

**CRITÉRIOS E PADRÕES DE COMPORTAMENTO PARA
AVALIAÇÃO DE DESCOLAMENTOS CERÂMICOS COM
TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO**

ELIER PAVÓN DE LA FÉ

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**CRITÉRIOS E PADRÕES DE COMPORTAMENTO PARA
AVALIAÇÃO DE DESCOLAMENTOS CERÂMICOS COM
TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO**

ELIER PAVÓN DE LA FÉ

ORIENTADOR: ELTON BAUER

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.TD – 6A/17
BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/ 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

CRITÉRIOS E PADRÕES DE COMPORTAMENTO PARA
AVALIAÇÃO DE DESCOLAMENTOS CERÂMICOS COM
TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO

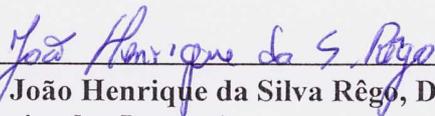
ELIER PAVÓN DE LA FÉ

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

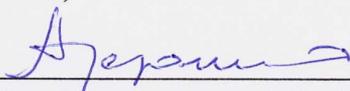
APROVADA POR:



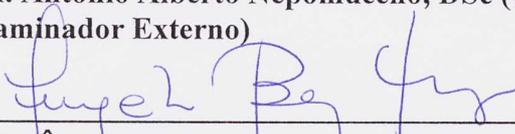
Prof. Elton Bauer, DSc (ENC-UnB)
(Orientador)



Prof. João Henrique da Silva Rêgo, DSc (ENC-UnB)
(Examinador Interno)



Prof. Antônio Alberto Nepomuceno, DSc (UnB)
(Examinador Externo)



Profa. Ângela Borges Masuero, DSc (UFRGS)
(Examinadora Externa)

BRASÍLIA/DF, 08 de dezembro de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

PAVON DE LA FE, ELIER

Critérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho [Distrito Federal] 2017.

250p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2017)

Tese de doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Termografia

2. Fachada

3. Cerâmica

4. Descolamento

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Pavon, E (2017). Critérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho. Tese de Doutorado, Publicação E.TD-6A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília- DF, 250p.

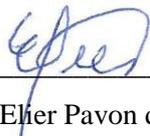
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Elier Pavón de la Fé

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Critérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho.

GRAU / ANO: Doutor/ 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Elier Pavon de la Fe

Rua Bom Sucesso 102, Morada Nobre.

CEP: 47810-133 – Barreiras/BA

elierpavon@gmail.com

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha família,
em especial a meu filho: Tiago
e minha esposa: Oisy*

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Oisy, por todo seu apoio, compreensão, dedicação e esforço. Obrigado por ser o motivo e por me dar as forças necessárias para chegar ao fim deste longo caminho. Sem teu amor e ajuda não tivesse conseguido.

Aos meus pais Isabel e Julio, minha irmã Maidel e meus avós (Gustavo, Carmen e Esther) pelo apoio incondicional, o incentivo e o amor de todos vocês.

Aos meus sogros Odalys e Otto, pela ajuda, apoio incondicional e pelo carinho.

Ao meu orientador, professor Elton Bauer, pela oportunidade, por acreditar em mim, por todo o tempo, esforço e recursos dedicados para o desenvolvimento da pesquisa. E principalmente pelo apoio na etapa final do trabalho.

À professora Yovanka, pela amizade, pelo carinho e por todo o apoio ao longo deste período.

Ao professor Manoel, pela amizade, pela preocupação constante e por todas as gestões relacionadas com o período sanduíche em Barcelona.

A Noel e Yarisley por todos os bons momentos compartilhados e por toda a ajuda. Obrigado pela amizade e por estarem presentes sempre que precisei.

A Nelson, Raydel e Elizabeth, por toda a ajuda, pela preocupação e por sempre estarem presentes.

Aos amigos que tive oportunidade de conhecer no PECC e que muito me ajudaram ao longo desta caminhada, em especial a Maria Claudia, Matheus, Manuel Alejandro, Nazaré e Jéssica.

A todos os amigos cubanos e colombianos que conheci nesta etapa, pelos momentos compartilhados em Brasília.

Aos amigos Maria, Erich, Hildo e Lucila, por toda a ajuda e apoio nestes dois anos.

Aos colegas e professores da UFOB, pelo apoio recebido nesta etapa final do doutorado.

Aos técnicos do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM-UnB), em especial Gilvan e Washington, pela ajuda sempre que precisei. A Matheus pela ajuda e ensinamentos sob a simulação.

Aos alunos da graduação Antonio e Elias que muito contribuíram com a realização dos ensaios.

À professora Eva Barreira (FEUP) pelas contribuições na qualificação.

À professora Inês Flores (IST), o professor Luís Matias (LNEC) e a professora Miren Etxeberria (UPC), pelo tempo dedicado durante o período sanduíche na Europa. À professora Inês Flores pelos ensaios de condutividade térmica.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília

Aos secretários do PECC, Eva e Ricardo.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, na forma de bolsa durante os dois primeiros anos do doutorado.

Ao Programa de Estruturas e Construção Civil (PECC) e a Universidade de Brasília (UNB), pela oportunidade de estudar e poder desenvolver a tese.

RESUMO

CRITÉRIOS E PADRÕES DE COMPORTAMENTO PARA AVALIAÇÃO DE DESCOLAMENTOS CERÂMICOS COM TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO

Autor: Elier Pavón de la Fé

Orientador: Elton Bauer

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Dezembro de 2017

A termografia de infravermelho é utilizada na avaliação de patologias em edificações, principalmente em fachadas. O descolamento no revestimento cerâmico é uma das principais patologias avaliadas com esta técnica de ensaio. No entanto, existem muitas dúvidas na aplicação e interpretação dos resultados termográficos, relacionadas com o momento de fazer a inspeção, a influência das condições de exposição da fachada e a forma de analisar os termogramas. O objetivo do trabalho foi definir critérios e padrões de comportamento a serem utilizados na avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho. A pesquisa foi dividida em três etapas experimentais, que incluíram estudos em placas, parede e fachadas. Nas placas, foi realizada uma análise qualitativa do comportamento térmico das principais anomalias encontradas nos termogramas e uma análise quantitativa do comportamento dos parâmetros termográficos associados aos descolamentos. Foi analisada nesta etapa a influência das principais variáveis relativas ao defeito e às condições de exposição. Na parede os parâmetros termográficos foram correlacionados com parâmetros relativos ao fluxo de calor, utilizados posteriormente na simulação térmica das fachadas. Nas fachadas foi possível validar os padrões de comportamento encontrados ao longo do estudo e propor critérios a serem utilizados na inspeção termográfica dos descolamentos. Os principais resultados foram a determinação do comportamento térmico das principais patologias e anomalias encontradas na avaliação termográfica das fachadas, a determinação dos parâmetros relativos ao fluxo de calor (gradientes e variação de temperatura da superfície) usados na escolha do momento de fazer as inspeções em campo e os critérios para avaliação dos descolamentos baseados em parâmetros termográficos (ΔT) e parâmetros relativos ao fluxo de calor.

Palavras chaves: Termografia, fachada, cerâmica, descolamento.

ABSTRACT

CRITERIA AND PATTERNS OF BEHAVIOR FOR THE EVALUATION OF CERAMIC DETACHMENT WITH INFRARED THERMOGRAPHY

Author: Elier Pavón de la Fé

Supervisor: Elton Bauer

Postgraduate in Structural and Civil Construction

Brasília, December of 2017

Infrared thermography is used in the evaluation of buildings pathologies, principally in facades. Detachment of ceramic tiles is one of the main pathologies evaluated with this technique. However, there are many doubts in the application and interpretation of the thermographic results, related to the moment of inspection, the influence of the conditions of the facade exposure and the method of thermograms analysis. The objective of the work was to define criteria and behavior parameters to be used in the evaluation of detachment of ceramic tiles with infrared thermography. The research was divided into three experimental stage, which included a study on plate, wall and facades. In the plates, a qualitative analysis of the thermal behavior of the main anomalies found in the thermograms was performed. A quantitative analysis of the behavior of the thermographic parameters associated with the detachments was performed. The influence of the main variables related to the defect and the exposure conditions, was analyzed in this stage. In the wall the thermographic parameters were correlated with parameters related to the heat flux, used later in the thermal simulation of the facades. In the facades it was possible to validate the parameters of behavior found throughout the study and to propose criteria to be used in the thermographic inspection of the detachments. The main results were the determination of the thermal behavior of the main pathologies and anomalies found in the thermographic evaluation of the façades, the determination of the parameters related to the heat flux (gradients and variation of surface temperature) used in choosing the moment of make inspection and the criteria for evaluating the detachments based on thermographic parameters (ΔT) and parameters related to the heat flow.

Keywords: Thermography, Facade, Ceramic, Detachment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	3
1.2 ORIGINALIDADE	5
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.4 METODOLOGIA DA TESE	7
1.5 ESTRUTURA DA TESE	8
2 TERMOGRAFIA NA AVALIAÇÃO DE MATERIAIS, ELEMENTOS E PATOLOGIAS NA CONSTRUÇÃO	10
2.1 TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO. PRINCÍPIOS BÁSICOS	10
2.2 VARIÁVEIS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO	12
2.2.1 Variáveis relacionadas ao equipamento	13
2.2.2 Variáveis relacionadas ao alvo.....	15
2.3 CLASSIFICAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....	19
2.3.1 Termografia qualitativa e quantitativa.....	20
2.3.2 Termografia passiva e ativa	21
2.4 NORMAS SOBRE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA APLICADA À CONSTRUÇÃO.....	22
2.5 PATOLOGIAS E DEFEITOS ESTUDADOS COM TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NA CONSTRUÇÃO	23
2.5.1 Descolamentos	25
2.5.2 Fissuras	28
2.5.3 Umidades	30
2.5.4 Presença de vazios, materiais e elementos ocultos	33
2.6 ANÁLISES PARA A IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ANOMALIAS COM TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA	37
2.6.1 Termografia qualitativa - passiva	37
2.6.1.1 Diferença visual no termograma.....	37
2.6.2 Termografia quantitativa – ativa	41
2.6.2.1 Delta-T	41
2.6.2.2 Representação gráfica e mensuração de defeitos.....	44
2.6.2.3 Funções de contraste	48
2.6.3 Termografia quantitativa – passiva	51

2.6.3.1	Delta-T	51
2.6.3.2	Análise de Componentes Principais	56
3	ESTUDO EM PLACAS.....	60
3.1	ESTUDO PRELIMINAR EM PLACAS.....	61
3.2	ESTUDO EM PLACAS COM REVESTIMENTO CERÂMICO	67
3.3	MATERIAIS UTILIZADOS.....	70
3.4	CONSTRUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	72
3.5	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	74
3.6	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	76
3.7	PROCEDIMENTO DE COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS.....	78
3.8	RESULTADO PRELIMINAR EM PLACAS.....	81
3.9	RESULTADO DAS PLACAS COM REVESTIMENTO CERÂMICO	90
3.9.1	Resultados da placa 10 (influência da espessura da cerâmica)	91
3.9.2	Resultados da placa 11 (influência do tamanho do defeito).....	98
3.9.3	Resultado da placa 12 (influência da espessura do defeito)	102
3.9.4	Resultados da placa 13 (influência da geometria do defeito).....	107
3.9.5	Análise estatística do estudo em placas com revestimento cerâmico	111
4	ESTUDO EM PAREDES.....	114
4.1	MATERIAIS E PROCESSO CONSTRUTIVO DA PAREDE	116
4.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	118
4.3	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	118
4.4	PROCEDIMENTO DE COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS.....	119
4.5	MENSURAÇÃO DA ÁREA DOS DEFEITOS.....	121
4.6	RESULTADO DO ESTUDO EM PAREDE	123
4.6.1	Comportamento dos parâmetros termográficos	124
4.6.2	Comportamento dos parâmetros relativos ao fluxo de calor	127
4.7	CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS RELATIVOS AO FLUXO DE CALOR COM OS PARÂMETROS TERMOGRÁFICOS	131
4.8	MENSURAÇÃO DA ÁREA COM DEFEITO (DESCOLAMENTO NOS REVESTIMENTOS CERÂMICOS).....	135
5	ESTUDO EM FACHADAS	139
5.1	SELEÇÃO DAS FACHADAS DE ESTUDO	139
5.2	SIMULAÇÃO NO WUFI	142
5.3	PROCEDIMENTO E COLETA DE DADOS	144

5.4	RESULTADO DO ESTUDO EM FACHADAS	145
5.4.1	Resultados do estudo da fachada 1 (F1).....	145
5.4.2	Resultados do estudo da fachada 2 (F2).....	150
5.4.3	Resultados do estudo da fachada 3 (F3).....	154
5.4.4	Resultados do estudo da fachada 4 (F4).....	160
5.4.5	Resultados de estudo da fachada 5 (f5).....	165
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	169
6.1	ESTUDO PRELIMINAR EM PLACAS.....	169
6.2	ESTUDO EM PLACAS COM REVESTIMENTO CERÂMICO	173
6.3	ESTUDO EM PAREDE.....	181
6.4	ESTUDO EM FACHADAS.....	186
6.5	CRITÉRIOS E PADRÕES DE COMPORTAMENTO PARA AVALIAÇÃO DE DESCOLAMENTOS CERÂMICOS EM FACHADAS	190
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	194
7.1	CONCLUSÕES.....	194
7.2	SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	200
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	201
	APÊNDICE A- TERMOGRAMAS DAS PLACAS	213
	Apêndice A1- Termogramas Placa 10	213
	Apêndice A2-Termogramas Placa 11	214
	Apêndice A3-Termogramas Placa 12	215
	Apêndice A4-Termogramas Placa 13	216
	APÊNDICE B – DADOS DA PAREDE UTILIZADOS NA ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	217
	APÊNDICES C – VALORES DA INCLINAÇÃO DAS LINHAS DE TEMPERATURAS USADAS NO CÁLCULO DA ÁREA DO DEFEITO NA PAREDE.....	221
	APÊNDICES D – DADOS CLIMÁTICOS NAS INSPEÇÕES DE FACHADAS ...	222
	ANEXO A – DADOS DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO NO WUFI (NASCIMENTO, 2016).....	224

Índice de Figuras

Figura 1 – Fluxograma da metodologia da tese.....	7
Figura 2 – Espectro eletromagnético.....	11
Figura 3 – Influência da emissividade. Grandes diferenças de temperaturas entre as esquadrias, revestimentos e elementos de proteção devido aos diferentes valores de emissividade dos materiais.....	17
Figura 4 – Influência do ângulo na emissividade. Canto superior esquerdo com valores menores de temperatura devido à inclinação e a forma arredondada da torre.....	17
Figura 5 – Problemas de reflexão em termogramas de fachadas de edifícios. (a) Imagem digital com indicação da torre da edificação a esquerda que gera reflexão na edificação a direita. (b) Termograma com indicação da área com reflexo na edificação.....	18
Figura 6 – Esquema simplificado das técnicas e métodos da termografia infravermelha...	19
Figura 7 – Defeito em fachada avaliado em momentos com sentido de fluxo de calor diferente. (a) Defeito mais quente. (b) Defeito mais frio.....	24
Figura 8 – Descolamento em fachada com revestimento em argamassa.....	26
Figura 9 – Descolamentos avaliados com termografia em fachadas com revestimento cerâmico. (a) Descolamentos no revestimento cerâmico de cor escura, detectados por apresentar maiores temperaturas. (a) Descolamentos no revestimento cerâmico de cor clara, detectados por apresentar maiores temperaturas.....	27
Figura 10 – Fissuras avaliadas com a termografia em um prédio histórico.....	29
Figura 11 – Fissuras ramificadas avaliadas com termografia, aparecendo como áreas mais quentes na fachada com revestimento em argamassa.....	30
Figura 12 – Umidade em parede alvenaria detectada com a termografia infravermelha como área mais quente.....	32
Figura 13 – Detecção de falhas de aderência (áreas mais quente) entre PRF e o concreto durante aquecimento com lâmpadas incandescente.....	34
Figura 14 – Estrutura de madeira detectada com a termografia infravermelha em fachada construída de adobe.....	35
Figura 15 – Identificação de anomalias através de diferenças visuais no termograma. (a) Localização de áreas quentes e frias. (b) Ponte térmica pela presença de diferentes matérias. (c) Identificação de ilha de calor em cidade.....	38
Figura 16 – Identificação de umidade e fissuras através de diferenças visuais no termograma. (a) Localização de áreas úmidas. (b) Identificação de fissura.....	39

Figura 17 – Detecção de áreas com acumulo de agua em um edifício histórico da Turquia.	39
Figura 18 – Identificação de umidade em paredes de tijolos.	40
Figura 19 – Identificação de zonas reparadas e fissuras.....	41
Figura 20 – Comportamento do Delta-T em uma placa de concreto com vazios no seu interior, no ciclo de aquecimento-arrefecimento. (a) Design da placa de concreto. (b) Termograma. (c) Delta-T dos vazios para diferentes profundidades.	42
Figura 21 –Análise do Delta-T em descolamento de gesso, no ciclo de aquecimento e arrefecimento. (a) Comportamento da temperatura. (b) Termograma.	43
Figura 22 – Representação do comportamento da linha de temperatura que atravessa o defeito na parede revestida com granite. (a) Termograma. (b) Valores de temperatura.	45
Figura 23 – Representação do comportamento da linha de temperatura que atravessa dois defeitos na placa de aço. (a) Valores de Delta-T. (b) Termograma.....	46
Figura 24 – Representação em 3D dos valores de temperatura do termograma da superfície do concreto.	46
Figura 25 – Metodologia para a determinação das dimensões de defeitos.	47
Figura 26 – Linhas utilizadas na determinação da presença de umidade em paredes com revestimento cerâmico.	52
Figura 27 – Comportamento do Delta-T e a radiação solar.	53
Figura 28 – Representação do comportamento da linha de temperatura que atravessa o descolamento da fachada.	54
Figura 29 – Valores de Delta-T nos revestimentos cerâmicos.	55
Figura 30 Utilização do ACP em fachadas, na detecção de áreas restauradas.	58
Figura 31 – Utilização do ACP na detecção de áreas reparadas e elementos estruturais....	59
Figura 32 – Metodologia da Etapa 1. Estudo em placas.	60
Figura 33 – Equipamentos para mensuração das propriedades térmicas. (a) Condutivímetro ISOMET2114. (b) Emissômetro do tipo: “ <i>Devices and Services Emissometer with Scaling Digital</i> ”	71
Figura 34 – Corpos de prova desenvolvidos para o estudo (placas de argamassa). (a) Preenchimento com argamassas. (b) Placa com acabamento final na forma.	72
Figura 35 – Procedimentos para inserir os defeitos na argamassa colante. (a) Procedimento com a utilização da fita. (b) Procedimento com a utilização de poliestireno expandido. ...	73
Figura 36 – Procedimento para inserir materiais nas placas. (a) Colocação das amostras de materiais na forma. (b) Preenchimento com argamassa.	73

Figura 37 – Procedimento usado na criação das fissuras.	74
Figura 38 – Dispositivo de aquecimento com lâmpadas infravermelhas. (a) Calibração da intensidade de corrente. (b) Vista do dispositivo para aquecimento com regulador de intensidade acoplado. (c) Vista frontal com a posição das lâmpadas.....	74
Figura 39 – Câmera utilizada na pesquisa.	75
Figura 40 – Psicrômetro medidor de umidade.....	75
Figura 41 – Termopar modelo Pico-Usb usado no experimento (coletor de dados).	76
Figura 42 – Ciclo direto. (a) Distribuição do experimento. (b) Imagem digital mostrando o sistema de aquecimento.	76
Figura 43 – Ciclo Reverso. (a) Distribuição do experimento. (b) Imagem digital mostrando o sistema de aquecimento.	77
Figura 44 – Condições de exposição das placas.....	78
Figura 45 – Determinação das temperaturas nas placas cerâmicas. Exemplo do defeito na placa cerâmica central.	79
Figura 46 – Resultados preliminares da placa 1 (P1).	82
Figura 47 – Resultados preliminares da placa 2 (P2).	82
Figura 48 – Resultados preliminares da placa 3 (P3).	83
Figura 49 – Resultados preliminares da placa 4 (P4).	85
Figura 50 – Resultados preliminares da placa 5 (P5).	86
Figura 51 – Resultados preliminares da placa 6 (P6).	88
Figura 52 – Resultados preliminares da placa 7 (P7).	89
Figura 53 – Resultados preliminares da placa 8 (P8).	90
Figura 54 – Delta-T da placa 10. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.	94
Figura 55 – Resultado do TRC na placa 10. a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.	96
Figura 56 – Resultado do TC da placa 10. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.....	98
Figura 57 – Delta-T da placa 11. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.	100
Figura 58 – Resultado do TRC da placa 11. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.....	101
Figura 59 – Resultado do TC da placa 11. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.....	102

Figura 60 – Delta-T da placa 12. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.	104
Figura 61 – Resultados do TRC da placa 12. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.....	106
Figura 62 – Resultado do TC da placa 12. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.....	107
Figura 63 – Delta-T da placa 13. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.	108
Figura 64 – Resultados do TRC da placa 13. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.....	109
Figura 65 – Resultados do TC da placa 13. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.....	110
Figura 66 – Metodologia da etapa 2. Estudo em parede.	114
Figura 67 – Parede. (a) Imagem digital. (b) Croqui da parede.....	115
Figura 68 – Sequência de passos para a construção da parede. (a) Montagem da estrutura e verificação da largura. (b) Assentamento dos blocos. (c) Colocação dos termopares. (d) Aplicação do emboço. (e) Assentamento da cerâmica. (f) Pintura da parede.	117
Figura 69 – Posição da barra de aço na parede.....	118
Figura 70 – Distribuição do experimento em parede. (a) Ciclo direto. (b) Ciclo reverso.	119
Figura 71 – Determinação das temperaturas a partir dos termogramas obtido na parede. Exemplo da placa B.....	120
Figura 72 – Representação da seção da parede incluindo os pontos de mensuração de temperatura com os termopares.....	121
Figura 73 – Procedimento para mensuração da largura do defeito. (a) Termograma com linha para mensuração da largura defeito. (b) Linha com valores de temperatura para determinação da inclinação mínima e máxima. (c) Quantificação dos pixels.....	123
Figura 74 – Comportamento do Delta-T na parede, Ciclo Direto-Fluxo alto.	125
Figura 75 – Comportamento do Delta-T na parede, Ciclo Reverso- Fluxo Alto.	125
Figura 76 – Comportamento do TRC e do TC na parede, ciclo direto e ciclo reverso.	126
Figura 77 – Comportamento dos gradientes de temperatura na parede, Ciclo Direto.....	128
Figura 78 – Comportamento dos gradientes de temperatura na parede, Ciclo Reverso....	130
Figura 79 – Metodologia da etapa 3. Estudo em fachadas.	139
Figura 80 – Esquema com as camadas da fachada e com os pontos de mensuração de temperatura usados na simulação.	143

Figura 81 – Imagem digital da fachada 1 (F1).	146
Figura 82 – Incidência do sol na fachada 1 (F1).	147
Figura 83 – Resultados da simulação das temperaturas no WUFI na fachada 1 (F1).	148
Figura 84 – Termogramas da fachada 1 (F1).	148
Figura 85 – Comportamento do Delta-T da área com maior gravidade.	149
Figura 86 – Cálculo da área com defeito na fachada 1. a) Termograma das 9h. b) Imagem 3D com os pixels correspondentes à área com defeito.	150
Figura 87 – Imagem digital da fachada 2 (F2).	151
Figura 88 – Incidência do sol na fachada 2 (F2).	151
Figura 89 – Resultados da simulação das temperaturas no WUFI da fachada 2 (F2).	152
Figura 90 – Termogramas da fachada 2 (F2).	153
Figura 91 – Comportamento do Delta-T da área com maior gravidade.	154
Figura 92 – Imagem digital de fachada 3 (F3).	155
Figura 93 – Incidência do sol na fachada 3 (F3).	156
Figura 94 – Resultados da simulação das temperaturas no WUFI na fachada 3 (F3).	156
Figura 95 – Termogramas da fachada 3 (F3).	158
Figura 96 – Comportamento do Delta-T dos defeitos (D1 e D2).	159
Figura 97 – Imagem 3D com os pixels correspondentes à área com defeito. a) 16h. b) 18h.	159
Figura 98 – Imagem digital de fachada 4 (F4).	161
Figura 99 – Incidência do sol na fachada 4 (F4).	162
Figura 100 – Resultados da modelação das temperaturas no WUFI da fachada 4.	163
Figura 101 – Termogramas e linhas de temperatura na fachada 4 (F4).	164
Figura 102 – Imagem digital da fachada 5 (F5).	165
Figura 103 – Incidência do sol na fachada 5 (F5).	166
Figura 104 – Resultados da simulação das temperaturas no WUFI da fachada 5.	167
Figura 105 – Termogramas da fachada 5 (F5).	168
Figura 106 – Resumo do comportamento padrão do Delta-T no ciclo direto.	176
Figura 107 – Resumo do comportamento padrão do Delta-T no ciclo reverso.	178
Figura 108 – Modelo de comportamento das funções de contraste (TRC e TC).	180
Figura 109 – Comportamento dos parâmetros termográficos e dos parâmetros relativos ao fluxo de calor, com dados da placa B. Resultados do ciclo direto. (a) Delta-T. (b) GSpBc. (c) GArSp. (d) TRC e TC. (e) GArSp. (f) VTSp.	183

Figura 110 – Comportamento dos parâmetros termográficos e dos parâmetros relativos ao fluxo de calor, com dados da placa B. Resultados do ciclo reverso. a) Delta-T. b) GArSp. c) GSpBc.	185
Figura 111 - Definição do elemento construtivo	224
Figura 112 - Definição da orientação, inclinação, altura e chuva.	224
Figura 113 - Definição dos coeficientes de transferência à superfície.	225
Figura 114 - Definição das condições iniciais para simulação.....	225
Figura 115 - Definição do período de simulação.	226
Figura 116 - Definição das condições de cálculo.....	226
Figura 117 - Definição do clima exterior.	227
Figura 118 - Definição do clima interior.	227

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Valores de emissividades, radiação incidente refletida e absorvida de corpos de referência.	12
Tabela 2 – Resolução e IFOV das câmeras infravermelhas utilizadas em estudos recentes (últimos cinco anos).	13
Tabela 3 – Valores de emissividade de materiais usados nas edificações.....	16
Tabela 4 – Resumo dos defeitos, elementos e variáveis analisadas no estudo preliminar. .	62
Tabela 5 – Características das placas com defeitos no revestimento cerâmico. Análise do descolamento e da baixa aderência.....	63
Tabela 6 – Características das placas com defeitos no revestimento em argamassa. Análise da profundidade da fissura e da espessura da camada de argamassa.	64
Tabela 7 – Características das placas com presença de elementos ocultos. Análise do tipo de material inserido.	66
Tabela 8 – Características das placas com revestimento de argamassa com presença de elementos ocultos.	67
Tabela 9 – Resumo dos defeitos, elementos e variáveis analisadas no estudo preliminar. .	68
Tabela 10 – Características das placas com revestimento cerâmico. Estudo quantitativo. .	69
Tabela 11 – Caracterização das placas cerâmicas e as argamassas utilizadas no estudo em placas com revestimento cerâmico.	71
Tabela 12 – Caracterização dos materiais inseridos e da argamassa.....	86
Tabela 13 – Análise de variância. Avaliação da influência da espessura da cerâmica e o fluxo de calor.	111
Tabela 14 – Análise de variância. Avaliação do tamanho do defeito e o fluxo de calor...	112
Tabela 15 – Análise de variância. Avaliação da influência da espessura do defeito e o fluxo de calor.	112
Tabela 16 – Análise de variância. Avaliação da influência da geometria do defeito e o fluxo de calor.....	113
Tabela 17 – Resumo dos defeitos, elementos e variáveis analisadas no estudo em parede.	115
Tabela 18 – Gradientes de temperatura calculados a partir dos termopares na parede.	121
Tabela 19 – Matriz de correlação (R^2) do Ciclo Direto. Resultado da análise multivariada.	132

Tabela 20 – Matriz de correlação (R^2) do Ciclo Reverso. Resultado da análise multivariada.	134
Tabela 21 – Cálculo da área do defeito no ciclo direto	136
Tabela 22 – Cálculo da área do defeito no ciclo reverso.....	137
Tabela 23 – Características das fachadas de estudo.	140
Tabela 24 – Propriedades das edificações estudadas.....	143
Tabela 25 – Parâmetros relacionados ao fluxo de calor.	144
Tabela 26 – Visibilidade dos defeitos no estudo preliminar em placas.....	169
Tabela 27 – Condição e forma como aparecem os defeitos.	170
Tabela 28 – Influência das variáveis analisadas no estudo em placas com revestimento cerâmico.....	175
Tabela 29 – Resumo dos resultados dos parâmetros utilizados na avaliação das fachadas.	187
Tabela 30 - Dados para análise estatística da parede, ciclo direto.	217
Tabela 31 - Dados para análise estatística da parede, ciclo reverso.	219
Tabela 32 - Dados climáticos no dia da inspeção da fachada 1 (F1).....	222
Tabela 33 - Dados climáticos no dia da inspeção da fachada 2 (F2).....	222
Tabela 34 - Dados climáticos no dia da inspeção da fachada 3 (F3).....	223
Tabela 35 - Dados climáticos no dia da inspeção da fachada 4 (F4) e 5 (F5).....	223

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações.

λ	Condutividade térmica
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
T	Temperatura absoluta da superfície
ε	Emissividade
ρ	Radiação incidente refletida
α	Radiação incidente absorvida pelo corpo
τ	Radiação incidente transmitida para fora do meio
ΔT -CA	Delta-T na placa cerâmica A. Temperatura da área com defeito menos a temperatura da área sem defeito na placa cerâmica A
ΔT -CB	Delta-T na placa cerâmica B. Temperatura da área com defeito menos a temperatura da área sem defeito na placa cerâmica B
ΔT -CC	Delta-T na placa cerâmica C. Temperatura da área com defeito menos a temperatura da área sem defeito na placa cerâmica C
ANOVA	Análise de variância
CA	Cerâmica A
CB	Cerâmica B
CC	Cerâmica C
C_s	Contraste térmico espacial em qualquer instante t
CD-FA	Ciclo Direto- Fluxo Alto
CD-FB	Ciclo Direto- Fluxo Baixo
CR-FA	Ciclo Reverso- Fluxo Alto
CR-FB	Ciclo Reverso- Fluxo Baixo
CD-Aquec	Ciclo Direto- Aquecimento
CD-Arref	Ciclo Direto- Arrefecimento
CR-Aquec	Ciclo Reverso- Aquecimento
CR-Arref	Ciclo Reverso- Arrefecimento
Delta-T	Diferença de temperatura da área com defeito menos a área sem defeito ou normal
E_b	Poder emissivo
F	Fisher
GI	Graus de liberdade
GAr	Gradiente ar (diferença de temperatura entre ar frontal e traseiro)

GArSp	Gradiente Ar - Superfície (diferença de temperatura entre ar frontal e a superfície frontal)
GBc	Gradiente bloco (diferença de temperatura entre a superfície frontal e traseira do bloco)
GSp	Gradiente superfícies (diferença de temperatura entre a superfície frontal e traseira da parede)
GSpBc	Gradiente superfície – bloco (diferença de temperatura entre a superfície frontal e a superfície frontal do bloco)
I FOV	Campo de visão instantâneo = <i>Instantaneous field of view</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LEM/UnB	Laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade de Brasília
MO297	Termohigrômetro Meterlink
MQ	Média quadrática
t	Tempo
t_0	Tempo inicial (começo do ciclo)
$T_a(t_0)$	Temperatura média da superfície no tempo inicial t_0
$T_a(t)$	Temperatura média da superfície no tempo t
TC	Contraste térmico = <i>Thermal constrast</i>
TC-CA	Contraste térmico na placa cerâmica A
TC-CB	Contraste térmico na placa cerâmica B
TC-CC	Contraste térmico na placa cerâmica C
T_d	Temperatura da área com defeito
$T_d(t)$	Temperatura da área com defeito no tempo t
$T_d(t_0)$	Temperatura da área com defeito no tempo t_0
Td-CA	Temperatura da área com defeito na placa cerâmica A
Td-CB	Temperatura da área com defeito na placa cerâmica B
Td-CC	Temperatura da área com defeito na placa cerâmica C
$T_{def}(x, y, t)$	Temperatura espacial em que os defeitos são encontrados em qualquer instante t
$T_{def}(t_0)$	Temperatura espacial em que os defeitos são encontrados inicialmente
TMY	Ano meteorológico típico = <i>Typical meteorological year</i>
$T_m(t)$	Temperatura média da placa no tempo t
$T_m(t_0)$	Temperatura média da placa no tempo t_0

T _{nd} -CA	Temperatura da área sem defeito na placa cerâmica A
T _{nd} -CB	Temperatura da área sem defeito na placa cerâmica B
T _{nd} -CC	Temperatura da área sem defeito na placa cerâmica C
T _{nd} (t)	Temperatura da área sem defeito no tempo t
T _{nd} (t ₀)	Temperatura da área sem defeito no tempo t ₀
TRC	Contraste térmico de corrida ou Contraste de corrida térmica = <i>Thermal running contrast</i>
TRC-CA	Contraste térmico de corrida na placa cerâmica A
TRC-CB	Contraste térmico de corrida na placa cerâmica B
TRC-CC	Contraste térmico de corrida na placa cerâmica C
T _p (t ₀)	Temperatura em qualquer ponto selecionado sobre a superfície do material ensaiada antes de estimulação térmica, no tempo t ₀
T _{pj} (t)	Temperatura no ponto de superfície sobre a área no tempo t
T _{pj} (t ₀)	Temperatura no ponto de superfície sobre a área homogênea antes da estimulação térmica, no tempo t ₀
p-valor	Probabilidade de significância
PRF	Polímeros reforçados com fibras
SQ	Soma de quadrados
V ^T	Transposta de da matriz n x n
VTSp	Varição de temperatura da superfície
WUFI	Transporte transiente de calor e umidade = <i>Wärme und feuchte instationär</i>

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos têm sido usados há anos na avaliação de materiais e componentes. Nas últimas décadas, estas técnicas têm experimentado um enorme desenvolvimento devido à sua importância e eficiência como ferramenta em processos de controle de qualidade (MADRUGA *et al.*, 2010). Atualmente, a inspeção térmica é reconhecida como uma das técnicas mais valiosas para a detecção e caracterização de defeitos (MILOVANOVIC e PECUR, 2011).

A termografia baseada na radiação infravermelha fornece medidas rápidas e sem contato, a partir da transformação da energia térmica, emitida pela superfície de um objeto na faixa infravermelha do espectro eletromagnético, em uma imagem visível (MADRUGA *et al.*, 2010). A termografia de infravermelho é usada em diversas áreas da Engenharia no monitoramento de equipamentos e processos, na detecção de defeitos e nas pesquisas de materiais (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013). Em áreas como a Engenharia Elétrica e Metalúrgica, as diferenças de temperatura entre a zona com defeito e a zona sem defeito, ou entre a zona com defeito e o ambiente, são geralmente grandes porque se estudam equipamentos mecânicos (LE CAM *et al.*, 2013; VALIORGUE *et al.*, 2013) ou elétricos (JADIN e TAIB, 2012; HUDA e TAIB, 2013), que geram calor durante o seu funcionamento.

No caso da Engenharia Civil (edificações), as diferenças de temperatura geradas pelos problemas ou defeitos estudados em relação à área normal (sem defeito) são relativamente pequenas, se comparadas com as áreas da Engenharia citadas anteriormente. Neste caso, o fluxo de calor que gera diferenças nos termogramas tem a sua origem no fluxo de calor gerado pelas condições de exposição natural dos elementos (BAUER *et al.*, 2015). Por estes motivos, a aplicação da termografia no estudo de edificações se torna mais complexa e precisa da análise de outros parâmetros.

Percebe-se um aumento das aplicações da termografia infravermelha na construção civil, além das melhoras nos equipamentos e do aperfeiçoamento dos procedimentos de avaliação das edificações. Importantes estudos foram desenvolvidos relativos à avaliação das características térmicas da envolvente do edifício (MARTÍN OCAÑA *et al.*, 2004; MONTEIRO, 2013; TODOROVIC *et al.*, 2014), ao estudo da eficiência energética de

edificações (SHI *et al.*, 2006; GONZÁLEZ-AGUILERA *et al.*, 2013; TAYLOR *et al.*, 2013; DE LIETO VOLLARO *et al.*, 2015), aos problemas em materiais de isolamento (BAETENS *et al.*, 2011; CHUDZIK e SYSTEMS, 2012; FERRARINI *et al.*, 2016; SAYGILI e BAYKAL, 2011), às falhas de aderência com elementos de concreto (CALDEIRA e PADARATZ, 2015; JUNYAN *et al.*, 2012; LAI *et al.*, 2010, 2013), aos problemas de umidade (BARREIRA *et al.*, 2016; EDIS *et al.*, 2014, 2015; KOMINSKY *et al.*, 2007; REBELO, 2017; ROSINA E LUDWIG, 1999; SOLLA *et al.*, 2013), à detecção de fissuras (BAUER *et al.*, 2016a; DUFOUR *et al.*, 2009; FREITAS *et al.*, 2014; ROCHA *et al.*, 2017; SHAM *et al.*, 2008) e aos descolamentos em fachadas (BAUER *et al.*, 2016b; EDIS *et al.*, 2012; EDIS *et al.*, 2015a; FOX *et al.*, 2015; FREITAS, S *et al.*, 2014; LOURENÇO *et al.*, 2017).

Podem-se citar como as principais patologias estudadas nas edificações com a termografia de infravermelho: a umidade, as fissuras e os descolamentos. Os resultados obtidos, principalmente no estudo destas patologias nas fachadas de edifícios, não apresentam ainda uma alta confiabilidade devido à inexistência de procedimentos padrões, falta de critérios (BAUER *et al.*, 2015a) e normatização para a aplicação da termografia. As pesquisas sobre avaliação de patologias de fachadas com termografia infravermelha são geralmente estudos de casos, onde a interpretação e a análise das patologias levam a conclusões particulares que dependem das condições específicas de exposição no momento da avaliação. As principais dúvidas em relação à avaliação das patologias na fachada com termografia de infravermelho estão relacionadas com o momento de fazer a inspeção, a forma em que vai aparecer a patologia, a influência das condições de exposição e a forma de analisar o termograma ou a sequência deles.

Por tais motivos, pesquisas recentes se dedicam a encontrar padrões de comportamento e critérios que possam melhorar a forma de avaliação das patologias, e conseqüentemente, a interpretação dos resultados. Nessa linha de pensamento se encontram estudos que fazem inspeções termográficas ao longo do dia (FOX *et al.*, 2015; LOURENÇO *et al.*, 2017) ou de dias (IBARRA-CASTANEDO *et al.*, 2017), que se apoiam em simulações do clima e das características do elemento (EDIS *et al.*, 2014; EDIS *et al.*, 2015a) e que utilizam ferramentas matemáticas consolidadas em outras áreas na interpretação dos termogramas (IBARRA-CASTANEDO *et al.*, 2017; SFARRA *et al.*, 2017) .

O presente trabalho pretende deixar contribuições nesta linha de pesquisa, com ênfase nas principais dúvidas encontradas na bibliografia em relação à aplicação da termografia na avaliação de patologias em fachadas de edifícios. O foco do estudo foi a avaliação de descolamentos em revestimento cerâmico com o uso da termografia infravermelha em protótipos produzidos no laboratório e em fachadas, apoiado na mensuração de parâmetros relativos ao fluxo de calor e na simulação térmica das fachadas.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

A detecção de descolamentos em revestimentos com placas cerâmicas é comumente realizada nas inspeções de edifícios através de testes de percussão na procura de identificação de placas com som cavo. A determinação da área descolada equivale, então, à somatória da quantidade de placas que, a critério do operador, apresentaram som cavo. Na avaliação de fachadas com revestimento cerâmico o teste é feito através de descidas nos diferentes panos da fachada com a utilização de balancim ou sistemas de cordas e polias, tornando-se lento e pouco preciso. Além disso, a depender da geometria do prédio, podem existir zonas de difícil acesso que prejudicam ainda mais a precisão do teste. Estas deficiências justificam o uso da termografia infravermelha nesta aplicação, sendo que a mesma permite realizar medições sem contato, à distância e mapear áreas. No entanto, quando se analisam as pesquisas referentes à avaliação de descolamentos em fachadas com termografia infravermelha, percebe-se que existem ainda dúvidas relacionadas com o momento de fazer a inspeção, influência das condições de exposição e a forma de analisar o termograma ou a sequência deles.

A aprovação da norma brasileira de desempenho ABNT NBR 15575-1: 2013 é outro dos fatos que tem gerado, nos últimos anos, um crescente interesse nas técnicas de ensaios não destrutivas na avaliação de edificações, pelos requisitos atuais de desempenho que a norma estabelece para os diferentes elementos da edificação. Um dos principais elementos é a fachada, onde os métodos de inspeção e diagnóstico no Brasil são ainda pouco padronizados e precisam de novas técnicas para complementar as metodologias já existentes, relativas ao mapeamento e quantificação de danos. Espera-se que a termografia seja uma destas técnicas, pelas vantagens que ela apresenta em comparação com outras técnicas não destrutivas.

No Brasil, encontram-se estudos de aplicação da termografia em análises térmicas de envoltivos de edifícios (DUFOUR *et al.*, 2009), conforto térmico (PEDRA, 2011), isolamento térmico (SOUSA, 2010) e propriedades térmicas de materiais (TAVARES *et al.*, 2004, 2011; NUNES TAVARES, 2007) e componentes (SOUZA, 2010). Aprecia-se também um aumento do número de pesquisas nos últimos 10 anos dedicadas a avaliar patologias com a termografia, limitadas, principalmente, ao estudo de elementos a escala reduzida, além de alguns casos de avaliação de fachadas. Podem-se citar os trabalhos de identificação de elementos (Cortizo, 2007) e patologias (MARIO, 2011; MORESCO *et al.*, 2015) ocultas em fachadas, de avaliação de fissuras em fachadas (FREITAS *et al.*, 2014) e em elementos de concreto (ROCHA *et al.*, 2017), de avaliação de danos de aderência entre o concreto e polímeros reforçados com fibras (CALDEIRA, 2016; CALDEIRA e PADARATZ, 2015) e de descolamentos em protótipos a escala reduzida (BRIQUE, 2016).

No contexto do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, o presente trabalho se encontra inserido na linha de pesquisa referente à Desempenho, Vida Útil, Degradação e Patologia no Ambiente Construído. Nesta linha foram desenvolvidos trabalhos relativos ao estudo de patologias em materiais, sistemas de revestimentos e em fachadas, com ênfase na identificação patologias e quantificação de degradação em fachadas. Podem-se citar os seguintes trabalhos:

- Estudo de manifestações patológicas em revestimento de fachada em Brasília - sistematização da incidência de casos (ANTUNES, 2010);
- Avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada - aplicação ao caso de Brasília (SILVA, 2014);
- Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios (NASCIMENTO, 2016);
- Desempenho, durabilidade, degradação e vida útil: aspectos técnicos no desenvolvimento do plano de manutenção de fachadas (BELISÁRIO, 2016);
- Evolução da degradação de fachadas - efeito dos agentes de degradação e dos elementos constituintes (SOUZA, 2016).
- Catalogação de patologias de revestimento de fachadas de edifícios do Distrito Federal (SANTOS, 2017)

- Sensibilidade à degradação das fachadas – estudo dos aspectos construtivos (HENRIQUE, 2017)

1.2 ORIGINALIDADE

Baseado no contexto atual das pesquisas sobre aplicação da termografia infravermelha na avaliação de patologias em edifícios e os métodos convencionais utilizados nas inspeções de fachadas, podem ser citados importantes aspectos em relação à originalidade e novidade do trabalho. Destaca-se a utilização de funções de contraste, trazidas de outras aplicações da engenharia, no entendimento do comportamento térmico das principais patologias de fachadas. A utilização de correlações entre parâmetros relacionados ao fluxo de calor e parâmetros termográficos para a definição dos melhores momentos para fazer as inspeções nas fachadas, o que constitui uma das principais lacunas atuais no conhecimento. O emprego da simulação higrotérmica na fachada como ferramenta para a definição das condições para a realização da inspeção termográfica e para a obtenção de critérios para avaliação de descolamentos é também um dos aspectos originais do presente trabalho. A definição de critérios a partir da termografia de infravermelho tanto para identificação do momento da inspeção como para a avaliação das anomalias nas fachadas é a principal contribuição original do tema.

1.3 OBJETIVOS

Em correspondência com o alcance das pesquisas atuais e o contexto internacional e nacional da termografia infravermelha aplicada aos estudos de patologias nas edificações, o presente trabalho tem como objetivo geral definir critérios e padrões de comportamento a serem empregados na avaliação de descolamentos em fachadas com revestimentos cerâmicos com termografia de infravermelho.

Os objetivos específicos do trabalho são:

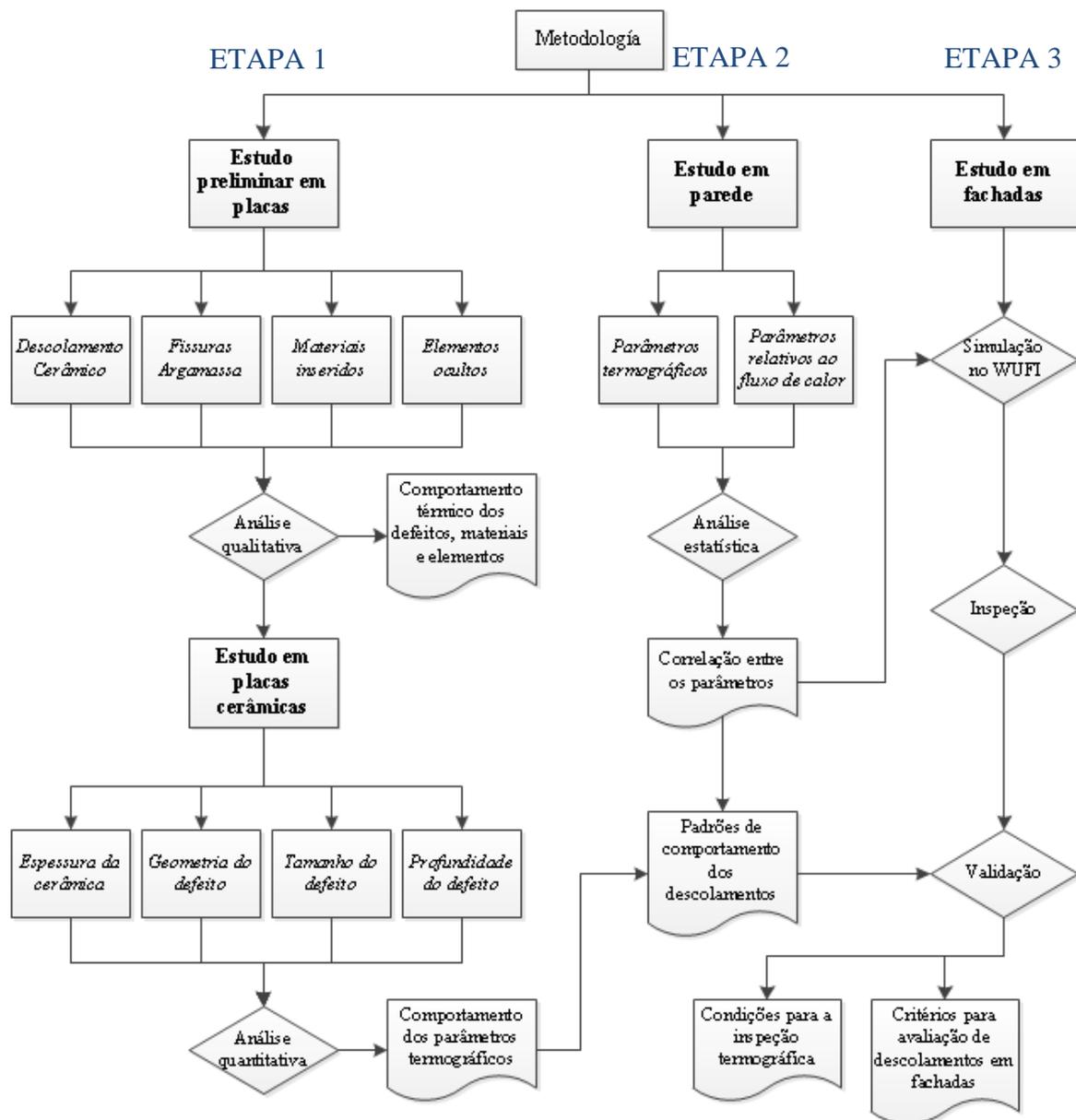
- Determinar o comportamento térmico das patologias e anomalias encontradas nas inspeções termográficas de fachadas a partir da simulação de defeitos a escala reduzida;

- Definir o comportamento dos parâmetros termográficos (Delta-T e funções de contraste) no defeito que simula o descolamento do revestimento cerâmico;
- Analisar o efeito das variáveis relacionadas às condições de exposição (intensidade e sentido do fluxo de calor) e aos defeitos no comportamento dos parâmetros termográficos;
- Definir os momentos e as condições apropriadas para a realização das inspeções termográficas nas fachadas a partir de parâmetros relacionados a fluxo de calor;
- Validar os padrões de comportamento obtidos no estudo a escala reduzida em estudos de casos de fachadas da região de Brasília.

1.4 METODOLOGIA DA TESE

O fluxograma da Figura 1 representa a metodologia da tese, nele estão resumidas todas as etapas e os resultados do estudo experimental.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia da tese.



Fonte: Próprio autor

O programa experimental foi dividido em três etapas. A primeira corresponde ao estudo em placas, que inclui um estudo preliminar em placas e um estudo em placas com revestimento cerâmico. Foram construídas placas com defeitos comuns de revestimentos

de fachadas (cerâmico e em argamassa) e elementos construtivos, que simularam possíveis anomalias nos termogramas. As placas foram aquecidas artificialmente com lâmpadas infravermelhas, e arrefecidas naturalmente, para estudar o comportamento térmico dos principais defeitos e elementos encontrados nas fachadas. Os objetivos foram analisar qualitativamente o comportamento dos defeitos e elementos nos termogramas e determinar o comportamento dos parâmetros termográficos utilizados na avaliação dos principais defeitos em revestimentos cerâmicos.

A segunda etapa corresponde ao estudo em parede. Foi construída uma parede de alvenaria com revestimento cerâmico para analisar a relação entre os parâmetros termográficos e os parâmetros relacionados ao fluxo de calor. A parede foi avaliada no laboratório em condições similares às placas. O objetivo foi identificar os parâmetros relacionados ao fluxo de calor que podem ser associados aos parâmetros termográficos e quantificar as áreas dos defeitos. A partir da análise dos resultados das duas primeiras etapas, foram definidos critérios e padrões, para a avaliação de defeitos em fachadas com revestimentos cerâmicos.

A terceira etapa experimental teve como objetivo validar os resultados das duas primeiras etapas. Foram escolhidos prédios com fachadas de revestimentos cerâmicos da região de Brasília, com defeitos conhecidos. A análise dos defeitos foi acompanhada da simulação dos gradientes na fachada no *software* WUFI Pro 5.3. Em cada uma das fachadas dos prédios foi feito um estudo periódico, que permitiu aplicar os critérios e procedimentos definidos nas etapas anteriores, na avaliação de descolamentos cerâmicos.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

O trabalho ficou dividido da seguinte forma:

O primeiro capítulo corresponde à introdução do trabalho. Nele se faz uma introdução do tema de estudo, comenta-se sobre o contexto e justificativa e se apresenta o objetivo geral e os específicos, assim como a metodologia e a estrutura da tese.

O capítulo dois corresponde à revisão bibliográfica relacionada com os estudos de avaliação de materiais, elementos e patologias da construção com termografia de infravermelho. Tratam-se os princípios básicos, os conceitos e as variáveis da termografia.

São apresentadas e discutidas as metodologias utilizadas para a identificação de defeitos com a termografia, assim como as principais patologias das edificações avaliadas com esta técnica.

No capítulo três é apresentado o estudo realizado em placas, incluindo o estudo preliminar e o estudo em placas com revestimento cerâmico (Etapa 1). Nele são apresentados os materiais e equipamentos utilizados. É descrito o experimento, o processo de construção dos corpos de prova e de coleta de dados. Finalmente, são apresentados e comentados os resultados de ambos os estudos.

No capítulo quatro é apresentado o estudo em parede (Etapa 2). Nele são apresentados os materiais, equipamentos e o processo construtivo da parede. É descrito o experimento, o processo de coleta de dados que inclui a mensuração de temperatura com termopares nas camadas da parede, além da mensuração dos defeitos nas imagens termográficas. Finalmente, são apresentados e comentados os resultados relativos aos parâmetros termográficos e aos parâmetros relacionados ao fluxo de calor.

No capítulo cinco é apresentado o estudo realizado em fachadas (Etapa 3). Nele são caracterizadas as fachadas de estudo, são apresentados os parâmetros e procedimento usados na simulação e no processo de coleta de dados em campos. Finalmente, são apresentados e comentados os resultados relativos à incidência do sol, a simulação e detecção dos defeitos nos termogramas.

No capítulo seis são discutidos os principais resultados do estudo em placas, na parede e nas fachadas. Nele são resumidos em tabelas e figuras os valores e comportamentos dos parâmetros analisados ao longo do trabalho. Na discussão dos resultados são propostos critérios e comentados os principais padrões de comportamento encontrados relativos à avaliação de descolamentos de fachadas com revestimento cerâmico.

No capítulo sete são apresentadas as conclusões e sugestões do trabalho.

2 TERMOGRAFIA NA AVALIAÇÃO DE MATERIAIS, ELEMENTOS E PATOLOGIAS NA CONSTRUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura referente à utilização da termografia de infravermelho no estudo de manifestações patológicas das edificações, com ênfase na avaliação de fachadas. Abordam-se os princípios básicos, conceitos e variáveis da técnica. Apresentam-se os principais parâmetros e metodologias utilizadas na identificação e avaliação de defeitos em materiais e elementos com o uso da termografia. Apresentam-se os principais resultados relativos ao estudo de fachadas, com ênfase nas fachadas com revestimento cerâmico.

2.1 TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO. PRINCÍPIOS BÁSICOS

A termografia infravermelha (*Infrared Thermography*) é uma ciência que se dedica à aquisição e processamento de informação térmica a partir de dispositivos de medição sem contato (MALDAGUE, 2001a).

Segundo a ASTM E1316 – 14 (2014), é o processo de exibir variações de temperatura aparente ao longo da superfície de um objeto ou de um cenário para a medição das variações de irradiação infravermelha.

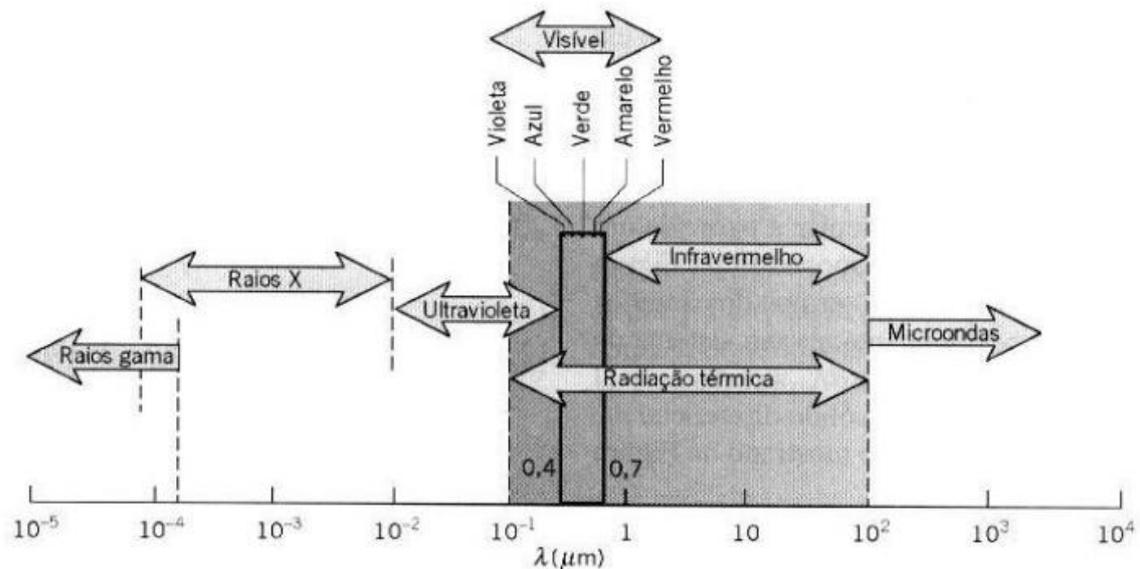
Os dispositivos de medição infravermelha captam a radiação infravermelha emitida por um objeto e a transformam em um sinal eletrônico. A energia térmica medida pelo sensor de temperatura da câmara de infravermelhos é a energia emitida pelo próprio alvo mais a energia refletida pelo ambiente através da superfície do objeto (KYLILI *et al.*, 2014).

As imagens adquiridas usando câmeras infravermelhas são convertidas em imagens visíveis através da atribuição de uma cor para cada nível de energia infravermelha. O resultado é uma imagem em cor falsa chamada de termograma (USAMENTIAGA *et al.*, 2014). Toda conclusão obtida de um estudo termográfico vai ser resultado do processamento e análise do termograma.

As operações das câmaras infravermelhas são baseadas na teoria da radiação térmica. Todo o espectro eletromagnético é dividido em intervalos de comprimento de onda,

denominados bandas espectrais, tendo valores de comprimento de onda muito pequenos até extremamente grandes, o que se pode observar na Figura 2.

Figura 2 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Incropera (2008).

O termo radiação descreve uma ampla gama de comprimentos de onda do espectro eletromagnético, enquanto a termografia de infravermelho limita a sua aplicação para a radiação térmica, que cobre apenas a radiação emitida como resultado da temperatura de uma substância. Existe um corpo que absorve toda a radiação incidente independentemente da direção ou do comprimento de onda e é denominado corpo negro.

No corpo negro a radiação térmica pode ser quantificada utilizando a Equação 1 de Stefan-Boltzmann (NUNES TAVARES, 2007).

$$E_b = \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

Sendo E_b (W/m^2) poder emissivo, σ ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) a constante de Stefan-Boltzmann e T (K) a temperatura absoluta da superfície. Em uma superfície real, o poder emissivo é inferior ao de um corpo negro à mesma temperatura, sendo necessário introduzir um fator de correção à emissividade que pode ser calculado por meio da Equação 2:

$$E_b = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2)$$

Geralmente, uma parte da radiação incidente será refletida (ρ), outra será absorvida pelo corpo (α), e outra transmitida para fora do meio (τ). Em uma substância opaca, a energia incidente será refletida ou absorvida (KYLILI *et al.*, 2014). Assim, a partir de um balanço de radiação para um comprimento de onda (ver Equação 3), se deduz que:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (3)$$

Como num corpo opaco como $\tau = 0$, nesses casos ficaria (ver equação 4):

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (4)$$

Alguns materiais apresentam valores particulares para estes parâmetros (SILVA, 2012), o que pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de emissividades, radiação incidente refletida e absorvida de corpos de referência.

Corpo	ε	ρ	τ
Corpo negro	1	0	0
Corpo transparente	0	0	1
Espelho perfeito	0	1	0

Fonte: Silva (2012)

A energia que chega ao sensor térmico é composta da energia emitida pelo alvo e da energia refletida pelo ambiente e interceptada pela superfície do objeto (FOKAIDES e KALOGIROU, 2011; KYLILI *et al.*, 2014).

2.2 VARIÁVEIS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO

A utilização da termografia de infravermelho requer muitos cuidados para a obtenção dos dados e posterior análise dos resultados pela quantidade de variáveis envolvidas nas medições (SANTOS, 2012). Existem dois grupos principais de variáveis: as que dependem do equipamento e as relacionadas com o alvo. As principais variáveis vinculadas ao

equipamento são a resolução geométrica IFOV (“*instantaneous field of view*”), a resolução da câmera, o foco e o ângulo de visão. No caso das variáveis relacionadas com o alvo, a principais que devem ser consideradas são a emissividade, a distância e a reflexão. Todas estas variáveis afetam em maior ou menor medida a precisão dos resultados e a interpretação dos mesmos, sendo imprescindível conhecer ou mensurar cada uma delas antes da realização da inspeção termográfica. Nos próximos itens são apresentadas as principais variáveis e relacionam-se as mesmas com os problemas que comumente aparecem nas inspeções de edifícios.

2.2.1 Variáveis relacionadas ao equipamento

As principais variáveis relacionadas com o equipamento são o IFOV, a resolução, o foco e o ângulo de visão. Elas vêm definidas pelo fabricante do equipamento. Câmeras com menor valor de IFOV e maior resolução permitem fazer leituras mais precisas e obter termogramas com maior nitidez e clareza para a detecção de anomalias.

A resolução geométrica corresponde ao o tamanho do detector projetado através das lentes no alvo (ITC, 2013). Já o IFOV se representa em mrad e define o objeto menor que se pode representar na imagem do visualizador, segundo a distância da medição. O valor representado em mrad corresponde ao tamanho do ponto visível (mm) a uma distância de 1m.

Na área de pesquisa de propriedades térmicas de materiais e patologias de edificações, têm sido utilizados nos últimos anos resoluções na faixa de 160 x 120 pixels até 640 x 480 pixels. É difícil encontrar valores superiores a estes em estudos de edificações principalmente, pelo custo elevado do equipamento. A Tabela 2 mostra um resumo da resolução e IFOV das câmeras infravermelhas empregadas em estudos recentes encontrados na literatura, vinculados à área da construção civil.

Tabela 2 – Resolução e IFOV das câmeras infravermelhas utilizadas em estudos recentes (últimos cinco anos).

Artigo ou trabalho	Caso de estudo	Resolução (px)	IFOV (mrad)
Lahiri <i>et al.</i> (2012)	A quantificação de defeitos de materiais compósitos e materiais de borracha utilizando termografia ativa	320-256	0,56

Asdrubali et al.(2012)	Metodologia para realizar uma análise quantitativa de alguns tipos de pontes térmicas em envoltórias de edifícios	320-240	1,36
González-Aguilera et al. (2013)	Desenvolvimento de uma nova modelagem baseada em imagem termográfica para avaliar a eficiência energética das fachadas de edifícios	640-480	0,6
Martínez et al. (2013a)	Caracterização físico-química da argamassa original usada durante a construção do campanário de uma igreja.	320-240	1,36
Lai et al. (2013)	Avaliação da durabilidade de vigas de concreto FRP- usando IRT e ensaios de cisalhamento direto	320-240	1,0
Kordatos et al. (2013)	A avaliação de danos dos murais e alvenaria de um mosteiro usando abordagens da termografia infravermelha	320-240	1,36
Edis et al. (2014)	Emprego da termografia passiva para a detecção de problemas de umidade em fachadas com revestimento cerâmico	160-120	-
Freitas, S et al. (2014)	Detecção de descolamentos de gesso em fachada utilizando termografia infravermelha. Estudo de laboratório e campo.	320-240	1,5
Freitas et al. (2014)	Avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura usando termografia de infravermelho	640-480	2,5
Lagüela et al. (2014)	Abordagem não destrutiva para a caracterização e geração térmica de edifícios	640-480	0,6
Manohar e Di Scalea (2014)	Modelagem da interação fluxo de calor em 3D de defeitos em materiais compósitos com termografia infravermelha	320-240	1,3
Lai et al. (2015)	Validação da estimativa de tamanho de defeitos em parede através de termografia passiva por infravermelho e um algoritmo de gradiente	320-240	1,1
Fox et al. (2015)	Termografia de lapso de tempo para detecção de defeitos de construção	640-480	0,68
Cotič et al. (2015)	Determinação da aplicabilidade e dos limites de detecção de vazio e descolamentos em estruturas de concreto usando termografia infravermelha	320-240	1,36
Menezes et al. (2015)	Avaliação in situ do desempenho físico e análise de degradação de revestimento de paredes.	160-120	3,63
Barreira et al. (2016)	Termografia infravermelha para avaliação de fenômenos relacionados à umidade de componentes na construção	320-240	1,5
Caldeira (2016)	Utilização da termografia infravermelha para identificação de danos na aderência entre concreto e PRF	320-240	1,36
Sferra et al. (2017)	Avaliação do estado de conservação dos mosaicos: simulações e processamento de sinal termográfico	320-240	1,1
Lourenço et al. (2017)	Detecção de anomalias em sistemas de revestimento cerâmico por termografia infravermelha	640-480	0,65

Fonte: Próprio Autor.

O IFOV, foco e ângulo de visão dependem da lente, não podem ser analisadas separadamente. Os valores frequentemente encontrados quando só se emprega a lente própria do equipamento fica entre 0,6 e 3,7 mrad de IFOV e o ângulo de visão pode variar entre 7 e 80 graus, sendo mais utilizadas as lentes de 15 e 25 graus. O valor do IFOV e o ângulo da lente são algumas das principais limitantes nos estudos de fachadas. Quanto maiores sejam estes parâmetros, menor será a resolução dos termogramas e a precisão do estudo, sendo que cada pixel analisado na imagem vai corresponder a uma área maior. Um estudo realizado por Bauer *et al.* (2015a) onde foram comparadas duas câmeras infravermelhas de igual resolução (320-240) e diferente IFOV (1,36 e 1,2), mostrou diferenças nos valores de temperatura das áreas com e sem defeito (descolamento. No entanto, os valores de Delta-T ficaram praticamente iguais durante todo o período de estudo.

2.2.2 Variáveis relacionadas ao alvo

A identificação e mensuração das variáveis relacionadas com o alvo se tornam difíceis e requerem muitos cuidados para obter termogramas de boa qualidade. A não identificação ou incorreta mensuração das mesmas gera imprecisões nos termogramas que podem levar a valores errados de temperatura. As principais variáveis são a emissividade, a reflexão e a distância.

A emissividade é a taxa de radiação emitida por um corpo real dividida pela radiação emitida por um corpo negro, ou seja, a capacidade de um material de emitir radiação infravermelha em relação a um corpo negro (ITC, 2013). Ela é decisiva na obtenção dos valores reais de temperatura. Os principais fatores que influenciam a emissividade são: o tipo de material, a textura da superfície e o ângulo.

Na Tabela 3 se mostram os valores de emissividade de materiais de construção usados comumente nas edificações (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013), observa-se como a emissividade varia dependendo do tipo de material.

Tabela 3 – Valores de emissividade de materiais usados nas edificações.

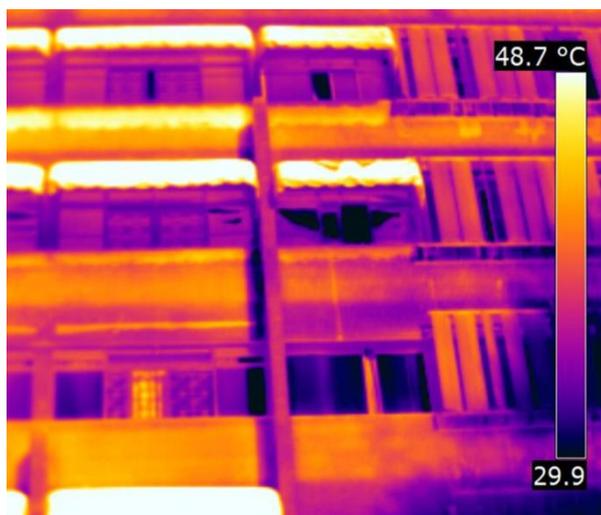
Materiais	Temperatura (K)	Emissividade
Tijolo comum	290	0,81-0,86
Tijolo de alvenaria	273	0,94
Concreto	309	0,95
Argamassa	311-533	0,94
Mármore	311	0,75
Granito	309	0,96
Pedra calcária	311	0,95
Asbestos	293	0,96
Alumínio	290	0,83-0,94
Aço fundido	377	0,95

Fonte: Modificada de Bagavathiappan *et al.* (2013).

A modo geral se pode concluir que os valores de emissividade dos materiais usados nas construções convencionais, tanto nas vedações horizontais quanto nas verticais têm emissividade alta, superiores a 0,8, o que favorece os estudos de transferência de calor e de avaliação de patologias com a termografia. Já os materiais usados nas esquadrias e elementos de proteção de aberturas apresentam valores baixos de emissividade, o que dificulta os estudos relacionados com a envolvente dos edifícios.

No estudo realizado por Barreira *et al.* (2015a) no qual avaliaram a emissividade de diferentes materiais (gesso, argamassa, placas cerâmicas) de construção por diferentes métodos, encontraram também valores superiores a 0,79, exceto nos materiais metálicos. A Figura 3 mostra a fachada de um prédio onde foi utilizado o valor de emissividade padrão de 0,95. Neste caso, os elementos de proteção das aberturas que têm emissividade mais baixa, apresentaram valores de temperatura superiores aos reais. Além disso, pode-se observar como a variedade de materiais com emissividade diferente gera muitas áreas com temperaturas bem diferentes o que dificulta qualquer tipo de análise no termograma.

Figura 3 – Influência da emissividade. Grandes diferenças de temperaturas entre as esquadrias, revestimentos e elementos de proteção devido aos diferentes valores de emissividade dos materiais.



Fonte: Bauer e Pavón (2015).

Na Figura 4, é possível observar como o ângulo afeta a emissividade. Nota-se que no canto esquerdo da torre (com superfície arredondada), se obtiveram menores valores de temperaturas em zonas que, em teoria, deveriam apresentar valores similares. Pode-se perceber também que, próximo ao topo da edificação, foram obtidos valores inferiores de temperaturas, resultado do ângulo de onde foi realizada a imagem. Por tais motivos (ITC, 2013), recomenda-se o ângulo de 45° como limite para a realização das inspeções.

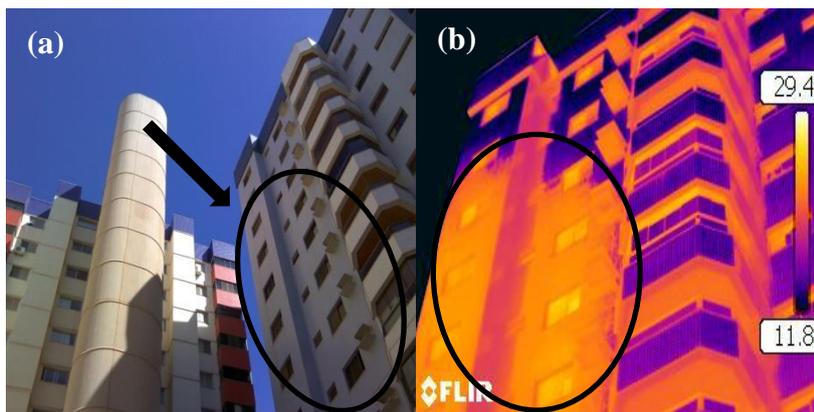
Figura 4 – Influência do ângulo na emissividade. Canto superior esquerdo com valores menores de temperatura devido à inclinação e a forma arredondada da torre.



Fonte: Bauer e Pavón (2015).

A reflexão é a perturbação causada sobre a superfície ou da superfície do alvo, proveniente de um objeto ou elemento posicionado no campo da imagem termográfica. A reflexão é uma das principais limitações da termografia, principalmente nas medições em campo. Materiais de construção com acabamentos muito lisos e com brilho refletem a radiação infravermelha de outros corpos. Por estes motivos, o termografista deve ser experiente para eleger cuidadosamente o posicionamento correto desde o qual vai fazer a foto para evitar ou amenizar as reflexões. Este fenômeno nas avaliações de fachadas de edifícios é muito frequente, principalmente quando os estudos são feitos sobre uma forte incidência solar. Na Figura 5 pode ser observado este problema. Nota-se a reflexão da torre do prédio da esquerda na imagem termográfica do prédio da direita. Na área marcada onde tem reflexão aparecem falsos valores de temperaturas. Neste caso, superiores aos reais.

Figura 5 – Problemas de reflexão em termogramas de fachadas de edifícios. (a) Imagem digital com indicação da torre da edificação a esquerda que gera reflexão na edificação a direita. (b) Termograma com indicação da área com reflexo na edificação.



Fonte: Modificada de Bauer e Pavón (2015).

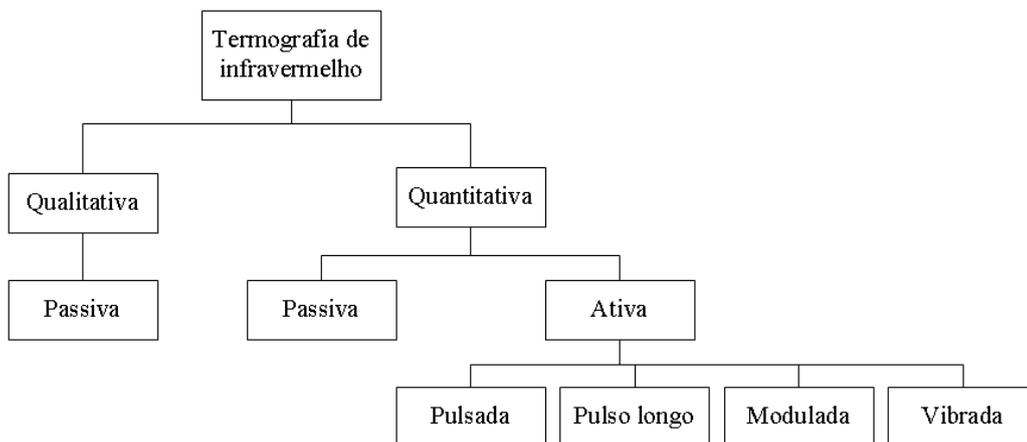
A distância também influencia as medições termográficas. Com o aumento da distância, cada ponto corresponde a uma área maior da superfície e a radiação captada pelo equipamento passa a ser uma média da radiação emitida, perdendo-se detalhes na imagem (SILVA, 2012). No estudo desenvolvido por Barreira *et al.* (2015) sobre a análise da sensibilidade da termografia infravermelha quantitativa, os autores concluíram que a distância (até 10m) não influenciava de maneira significativa os valores de Delta-T. Não entanto, perceberam que os termogramas ficaram menos claros e precisos.

O estudo desenvolvido por Bauer *et al.* (2015b) resumiu a influência destas três variáveis (emissividade, a temperatura aparente refletida e a distância) nos valores de temperatura de revestimentos cerâmicos e de revestimentos em argamassa. As variáveis tiveram valores determinados experimentalmente (fisicamente corretos) e outros atribuídos erroneamente, de modo a não retratar a realidade do parâmetro. Concluíram que os erros gerados da variação da temperatura aparente refletida e da distância são relativamente pequenos se comparados com os erros gerados pela variação da emissividade. No caso da emissividade, esses erros foram maiores com o aumento da temperatura média da superfície do corpo de prova.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A termografia infravermelha se classifica, dependendo do tipo de análise e interpretação das imagens térmicas em: termografia qualitativa ou termografia quantitativa e dependendo do tipo de estimulação utilizada em: termografia passiva ou ativa. Na Figura 6 observa-se um esquema simplificado da abordagem das inspeções termográficas de acordo com a sua classificação.

Figura 6 – Esquema simplificado das técnicas e métodos da termografia infravermelha.



Fonte: Modificado de Bagavathiappan *et al.* (2013).

Os tipos de análises estão diretamente relacionados com a forma de estimulação utilizada e a seleção de ambos vai depender do problema estudado e do objetivo procurado com a

inspeção termográfica. Nos próximos itens será explicado cada um dos termos apresentados.

2.3.1 Termografia qualitativa e quantitativa

A termografia qualitativa é baseada em uma análise relativamente simples de identificação de pontos quentes e pontos frios da imagem térmica, através da diferença de cores, ou seja, é uma análise visual do termograma (SILVA, 2012). A simplicidade da termografia qualitativa é relativa e vai depender da experiência de quem efetua o ensaio e interpreta os resultados. A análise qualitativa é feita por comparação com uma situação padrão, levando em consideração apenas a diferença local da temperatura superficial, através da variação de cores no termograma, indicando assim, a existência ou não de uma anomalia (ALAM *et al.*, 2016), ficando os resultados sujeitos à experiência do avaliador.

A técnica permite o acompanhamento sistemático de condições normais de trabalho e possibilita investigação periódica para conhecer e identificar possíveis anomalias invisíveis ao olho (PEDRA, 2011). Em investigações de sistemas nos quais existe uma determinada tipologia de fluxo térmico constante, em que a detecção de um ponto ou região com temperaturas fora da faixa de trabalho indica uma anomalia, a termografia pode assumir um padrão qualitativo (CERDEIRA *et al.*, 2011). Nesses casos o objetivo é descobrir se existe uma anomalia e onde ela está localizada, por analogia de padrões de falha que dependem do sistema em estudo. Neste tipo de análise, são poucas as preocupações com as correções e os ajustes dos parâmetros de aquisição da imagem.

A termografia quantitativa é usada para classificar a severidade de uma anomalia, sendo necessário ter a maior precisão possível nas temperaturas obtidas no termograma e realizar os ajustes e medições dos parâmetros termográficos de medição (emissividade, distância, temperatura refletida, dentre outros)(BAUER *et al.*, 2014). Nesse sentido, o estabelecimento de critérios associativos às anomalias e patologias são fundamentais. Neste caso, as variações de temperatura na imagem térmica são quantificadas (REBELO, 2017), podendo-se detectar e avaliar anomalias. Este tipo de abordagem requer maiores cuidados na introdução de parâmetros para a obtenção dos termogramas (temperatura ambiente, temperatura aparente refletida, umidade, distância e emissividade). Geralmente, os resultados da análise não são avaliados *in situ*, as imagens são gravadas e,

posteriormente, tratadas em um computador para depois serem interpretadas (SILVA, 2012).

2.3.2 Termografia passiva e ativa

No método passivo, nenhuma estimulação artificial é utilizada, devendo existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto em estudo e o meio no qual ele está inserido (PEDRA, 2011). Na termografia passiva, as diferenças de temperatura que identificam as prováveis anomalias têm origem nos fluxos de calor gerados pelas condições de exposição natural dos elementos. Nas fachadas, esses fluxos de calor, obviamente, não são estáticos nem constantes ao longo do dia, e dependem em grande escala da temperatura ambiente, do aquecimento pelo sol e das condições de resfriamento da fachada (BAUER *et al.*, 2015).

Na termografia ativa, um estímulo externo é necessário para gerar diferenças relevantes de temperatura. Em geral, a sua aplicação se dá em casos em que se desejem resultados quantitativos (PEDRA, 2011). Os estímulos externos usados na termografia ativa podem ser de diferentes naturezas. Os mais usados são os chamados: pulsado, de pulso longo, modulado e vibrado. Na termografia pulsada, a temperatura do material se modifica rapidamente pelo pulso térmico instantâneo, avaliando-se os padrões de arrefecimento da superfície. Na termografia de pulso longo, o regime de aquecimento é contínuo e prolongado com o objetivo de observar em um tempo maior as alterações na superfície do material. Estuda-se tanto a etapa de aquecimento quanto a etapa de arrefecimento (BAUER *et al.*, 2014).

Na termografia modulada, aplica-se um perfil de aquecimento modulado sinusoidal, baseia-se em ondas térmicas geradas no interior da amostra. Na termografia vibrada são induzidas externamente vibrações mecânicas para avaliar as mudanças de temperatura, resultantes do calor liberado nas áreas com defeitos (MALDAGUE, 2001a). Cada estímulo tem suas características e limitações próprias e a escolha do tipo de estímulo térmico vai depender das características do objeto a ser testado e do tipo de informação a ser pesquisada (PEDRA, 2011).

2.4 NORMAS SOBRE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA APLICADA À CONSTRUÇÃO

A seguir são apresentadas as principais normas internacionais referentes à aplicação da termografia infravermelha na inspeção das construções:

Resumo das normas ASTM (GUERRERO MENA, 2013; REBELO, 2017):

- ASTM C1060 – 11a (2015): Prática padrão para a inspeção termográfica de instalações de isolamento em cavidades fechadas dentro da estrutura de edifícios.
- A ASTM C1153 - 10 (2015): Prática padrão para a localização de umidades nos sistemas de impermeabilização de coberturas por imagens de infravermelhos.
- ASTM D4788 - 03 (2013): Método estandar de ensaio para a detecção de descolamentos em tabuleiros de pontes através da termografia infravermelho.
- ASTM C1046 - 95 (2013): Prática padrão para a medição in situ do fluxo de calor e temperatura nos componentes que conformam o envolvente do edifício.

Resumo das normas europeias (EN)(REBELO, 2017):

- EN 13187 (1999) - Desempenho térmico de edifícios - Detecção qualitativa de irregularidades térmicas em envelopes de construção - Método infravermelho;
- EN 1767 (1999) - Produtos e sistemas para proteção e reparação de estruturas de concreto. Métodos de teste. Análise de infravermelhos.

Resumo das normas ISO (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013; REBELO, 2017):

- ISO 6781-3 (2015) - Desempenho dos edifícios - Detecção de irregularidades de calor, ar e umidade em edifícios por métodos infravermelhos - Parte 3: Qualificações de operadores de equipamentos, análise de dados e escritores de relatórios;
- ISO 6781 (1983) - Isolamento térmico - Detecção qualitativa de irregularidades térmicas em envelopes de construção - Métodos de infravermelho.

Nota-se que, internacionalmente, existem normas sobre termografia utilizadas na área da construção. Percebe-se que as mesmas são orientadas ao estudo de problemas de isolamento térmico, temperaturas da envolvente de edifícios e problemas patológicos em

elementos específicos. Sendo assim, pode-se concluir que faltam procedimentos e critérios normativos, tanto qualitativos quanto quantitativos aplicados à avaliação de problemas patológicos nas edificações.

A seguir é mostrado um resumo das normas ABNT relacionadas com a termografia (BRIQUE, 2016):

- NBR 16292: 2014: Ensaios não destrutivos — Termografia — Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas;
- NBR 15572: 2013: Ensaios não destrutivos — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos;
- NBR 15866: 2010: Ensaio não destrutivo—Termografia — Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos;
- NBR 15718: 2009: Ensaios não destrutivos —Termografia — Guia para verificação de termovisores;
- NBR 15763: 2009: Ensaios não destrutivos - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência;
- NBR 15424: 2006: Ensaios não destrutivos —Termografia – Terminologia.

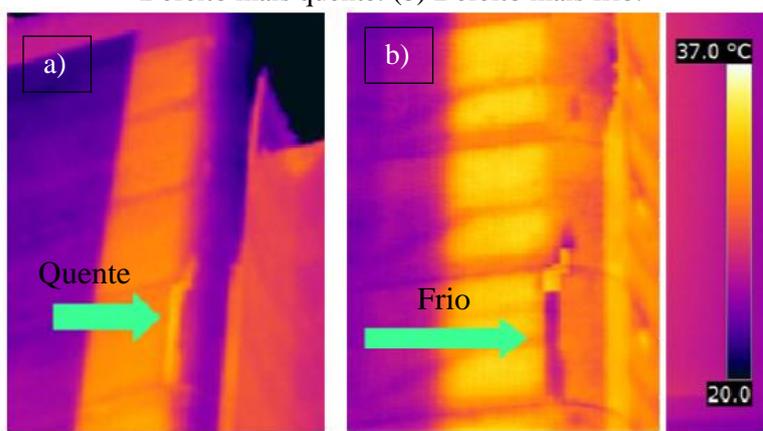
Nota-se que a maioria das normas é aplicada ao estudo de sistemas ou equipamentos elétricos. Não existem normas aplicadas à avaliação de edificações ou inspeção de materiais ou elementos construtivos.

2.5 PATOLOGIAS E DEFEITOS ESTUDADOS COM TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NA CONSTRUÇÃO

A termografia de infravermelho, com base na análise do campo de temperatura, é capaz de identificar anomalias internas porque o processo de difusão térmica, afetado pela presença de falhas, inclusões, umidade, dentre outras ocorrências, gera uma alteração do campo de temperatura superficial da estrutura em comparação ao campo de temperatura gerado por uma estrutura íntegra (TAVARES, 2012). Embora possam ser detectadas anomalias internas, a termografia de infravermelho é considerada uma técnica superficial, já que as anomalias que podem ser identificadas são as que ficam perto da superfície.

A possibilidade de identificar as anomalias não vai depender somente das características e profundidade do defeito. Objetos em equilíbrio térmico ou higroscópico não podem ser estudados com a termografia (BARREIRA e FREITA, 2007). A intensidade e sentido do fluxo de calor que atravessa o elemento vai determinar o momento em que é visível a anomalia e como a mesma vai aparecer no termograma, se é como uma zona mais fria ou mais quente. Na Figura 7 se pode observar como a mesma patologia aparece mais quente ou mais fria dependendo do sentido do fluxo de calor.

Figura 7 – Defeito em fachada avaliado em momentos com sentido de fluxo de calor diferente. (a) Defeito mais quente. (b) Defeito mais frio.



Fonte: Bauer *et al.* (2015a)

Importantes patologias têm sido estudadas na área da construção, como por exemplo: descolamentos, fissuras, umidades, presença de vazios e outros. Os estudos de laboratório estão focados na simulação de defeitos em materiais, elementos ou sistemas de revestimentos em escala reduzida e os estudos de campo se dedicam principalmente à análise de fachadas.

Neste item se apresentam os resultados das pesquisas relacionadas à área da construção civil, divididas por tipo de patologia ou defeito. São comentados os aspectos relativos à visibilidade dos defeitos e a forma através da qual os mesmos aparecem no termograma a depender do fluxo de calor e as condições do ambiente.

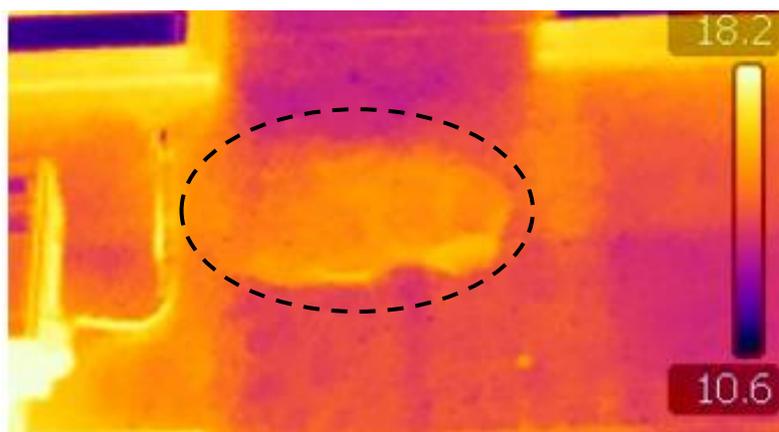
2.5.1 Descolamentos

Os descolamentos de revestimentos são algumas das patologias estudadas com a termografia infravermelha. A espessura relativamente pequena da maioria dos materiais de revestimento e a presença de ar entre as camadas dos mesmos como resultado da perda de aderência com o substrato são dois dos fatos que justificam o estudo deste fenômeno com a termografia de infravermelho. A presença de ar perto da superfície gera nessa área diferenças de temperatura comparada com uma área vizinha em condições normais, o que permite a identificação desta patologia. Pelas variáveis envolvidas relativas ao material e as condições relativas ao ambiente, a identificação desta patologia com a termografia se torna bem complexa e depende do sentido e da intensidade do fluxo de calor, que varia a depender do experimento na termografia ativa e a depender das condições climáticas na termografia passiva.

Cerdeira *et al.* (2011) analisou a possibilidade de empregar a termografia na avaliação de descolamentos em revestimentos com placas de granito mediante um estudo de laboratório. Para isso, construíram uma parede de tijolo cerâmico com uma camada de argamassa, na qual colocaram defeitos predefinidos de geometria e tamanhos diferentes para simular problemas de aderência com a placa de granito. Os descolamentos apareceram como áreas mais frias na imagem devido ao aquecimento ter sido pela parte traseira da parede. Apesar de ter encontrado limitações com a termografia de infravermelho para a identificação de defeitos em paredes, demonstraram que é possível estabelecer normas para a aceitação e rejeição desses revestimentos e condições para a criação de bases de dados com a evolução temporal da análise térmica do edifício.

Mario (2011) detectou diversas áreas com descolamento de um prédio com revestimento em argamassa. As inspeções foram feitas com baixa incidência do sol na fachada, sendo assim, nos casos apresentados pelo autor os descolamentos apareceram com áreas mais quentes nos termogramas (Figura 8).

Figura 8 – Descolamento em fachada com revestimento em argamassa.



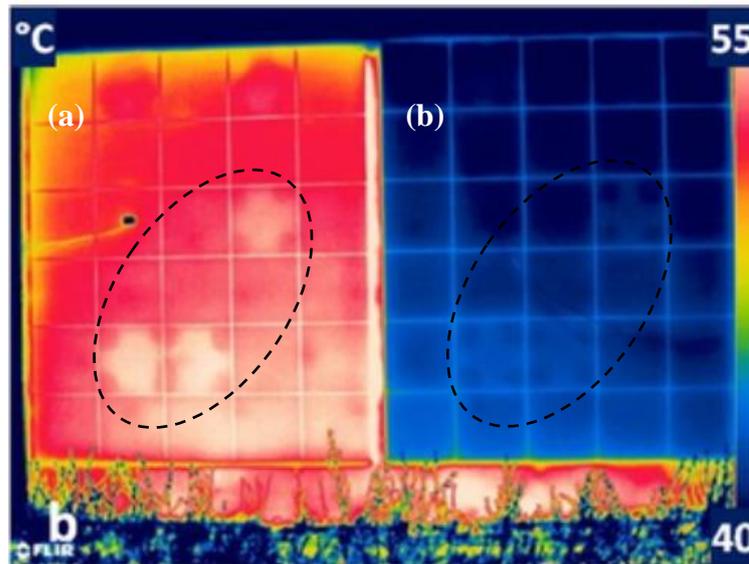
Fonte: Modificada de Mario (2011)

Silva (2012); Freitas, S *et al.* (2014), conseguiram detectar descolamentos em revestimentos de gesso polimérico, no laboratório e no campo. Observaram que, no laboratório, os descolamentos testados produziram temperaturas mais elevadas do que o revestimento de gesso sem defeitos durante a exposição a uma fonte de calor. Em campo, identificaram a patologia em dias de sol e nublado. Os descolamentos foram visíveis com temperaturas mais elevadas do que o resto da fachada durante o dia e com temperaturas mais baixas, em comparação com a parede, quando a temperatura do ar foi diminuindo após o pôr do sol.

Bauer *et al.* (2016b) conseguiram detectar descolamentos de fachadas com revestimento de placas cerâmicas. Os autores perceberam que os descolamentos apareceram na imagem como áreas mais quentes durante o período da incidência do sol e como áreas mais frias no final da tarde e a noite. Após a incidência direta do sol, encontraram um intervalo de tempo onde a diferença de temperatura entre o descolamento e a área normal ficou próxima de zero.

Lourenço *et al.* (2017) detectaram descolamentos em placas cerâmicas tipo porcelanato de diferentes cores (branca e preta). Durante o dia, os descolamentos apareceram como áreas mais quentes nos termogramas e, à noite como, áreas mais frias (Figura 9). Ademais, neste estudo, comprovaram a dificuldade de avaliar estes descolamentos com a presença de umidade.

Figura 9 – Descolamentos avaliados com termografia em fachadas com revestimento cerâmico. (a) Descolamentos no revestimento cerâmico de cor escura, detectados por apresentar maiores temperaturas. (b) Descolamentos no revestimento cerâmico de cor clara, detectados por apresentar maiores temperaturas.



Fonte: Lourenço *et al.* (2017).

Pode-se concluir que a termografia pode ser utilizada na detecção de descolamento em sistemas de revestimento cerâmicos e de revestimento em argamassa. Esta patologia é detectada através da termografia, quando comparada com uma área normal (sem defeito), como áreas mais frias ou mais quentes a depender do momento em que for realizada a inspeção.

A princípio, percebeu-se que em uma condição direta, quando está entrando o calor para o interior da edificação, os descolamentos devem aparecer como áreas mais quentes e, em uma condição reversa, quando o calor estiver saindo pela superfície revestida o descolamento deve aparecer como uma área mais fria. No entanto, como as condições climáticas são diferentes dependendo da região do estudo e mudam durante o dia, o momento para avaliar a patologia constitui uma das principais dificuldades, tendo em vista que, para que o sistema se encontre em uma condição direta ou reversa, depende, no mínimo, do clima, da orientação, elemento e das camadas que o compõem.

2.5.2 Fissuras

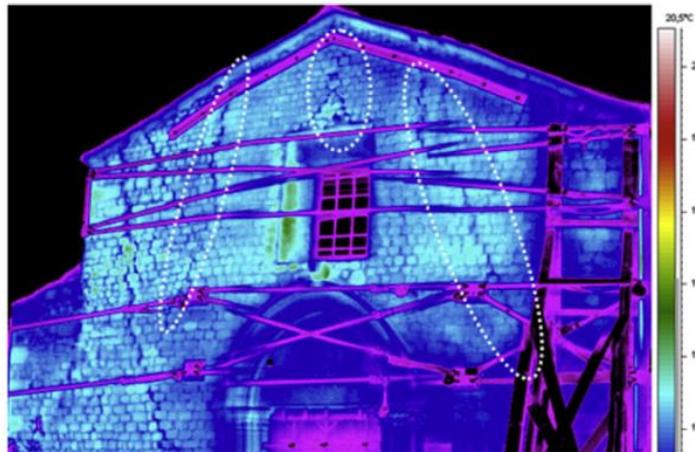
A termografia infravermelha tem sido utilizada na avaliação de fissuras, principalmente, fissuras superficiais em revestimentos externos em argamassa ou elementos de concreto. A camada de ar dentro da fissura e sua geometria estreita são dois dos fatos que facilitam o estudo desta patologia. Quando o calor penetra ou sai da fissura, parte da radiação é refletida nas paredes e parte é absorvida, por tais motivos, esta região não fica aquecida da mesma forma que a superfície totalmente exposta, o que gera diferenças que podem ser detectadas na inspeção termográfica.

Sham *et al.* (2008) estudaram fissuras superficiais, secas e molhadas, criadas no laboratório em um painel de argamassa de cimento. Conseguiram detectar fissuras de até 0,5mm e sugeriram que a detecção das fissuras deve ser feita utilizando fontes de aquecimento e não água, porque a presença da água gerou termogramas pouco claros. Pelas cores dos termogramas apresentados não é possível comentar em relação a como apareceram as fissuras, se como áreas mais frias ou mais quentes.

Utilizando a termografia, foi verificada presença de fissuras no estudo desenvolvido em um prédio histórico da cidade de Madri (MARTÍNEZ *et al.*, 2013), segundo os autores pelas elevadas diferenças de temperatura encontradas a ambos os lados das fissuras. Na análise visual do termograma realizado durante o dia, se percebe a fissura como uma área mais fria, quando comparada com a área vizinha bem próxima à fissura.

Paoletti *et al.* (2013) verificaram a presença de fissuras na fachada de um prédio histórico de alvenaria de pedra, através da inspeção termográfica. Os autores concluíram que a extensão e alcance das fissuras foram determinadas somente através de uma análise precisa das imagens térmicas capturadas. Neste caso, a ausência de argamassa nas juntas de algumas regiões dificultava a determinação do real alcance da fissura na inspeção visual. Na situação, as imagens térmicas foram realizadas durante o dia e as fissuras apareceram nos termogramas como áreas mais frias quando comparadas com as regiões vizinhas próximas a elas (Figura 10).

Figura 10 – Fissuras avaliadas com a termografia em um prédio histórico.

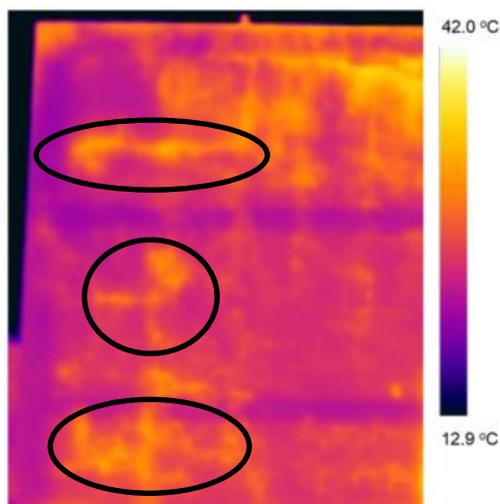


Fonte: Modificada de Paoletti *et al.*(2013).

Freitas, S *et al.* (2014) verificaram a presença de fissuras detectadas previamente na inspeção visual, com a termografia em um prédio com revestimento em argamassa. Segundo autores outras fissuras não visíveis na inspeção visual foram detectadas com a termografia. Eles encontraram valores de temperaturas nas fissuras, inferiores aos valores de temperaturas no revestimento em argamassa sem defeito, ou seja, as fissuras se apresentaram como áreas mais frias. A captura das imagens foi feita em três horários diferentes (no meio da manhã, da tarde e da noite). O comportamento encontrado pelos autores gera dúvidas em relação ao comportamento térmico das fissuras, porque, à priori no horário da noite, as fissuras deveriam ter aparecido mais quentes em relação à área normal.

Bauer *et al.* (2016a) avaliaram um muro de alvenaria com revestimento em argamassa com alta concentração de fissuras, muitas delas ramificadas. Na Figura 11 aparecem marcadas as fissuras analisada nesse estudo. Os resultados também mostraram valores positivos do Delta-T durante todo o dia. Estes valores podem ser atribuídos à cor mais escura das regiões com fissuras. Possíveis descolamentos associados às fissuras poderiam justificar também as temperaturas mais elevadas das regiões com defeito (fissuras).

Figura 11 – Fissuras ramificadas avaliadas com termografia, aparecendo como áreas mais quentes na fachada com revestimento em argamassa.



Fonte: Bauer *et al.* (2016a).

Conclui-se que a termografia pode ser utilizada na avaliação de fissuras expostas em revestimentos em argamassa, em superfícies de concreto e em paredes de alvenaria. No entanto, a interpretação dos termogramas com esta patologia se torna complexa, principalmente, quando aumenta a concentração das fissuras. Nota-se que existem divergências em relação a forma como aparecem as fissuras, não se identificando claramente a relação com o sentido do fluxo de calor nos elementos.

2.5.3 Umidades

A umidade é uma das patologias das construções que mais tem sido estudada com o uso da termografia de infravermelho. A umidade em materiais porosos (como os materiais de construção) se espalha nos poros até seu enchimento. A água modifica radicalmente a densidade, o calor específico e a condutividade térmica. Esses três fatores aumentam de acordo com o aumento da quantidade de água (ROSINA e LUDWIG, 1999).

O estudo deste fenômeno vai depender destas três propriedades térmicas do material, principalmente, do calor específico. Quanto maior for o calor específico, mais energia é necessária para aquecer ou arrefecer um material particular. A água tem calor específico mais elevado do que materiais comuns de construção. Consequentemente, o ganho ou perda de calor da água em condições semelhantes é mais lento do que nesses materiais,

fazendo que os materiais danificados pela água apresentem um maior calor específico (KOMINSKY *et al.*, 2006). Isto faz com que as áreas com elevado conteúdo de umidade apareçam com temperaturas diferentes às áreas vizinhas sem presença de umidade, podendo ser observada esta diferença de temperatura com a termografia infravermelha.

Outros autores explicam este fenômeno a partir da mudança da condutividade térmica dos materiais porosos, a qual cria um tipo de ponte térmica que permite visualizar as diferenças de temperatura na superfície (KYLILI *et al.*, 2014). Edis *et al.* (2014) resumem em três os aspectos que devem ser analisados para usar a termografia infravermelha na detecção de alterações no teor de umidade, eles são: o arrefecimento evaporativo na área úmida, a redução da resistência térmica e o aumento da capacidade de armazenamento de calor do material úmido.

Tavukçuoğlu *et al.* (2005) utilizaram a termografia infravermelha para a avaliação de problemas de drenagem de águas superficiais em um edifício histórico de alvenaria de pedra. Os autores detectaram as zonas de acúmulo de água e vazamentos na edificação através da termografia, no horário da manhã e da tarde. As áreas com problemas de umidade foram detectadas pela diminuição da temperatura da área afetada.

Kominsky *et al.* (2006) identificaram com a termografia de infravermelho, os locais da envoltória do edifício com problemas de umidades, comprovando depois, com inspeção intrusiva, níveis de umidade superiores a 20%. Os problemas de umidades nas paredes de alvenaria de tijolo cerâmico foram detectados como áreas mais quentes na inspeção realizada durante o dia (Figura 12).

Figura 12 – Umidade em parede alvenaria detectada com a termografia infravermelha como área mais quente.



Fonte: Kominsky *et al.* (2007).

Solla *et al.* (2013) utilizaram a termografia infravermelha para detectar problemas de umidade em uma ponte de alvenaria. A partir de um modelo termográfico tridimensional detectaram a presença de água (umidade) pela redução da temperatura na área afetada por causa da evaporação.

Edis *et al.* (2014) avaliaram problemas de umidade de uma fachada a partir da utilização de perfis de temperatura. Concluíram que, em fachadas com revestimento cerâmico vidrado as variações de umidade podem ser detectadas através de inspeção termográfica passiva com base no ganho de calor solar da fachada. A magnitude da diferença de temperatura entre as áreas secas e úmidas foi maior em torno do meio dia, contudo, apenas permanece no seu valor máximo para um curto período de tempo. À noite, a magnitude da diferença de temperatura foi menor, mas permaneceu estável durante mais tempo, pelo qual recomendam a noite como o melhor horário para realizar este tipo de estudo.

Barreira *et al.* (2016) utilizaram a termografia infravermelha para avaliar a absorção capilar em um modelo de laboratório em grande escala e o processo de secagem de duas paredes exteriores. Concluíram que a termografia infravermelha pode detectar problemas de umidade invisíveis e pode ser usada para avaliar o processo de secagem, embora destaque que a abordagem quantitativa do fenômeno é muito complexa.

Pode-se concluir que, efetivamente, a termografia pode ser usada na detecção e avaliação de problemas de umidade. Presença de umidade na superfície dos revestimentos é detectada qualitativamente com certa facilidade, mas quando a avaliação envolve o processo de secagem, à análise térmica se torna muito complexa. Conclui-se também que não existe um consenso em relação a forma que este problema vai aparecer no termograma, a depender do sentido do fluxo de calor no elemento, neste caso, outras variáveis do clima como a umidade e o vento têm uma influência muito grande no processo de avaliação desta patologia.

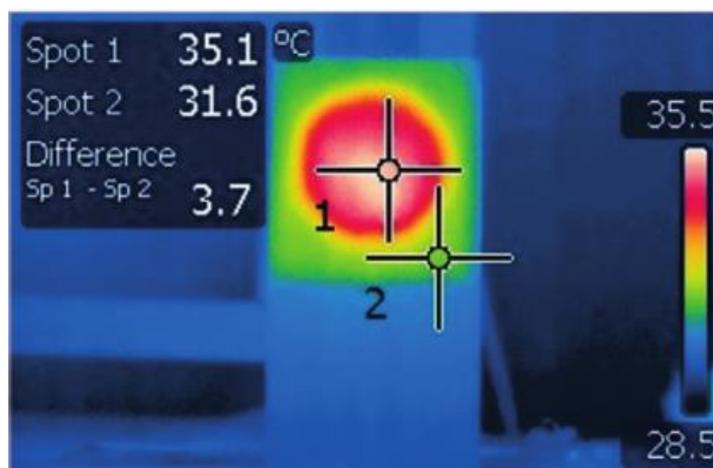
2.5.4 Presença de vazios, materiais e elementos ocultos

Outra aplicação da termografia na construção é a identificação de vazios, materiais ou elementos ocultos. A elevada resistência térmica do ar e as diferenças nas propriedades térmicas dos materiais de construção fazem com que, no termograma, dependendo da direção e intensidade do fluxo de calor, seja possível identificar a presença de vazios e elementos ocultos, estejam eles inseridos ou situados por trás do elemento estudado.

A presença de vazios é outro defeito que pode ser detectado com a termografia de infravermelho. Presença de vazios bem próximos da superfície como a falhas de aderência entre o concreto e o Polímero Reforçado com Fibra (PRF) é um dos problemas estudado com a termográfica. Este tipo de problema foi estudado por Lai *et al.* (2010). Neste estudo o estímulo térmico utilizado nos experimentos foi um pacote quente com uma temperatura superficial de aproximadamente 40°C, durante 30 segundos. Para cada teste, aplicou-se diretamente na superfície PRF durante 30s. Eles conseguiram avaliar os defeitos que pareceram como áreas mais quentes nos termogramas durante o aquecimento. As diferenças de linhas de temperatura foram determinadas e utilizadas no cálculo do tamanho das falhas de aderência.

Neste mesmo viés, foi desenvolvido o estudo realizado por Caldeira e Padaratz (2015). Foram utilizadas diferentes formas de aquecimento na detecção das falhas de aderência (*delaminations*) simuladas em superfícies de concreto. As falhas foram identificadas como áreas mais quentes durante o período de aquecimento (Figura 13) e os autores concluíram que, dentre os diferentes tipos de aquecimento analisados, a lâmpada incandescente e o aquecedor alógeno foram os que melhor identificaram a falha de aderência simulada.

Figura 13 – Detecção de falhas de aderência (áreas mais quente) entre PRF e o concreto durante aquecimento com lâmpadas incandescente.



Fonte: Caldeira e Padaratz (2015).

A presença de vazios com maior profundidade tem sido estudada em grandes placas de concreto (WERITZ *et al.*, 2005). Para simular os vazios foram inseridos cubos de poliestireno expandido em profundidades entre 1 e 9cm. Comprovaram que os defeitos menores, em profundidades de 3 e 4,5cm, são vistos melhor no início da sequência térmica (aquecimento). Os vazios apareceram como áreas mais quentes no termograma e a temperatura da área com defeito em relação a área sem defeito (Delta-T) foi diminuindo ao longo do aquecimento. Um estudo similar foi desenvolvido por Cheng *et al.* (2008). No artigo analisaram vazios com profundidades entre 0,5 e 3,0cm, utilizando como parâmetro a diferença de temperatura (Delta-T) entre a superfície onde se encontrava o defeito e a superfície do concreto com qualidade normal. Comprovaram que, quanto mais perto da superfície fique o defeito, é maior a diferença de temperatura (Delta-T). Em ambos os estudos, as placas foram esquentadas com lâmpadas de 2000 W de potência e conseguiram visualizar defeitos com profundidades de 3 cm.

Em outros elementos como, por exemplo, uma laje de concreto armado foi possível identificar somente alguns dos vazios introduzidos usando termografia passiva (MILOVANOVIC e PECUR, 2011). Os defeitos só foram visualizados sob condições climáticas específicas.

Em relação à identificação de materiais e elementos ocultos, aparecem estudos que comprovam a viabilidade da termografia nesta aplicação. Tem sido possível identificar a estrutura interna de paredes e tetos de uma construção com o objetivo de identificar a configuração estrutural do prédio, ou para ajudar no caso de modificações estruturais. Um exemplo desta aplicação é o relatado por Titman (2001) que mostra a localização de colunas e vigas de concreto armado dentro de um edifício pré-fabricado com espessura total de revestimento de 10 cm. O mesmo comenta que este tipo de estudos é viável quando a superfície externa está sob uma forte exposição solar. Neste caso, a imagem termográfica foi realizada pela parte interna da edificação.

A termografia para a avaliação de elementos estruturais ocultos foi utilizado por Cortizo (2007) na caracterização de uma edificação do Patrimônio Histórico. O autor detectou a presença da estrutura de madeira inserida na parede de adobe da fachada (Figura 14). O autor comenta que, quando o termograma foi realizado pela parte externa, não foi possível detectar a estrutura durante o período de aquecimento e que a melhor resolução visual ocorreu entre 0h e às 6h, mostrando a estrutura como uma área mais fria no termograma. Quando o termograma foi realizado pela parte interna, o mesmo apareceu nos momentos de maior incidência do sol.

Figura 14 – Estrutura de madeira detectada com a termografia infravermelha em fachada construída de adobe.



Fonte: Cortizo (2007).

Nowak e Kucypera (2010), detectaram a presença de ferro e poliéster dentro de uma parede. O experimento foi realizado em laboratório e a análise foi feita durante a etapa de arrefecimento. Concluíram que, dependendo do tipo de material (defeito) e a sua capacidade térmica, a distribuição da temperatura tem o desvio para acima (área mais quente) ou para abaixo (área mais fria) da zona homogênea, sempre em forma de onda.

Lai *et al.* (2015) avaliaram placas de concretos com pedaços de poliestireno expandidos colocados por trás de revestimento em argamassa e de revestimento de placas cerâmicas. Nesta pesquisa, o objetivo principal foi a mensuração dos defeitos, mas pode ser observado que os defeitos apareceram como áreas mais quente quando a placa foi aquecida pela superfície frontal (10h) e mais frios quando a placa foi aquecida pela superfície traseira.

Em outros estudos realizados por Bauer *et al.* (2016b); Bauer e Pavón, (2015) foi possível observar também a presença das estruturas de concreto formando parte da vedação vertical, nestes casos tanto na condição direta quanto na condição reversa os elementos de concreto apareceram como áreas mais frias nos termogramas.

Pode-se concluir que a presença de vazios, pode ser detectada com a termografia infravermelha, sendo que na maioria dos casos foi avaliado em uma condição direta, por tais motivos, as áreas na frente dos vazios apareceram como áreas mais quentes no termograma. Conclui-se também que, a presença de vazios quando avaliados em períodos de aquecimento médios ou longos, induz a uma diferença de temperatura entre a área com defeito e sem defeito que é maior no início de aquecimento e tende a diminuir para o final do mesmo.

Em relação à presença de materiais ocultos, pode-se concluir que a forma em que os mesmos vão aparecer no termograma depende das suas propriedades térmicas e do sentido do aquecimento do elemento estudado. No caso de elementos ocultos, grandes elementos como estruturas, podem ser detectados, tanto as inseridas na vedação vertical quanto elementos estruturais por trás da fachada. Verificou-se que, na maioria dos casos, aparecem visíveis na condição reversa, ou seja, quando o calor está saindo pela superfície estudada. Nestes casos, as estruturas se mostram no termograma como áreas mais frias.

2.6 ANÁLISES PARA A IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ANOMALIAS COM TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

As diferenças de temperatura que identificam as prováveis anomalias têm origem no fluxo de calor observado nos elementos construtivos. A presença de defeitos modifica a taxa de transporte de calor no material, a qual pode ser detectada na superfície. O fluxo de calor vai depender das condições de exposição do elemento estudado. Na termografia ativa, o fluxo de calor é gerado a partir de um estímulo externo controlado experimentalmente. Já na termografia passiva, o fluxo de calor depende das condições ambientais, as quais não podem ser controladas. Neste caso, o fluxo de calor não é estático nem constante ao longo do dia, e dependem, em grande escala, da temperatura ambiente, do aquecimento pelo sol e das condições de resfriamento do elemento (BAUER *et al.*, 2014). Por tais motivos, a análise das patologias e defeitos que podem ser qualitativas ou quantitativas, ficam divididas em estudos de termografia ativa e passiva.

Dentre os diferentes tipos de análises empregados na identificação de anomalias com a termografia infravermelha, consideram-se os mais empregados: a diferença visual no termograma (correspondente à termografia qualitativa) e o Delta-T (correspondente à termografia quantitativa). No entanto, nos estudos quantitativos são encontradas nas pesquisas outras formas de análises, que incluem outros parâmetros e ferramentas, com o intuito de aprimorar os resultados. Estas outras formas de análises se podem resumir em: representação gráfica, funções de contraste e análise de componentes principais (ACP).

Nos próximos itens, são apresentadas e discutidas as análises de identificação e avaliação das anomalias, com ênfase nos estudos aplicados à avaliação de anomalias em materiais e elementos construtivos e em fachadas de edificações.

2.6.1 Termografia qualitativa - passiva

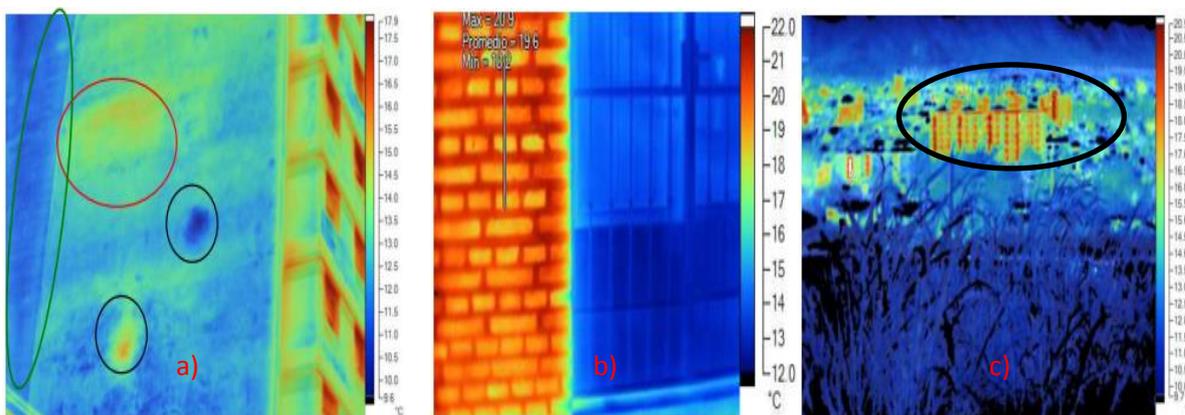
2.6.1.1 Diferença visual no termograma

A termografia qualitativa é baseada na identificação de pontos quentes e pontos frios da imagem térmica, através da diferença nas cores. A partir das diferenças visuais no termograma é que podem ser identificados os defeitos. As diferenças nas cores em áreas

que, em princípio, deveriam ser homogêneas, são o aviso de possíveis defeitos no material ou elemento. Este princípio constitui a base da análise qualitativa. A detecção de situações que podem ser consideradas como anômalas é feita só por comparação visual a critério do termografista. A partir das diferenças visuais é possível determinar a distribuição de temperatura aparente de cada uma das superfícies que formam a fachada, localizar os pontos ou áreas consideradas de distribuição anormal de temperatura, avaliar qualitativamente o tipo, extensão e importância dos possíveis defeitos (CRESPO e RODRIGUEZ, 2004).

A partir das diferenças visuais nos termogramas se têm identificado áreas quentes e frias nas fachadas dos edifícios, pontes térmicas, resultados da presença de diferentes materiais (argamassa-tijolo), e defeitos em materiais de isolamento térmico e efeito das ilhas de calor em cidades (LARSEN e HONGN, 2012). A Figura 15 mostra os diferentes tipos de anomalias identificados através da diferença visual no termograma.

Figura 15 – Identificação de anomalias através de diferenças visuais no termograma. (a) Localização de áreas quentes e frias. (b) Ponte térmica pela presença de diferentes matérias. (c) Identificação de ilha de calor em cidade.

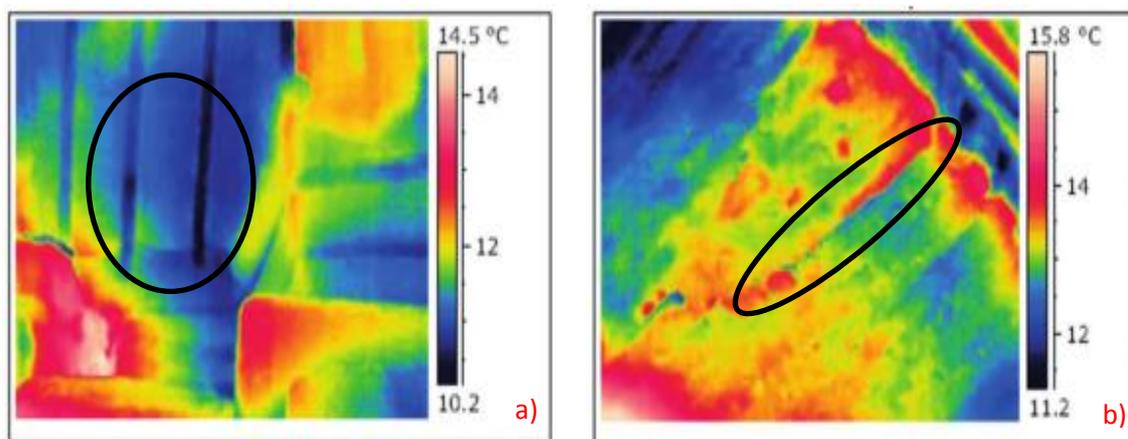


Fonte: Modificada de Larsen e Hongn (2012)

No estudo desenvolvido por Martínez *et al.* (2013), foi utilizada a termografia infravermelha como técnica de ensaio não destrutivo, como complemento da inspeção visual em zonas de difícil acesso. Conseguiu-se identificar a presença de umidade (Figura 16a) a partir da localização de áreas de menor temperatura na imagem térmica, resultado do arrefecimento local pela evaporação da água nessas zonas. Além disso, detectaram fissuras (ver Figura 16b) por intermédio das elevadas temperaturas em ambos os lados da

fissura, tendo em vista que, nesta zona, a transferência de calor não ocorre por condução por causa da descontinuidade no material.

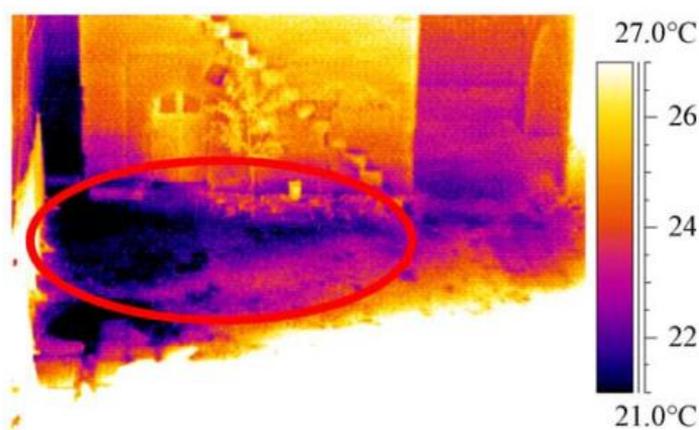
Figura 16 – Identificação de umidade e fissuras através de diferenças visuais no termograma. (a) Localização de áreas úmidas. (b) Identificação de fissura.



Fonte: Modificada de Martínez *et al.* (2013)

No estudo desenvolvido por Tavukçuoğlu *et al.* (2005) foi usada a termografia infravermelha para a avaliação de problemas de drenagem de águas superficiais em um edifício histórico de alvenaria e pisos de pedra. A partir da análise visual do termograma, detectaram as zonas de acúmulo de água e vazamentos (áreas mais frias) (Figura 17). Concluíram que o uso de termografia infravermelha, juntamente com um estudo de nivelamento do terreno, aumenta a precisão e eficácia dos estudos de drenagem. A análise térmica das áreas de depressão e de queda permitiu definir as zonas do terreno onde o escoamento das águas se realizava de forma correta.

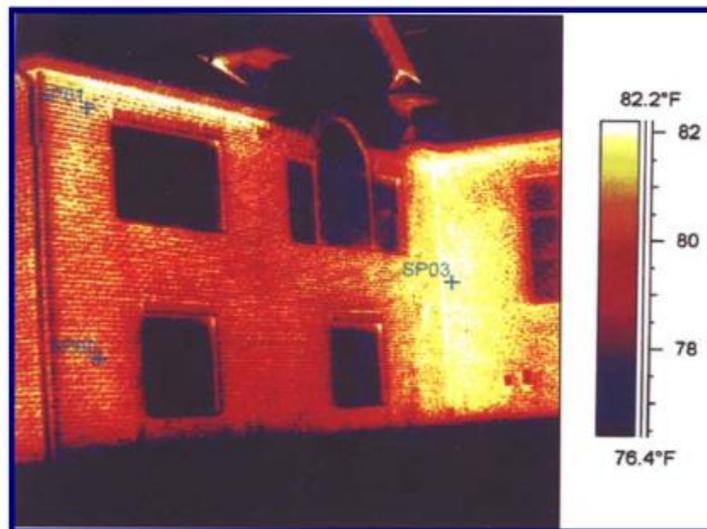
Figura 17 – Detecção de áreas com acúmulo de água em um edifício histórico da Turquia.



Fonte: Modificada de Tavukçuoğlu *et al.* (2005)

Kominsky *et al.* (2006) empregou também a termografia como complemento da inspeção visual para a identificação de umidade em paredes de tijolo cerâmico (ver Figura 18) e madeira. A análise visual do termograma foi o critério para a seleção das áreas onde foi feito o exame invasivo com o uso de medidores de umidade. Concluíram que a termografia infravermelha qualitativa, aliada ao informe de inspeção visual, junto com a comprovação quantitativa utilizando medidores de umidade é um procedimento eficaz para detectar anomalias de umidade em envelopes de construção.

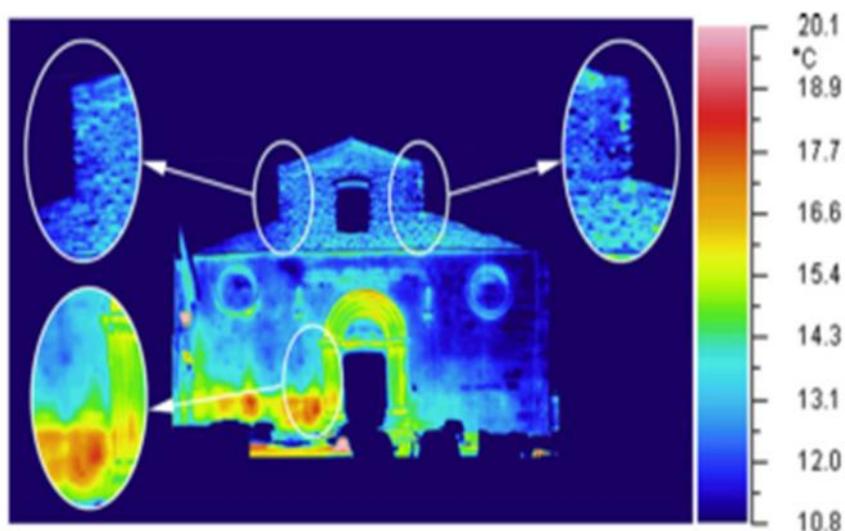
Figura 18 – Identificação de umidade em paredes de tijolos.



Fonte: Modificada de Kominsky *et al.* (2006).

Bisegna *et al.* (2014) comparou as informações visuais e as imagens termográficas de um prédio histórico em anos diferentes e conseguiu reconhecer a zona onde foram realizados os trabalhos de reparação, devido às diferenças na textura da alvenaria. Além disso, identificaram-se zonas de formação de fissuras e de falta de homogeneidade entre os diferentes materiais utilizados. (Ver Figura 19).

Figura 19 – Identificação de zonas reparadas e fissuras.



Fonte: Modificada de Bisegna *et al.* (2014)

Nota-se que a análise visual do termograma é utilizada como complemento das inspeções visuais e como ensaio prévio a outros testes. A patologia que, majoritariamente tem sido identificada com este critério é a umidade, pelas diferenças de temperatura geradas pela evaporação da água. Esta forma de análise por si só, é muito subjetiva e depende, em grande medida, da experiência do termografista. Baseia-se em encontrar mudanças de temperaturas em áreas com suspeita de presença de defeitos.

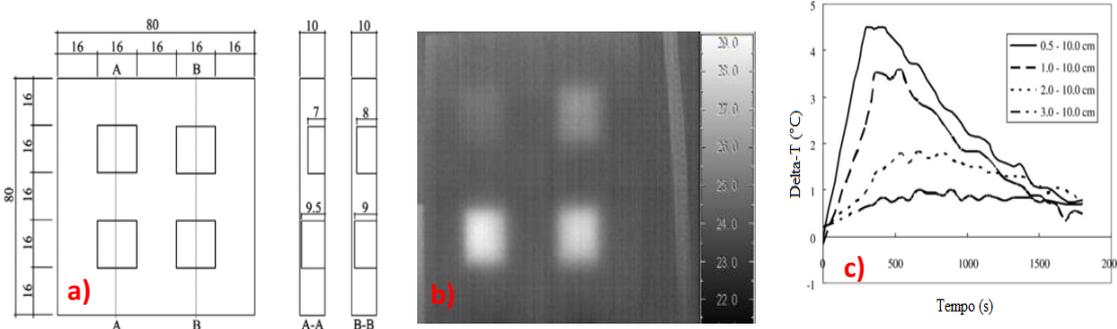
2.6.2 Termografia quantitativa – ativa

2.6.2.1 Delta-T

Na maioria dos estudos que realizam análise quantitativa, utilizam o Delta-T como parâmetro de identificação do defeito. O Delta-T é calculado como a diferença de temperatura da área com defeito menos a temperatura da área sem defeito ou normal. Nos estudos de termografia ativa aplicados a materiais e elementos da construção, o aquecimento é feito, geralmente, através de lâmpadas ou resistências elétricas, em períodos longos e contínuos (pulso longo), com o objetivo de estudar o aquecimento e o arrefecimento do material ou elemento.

No estudo de laboratório realizado por Cheng *et al.* (2008) foram avaliadas placas de concreto com vazios cúbicos no seu interior, para avaliar a influência da profundidade do defeito (dimensão lateral) a partir do comportamento dos valores do Delta-T. Na Figura 20, percebe-se o design da placa de concreto, o termograma e o comportamento do Delta-T no ciclo de aquecimento-arrefecimento. Observe-se como, para um mesmo tamanho de defeito (10cm) e igual intensidade do fluxo de calor, os defeitos mais próximos da superfície (menor profundidade) apresentaram maiores valores de Delta-T. Nota-se também que foi possível identificar vazios a uma profundidade de 3cm. Os valores do Delta-T obtidos estiveram na faixa de 1 até 4,5°C para um aquecimento intenso de aproximadamente 5 minutos.

Figura 20 – Comportamento do Delta-T em uma placa de concreto com vazios no seu interior, no ciclo de aquecimento-arrefecimento. (a) Design da placa de concreto. (b) Termograma. (c) Delta-T dos vazios para diferentes profundidades.



Fonte: Modificada de Cheng *et al.* (2008)

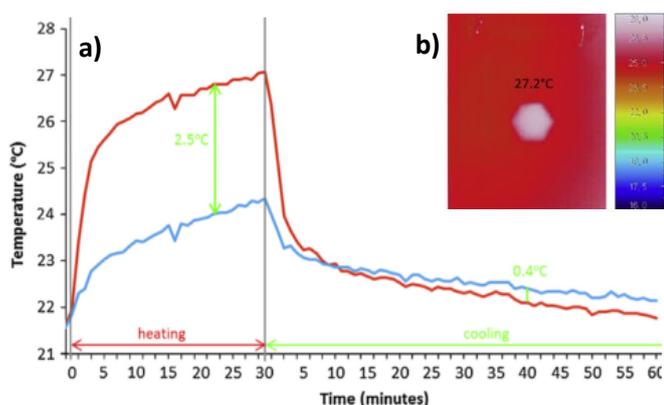
Nowak e Kucypera (2010), utilizando a termografia ativa, conseguiram identificar, a partir do Delta-T (contraste absoluto) e uma função de contraste (contraste padrão), a presença de ferro e poliéster dentro de uma parede. O experimento foi realizado em laboratório e a análise foi feita durante a etapa de arrefecimento. Concluíram que, com a gravação sequencial de termogramas e com a análise da distribuição de temperatura sobre a superfície da placa ensaiada, é possível identificar os materiais ocultos nela, ou seja, defeitos pela presença de outros materiais no interior.

Cerdeira *et al.* (2011) analisou a possibilidade de empregar a termografia na avaliação de descolamentos em revestimentos com placas de granito mediante um estudo de laboratório. Para isso, construíram uma parede de tijolo cerâmico com uma camada de argamassa, na qual colocaram defeitos predefinidos de geometria e tamanhos diferentes para simular

problemas de aderência com a placa de granito. Para a parede que foi aquecida, concluíram que, quanto mais finas são as placas, mais eficiente é a técnica empregada para a identificação dos defeitos. Seus resultados mostraram que, com placas de 20mm de espessuras e com uma diferença de 10°C entre o ar interno e externo, com a metodologia empregada conseguiram localizar defeitos até 90mm de diâmetro. Apesar de ter encontrado limitações com a termografia de infravermelho para a identificação de defeitos em paredes, concluíram que é possível estabelecer normas para a aceitação e rejeição desses revestimentos e condições para a criação de bases de dados com a evolução temporal da análise térmica do edifício.

Freitas, S *et al.* (2014) avaliou um descolamento no revestimento de gesso, a partir da criação de um vazio entre a camada de revestimento e a alvenaria. Os autores perceberam que o Delta-T foi positivo durante a etapa de aquecimento e negativo durante a etapa de arrefecimento, com valores médios de 2,5 e 0,4 °C, respectivamente. A Figura 21 mostra o comportamento da temperatura no ciclo direto e o termograma correspondente aos 30 minutos.

Figura 21 –Análise do Delta-T em descolamento de gesso, no ciclo de aquecimento e arrefecimento. (a) Comportamento da temperatura. (b) Termograma.



Fonte: Modificada Freitas, S *et al.* (2014).

Concluíram que a termografia é uma ferramenta útil para o diagnóstico não destrutivo de descolamento de gesso e pode facilitar a detecção precoce, desde que suas limitações sejam levadas em consideração. (FREITAS, S *et al.*, 2014)

Caldeira e Padaratz (2015) realizaram um estudo de detecção de danos na aderência entre concreto e polímero reforçado com fibra (PRF), em corpos de prova de concreto e

argamassa colados externamente com PRF utilizando o Delta-T (contraste absoluto). Foram inseridos discos de EPS (poliestireno expandido) para simular os danos. Os maiores valores de Delta-T ($3,7^{\circ}\text{C}$) foram obtidos quando a imagem foi captada para uma amostra aquecida no sentido PRFV/Concreto por lâmpada incandescente.

Cotič *et al.* (2015) estudou a aplicabilidade e as limitações da detecção de vazios e descolamentos no interior de uma placa de concreto a partir do Delta-T (contraste) e da simulação numérica e concluíram que é possível visualizar os vazios e descolamentos em concreto cujo tamanho é igual ou maior do que a camada de cobertura de concreto na frente do defeito. Os máximos valores de Delta-T obtidos para o aquecimento com lâmpadas foram de aproximadamente 6°C para defeitos de 8cm com profundidade de 1,5cm. O mesmo defeito com profundidade 4,5cm os valores de Delta-T ficaram próximos de zero.

A análise destes e outros estudos que empregam o Delta-T como critério de identificação de defeitos levam à conclusão que este parâmetro não pode ser usado por se só, para este fim, já que o seu valor vai depender fortemente da forma e do tipo de aquecimento, além das características dos elementos. Portanto, para a formulação de um critério de identificação de defeitos, é preciso incluir outros parâmetros que ajudem a quantificar o fluxo de calor e as características dos elementos.

2.6.2.2 Representação gráfica e mensuração de defeitos

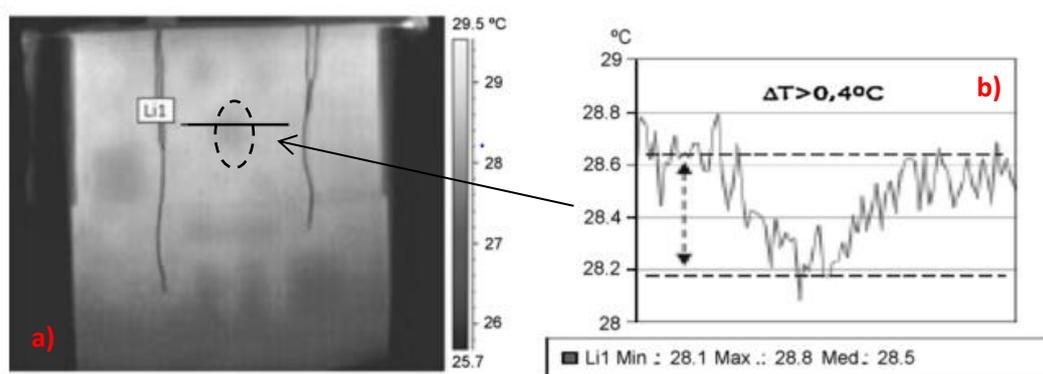
Para a determinação do Delta-T são selecionados pontos ou áreas no termograma para obter os valores médios de temperatura que serão utilizados no cálculo. As técnicas de representação gráfica se baseiam na utilização dos valores de temperaturas de linhas e áreas, vinculados à posição (x,y) dos pixels, para posteriormente, construir gráficos em 2D ou 3D. Além da determinação do Delta-T, diversos estudos utilizam a representação gráfica como ferramenta na mensuração dos defeitos.

A distribuição da temperatura da superfície do material que fica diante de um defeito tem forma de onda, comparada à área vizinha com material homogêneo (NOWAK e KUCYPERA, 2010). Dependendo do tipo de defeito e da sua capacidade térmica, a

distribuição de temperatura tem um desvio para acima ou para abaixo em forma de onda para a zona homogênea.

Tem-se desenvolvido diferentes estudos que utilizam a representação gráfica na identificação e caracterização de defeitos. Para isso, Cerdeira *et al.* (2011) utilizou a linha (Li1) de temperatura que atravessa a zona com defeito (ausência de argamassa na parte posterior da placa) da parede revestida com placas de granito, o que pode ser observado na Figura 22. Este estudo foi desenvolvido no laboratório e a parede apresentada se corresponde com um ciclo de aquecimento com lâmpadas infravermelhas na parte traseira da parede.

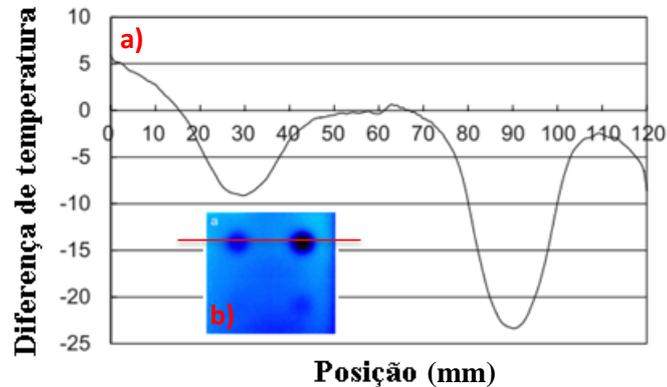
Figura 22 – Representação do comportamento da linha de temperatura que atravessa o defeito na parede revestida com granito. (a) Termograma. (b) Valores de temperatura.



Fonte: Cerdeira *et al.* (2011).

Observe-se que, neste caso, a partir da representação gráfica se determinou o valor do parâmetro Delta-T, ou seja, a representação gráfica serviu de ferramenta auxiliar na caracterização do defeito. Choi *et al.* (2008) no seu estudo com termografia modulada, utilizou este mesmo conceito para determinar o tamanho e posição dos defeitos (furos) em uma placa de aço (Figura 23), mostrado, no gráfico, a diferença de temperatura (referente à temperatura média da placa) em relação à posição.

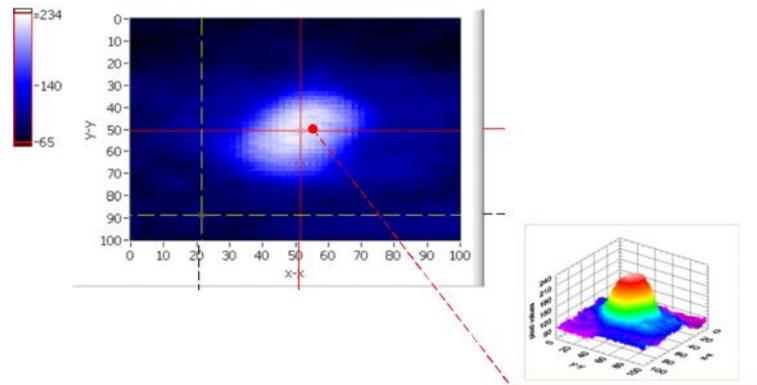
Figura 23 – Representação do comportamento da linha de temperatura que atravessa dois defeitos na placa de aço. (a) Valores de Delta-T. (b) Termograma.



Fonte: Modificada de Choi *et al.*(2008).

Em relação à representação gráfica em 3D, foi encontrada a pesquisa do Lai *et al.* (2010), onde analisaram a deterioração de materiais compósitos de PRF-concreto colado externamente usando a termografia infravermelha quantitativa, apoiado na representação gráfica. Na Figura 24 se pode observar a técnica empregada.

Figura 24 – Representação em 3D dos valores de temperatura do termograma da superfície do concreto.



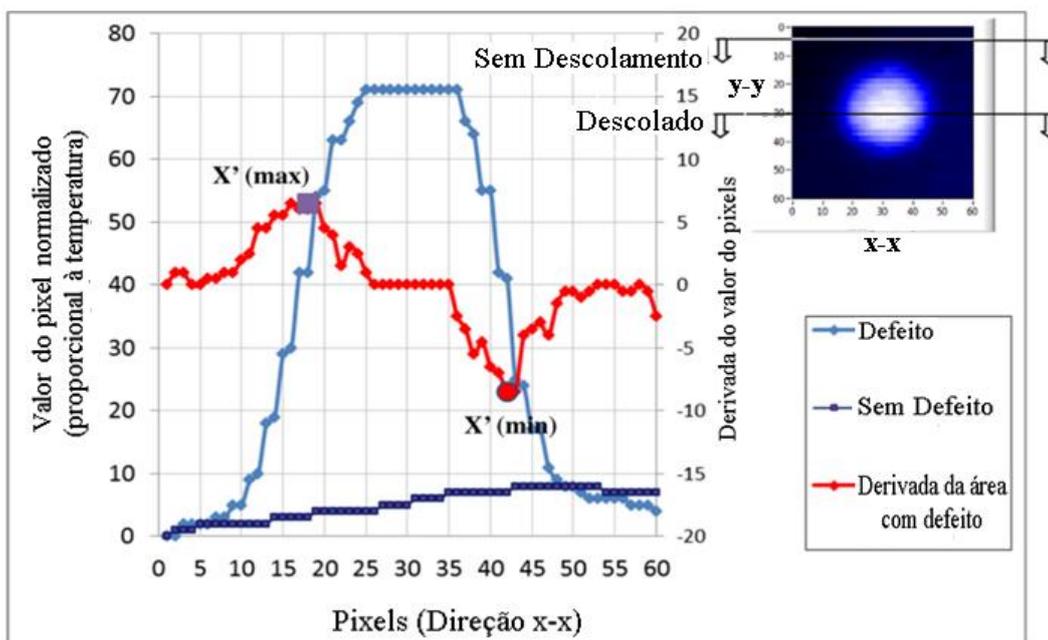
Fonte: Modificada de Lai *et al.* (2010).

Nesta pesquisa o objetivo da representação foi calcular as dimensões dos defeitos a partir das linhas de temperaturas que atravessam o defeito. Os resultados experimentais mostraram que os tamanhos dos defeitos determinados por termografia (a partir da representação gráfica dos valores dos pixels obtidos dos termogramas) se encontravam em

boa concordância (precisão de 88%) com a falha real, determinada após tirar a camada de PRF por cisalhamento direto. É importante destacar que a espessura da camada de PRF foi de somente 0,165mm, o que favorece a visibilidade do defeito com a termografia.

Lai *et al.* (2015) apresentaram uma metodologia para determinar as dimensões de defeitos inseridos (isopor) em placas de concreto com revestimento em argamassa e revestimento cerâmico, baseado na determinação da derivada (máxima e mínima inclinação) da linha de temperatura que atravessa o defeito na sua área central. A Figura 25 mostra o resumo do procedimento utilizado.

Figura 25 – Metodologia para a determinação das dimensões de defeitos.



Fonte: Modificada de Lai *et al.* (2015).

O procedimento mostrado foi repetido em várias linhas atravessando o defeito no sentido vertical e horizontal até obter o total de pontos dentro do intervalo. Finalmente, os pontos dentro e fora do intervalo foram representados em um gráfico binário 2D que permitiu determinar as dimensões dos defeitos avaliados para diferentes gradientes de temperatura.

Pode-se concluir que as técnicas de representação devem ser utilizadas como complemento da inspeção visual e como técnica auxiliar na determinação do Delta-T, sendo que a mesmas ajudam na avaliação da magnitude da anomalia e a identificação do tipo de defeito. Além disso, verificou-se que através da representação gráfica das linhas que

atravessam o defeito pode ser estimado com boa aproximação as dimensões dos mesmos por meio da termografia de infravermelho.

2.6.2.3 Funções de contraste

Além do Delta-T e as técnicas de representação gráfica, na termografia ativa, empregam-se funções de contraste como ferramenta auxiliar na identificação de defeitos. Em alguns dos casos de estudos de materiais (homogêneos), o valor da função de contraste indica a presença de defeito, quando o valor do contraste de ruído é conhecido. No entanto, em estudos de materiais e elementos de construção, pelas suas características heterogêneas, se espera que esta função possa ser empregada na determinação do momento ótimo para a identificação dos defeitos.

Estas funções têm sido encontradas em outras áreas da engenharia, principalmente em pesquisa de materiais. Vavilov (2014) empregou uma função de contraste denominada “*Thermal Running Contrast*” (TRC) no estudo da sensibilidade e ruídos nas medições termográficas. Basicamente, esta função de contraste é obtida a partir da Equação 5, sendo determinada nos períodos de aquecimento. Esses valores são gerados para cada tempo e correspondem à evolução do Delta-T (temperatura da região da falha menos região sem falhas), em relação à evolução da temperatura média da placa. Com essa avaliação, espera-se identificar os momentos para a melhor identificação das anomalias.

$$TRC = \frac{T_d(t) - T_{nd}(t)}{T_a(t) - T_a(t_0)} \quad (5)$$

Onde:

TRC: “*Thermal Running Contrast*”

$T_d(t)$: temperatura da área com defeito no tempo t

$T_{nd}(t)$: temperatura da área sem defeito no tempo t

$T_a(t)$: temperatura média da superfície no tempo t

$T_a(t_0)$: temperatura média da superfície no tempo inicial t_0

t_0 : tempo inicial (começo do ciclo)

Maldague (2001) propõe outra abordagem com uma função de contraste denominada “*Thermal contrast*” (C), a qual é calculada conforme Equação 6. Observa-se que, nesse caso, o contraste é a variação de temperatura na área da anomalia em relação à evolução da temperatura da região próxima, sem anomalia.

$$C(t) = \frac{T_i(t) - T_i(t_0)}{T_s(t) - T_s(t_0)} \quad (6)$$

Onde:

TC: “*Thermal Contrast*”

$i(t)$: temperatura da área com defeito no tempo t

$T_i(t_0)$: temperatura da área com defeito no tempo t_0

$T_s(t)$: temperatura da área sem defeito no tempo t

$T_s(t_0)$: temperatura da área sem defeito no tempo t_0

t_0 : tempo inicial (começo do ciclo)

Esta função de contraste foi utilizada também por Nowak e Kucypera (2010), eles estudaram a presença de materiais ocultos em paredes. Ver Equação 7.

$$C_s = \frac{T_p(t) - T_p(t_0)}{T_{pj}(t) - T_{pj}(t_0)} \quad (7)$$

Onde:

C_s : “*Standard Contrast*”: Contraste padrão

$T_p(t)$: temperatura em qualquer ponto selecionado na superfície do material ensaiada no tempo t

$T_p(t_0)$: temperatura em qualquer ponto selecionado sobre a superfície do material ensaiada antes de estimulação térmica, no tempo t_0

$T_{pj}(t)$: temperatura no ponto de superfície sobre a área no tempo t

$T_{pj}(t_0)$: temperatura no ponto de superfície sobre a área homogênea antes da estimulação térmica, no tempo t_0

O contraste padrão, como Nowak e Kucypera (2010) denominaram ao TC, é independente do tipo de material testado; é adimensional e oscila em torno de um valor constante perto

de 1, de modo que é possível comparar os resultados de várias experiências. O Delta-T é a diferença absoluta de temperaturas, vai depender do tipo de material e das condições do ensaio. O TC varia com o tempo, no entanto o Delta-T torna-se estável em algum ponto no tempo (NOWAK e KUCYPERA, 2010).

Para extrair os limites dos defeitos locais é preciso escolher o instante de tempo adequado. Os critérios de seleção são geralmente baseados no termograma com o maior contraste térmico (LAI *et al.*, 2010), que é o diferencial de temperatura, das falhas sobre a área normal. A Equação 8 combina o tempo (t) e a espaço (ou seja, x e y) no contraste térmico.

$$C_s = \frac{T_{def}(x,y,t) - T_{def}(t_0)}{T_{sound}(t) - T_{sound}(t_0)} \quad (8)$$

$C_s(x, y, t)$ é o contraste térmico espacial em qualquer instante t; $T_{def}(x, y, t)$ é a temperatura espacial (representada por valores de pixel) em que os defeitos são encontrados em qualquer instante t; $T_{def}(t_0)$ é a temperatura espacial (representada por valores de pixel) em que os defeitos são encontrados inicialmente; $T_{sound}(t)$ é a temperatura (representada por valores de pixel) a uma determinada posição em que não há defeitos, em qualquer instante t; $T_{sound}(t_0)$ é a temperatura (representada por valores de pixel), a uma determinada posição em que não há defeitos, no instante inicialmente.

Em relação ao tempo, o Delta-T e o contraste térmico em cada ponto das zonas livres de defeitos são muito próximos uns dos outros no que se refere aos seus valores e forma de onda, ambos aumentam ou diminuem em pares, dependendo do tipo de defeito. No mesmo tipo de defeito, eles também atingem a suas temperaturas máximas e mínimas em estado emparelhado (NOWAK e KUCYPERA, 2010).

Bauer *et al.* (2016) utilizaram as funções de contraste (TRC e TC) na avaliação de descolamentos e fissuras em revestimentos cerâmicos e em revestimentos em argamassa, respectivamente, e analisaram o comportamento das funções de conjunto com o Delta-T. Os autores concluíram que os valores máximos de Delta-T e as funções de contraste nem sempre coincidem no intervalo de tempo. No entanto, observaram que os limites dos defeitos aparecem melhor definidos nos intervalos de tempo em que o crescimento da

temperatura da superfície é maior, momento que coincide com os máximos valores das funções de contraste.

2.6.3 Termografia quantitativa – passiva

2.6.3.1 Delta-T

Na termografia passiva, a análise dos defeitos através do Delta-T se torna mais complexo, pelo fato das diferenças de temperatura que identificam as prováveis anomalias ter a sua origem no fluxo de calor gerado pelas condições de exposição natural dos elementos (BAUER *et al.*, 2015). Como o fluxo de calor muda ao longo do dia os valores de Delta-T têm uma grande variabilidade, por tais motivos, devem ser analisadas as condições em que se encontra a superfície estudada, para a correta avaliação do defeito. No mínimo, faz-se necessário conhecer o sentido do fluxo de calor no momento da captura do termograma.

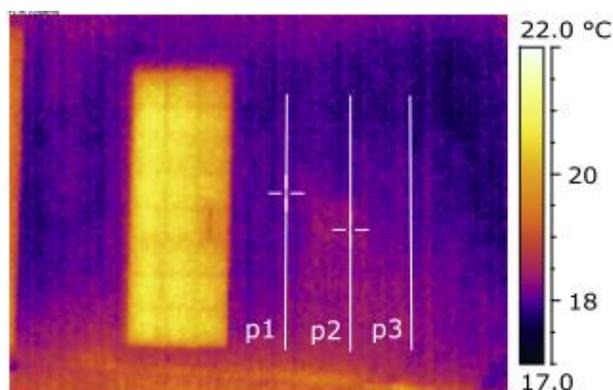
Freitas *et al.* (2014) realizaram um estudo termográfico em fachadas revestidas com argamassa e pintadas usando o Delta-T como parâmetro para avaliação das fissuras. Neste caso, foram colocados pontos para medir a temperatura na fissura e no revestimento (sem defeito). Os valores médios do Delta-T nas fissuras da fachada com orientação norte (maior incidência do sol) foram aproximadamente de $0,99^{\circ}\text{C}$ com coeficiente de variação de variação de $1,06^{\circ}\text{C}$ e foi indicado como melhor momento (máximo Delta-T) para a realização das inspeções no período seco no horário da tarde (15h). Nota-se que, quando se analisa somente o Delta-T, a variabilidade dos resultados é muito grande e os resultados levam a conclusões específicas do clima da região no dia da análise.

Este parâmetro tem sido utilizado também na detecção de umidade em fachadas de revestimentos cerâmicos, podendo-se detectar presença de umidade com valores menores que $0,5^{\circ}\text{C}$ (EDIS *et al.*, 2014). Neste caso, a comparação dos resultados da termografia infravermelha, da medição de umidade da superfície e das simulações numéricas mostrou, em algumas áreas que o maior teor de umidade (%) das cerâmicas coincidiu geralmente com maiores temperaturas na superfície, quando a inspeção foi feita após o pôr do sol.

A Figura 26 mostra este comportamento, nota-se que as áreas úmidas próximas do solo aparecem como zonas mais quente pelo fato do arrefecimento delas acontecer mais

lentamente devido ao maior calor específico. A análise foi feita avaliando o comportamento das linhas de temperatura mostradas.

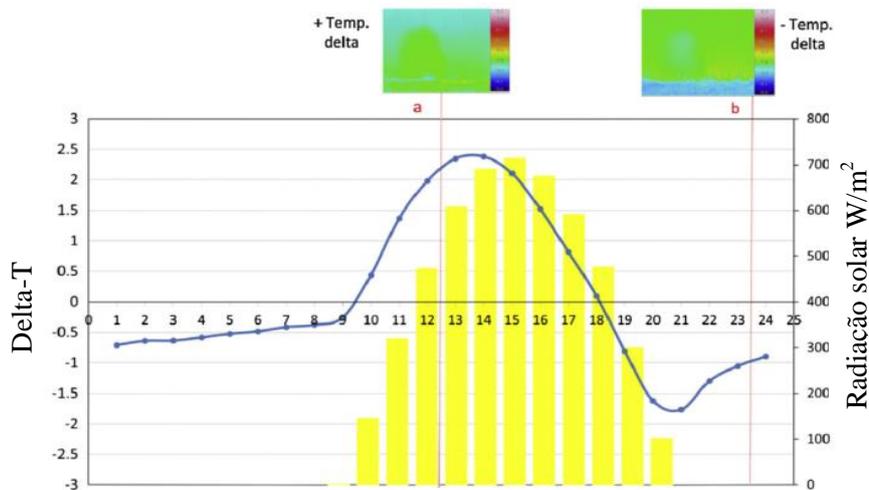
Figura 26 – Linhas utilizadas na determinação da presença de umidade em paredes com revestimento cerâmico.



Fonte: Edis *et al.* (2014).

O Delta-T foi usado na detecção de descolamento no revestimento de gesso de uma parede de alvenaria (FREITAS, S *et al.*, 2014). Foi possível identificar a patologia in situ, em dias ensolarados e nublados, durante e após os períodos de exposição à luz solar. Os descolamentos foram visíveis com temperaturas mais altas do que o resto da fachada durante o dia e com temperaturas mais baixas em comparação com a parede à medida que a temperatura do ar estava diminuindo após o pôr-do-sol. Os resultados não mostraram uma boa correlação com a simulação, os máximos e mínimos valores do Delta-T apareceram em momentos diferentes, quando comparado o resultado obtido em campo e o resultado da simulação (Figura 27). Nota-se que, neste caso, começam a ser incorporados outros parâmetros na análise (radiação global).

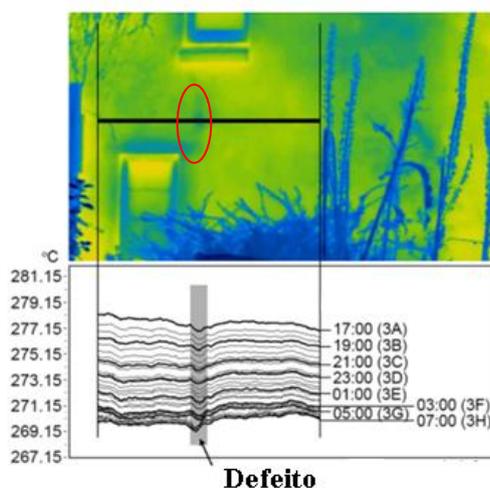
Figura 27 – Comportamento do Delta-T e a radiação solar.



Fonte: Freitas, S *et al.* (2014).

Na pesquisa realizada por Fox *et al.* (2015), foi avaliado um descolamento no revestimento em argamassa de uma edificação antiga, construída com paredes de adobe. Além disso, a parede de adobe foi comparada com outra área da edificação construída em alvenaria de pedra. O objetivo do estudo multi-temporal foi determinar os intervalos a serem usados na realização das imagens térmicas em campo. Foram acompanhadas as temperaturas das duas paredes e o comportamento da área com e sem descolamento na parede de adobe. Foi determinado o Delta-T a partir da representação das linhas de temperatura durante o final da tarde, a noite e a madrugada (17h até 5h). Como nesses horários o fluxo de calor está saindo da superfície da fachada para o exterior, o comportamento da linha em forma de onda para baixo indica a presença de um descolamento no revestimento com valores negativos (Figura 28).

Figura 28 – Representação do comportamento da linha de temperatura que atravessa o descolamento da fachada..

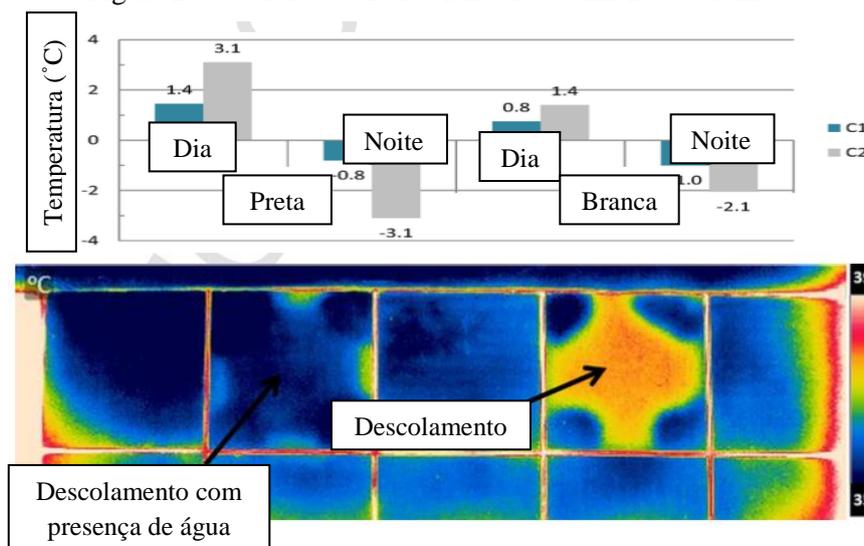


Fonte: Fox *et al.* (2015).

Concluíram que a diferença de temperatura entre imagens consecutivas variou com o tipo de construção, indicando que nenhum intervalo temporal único seria adequado a todas as circunstâncias. Os intervalos de imagem de 20 a 30 minutos mostraram algumas imagens idênticas na sequência o que não ajudou na detecção de variações dentro dos padrões térmicos. Recomendam, ainda, que os estudos levem em consideração a transmitância térmica das paredes e que sejam feitas observações *in situ* de parâmetros relacionados com a transferência de calor.

Lourenço *et al.* (2017) estudaram descolamentos e presença de umidade em revestimento de placas cerâmicas. Utilizaram placas de duas cores e mensuraram o Delta-T durante o dia e o começo da noite. A Figura 29 mostra os máximos valores de Delta-T encontrados pelos autores e o termograma correspondente às 15h no revestimento com placa de cor preta.

Figura 29 – Valores de Delta-T nos revestimentos cerâmicos.



Fonte: Lourenço *et al.* (2017)

Concluíram que não é aconselhável fazer a pesquisa termográfica com um céu coberto de nuvens e que se devem procurar os descolamentos durante o início da incidência solar na fachada (1h30 primeiro após o início da incidência) ou no início de o período de arrefecimento (na noite, depois de cerca de 1 h do início do sombreamento da parede). Comentaram também que, a umidade nas paredes pode ser identificada durante o dia como áreas com temperaturas mais baixas por causa do processo de coleta de evaporação. No entanto, observaram que a umidade e os descolamentos têm comportamentos opostos, sendo que, se ocorrem ao mesmo tempo, é possível que o diferencial térmico possa ser nulo, dificultando qualquer identificação de anomalias.

Analisando os resultados das pesquisas de termografia passiva utilizando o Delta-T como critério de comparação, se percebe que a variabilidade dos resultados é muito grande, no que diz respeito ao comportamento do Delta-T e aos valores máximos e mínimos da função.

Comprovou-se, também, que existem muitas dúvidas em relação ao melhor momento para realizar a análise termográfica, o que justifica a necessidade de realizar simulações do clima ou mensurações em campo dos parâmetros associados ao clima com o objetivo de encontrar critérios que possam ajudar na escolha do melhor momento para a avaliação dos defeitos com termografia. Conclui-se que os estudos com termografia passiva para a identificação e avaliação de patologias devem ser multi-temporais analisando-se o Delta-T

ao longo do tempo e se deve realizar uma simulação prévia do comportamento do clima nos elementos para a escolha dos termogramas com melhor visualização do defeito.

2.6.3.2 Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica de estatística multivariada de redução da dimensão dos dados que mantém a sua estrutura original. Esta ferramenta estatística transforma um conjunto arbitrário de dados em um novo conjunto de variáveis (VICINI, 2005). As novas variáveis geradas se denominam componentes principais, e possuem independência, ou seja, não estão correlacionadas entre si (REBELO, 2017).

A redução de um conjunto de dados é definida pela seguinte Equação 9:

$$A = USV^T \quad (9)$$

Onde A é a matriz de ordem $n \times m$, S é uma matriz diagonal de ordem $n \times n$ representativa dos valores singulares da matriz A, U é uma matriz de ordem $m \times n$ e V^T é a transposta de da matriz $n \times n$ (RAJIC, 2002).

A ACP, no âmbito da termografia, permite avaliar os gradientes térmicos e as regiões mais críticas de um termograma em um longo período de medição (REBELO, 2017). Para realizar a ACP na sequência de termogramas, que incluem informações de temperatura espacial ao longo do tempo, os dados termográficos 3D são rearranjados em uma matriz 2D (SFARRA *et al.*, 2017). Cada componente principal é representada por um vetor da mesma ordem, sendo possível através do software adequado a representação das componentes principais sob a forma de um mapa de cores (REBELO, 2017). O resultado da aplicação da ACP é um conjunto de imagens, sendo que cada uma dela representa uma componente principal. Cabe então, ao avaliador, analisar os componentes (imagens) e associar o comportamento das temperaturas dos materiais, elementos e detectar anomalias como reflexão, sombra, dentre outras.

A ACP tem sido utilizada na avaliação de patologias em fachadas. Problemas de umidade (GRINZATO *et al.*, 2010), avaliação de descolamentos (EDIS *et al.*, 2015a) e detecção de áreas reparadas (IBARRA-CASTANEDO *et al.*, 2017), são as principais aplicações. Lerma

et al., (2011) avaliaram a eficácia da ACP na detecção da umidade na fachada de um castelo da Bélgica, comparando a ferramenta com uma análise simples baseada nas diferenças visuais na sequência de imagens. Os autores somente conseguiram detectar as áreas de umidade através do ACP, apesar do tempo de processamento ser mais longo. Concluíram que o ACP facilita a extração de informações em diferentes alvos com base em características térmicas e espectrais, difíceis de determinar previamente, mantendo a integridade do conjunto de dados. No entanto é importante salientar que a umidade foi detectada no CP2 e CP3, componentes que mostraram as áreas com evolução desigual ao longo do tempo, com menores diferenças de temperatura entre as imagens, que podem ser indicativas de áreas que têm umidade, áreas de sombra ou materiais com baixa emissividade.

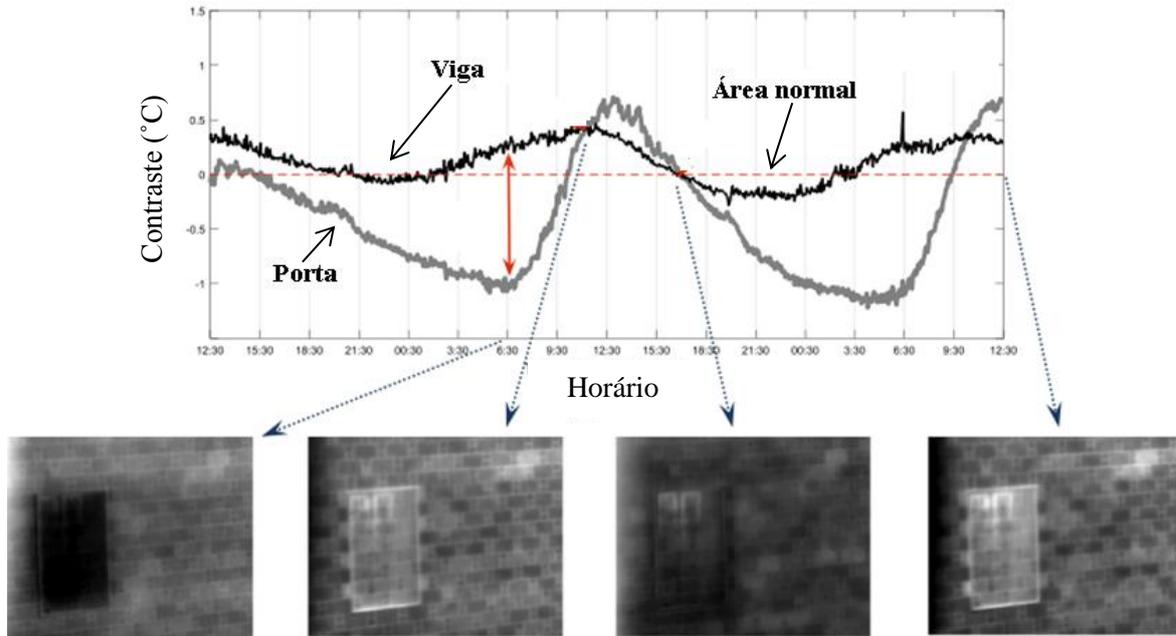
Edis *et al.* (2015) conseguiu detectar aumento da umidade em fachadas com revestimento cerâmico e concluiu que a ACP se revela eficaz com variações de umidade superiores a 36% e que a inspeção diurna, durante ou após a exposição solar, em intervalos de 0,5 h ou 1 h, é suficiente para identificar áreas com maior teor de umidade usando ACP. Neste caso, foram analisadas pequenas áreas de uma fachada com problemas de umidade capilar e descolamentos. Em relação à presença de dois tipos de defeitos, concluíram que a evolução da temperatura da superfície deve ser analisada através de uma série de termogramas para identificar o tipo de defeito, uma vez que o descolamento e a umidade geraram as mesmas indicações nos resultados (aumentaram em ambos os casos).

Grinzato *et al.* (2010) detectaram a presença de umidade a partir da identificação das áreas onde a velocidade de arrefecimento apresenta maior variação, devido à evaporação da água. Um dos principais resultados encontrados pelos autores foi a melhoria na definição do limite da área úmida, o que comprova as premissas de que esta ferramenta é eficaz e proporciona um efeito seletivo, uma vez que separa o aumento de evaporação de outras fontes de variação de temperatura (REBELO, 2017).

Ibarra-Castanedo *et al.* (2017) utilizaram a ACP no estudo de duas fachadas de prédios históricos. A Figura 30, mostra as imagens de uma das áreas estudadas onde foi detectada uma área restaurada (substituição da janela por alvenaria). Foram determinados os valores de Delta-T durante dois dias da área da janela (antiga) e da área correspondente a uma viga colocada acima da janela, em relação à área normal (área vizinha sobre a alvenaria). Nota-

se que nem sempre coincidem os máximos valores de Delta-T com o momento em que os limites dos defeitos aparecem melhor definidos (Figura 30).

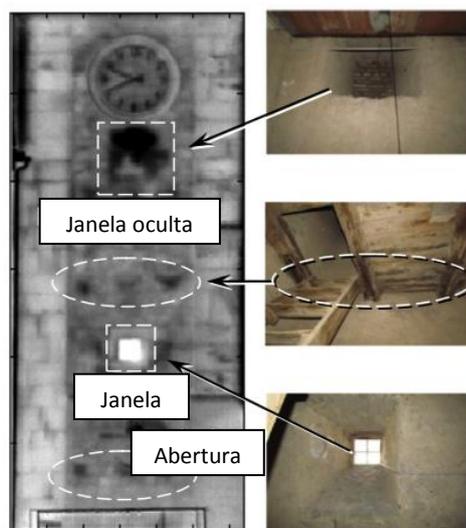
Figura 30 Utilização do ACP em fachadas, na detecção de áreas restauradas.



Fonte: Ibarra-Castanedo *et al.* (2017).

Neste caso, a ACP foi utilizada para melhorar ainda mais a visibilidade da estrutura interna, permitindo detectar a presença das vigas acima e abaixo da janela, além das lajes do prédio. Os melhores resultados da aplicação da ACP nesta pesquisa foram referentes ao estudo de outra fachada, a qual pode ser observada na imagem (Figura 31). Foi possível detectar a área restaurada e os encontros com elementos estruturais, neste caso, com as vigas da escada.

Figura 31 – Utilização do ACP na detecção de áreas reparadas e elementos estruturais.



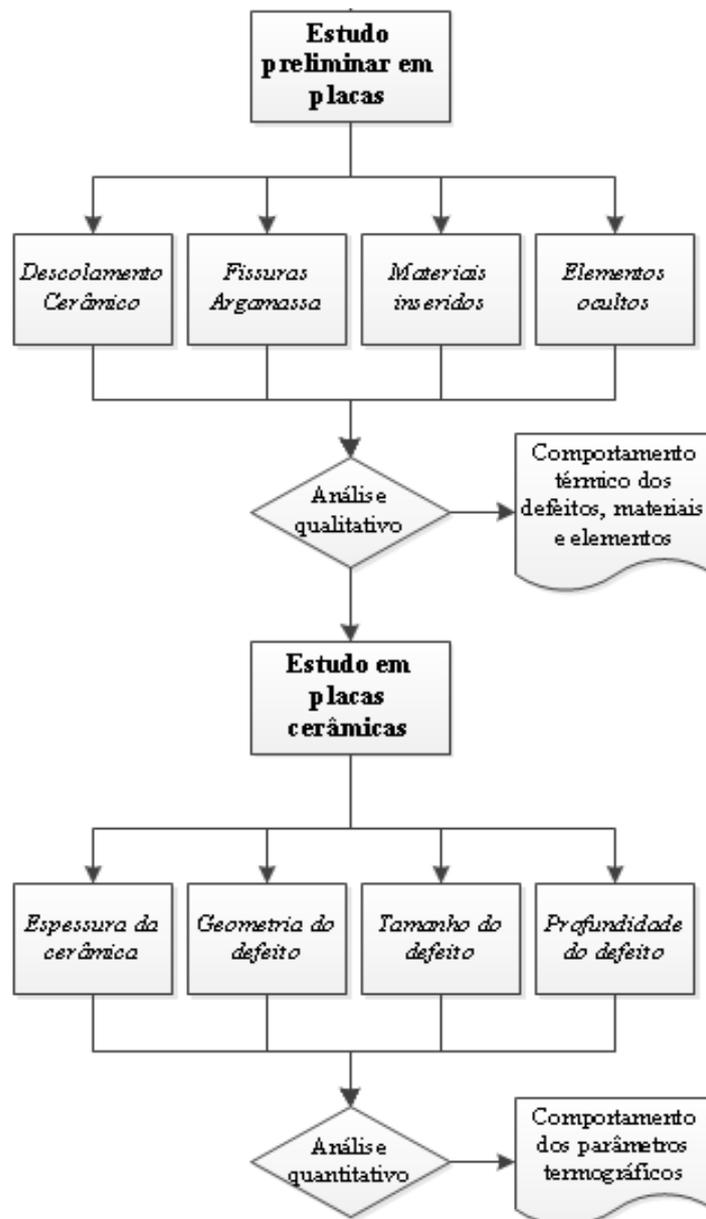
Fonte: Ibarra-Castanedo *et al.* (2017)

Pode-se concluir que, em princípio, a ACP pode contribuir com melhoras na identificação das patologias (umidade e descolamentos) e áreas reparadas, principalmente pelo fato do seu potencial de eliminar falsas indicações causadas por reflexão e sombra. É importante salientar que em situações como forte incidência solar, estes efeitos não desaparecem completamente, sendo assim, a análise baseada simplesmente na ferramenta matemática pode trazer problemas na interpretação dos dados. Além disso, é importante comentar que defeitos diferentes podem gerar indicações similares nas componentes o que justifica o fato de utilizar outras formas de análise para complementar a informação gerada pela ACP.

3 ESTUDO EM PLACAS

O estudo em placas constitui a primeira etapa experimental do trabalho (Figura 32). Nesta etapa foi analisado qualitativamente o comportamento dos defeitos, materiais e elementos nos termogramas e foram quantificados os parâmetros termográficos das principais variáveis relacionadas com os defeitos (descolamentos) em revestimentos cerâmicos.

Figura 32 – Metodologia da Etapa 1. Estudo em placas.



Fonte: Próprio autor.

Para o estudo em placas (Etapa 1) se utilizaram corpos de prova constituídos de uma placa base, moldados previamente em argamassa de cimento e areia. Foram estudados defeitos no revestimento cerâmico, e no revestimento em argamassa, além de serem inseridos materiais e corpos de prova que simularam elementos construtivos que geram anomalias nos termogramas. As características dos defeitos, materiais e elementos utilizados foram modificadas para tentar analisar as principais anomalias encontradas nos termogramas. As placas foram aquecidas artificialmente com lâmpadas infravermelhas e arrefecidas naturalmente.

A primeira parte do estudo em placas (estudo preliminar) foi qualitativa, analisou-se quais defeitos, materiais e elementos podem ser avaliados com a termografia, e a forma em que os mesmos aparecem no termograma dependendo do sentido do fluxo de calor. A segunda parte do estudo em placas (estudo em placas com revestimento cerâmico) foi quantitativa, sendo estudado somente o descolamento nos revestimentos cerâmicos. Foi analisado o comportamento dos parâmetros termográficos (Delta-T e das funções de contraste), a influência das variáveis relacionadas às condições de exposição (fluxo de calor) e às características do defeito (descolamento), nas diferentes placas com revestimento cerâmico.

3.1 ESTUDO PRELIMINAR EM PLACAS

Tabela 4 apresenta o resumo do estudo preliminar em placas. Podem ser observados os defeitos, os elementos, os tipos, as variáveis e os corpos de prova fabricados. Foram consideradas como variáveis de estudo as modificações realizadas nas placas, relativas às características do defeito ou elemento.

Baseados nos defeitos, elementos e variáveis definidas, os objetivos do estudo foram:

- Definir que tipos de defeitos ou elementos são visíveis no termograma;
- Identificar em que condições aparecem os defeitos ou elementos em relação ao fluxo de calor (direto ou reverso) e ao comportamento da superfície (aquecimento ou arrefecimento);

- Determinar como aparecem (áreas frias ou quentes) os defeitos ou elementos nos termogramas;
- Determinar se as variáveis definidas geram diferenças nos termogramas.

Tabela 4 – Resumo dos defeitos, elementos e variáveis analisadas no estudo preliminar.

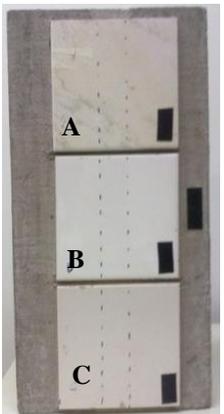
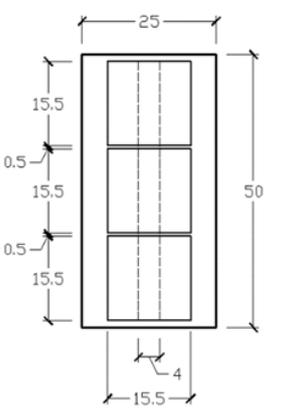
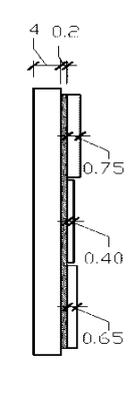
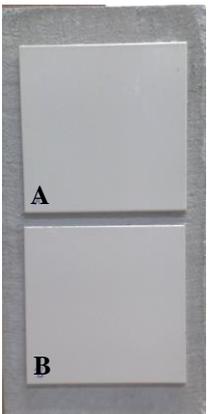
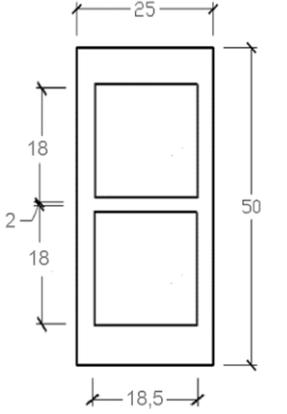
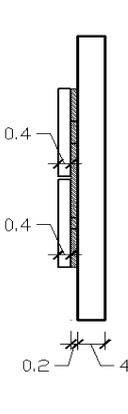
Defeitos ou elementos	Tipos	Variáveis	Placa
Defeitos em revestimento cerâmico	Descolamento	Espessura da placa cerâmica	P1
	Baixa aderência	Tempo para assentamento	P2
Defeito em revestimento em argamassa	Fissura superficial	Profundidade	P3
	Fissura oculta	Separação da superfície	P4
Elementos inseridos	Inseridos na superfície	Tipo de material	P5
	Inseridos na placa	Tipo de material	P5
Elementos ocultos	Paralelo	Tamanho	P7
	Perpendiculares		P8

Fonte: Próprio autor

Os defeitos analisados no revestimento cerâmico foram o descolamento e a baixa aderência. O descolamento simula uma anomalia de contato entre a placa cerâmica e a base, a partir da criação de um espaço vazio na região central das peças cerâmicas. O comportamento deste defeito pode ser associado ao comportamento dos descolamentos cerâmicos, principal patologia encontrada nas fachadas de Brasília, segundo estudo de Silva (2014). O segundo defeito estudado no revestimento cerâmico foi chamado de baixa aderência. Neste caso, uma das placas cerâmicas foi assentada utilizando práticas erradas que geraram valores inferiores de resistência à aderência. O assentamento realizou-se depois de transcorrido o tempo em aberto, após assentada a placa cerâmica a mesma foi movimentada para garantir uma aderência bem baixa.

A Tabela 5 mostra as características das placas com defeitos no revestimento cerâmico. Pode-se observar a imagem digital, a vista frontal e a vista lateral de cada uma das placas. A variável analisada na placa 1 foi a espessura da cerâmica, e na placa 2 (P2), o tempo para o assentamento da placa cerâmica.

Tabela 5 – Características das placas com defeitos no revestimento cerâmico. Análise do descolamento e da baixa aderência.

Placa	Imagem digital	Vista em planta	Vista lateral	Observações
P1				<p>Espessura da placa: A-7,5mm B-4,0mm C- 6,5mm</p>
P2				<p>Problemas de aderência na placa: A-Asentamento deficiente B-Asentamento correto</p>

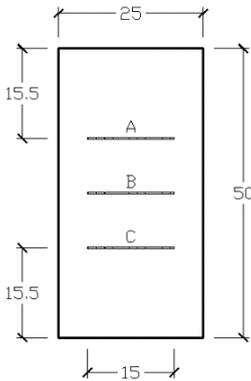
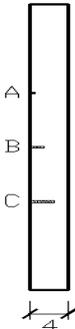
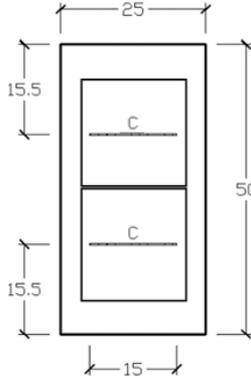
Fonte: Próprio autor.

As fissuras foram o defeito estudado no revestimento em argamassa. As fissuras na argamassa têm como objetivo, avaliar o alcance da termografia com relação à profundidade e a separação da superfície, na qual é possível observar as fissuras na argamassa.

Com as fissuras superficiais se simulou esta patologia a escala reduzida, tentou-se avaliar se a profundidade das fissuras gera diferenças no termograma. As fissuras se encontram na superfície estudada, ou seja, visíveis. No caso das fissuras ocultas, procurou-se avaliar se é possível detectar com a termografia este tipo de problemas, sendo que as fissuras se encontram por trás de camadas de argamassa de diferentes espessuras.

A Tabela 6 mostra as características das placas com defeitos no revestimento em argamassa. Pode-se observar a imagem digital, a vista em frontal e a vista lateral de cada uma das placas. A variável analisada na placa 3 (P3) foi a profundidade da fissura, e na placa 4 (P4) a separação da superfície (espessura da camada de argamassa).

Tabela 6 – Características das placas com defeitos no revestimento em argamassa. Análise da profundidade da fissura e da espessura da camada de argamassa.

Placa	Imagem digital	Vista em planta	Vista lateral	Observações
P3				Profundidade da fissura: A- 5mm B- 15mm C- 25mm Espessura da fissuras: 2,5mm
P4				Profundidade da fissura: C- 25mm Espessura da fissuras: 2,5mm Espessuras da camadas de argamassa: Superior: 2,5mm Inferior: 5mm

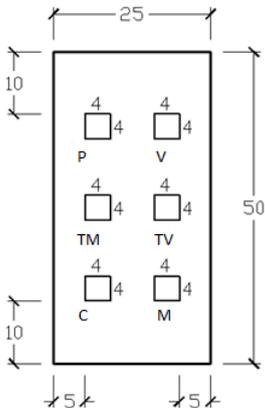
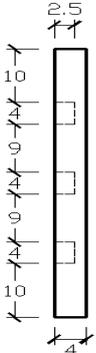
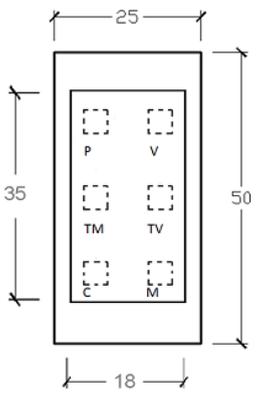
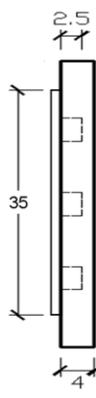
Fonte: Próprio autor.

Os elementos inseridos têm por objetivo simular a presença de materiais diferentes nas fachadas. Tanto na superfície, quanto no interior da vedação vertical, a variedade de materiais presentes na mesma é um dos principais fatores que pode gerar anomalias nos termogramas devido às diferenças nas propriedades térmicas.

Na superfície das fachadas é comum encontrar além do revestimento, materiais e elementos diferentes como as esquadrias, os elementos de proteção e sombreamento, dentre outros. Na vedação vertical, podem ficar presentes elementos estruturais, instalações, dentre outros que vão gerar também anomalias nos termogramas. Para estudar de forma simplificada este fenômeno foram construídas as placas 5 (P5) e 6 (P6), onde foram inseridos materiais com propriedades térmicas bem diferentes. Na placa 5 (P5) os materiais se encontram na superfície, e na placa 6 (P6) os materiais se encontram cobertos por uma camada de argamassa de 2,5mm.

A Tabela 7 mostra as características das placas com elementos inseridos. Pode-se observar a imagem digital, a vista frontal e a vista lateral de cada uma das placas. A variável analisada em ambos os casos (P5 e P6) foi o tipo de material (cerâmica, concreto, madeira, poliestireno expandido, além da criação de um vazio).

Tabela 7 – Características das placas com presença de elementos ocultos. Análise do tipo de material inserido.

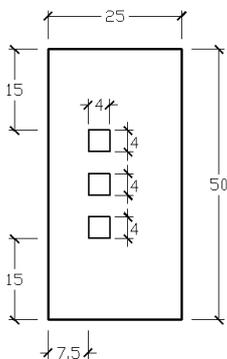
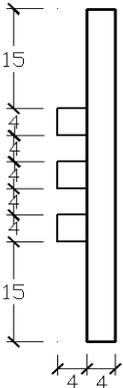
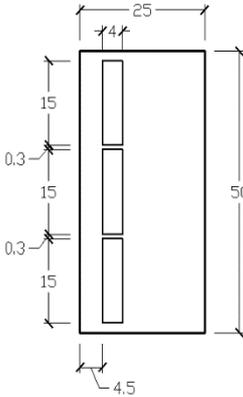
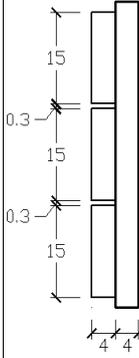
Placa	Imagem digital	Vista em planta	Vista lateral	Observações
P5				<p>Materiais:</p> <ul style="list-style-type: none"> P- Poliestireno expandido V- Vazio TM- Tijolo Maciço TV- Bloco cerâmico C- Concreto M- Madeira
P6				<p>Materiais:</p> <ul style="list-style-type: none"> P- Poliestireno expandido V- Vazio TM- Tijolo Maciço TV- Bloco cerâmico C- Concreto M- Madeira

Fonte: Próprio autor.

Nas fachadas comumente podem ser encontrados por trás da vedação elementos estruturais de concreto, escadas, caixas de água, dentre outros que formam parte do interior do edifício (considerados elementos ocultos) e que geram áreas de temperaturas diferentes ao resto da fachada nos termogramas. Este fenômeno é considerado uma desvantagem que precisa ser analisada, porque a diferença de temperatura que geram estes elementos pode ser confundida com as diferenças geradas por uma manifestação patológica no revestimento. Este último fenômeno é considerado uma vantagem, quando o objetivo é encontrar uma estrutura oculta na fachada ou por trás dela, sendo esta outra das aplicações importantes da termografia. Em ambos os casos é de reconhecida importância analisar o fenômeno.

A Tabela 8 mostra as características das placas com presença de elementos ocultos. Pode-se observar a imagem digital, a vista frontal e a vista lateral de cada uma das placas. A placa 7 (P7) simula a presença de elementos perpendiculares à superfície, e a placa 8 (P8) simula a presença de elementos paralelos à superfície, em ambos os casos na superfície traseira.

Tabela 8 – Características das placas com revestimento de argamassa com presença de elementos ocultos.

Placa	Imagem digital	Vista em planta	Vista lateral	Observações
P7				Foram cortados e inseridos pedaços de corpos de prova
P8				Foram inseridos pedaços de corpos de prova de 4x4x16cm

Fonte: Próprio autor.

3.2 ESTUDO EM PLACAS COM REVESTIMENTO CERÂMICO

O estudo da metodologia em placas com revestimento cerâmico constitui a segunda parte da Etapa 1 (Figura 32). Foi analisada a influência das variáveis relacionadas com: as

condições de exposição (intensidade do fluxo de calor), as características do revestimento (espessura da placa) e as características do defeito (geometria, tamanho e profundidade) no comportamento dos parâmetros termográficos (Delta-T e das funções de contraste). A Tabela 9 apresenta o resumo do estudo em placas com revestimento cerâmico. Podem ser observadas as variáveis do estudo e os corpos de prova fabricados (placas).

Tabela 9 – Resumo dos defeitos, elementos e variáveis analisadas no estudo preliminar.

Defeitos ou elementos	Tipos	Variáveis	Placas
Defeitos em revestimento cerâmico	Descolamento	Espessura da placa cerâmica	P10
		Tamanho do defeito	P11
		Profundidade do defeito	P12
		Geometria do defeito	P13

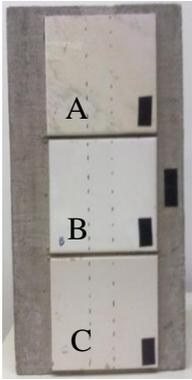
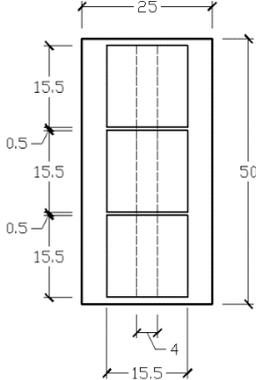
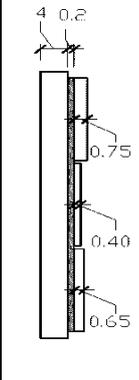
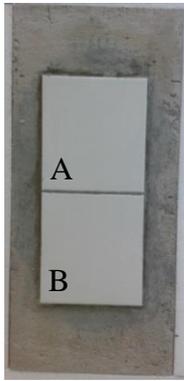
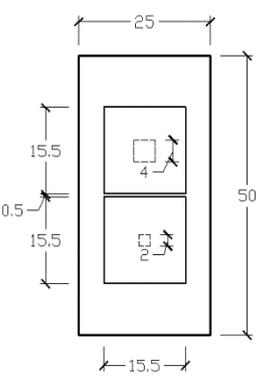
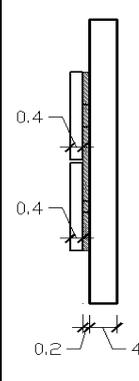
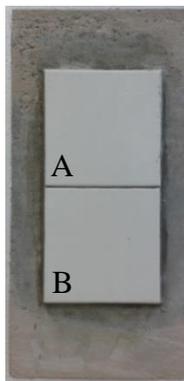
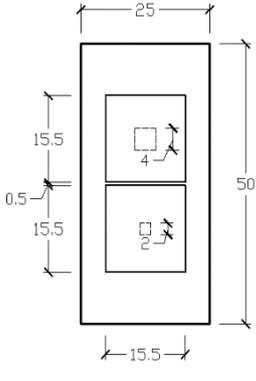
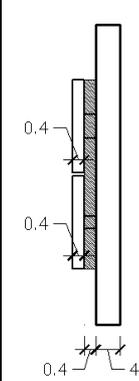
Fonte: Próprio autor.

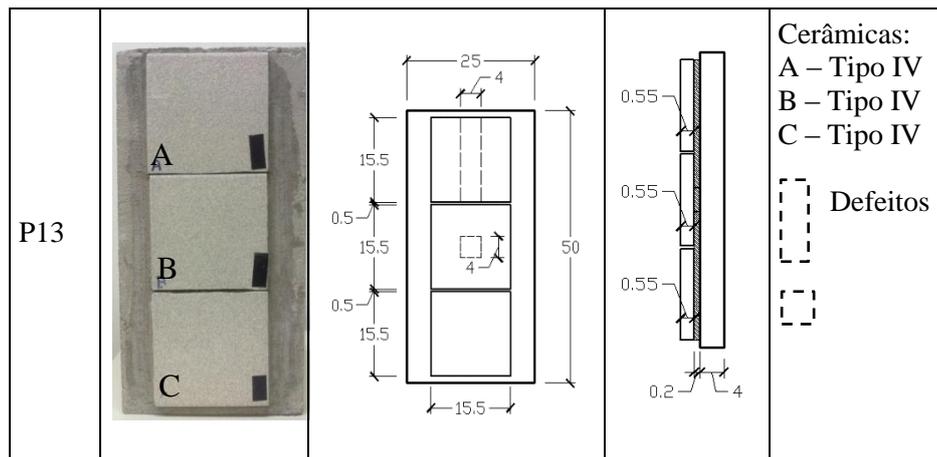
Baseados nas variáveis definidas, os objetivos específicos do estudo foram:

- Quantificar os parâmetros termográficos nas placas;
- Explicar o comportamento dos parâmetros termográficos;
- Determinar se as variáveis definidas geram diferenças significativas no Delta-T;
- Associar o comportamento dos parâmetros com as condições de avaliação em campo.

A Tabela 10 mostra as placas construídas para o estudo dos defeitos (descolamentos) nos revestimentos cerâmicos. A placa 10 (P10) foi utilizada para avaliar a influência da espessura da cerâmica. Na placa 11 (P11) se analisou a influência do tamanho do defeito. A influência da espessura do defeito (dimensão lateral do defeito) foi avaliada a partir da comparação das placas 11 (P11) e 12 (P12). Na placa 13 (P13) se analisou a influência da geometria do defeito.

Tabela 10 – Características das placas com revestimento cerâmico. Estudo quantitativo.

Placa	Imagem digital	Vista em planta	Vista lateral	Observações
P10				Cerâmicas: A – Tipo I B – Tipo II C – Tipo III - - - Defeito
P11				Cerâmicas: A – Tipo II B – Tipo II - - - Defeito
P12				Cerâmicas: A – Tipo II B – Tipo II - - - Defeito



Fonte: Próprio autor.

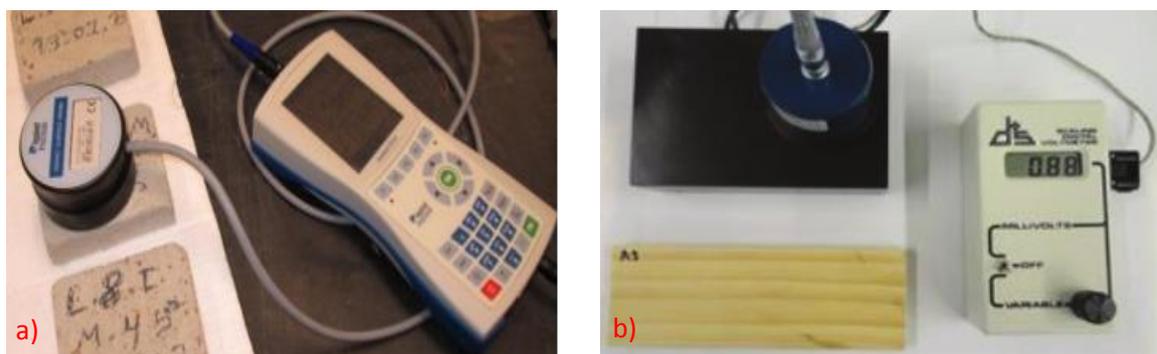
As placas cerâmicas foram identificadas com as letras A, B e C de cima para baixo em cada placa estudada. Nos gráficos de resultados aparecem citadas como: Cerâmica A (CA), Cerâmica B (CB), Cerâmica C (CC). Nas observações foram classificadas as placas cerâmicas por tipo (I, II, III e IV) de acordo com suas propriedades.

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais empregados na confecção dos corpos de prova foram: argamassa de cimento e areia artificial para a fabricação da placa de 50x25x4cm, argamassa colante ACIII e placas cerâmicas. Os ensaios de caracterização física e mecânica das argamassas foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB).

As principais propriedades térmicas dos materiais foram avaliadas nos laboratórios do Instituto Superior Técnico de Lisboa e da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. As amostras de argamassa e das placas cerâmicas foram enviadas ao Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, onde foram feitos os ensaios de condutividade térmica. Para medir a condutividade foi utilizado o equipamento ISOMET2114 (Figura 33a). Na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto foram feitos os ensaios de emissividade. Foi utilizado um emissômetro do tipo: “*Devices and Services Emissometer with Scaling Digital*” (Figura 33b).

Figura 33 – Equipamentos para mensuração das propriedades térmicas. (a) Condutivímetro ISOMET2114. (b) Emissômetro do tipo: “Devices and Services Emissometer with Scaling Digital”.



Fonte: (a) Soares *et al.* (2014). (b) Barreira *et al.* (2015a).

A Tabela 11 mostra as propriedades das argamassas e das placas cerâmicas utilizadas no estudo em placas com revestimento cerâmico.

Tabela 11 – Caracterização das placas cerâmicas e as argamassas utilizadas no estudo em placas com revestimento cerâmico.

Materiais	Resistência à compressão (MPa)	Densidade endurecida (Kg/m³)	Absorção de água (%)	Condutividade térmica (W/m.K)	Emissividade
Cerâmica: Tipo I	-	2170	1,4	0,5247	0,84
Cerâmica: Tipo II	-	1740	2,2	-	0,80
Cerâmica: Tipo III	-	1780	1,8	0,3345	0,82
Cerâmica: Tipo IV	-	2070	1,6	0,3924	0,82
Argamassa da placa (Ag)	14	1690	2,4	0,9851	0,91
Argamassa colante (ACIII)	6	1600	3,4	-	-

Fonte: Próprio Autor.

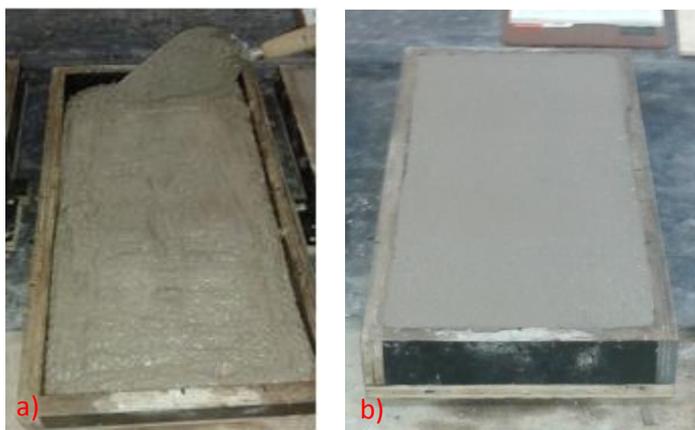
Em relação às propriedades físicas, especificamente a absorção de água, todas as placas cerâmicas podem ser classificadas como Grês. Os valores de condutividade térmica podem ser considerados relativamente baixos, se comparados com os apresentados pela ABNT NBR 15220: 2003 para o cálculo do desempenho térmico de paredes e coberturas. No caso da argamassa comum, a norma define 1,15 W/m.K. Para as placas cerâmicas não existe referência na norma, sendo definido para os tijolos ou telhas cerâmicas uma faixa entre 0,7

e 1,05 W/m.K. O valor de emissividade obtido tanto na argamassa quanto nas placas cerâmicas foram similares aos valores experimentais obtidos por Barreira *et al.* (2015a).

3.4 CONSTRUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova construídos foram placas de argamassa (Ag) com dimensões de 50 x 25 cm e espessura de 4 cm, feitas em formas de madeira. A Figura 34 mostra o procedimento para a fabricação das placas. Depois da fabricação, as placas foram colocadas em uma câmara úmida durante 28 dias e posteriormente secadas em um forno a 50 °C durante três dias.

Figura 34 – Corpos de prova desenvolvidos para o estudo (placas de argamassa). (a) Preenchimento com argamassas. (b) Placa com acabamento final na forma.

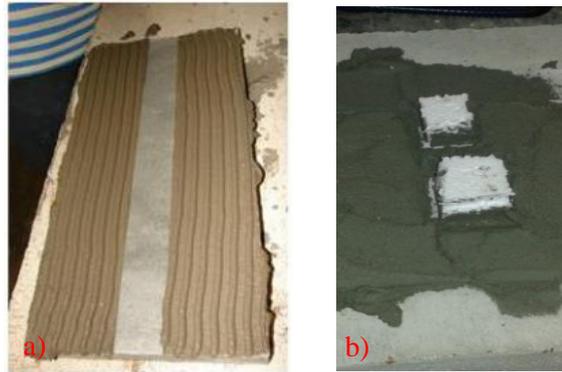


Fonte: Próprio autor.

Nas placas com revestimento cerâmico, após a fabricação e cura da placa de argamassa foram assentadas as placas cerâmicas com argamassa colante. Foi utilizada uma espessura final de aproximadamente 2mm para a camada de argamassa colante, exceto na placa 12, onde, duplicou-se o valor da espessura para o estudo dessa variável.

Os defeitos na argamassa colante foram criados com o auxílio de dois procedimentos: (a) colocando sobre a placa antes da aplicação da argamassa, uma fita com as dimensões do defeito a estudar, a qual, quando removida recolhe toda a argamassa colocada sobre ela, deixando, bem definida a zona do defeito (ver Figura 35a); (b) colocando cubos de poliestireno expandido, os quais eram cortados com as dimensões do defeito e fixados manualmente até concluir a aplicação da argamassa (ver Figura 35b).

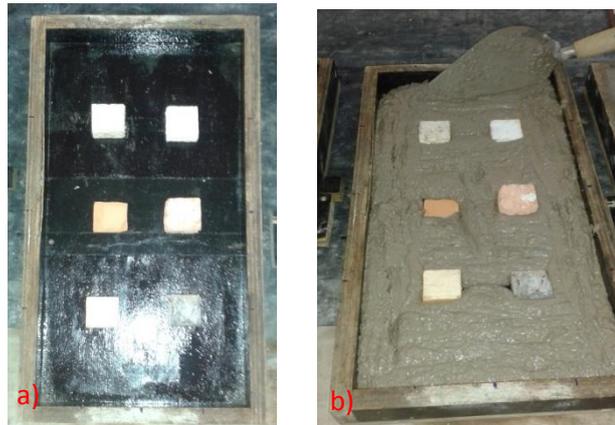
Figura 35 – Procedimentos para inserir os defeitos na argamassa colante. (a) Procedimento com a utilização da fita. (b) Procedimento com a utilização de poliestireno expandido.



Fonte: Próprio autor.

Nas placas que têm materiais inseridos, os mesmos foram colocados na fôrma antes da aplicação da argamassa (ver Figura 36 a,b) e nas placas que têm elementos ocultos, os corpos de prova foram encaixados com argamassa ainda em estado fresco.

Figura 36 – Procedimento para inserir materiais nas placas. (a) Colocação das amostras de materiais na forma. (b) Preenchimento com argamassa.



Fonte: Próprio autor.

As fissuras nas placas com defeitos no revestimento em argamassa foram feitas em estado endurecido, após a cura das mesmas. Utilizou-se uma serra circular para as fissuras, variando-se a profundidade do suporte até obter as profundidades desejadas (ver Figura 37). No caso em que a fissura foi coberta por argamassa, a mesma foi preenchida com isopor e logo colocada no forno até a decomposição do mesmo.

Figura 37 – Procedimento usado na criação das fissuras.

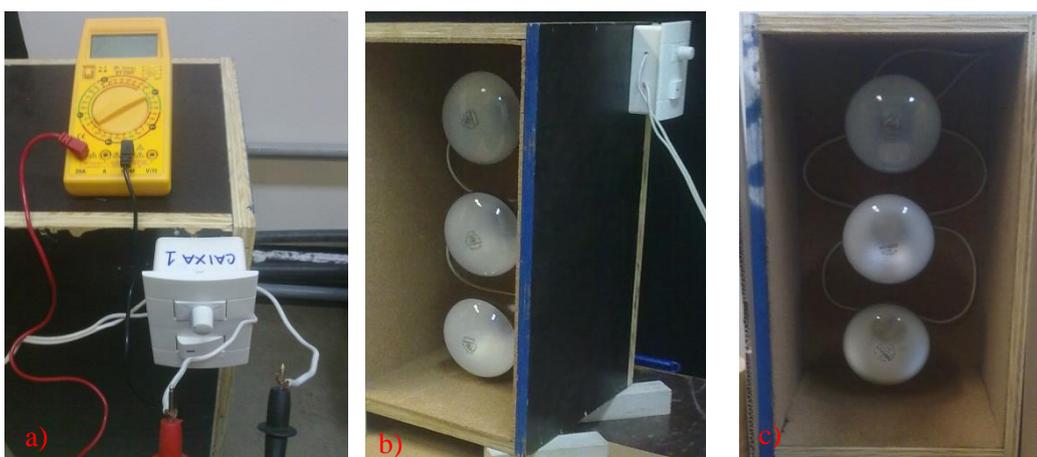


Fonte: Próprio autor.

3.5 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Foram construídos dois dispositivos para o aquecimento das placas com dimensões de 50x25x25 cm, colocaram-se três lâmpadas infravermelhas de 250W cada uma. Acoplou-se aos dispositivos de aquecimento um “dimmer” para regular a intensidade das lâmpadas, o que permitiu variar a intensidade de corrente e conseqüentemente a intensidade de fluxo de calor. O design do dispositivo de aquecimento pode ser observado na Figura 38.

Figura 38 – Dispositivo de aquecimento com lâmpadas infravermelhas. (a) Calibração da intensidade de corrente. (b) Vista do dispositivo para aquecimento com regulador de intensidade acoplado. (c) Vista frontal com a posição das lâmpadas.



Fonte: Próprio autor.

Para a realização das imagens térmicas foi utilizada uma câmera infravermelha modelo FLIR T400, com uma faixa de temperatura de -20 a 120 °C, precisão de 2%, faixa espectral de 7,5 a 13µm, com resolução de 320 x 240 pixels, com lente de 25 graus e IFOV de 1,363 mrad. Na Figura 39 se pode observar a câmera utilizada.

Figura 39 – Câmera utilizada na pesquisa.



Fonte: Próprio autor.

Para as medições de umidade e temperatura ambiente foi utilizado o Psicrômetro de umidade sem fuso com termômetro, modelo MO297. Na Figura 40 pode ser observado o equipamento.

Figura 40 – Psicrômetro medidor de umidade.



Fonte: Próprio autor.

Além da câmera térmica, se utilizaram termopares para a validação das leituras de temperatura e o controle do fluxo de calor através das placas. Empregou-se o registrador de dados modelo Pico Usb TC-08 (ver Figura 41), o qual ficou ligado a um computador durante todo o ensaio.

Figura 41 – Termopar modelo Pico-Usb usado no experimento (coletor de dados).

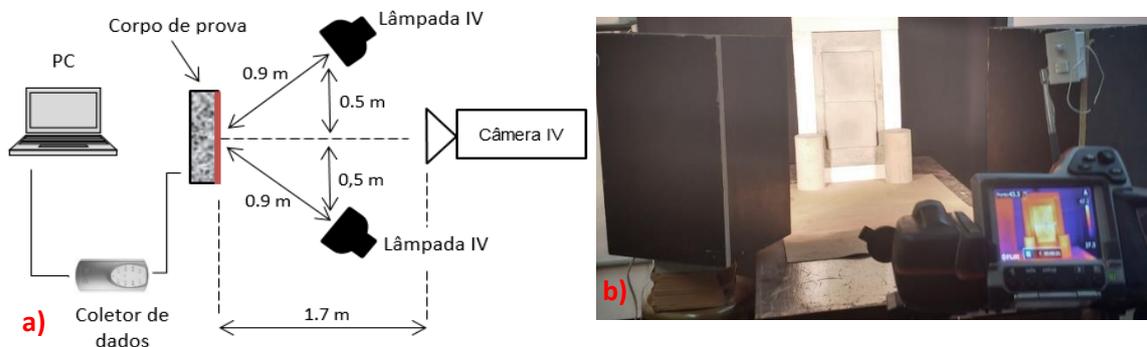


Fonte: Próprio autor.

3.6 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi dividido em dois ciclos: o ciclo direto e o ciclo reverso. No ciclo direto, o aquecimento das placas acontece pela superfície frontal, coincidindo a superfície aquecida com a fotografada pela câmera de infravermelho. A superfície foi aquecida (aquecimento) e deixada esfriar por igual período de tempo (arrefecimento). Neste ciclo, durante o aquecimento, o calor penetra pela superfície estudada, o que simula o momento em que a fachada recebe radiação solar e o sentido do fluxo é de fora para dentro da edificação. Na Figura 42 pode-se observar a distribuição do experimento e a imagem digital da montagem dos equipamentos. Empregaram-se dois dispositivos de aquecimento, o que permitiu colocar a câmera infravermelha o mais perpendicular possível à placa estudada. Nas paredes frontal e traseira da sala de laboratório foram colocadas cortinas de cor preta para diminuir problemas de reflexos no local.

Figura 42 – Ciclo direto. (a) Distribuição do experimento. (b) Imagem digital mostrando o sistema de aquecimento.



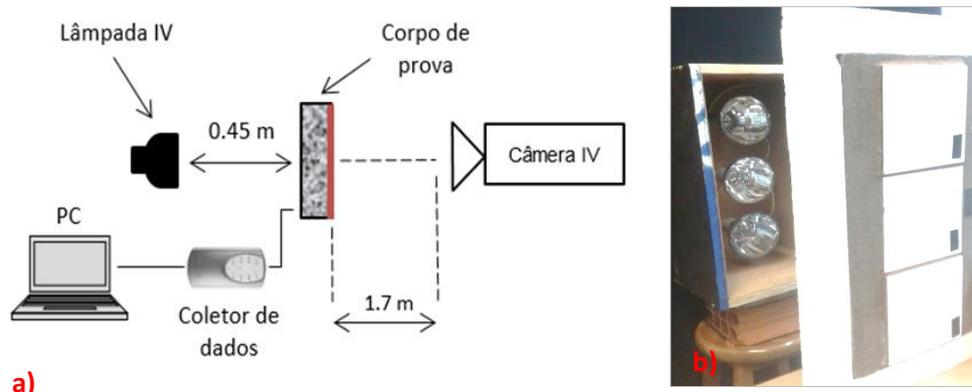
Fonte: Próprio autor.

Os dispositivos para o aquecimento se encontravam separados 90cm da superfície da placa, e a câmera foi colocada a uma distância de 1,7m. A intensidade de corrente foi regulada pelo “dimmer”, utilizando-se duas intensidades. Com a intensidade baixa (correspondeu à potência de aproximadamente 150W), e com a intensidade alta (a potência 750W) por dispositivo. Quando foi usada uma potência de 300W (dois dispositivos de 150W), denominou-se fluxo baixo, e quando foi usada uma potência de 1500W (dois dispositivos de 750W), fluxo alto.

O ciclo reverso consistiu no aquecimento das placas pela superfície traseira, neste, a superfície aquecida e a fotografada pela câmera de infravermelho não coincidem. A superfície foi aquecida (aquecimento) e deixada esfriar por igual período de tempo (arrefecimento). Neste ciclo, o calor penetra pela superfície traseira, e sai pela superfície estudada, o que simula o momento em que o calor sai da fachada, ou seja, quando o fluxo de calor vai de dentro para fora da edificação. Na Figura 43 pode ser observada a distribuição do experimento.

Para o aquecimento, empregou-se somente um dispositivo. A distância do dispositivo até a superfície da placa foi 45cm. Sendo assim, a potência utilizada no fluxo baixo 150W e no fluxo alto 750W. Tanto no ciclo direto, quanto no ciclo reverso, o ensaio foi realizado em um local, com temperatura ambiente de 25°C, sendo aceitas variações de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ para o início do experimento.

Figura 43 – Ciclo Reverso. (a) Distribuição do experimento. (b) Imagem digital mostrando o sistema de aquecimento.

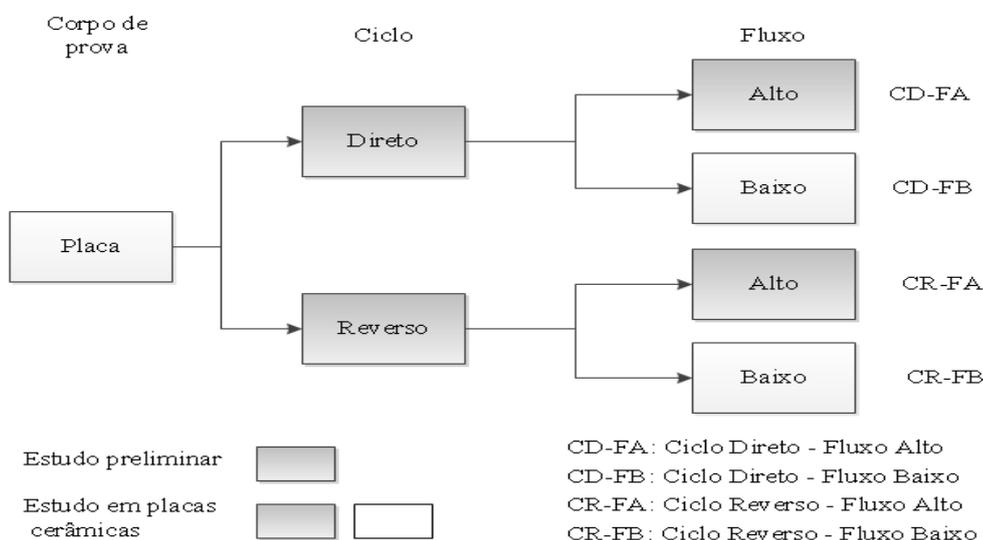


Fonte: Próprio autor.

A Figura 44 mostra o fluxograma que resume as condições de exposição das placas no estudo preliminar e no estudo em placas com revestimento cerâmico. O estudo preliminar foi realizado usando somente a condição de fluxo alto. Como a análise foi qualitativa, e o principal objetivo foi visualizar os defeitos, materiais ou elementos, a duração do experimento variou dependendo da placa e o tipo de defeito ou elemento analisado. As placas foram aquecidas até a superfície estudada ficar com temperatura próxima dos 40°C.

No estudo em placas com revestimento cerâmico, em ambos os ciclos (direto e reverso), trabalhou-se com fluxo alto e fluxo baixo. O experimento teve uma duração de 240 minutos, sendo 120 minutos de aquecimento e 120 minutos de arrefecimento.

Figura 44 – Condições de exposição das placas.



Fonte: Próprio autor.

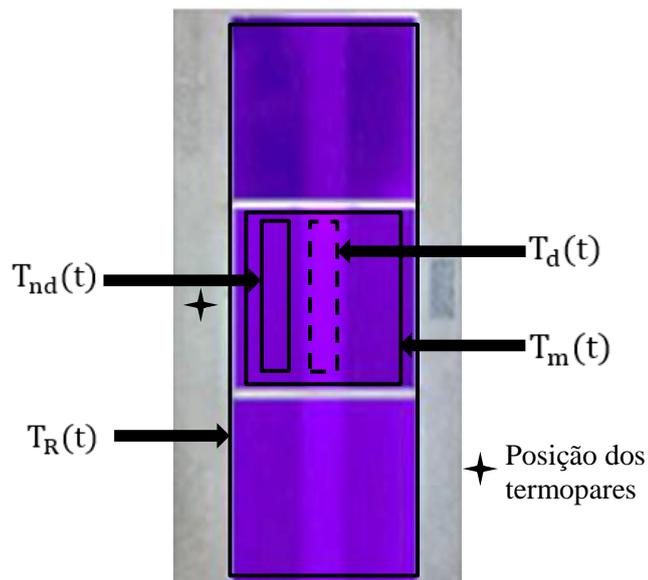
3.7 PROCEDIMENTO DE COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS

Cada experimento começou com a determinação dos parâmetros a serem inseridos na câmera de infravermelho. Foi determinada a temperatura ambiente, a umidade relativa e a temperatura aparente refletida pelo método da chapa ondulada de alumínio, de acordo com o procedimento da ASTM E1862-97 (2010). Os valores de emissividade foram determinados baseado na comparação com a fita padrão, de acordo com o procedimento descrito na ASTM 1933-99 (1999).

A câmera de infravermelho foi programada para fazer uma foto a cada 4 minutos. Para o preliminar em placas, somente foram selecionadas duas imagens em cada ciclo. Não foi determinado nenhum valor de temperatura através da imagem nem a partir dos termopares.

Para o estudo em placas cerâmicas, foram colocados dois termopares, na superfície frontal e traseira da argamassa, para o cálculo do gradiente de temperatura que atravessa a placa (Figura 45). Os termopares foram programados para fazer leituras na superfície da placa a cada 2 min. Os dados da temperatura capturados pelos termopares foram guardados automaticamente no computador durante o experimento, através do coletor de dados (*data logger*). As imagens térmicas foram guardadas em um cartão SD, para logo serem processadas. O processamento das imagens se realizou no *software* Flir-QuickReport v1.2. A Figura 45 mostra como foram determinadas as temperaturas a partir do processamento das temperaturas das placas cerâmicas no *software*. O T_R foi utilizado como parâmetro de controle durante do experimento, os valores dele não foram empregados no cálculo dos parâmetros termográficos,

Figura 45 – Determinação das temperaturas nas placas cerâmicas. Exemplo do defeito na placa cerâmica central.



Legenda:

- $T_d(t)$: Temperatura da área com defeito no tempo t
- $T_{nd}(t)$: Temperatura da área sem defeito no tempo t
- $T_m(t)$: Temperatura média da placa no tempo t
- $T_R(t)$: Temperatura média do revestimento no tempo t

Fonte: Próprio autor.

O valor de cada temperatura se refere ao valor médio da área marcada. A partir desses valores médios, obtidos em cada imagem térmica (a cada 4 min), foram construídos os gráficos com a evolução da temperatura e dos parâmetros termográficos: Delta-T (ΔT) (Equação 10), Contraste de corrida térmica (TRC) (Equação 11) e Contraste térmico (TC) (Equação 12). Além dos parâmetros termográficos foi determinado o gradiente de temperatura que atravessa a placa de argamassa a partir da diferença de temperatura entre o termograma colocado na parte frontal e traseira da placa.

$$\Delta T = T_d(t) - T_{nd}(t) \quad (10)$$

Onde:

ΔT : Delta-T, diferença de temperatura

$T_d(t)$: temperatura da área com defeito no tempo t

$T_{nd}(t)$: temperatura da área sem defeito no tempo t

$$TRC = \frac{T_d(t) - T_{nd}(t)}{T_m(t) - T_m(t_0)} \quad (11)$$

Onde:

TRC: Contraste de corrida térmica

$T_d(t)$: temperatura da área com defeito no tempo t

$T_{nd}(t)$: temperatura da área sem defeito no tempo t

$T_m(t)$: temperatura média da placa no tempo t

$T_m(t_0)$: temperatura média da placa no tempo t_0

t_0 : tempo de início do ciclo

$$TC = \frac{T_d(t) - T_d(t_0)}{T_{nd}(t) - T_{nd}(t_0)} \quad (12)$$

Onde:

TC: Contraste térmico

$T_d(t)$: temperatura da área com defeito no tempo t

$T_d(t_0)$: temperatura da área com defeito no tempo t_0

$T_{nd}(t)$: temperatura da área sem defeito no tempo t

$T_{nd}(t_0)$: temperatura da área sem defeito no tempo t_0

t_0 : tempo de início do ciclo

No ciclo direto, na etapa de arrefecimento o t_0 não corresponde ao início do ciclo. Foi utilizado o valor de temperatura correspondente ao momento de inversão do fluxo, ou seja, o valor de temperatura no momento onde as temperaturas das áreas com e sem defeito se igualam. Para determinar este valor foi realizada uma interpolação linear utilizando os valores de temperaturas das áreas com e sem defeito, antes e depois da inversão do fluxo.

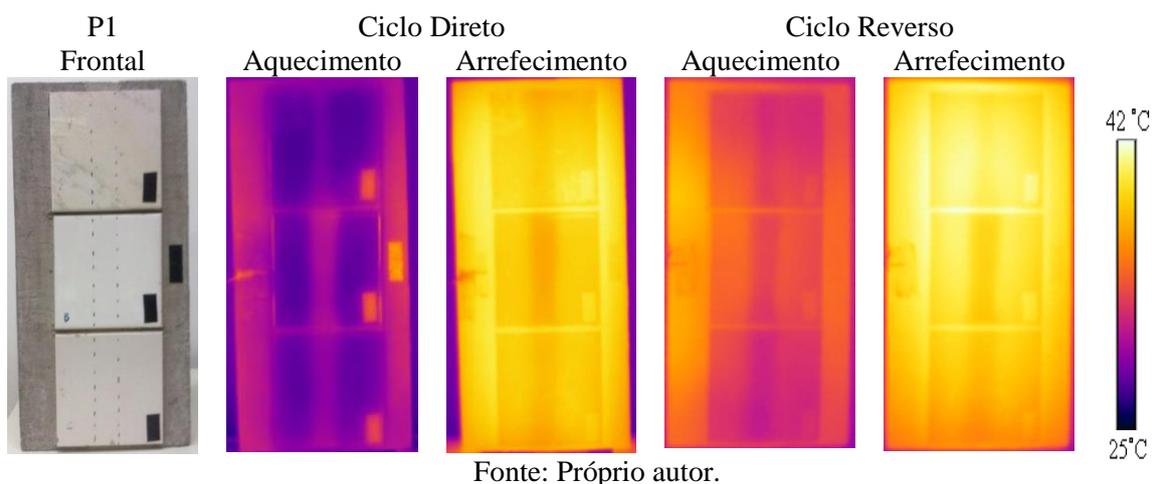
Além do Delta-T e dos valores de contraste, foi determinado o gradiente de temperatura da placa, o qual, foi calculado como a diferença entre a temperatura frontal (superfície que recebe calor das lâmpadas) e a temperatura traseira da placa. Os valores utilizados para o cálculo do gradiente são os obtidos das leituras dos termopares.

3.8 RESULTADO PRELIMINAR EM PLACAS

Neste item são apresentados os resultados do estudo preliminar em placas. O objetivo principal deste estudo foi avaliar qualitativamente a forma como aparece cada tipo de defeito. Os resultados foram apresentados em uma figura, que mostra termogramas correspondentes a cada ciclo. Foi escolhida uma imagem próxima ao início do aquecimento e outra próxima do início do arrefecimento do ciclo direto. No ciclo reverso, foi escolhida uma imagem próxima ao fim do aquecimento e outra próxima do início do arrefecimento.

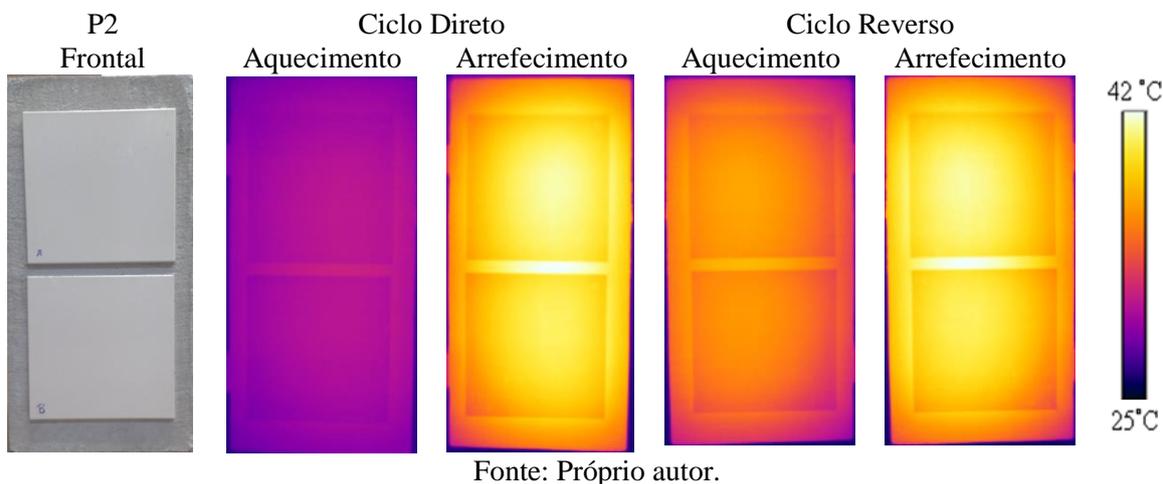
A Figura 46 mostra os resultados da placa 1 (P1). Nota-se que pode ser observada claramente com a termografia a presença de vazio por trás da cerâmica (deslocamento). Neste caso, foi possível detectar o defeito para espessuras de placas cerâmicas variando de 4 a 7mm. O defeito ficou visível nas quatro condições e se percebe pela variação nas cores, que a espessura da cerâmica gera diferença nos termogramas. Esperou-se que, a menor espessura da cerâmica estivesse vinculada à melhor visibilidade, pelo fato do defeito ficar mais próximo da superfície. Este comportamento foi comprovado por diversos autores em vários tipos de revestimentos (CHENG *et al.*, 2008; WERITZ *et al.*, 2005). O defeito aparece como uma área mais quente quando o calor entra pela superfície da cerâmica, e mais frio quando o calor está saindo através da cerâmica. Este comportamento foi comprovado por diversos autores (BAUER *et al.* 2016b; BRIQUE, 2016; EDIS *et al.*, 2015a; LOURENÇO *et al.*, 2017).

Figura 46 – Resultados preliminares da placa 1 (P1).



A Figura 47 mostra os resultados da placa 2 (P2). Nota-se que não foi visível a falta de aderência das placas cerâmicas com a argamassa colante em nenhuma das quatro condições avaliadas, devido a não existência de vazios capazes de gerar perturbação no fluxo térmico. Valores mais baixos de aderência das placas cerâmicas somente poderão ser detectados com a termografia, no caso que a falta de aderência origine separação entre alguma das camadas, criando um vazio por trás da cerâmica.

Figura 47 – Resultados preliminares da placa 2 (P2).

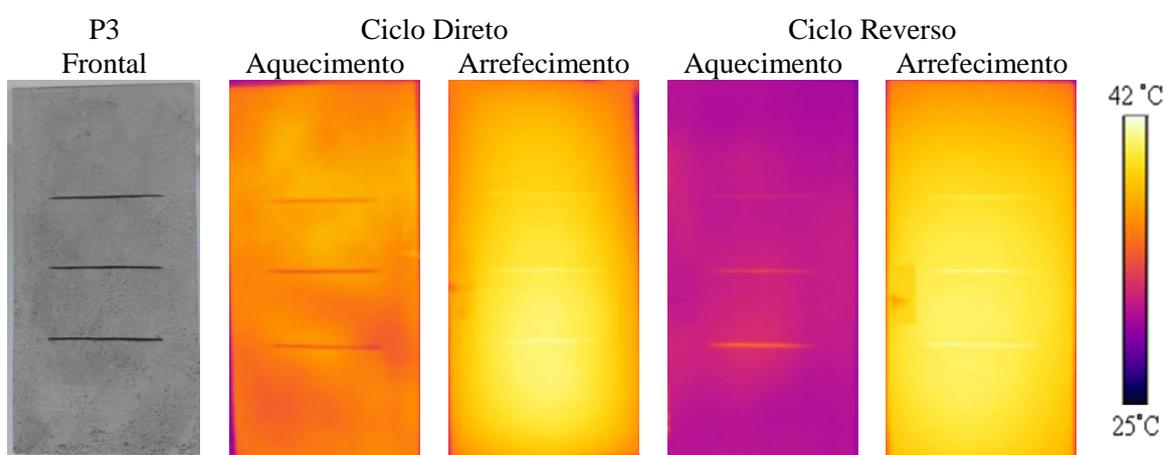


A análise preliminar das duas placas com revestimento cerâmico confirma que neste tipo de revestimento poderão ser detectados com a termografia os defeitos associados à presença de vazio por trás da placa cerâmica. Na bibliografia são encontrados vários estudos focados em avaliar descolamentos nas fachadas, o que corrobora a viabilidade da

aplicação da termografia na análise deste tipo de defeito (BAUER *et al.* 2016b; EDIS, 2015; LOURENÇO, 2017).

A Figura 48 mostra os resultados da placa 3 (P3). Na P3 foram estudadas fissuras superficiais no revestimento de argamassa. As fissuras superficiais no revestimento em argamassa podem ser detectadas em uma inspeção visual e os resultados comprovaram que elas devem aparecer também nos termogramas. Elas foram detectadas nas quatro condições existentes e podem ser avaliadas tanto na condição direta, quanto na condição reversa.

Figura 48 – Resultados preliminares da placa 3 (P3).



Fonte: Próprio autor.

Observaram-se nos termogramas na condição direta, que as fissuras mais profundas apareceram como áreas mais frias, e na condição reversa, as fissuras mais profundas apareceram como áreas mais quentes quando comparadas com fissuras de menor profundidade. Considerando que a profundidade da fissura é um dos principais parâmetros que pode ser associado à gravidade desta patologia, a termografia apresentaria vantagens no que diz respeito à análise da degradação dos revestimentos com fissuras.

A forma em que aparecem as fissuras nos termogramas tem relação direta com a profundidade das mesmas. A temperatura da fissura no termograma corresponde com a temperatura de uma área afastada da superfície da placa (área normal). Como a temperatura do defeito (fissura) correspondente com uma camada mais profunda, quando a placa é aquecida pela superfície frontal (condição direta) o calor demora mais em chegar à área com defeito, aparecendo como uma área mais fria no termograma. No arrefecimento,

como o calor sai do centro da placa para a área externa, a área com defeito fica mais próxima do centro da placa, aparecendo então como uma área mais quente na etapa de arrefecimento.

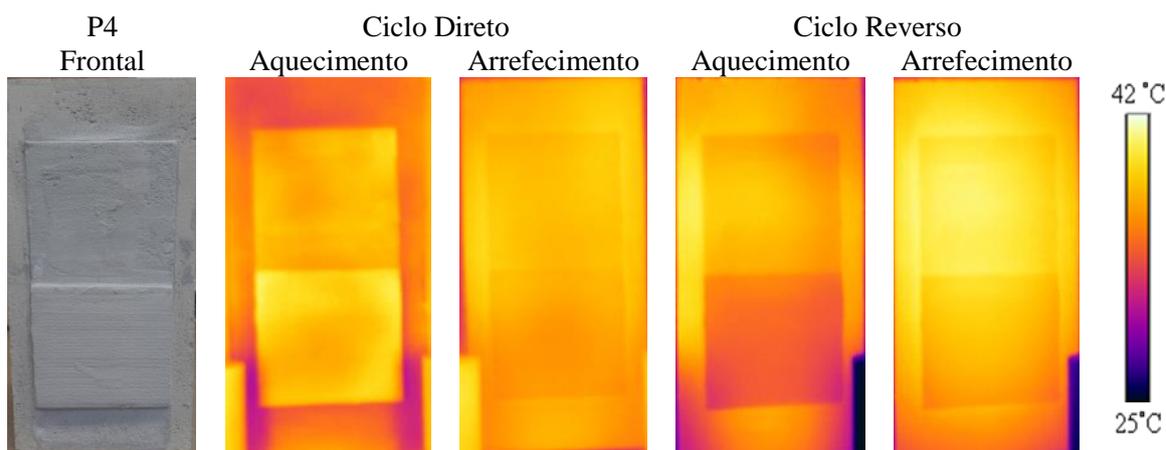
No ciclo reverso, as fissuras vão aparecer como áreas mais quentes tanto na etapa de aquecimento quanto na etapa de arrefecimento, neste caso, a justificativa se baseia também na camada onde se encontra o defeito (fissura). Como o calor está vindo de trás para frente, a espessura de argamassa até chegar à fissura é menor, portanto, vai esquentar mais rapidamente e se manter com temperatura maior, se comparada com a área normal onde o calor tem que atravessar uma espessura maior de argamassa para sair pela superfície.

Percebe-se que, a forma em que aparecem as fissuras nos termogramas é diferente em relação aos descolamentos. Numa mesma condição de fluxo de calor, um deles vai aparecer como uma área mais quente, enquanto o outro, aparece como uma área mais fria em relação à área vizinha ou normal. Conclui-se então que, o comportamento diferenciado destas duas patologias no termograma pode gerar dificuldades na interpretação dos resultados quando as fissuras estejam associadas a descolamentos no revestimento.

Os resultados mostraram uma vantagem importante da termografia em relação à inspeção visual, com a termografia foi possível observar as diferenças das fissuras em relação à profundidade. No caso de uma inspeção visual à distância, somente poderiam ser avaliadas a largura e o comprimento das mesmas.

A Figura 49 mostra os resultados da placa 4 (P4). Nesta placa foram avaliadas fissuras internas, revestidas com camadas de argamassa de diferentes espessuras. Nota-se que com a termografia não foi possível detectar as fissuras internas em nenhuma das condições de fluxo analisadas. Nos termogramas não se observaram diferenças de temperaturas que possam ser associadas à presença das fissuras.

Figura 49 – Resultados preliminares da placa 4 (P4).



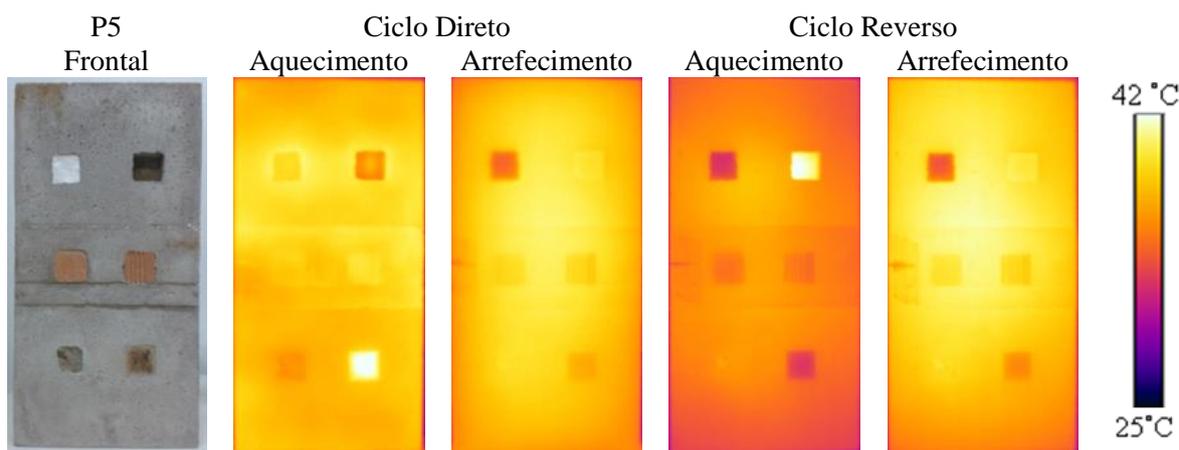
Fonte: Próprio autor.

Considerando que as espessuras das camadas de argamassa utilizadas para revestir a fissuras foram relativamente pequenas (2,5 e 5 mm), fica-se na dúvida da viabilidade da termografia para avaliar fissuras ocultas, tendo em vista que as espessuras das camadas dos sistemas de revestimentos em argamassa geralmente são maiores. A não visibilidade das fissuras neste caso se deve ao fato de o volume de ar (na fissura) não foi suficiente para que o efeito da convecção dentro dela gere uma resistência térmica suficiente para perturbar o fluxo térmico.

Maldague (2001) comenta que para os defeitos serem visíveis nos termogramas deve existir uma relação maior ou igual que dois entre a profundidade do defeito (separação da superfície) e a largura (menor dimensão). No estudo a relação entre a profundidade do defeito (que corresponde com a espessura da camada de argamassa) e a largura (que corresponde com a espessura da fissura), foi de 1 e 0,5, valores que podem ser considerados pequenos, o que justifica neste caso a não visibilidades das fissuras.

A Figura 50 mostra os resultados da placa 5 (P5). É possível identificar nas quatro condições de fluxo de calor, os diferentes tipos de materiais inseridos na placa devido às diferenças nas suas propriedades térmicas, principalmente condutividade térmica e calor específico.

Figura 50 – Resultados preliminares da placa 5 (P5).



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 12 resume as propriedades térmicas dos materiais inseridos na placa, além da argamassa usada na fabricação da mesma, para o melhor entendimento dos resultados.

Tabela 12 – Caracterização dos materiais inseridos e da argamassa.

Materiais	Condutividade térmica λ (W/(m.K))	Capacidade térmica c (kJ/(kg.K))
Argamassa (referência)	1,15	1,00
Concreto	1,75	1,00
Cerâmica	0,90	0,92
Madeira (pinus)	0,15	1,34
Poliestireno expandido	0,04	1,42

Fonte: ABNT NBR 15220: 2003.

No ciclo direto na etapa de aquecimento, a forma como apareceram os materiais dependeu das diferenças nas suas propriedades térmicas (calor específico e condutividade térmica do material) em comparação com argamassa da placa. Quanto maior é o calor específico, mais frio apareceram os materiais no termograma, como foi o caso do poliestireno expandido. Quanto menor é o calor específico do material, mais quentes aparecera no termograma, como foi o caso das cerâmicas. As maiores diferenças foram observadas no isopor, na madeira e no vazio. No caso do concreto, que o calor específico é similar ao da argamassa, ele apareceu mais frio no termograma por ter maior condutividade térmica. No caso do vazio, como a temperatura do defeito corresponde com uma camada mais profunda, quando a placa é aquecida pela superfície frontal o calor demora mais em chegar à área com defeito, aparecendo o mesmo como uma área mais fria no termograma.

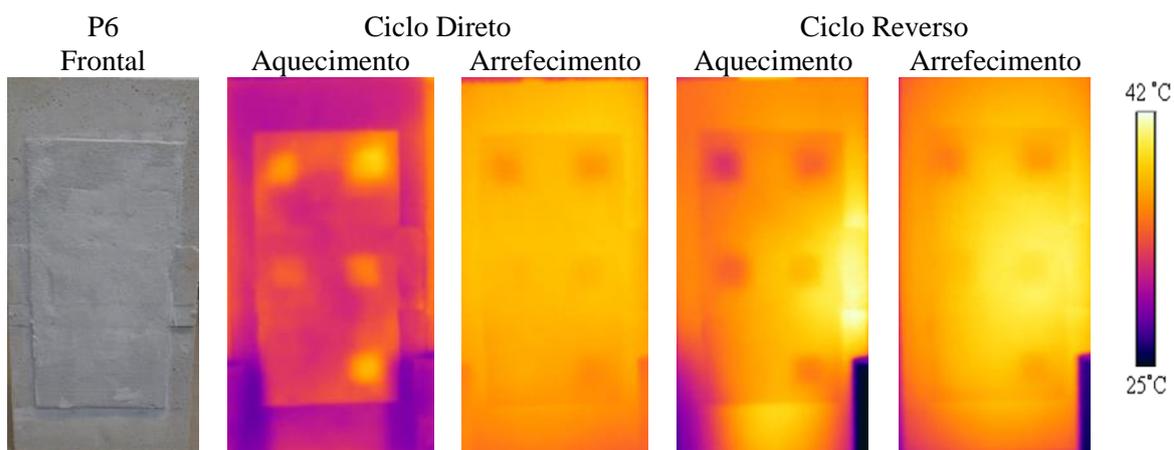
A madeira foi o único material que obteve um comportamento diferente ao esperado. Por apresentar maior calor específico deveria ter aparecido mais fria no termograma, no entanto, a temperatura foi maior do que argamassa. Provavelmente, a mancha escura que a madeira tinha na superfície no momento do ensaio seja a causa deste comportamento. A mancha talvez esteja relacionada com alguma sujeira resultado do contato com a fôrma no processo de moldagem.

No ciclo direto na etapa de arrefecimento, se pode observar que a forma como apareceram os materiais esteve diretamente relacionada com a condutividade térmica. Os materiais com menor condutividade térmica (cerâmica, madeira e poliestireno expandido) apareceram mais frios no termograma. Neste caso como o calor se movimenta por condução proveniente do centro da placa, os materiais que conduzem menos quantidade de calor não aparece mais frios na superfície estudada. O concreto apareceu mais quente por ter condutividade térmica maior do que a argamassa da placa e o vazio apareceu bem mais quente, porque o calor chega rapidamente na superfície devido à profundidade do furo.

No ciclo reverso, tanto no aquecimento quanto no arrefecimento, o comportamento é similar ao arrefecimento no ciclo direto, sendo, as maiores diferenças na etapa de aquecimento do ciclo reverso pela maior intensidade do fluxo de calor, devido ao fato das lâmpadas se encontrarem ligadas. No ciclo reverso o comportamento térmico dependeu da condutividade térmica dos materiais. A modo geral se observou que, as menores diferenças se obtêm com o concreto e as cerâmicas, e as diferenças maiores com o poliestireno expandido e a madeira, que apresentam propriedades térmicas bem diferentes às da argamassa.

A Figura 51 mostra os resultados da placa 6 (P6). Nota-se que foi possível identificar nas quatro condições de fluxo de calor a maioria dos materiais inseridos na placa devido às diferenças nas suas propriedades térmicas.

Figura 51 – Resultados preliminares da placa 6 (P6).



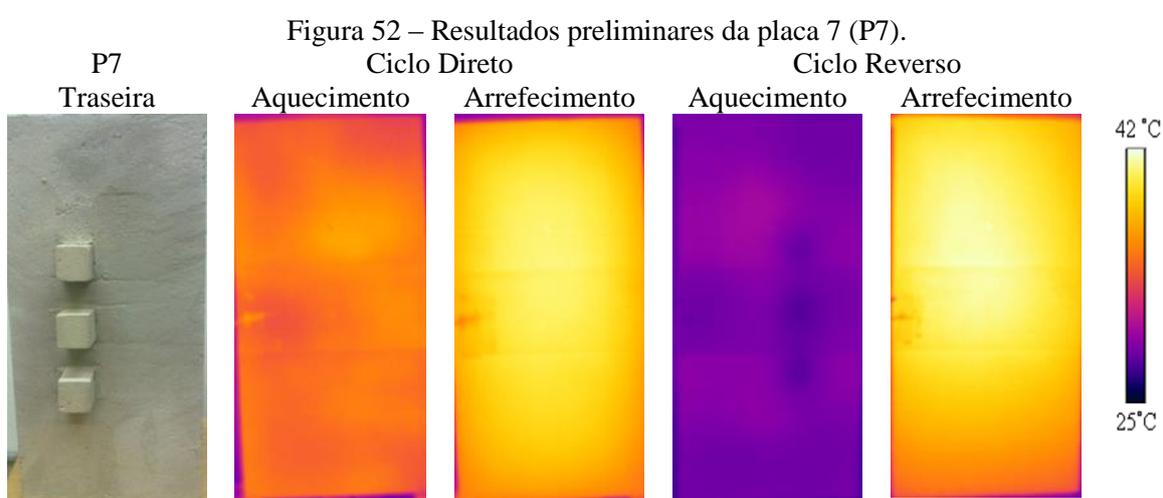
Fonte: Próprio autor.

Quando os materiais ficam por trás do revestimento se percebe que, tanto no ciclo direto quanto no ciclo reverso, a condutividade térmica é a propriedade que vai definir a visibilidade do defeito no termograma. As maiores diferenças foram obtidas nas etapas de aquecimento (pela maior intensidade do fluxo nesses períodos). Os materiais com valores menores de condutividade térmica (cerâmica, madeira e poliestireno) apareceram mais quentes na condição direta (aquecimento), e mais frios na condição reversa (arrefecimento). O poliestireno expandido e a madeira, que apresentam as maiores diferenças em relação à condutividade foram os materiais mais visíveis nos termogramas. Estudos que analisaram o comportamento térmico de poliestireno expandido inserido em diferentes elementos detectaram o mesmo comportamento (CHENG *et al.*, 2008; LAI *et al.*, 2015; WERITZ *et al.*, 2005).

Um fato importante a ser destacado foi a visibilidade dos materiais cerâmicos nas quatro etapas e as diferenças de temperatura destes com a argamassa e o concreto inserido. Por tais motivos se justifica a utilização da termografia infravermelha na identificação dos elementos nos principais sistemas construtivos no contexto brasileiro (edificações em estruturas de concreto e alvenaria de vedação).

A Figura 52 mostra os resultados da placa 7 (P7). Na P7 foram inseridos três corpos de prova cúbicos (4 x 4 x 4cm) perpendicular à superfície traseira. Os corpos de prova simularam a presença de elementos por trás da fachada.

No caso do ciclo direto, não foi possível detectar os corpos de prova com a termografia. No aquecimento, a não visibilidade do defeito poderia estar associado à relação entre a profundidade do defeito (espessura da placa) e a dimensões do defeito. As condições do experimento podem ter influenciado também a não visibilidade do defeito nesta etapa, o ambiente traseiro aberto facilitou a saída de calor do elemento, não se acumulando no mesmo, e por sua vez, não gerando diferenças de temperatura na superfície estudada. No caso do arrefecimento, como o calor sai do centro da placa para o exterior, o calor que sai pela superfície frontal não atravessa o defeito, por tais motivos não gera diferenças de temperatura na superfície.



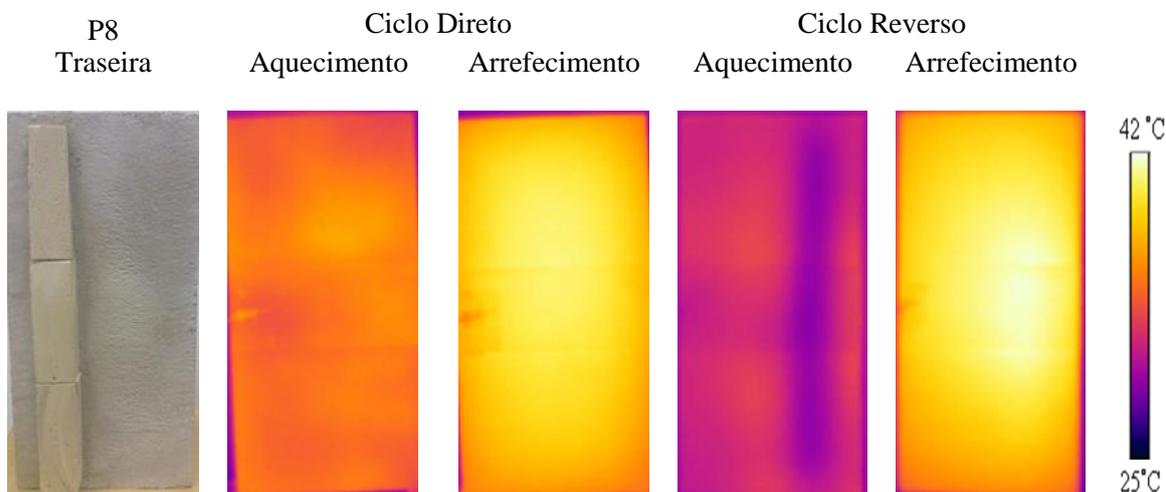
Fonte: Próprio autor.

No ciclo reverso, os elementos foram detectados no termograma na etapa de aquecimento, como a espessura para atravessar o elemento e chegar à superfície é maior, a superfície na frente do defeito apareceu como uma área mais fria. Já no arrefecimento, similar ao que acontece no ciclo direto os elementos não foram visíveis no termograma.

A Figura 53 mostra os resultados da placa 8. Na P8 foram inseridos três corpos de prova prismáticos (4 x 4 x 16cm) na superfície traseira com o comprimento paralelo à maior dimensão da placa. Estes corpos de prova simularam elementos lineares como vigas ou pilares que se podem encontrar por trás da fachada formando parte da estrutura da edificação. O comportamento obtido foi similar à placa 7, sendo facilmente detectáveis os elementos na etapa de aquecimento no ciclo reverso. Comparados os resultados da placa 8 com a placa 7 se conclui que, o tamanho dos elementos por trás da placa não teve influência na visibilidade do defeito no termograma. No entanto, a maior dimensão dos

corpos de prova gerou maiores diferenças de temperatura o que permitiu observar mais claramente o defeito na P8.

Figura 53 – Resultados preliminares da placa 8 (P8).



Fonte: Próprio autor.

Os resultados das placas com elementos inseridos na parte traseira sugerem que as estruturas ocultas por trás das fachadas poderão ser identificadas com maior facilidade nos termogramas, nos momentos onde o fluxo de calor esteja saindo do ambiente interno para o ambiente externo (condição reversa) da edificação. Vários estudos têm detectado estruturas formando parte da fachada (BAUER *et al.*, 2016; CORTIZO., 2007) e por trás dela (IBARRA-CASTANEDO *et al.*, 2017), principalmente na condição reversa. Em uma condição reversa, as estruturas por trás da fachada irão aparecer nos termogramas como áreas mais frias, similar a como apareceram os defeitos associados aos vazios por trás das cerâmicas (descolamentos). Este fato ressalta a necessidade de estudar os descolamentos na condição direta, para facilitar a identificação dos mesmos.

3.9 RESULTADO DAS PLACAS COM REVESTIMENTO CERÂMICO

Neste item são apresentados os resultados do estudo das placas com revestimento cerâmico, nas quais, analisa-se a ausência de material na argamassa colante, que simula os problemas de descolamento nos revestimentos cerâmicos. O estudo em placas com revestimento cerâmico constitui o início das análises quantitativas do trabalho. Os

termogramas das placas estudadas podem ser observados no Apêndice A, divididos por ciclos (direto e reverso) e por intensidade do fluxo (alto e baixo).

Neste item são apresentados os resultados em quatro figuras que incluem os dois ciclos (direto e reverso) e as duas intensidades de fluxo (alto e baixo). Inicialmente, se apresenta uma figura com o resultado do Delta-T, as temperaturas das áreas com e sem defeito, além do gradiente de temperatura da placa, com o objetivo de analisar o comportamento Delta-T e a sua relação com os demais parâmetros. A segunda figura apresenta os resultados da função de contraste de corrida térmica (TRC) e a terceira os resultados do contraste térmico (TC).

Em cada uma das figuras é discutido o comportamento das funções, os valores, a influência da variável estudada e a possível aplicação nos estudos de campo, com o objetivo de gerar critérios que facilitem a aplicação da técnica na inspeção de fachadas de edifícios com revestimento cerâmicos.

É importante salientar que, os comentários relativos aos resultados dos parâmetros termográficos sobre os valores máximos, dependem das características de cada função. Quando se diz que o valor de Delta-T é o máximo, faz-se referência ao valor (módulo), já que no Delta-T o signo (\pm) indica o sentido do fluxo de calor. No caso do TRC, os máximos valores são considerados também em módulo, quanto mais afastado de zero esteja o valor o contraste é considerado maior. No caso do TC, os máximos valores estão relacionados com o afastamento de 1, ou seja, quanto mais afastado de 1 esteja o valor maior é o contraste.

3.9.1 Resultados da placa 10 (influência da espessura da cerâmica)

Neste item são apresentados os resultados da placa 10 (P10), na qual foi analisada a influência da espessura da placa cerâmica. No ciclo direto - fluxo alto (Figura 54a) no início do aquecimento, as temperaturas das áreas com e sem defeito crescem rapidamente, observando-se desde o início da etapa diferenças entre as áreas com e sem defeito. As áreas com defeito (Td) apresentaram temperaturas maiores do que a áreas sem defeito (Tnd). Ao longo do tempo, as temperaturas das áreas com e sem defeito continuaram aumentando,

mas com taxa de crescimento menor. Observou-se que, para o final da etapa de aquecimento, as temperaturas das áreas com e sem defeito ficaram mais próximas.

Quando as lâmpadas foram desligadas e começou a etapa de arrefecimento, as temperaturas das áreas com e sem defeito começaram a diminuir. Minutos depois, as temperaturas das áreas com e sem defeitos se igualaram, para posteriormente, se inverter os comportamentos das temperaturas devido à mudança de sentido do fluxo de calor. Ao longo da etapa de arrefecimento, ficaram então, as áreas com defeitos com temperaturas menores do que as áreas sem defeito.

No ciclo direto - fluxo baixo (Figura 54b) o comportamento das temperaturas das áreas com e sem defeito foi similar, com diferença na taxa de crescimento da temperatura, que foi inferior, resultado da utilização de uma potência inferior no aquecimento. Devido ao comportamento das temperaturas, no ciclo direto, na etapa de aquecimento (primeiros 120 minutos) tanto no fluxo alto (Figura 54a) quanto no fluxo baixo (Figura 54b) o Delta-T foi positivo, indicando que, a área da superfície com defeito se encontrava mais quente do que a área normal ou sem defeito.

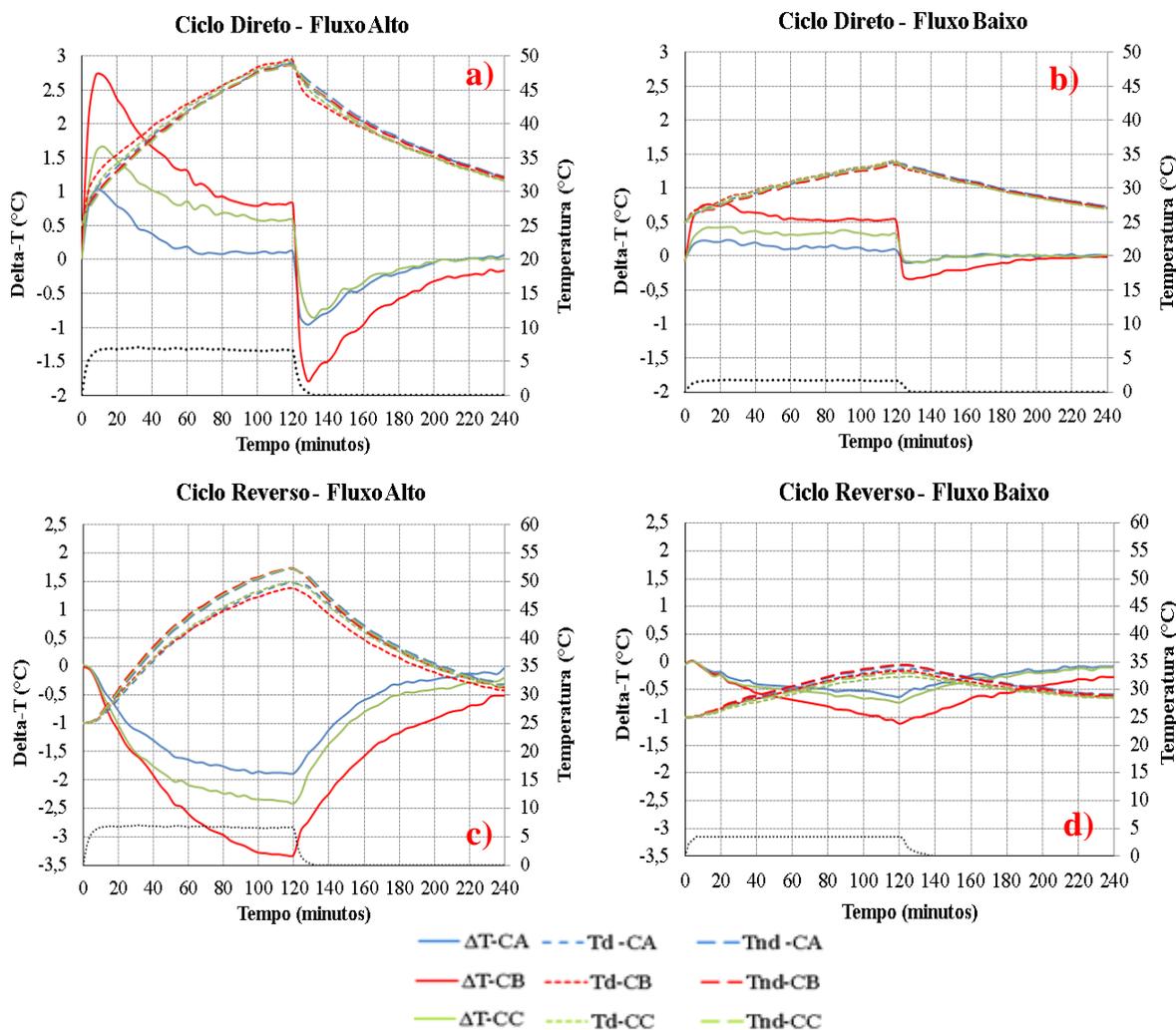
No arrefecimento, após a inversão do fluxo de calor, o Delta-T passou a ser negativo, indicando que, a área com defeito fica mais fria do que a área sem defeito. Nota-se que os valores de Delta-T ao longo do ciclo direto ficaram maiores no fluxo alto (Figura 54a) em relação ao fluxo baixo (Figura 54b), pela maior intensidade do fluxo, gerada pela diferença de potência nas lâmpadas.

No ciclo reverso - fluxo alto (Figura 54c) os minutos iniciais (4 minutos), correspondem ao tempo necessário para o calor atravessar a placa e começar a sair pela superfície revestida. Nesse tempo a temperatura das áreas com e sem defeito crescem rapidamente. Neste caso, as diferenças entre área com defeito e sem defeito após este período não foram observadas com clareza desde o início da etapa. Ao longo do tempo, as temperaturas das áreas com e sem defeito continuaram aumentando, mas com taxa de crescimento menor. Nesta etapa, as áreas com defeito (T_d) apresentaram temperaturas menores do que as áreas sem defeito (T_{nd}). Observou-se que, para o final da etapa de aquecimento, as diferenças entre as temperaturas das áreas com e sem defeito ficaram maiores.

Quando as lâmpadas foram desligadas e começou a etapa de arrefecimento, as temperaturas das áreas com e sem defeito começaram a diminuir. Ao longo da etapa de arrefecimento, se mantiveram as áreas com defeitos com temperaturas inferiores às das áreas sem defeito. Não existiu inversão do fluxo de calor. Devido ao comportamento das temperaturas das áreas com e sem defeito, no ciclo reverso com fluxo alto e baixo (Figura 54c e d) o Delta-T foi sempre negativo, já que o calor saiu através da cerâmica tanto na etapa de aquecimento quanto na etapa de arrefecimento.

Nos dois ciclos e nas duas condições de fluxo se pode observar que, a espessura da cerâmica influencia os valores de Delta-T. A cerâmica de menor espessura (Cerâmica B) apresentou os maiores valores de Delta-T. Estes valores se justificam pelo fato de se encontrar o defeito mais perto da superfície, na cerâmica com menor espessura. Este comportamento mostra que, a menor espessura das cerâmicas utilizadas nos revestimentos de fachada vai facilitar a aplicação da termografia infravermelha na identificação de descolamentos. É importante salientar que, as diferenças na espessura da cerâmica não geraram comportamentos diferentes no Delta-T.

Figura 54 – Delta-T da placa 10. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.



Fonte: Próprio autor.

No ciclo direto no fluxo alto e baixo (Figura 54a e b) na etapa de aquecimento, se pode observar que, nos momentos iniciais, onde existe um rápido crescimento da temperatura das áreas com e sem defeito se obtém os máximos valores do Delta-T em todas as cerâmicas. Estes valores começam a diminuir quando o gradiente de temperatura ficou constante e as temperaturas das superfícies têm um crescimento mais lento. No final da etapa de aquecimento existe uma tendência a se manter constante os valores do Delta-T, porque nesta etapa os valores de temperatura da superfície têm um crescimento pequeno com tendência a se manter constante.

No ciclo direto no fluxo alto e baixo (Figura 54a e b) na etapa de arrefecimento, após a queda brusca de temperaturas da superfície pelo desligamento das lâmpadas, obtêm-se os máximos valores (módulo) de Delta-T. Logo estes valores foram diminuindo produto do arrefecimento da placa. Nesta etapa, o calor sai do interior da placa para o exterior. O gradiente, após o período de queda inicial foi considerado igual zero, porque as superfícies frontal e traseira foram diminuindo as temperaturas simultaneamente, sendo praticamente iguais a cada intervalo de tempo.

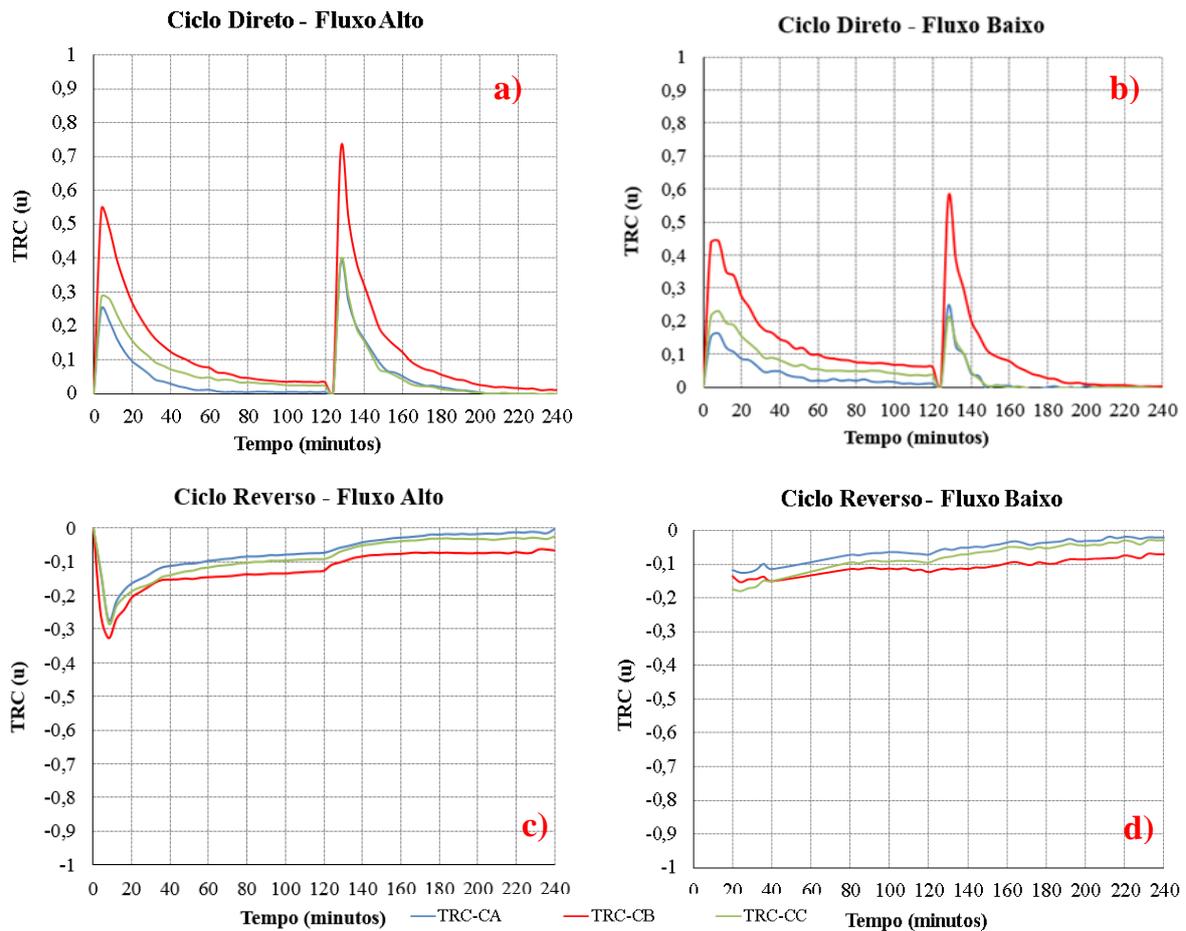
No ciclo reverso no fluxo alto e baixo (Figura 54c e d) o aquecimento acontece pela superfície traseira, neste caso, o calor demora em sair através da cerâmica. Após os primeiros 8 minutos, começa-se a perceber o aumento das temperaturas das áreas com e sem defeito e o Delta-T aumenta com o crescimento da temperatura da superfície. Na etapa de arrefecimento, o calor continua saindo pela cerâmica e diminuindo simultaneamente com o arrefecimento da superfície.

Tanto no ciclo direto quanto no ciclo reverso, observou-se que quanto maior foi o fluxo de calor, maiores são os valores (módulo) de Delta-T. Em ambos os fluxos, foi possível observar as diferenças no Delta-T resultantes da espessura das cerâmicas. Tendo como base a aplicação em campo, estes resultados sugerem que, as fachadas com cerâmicas de menor espessura facilitam a identificação dos defeitos. Os máximos valores de Delta-T quando as fachadas recebem radiação solar direta, poderiam ser encontrados nos momentos de maior crescimento das temperaturas da superfície. Com o aumento das temperaturas das áreas com e sem defeito não necessariamente vai aumentar o Delta-T, e conseqüentemente a visibilidade dos defeitos. O ciclo direto mostrou também que, quando temos uma inversão do sentido do fluxo de calor, o Delta-T vai ser igual zero, indicando que, no momento que se inverte o sentido do fluxo de calor nas fachadas não poderão ser feitas as inspeções, já que não será possível identificar nem mensurar os defeitos.

O estudo das funções de contraste teve como objetivo encontrar parâmetros que possam ser utilizados na identificação das condições para a melhor visualização dos defeitos. A Figura 55 mostra o resultado do TRC na placa 10. Nota-se que através desta função foi possível perceber as diferenças entre os defeitos, gerados pelas diferentes espessuras da cerâmica. Esta função avalia a relação entre o Delta-T e o crescimento da temperatura da superfície.

Os máximos valores do TRC se obtiveram no início da etapa de aquecimento e arrefecimento tanto no ciclo direto (Figura 55 a, b) quanto no ciclo reverso (Figura 55c, d). No aquecimento aos 4 minutos aproximadamente aparecem os máximos valores de TRC. No aquecimento após a inversão do fluxo se obtiveram os máximos valores de TRC, aproximadamente aos 128 minutos.

Figura 55 – Resultado do TRC na placa 10. a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.



Fonte: Próprio autor.

No ciclo reverso, os valores do TRC são negativos pelo defeito apresentar temperaturas mais baixas do que a área normal. Neste caso, foram considerados os valores como máximos, baseados no valor modular. O pico da função do contraste com fluxo alto aparece bem no início do ciclo, aproximadamente aos 8 minutos. Já no fluxo baixo, no início do aquecimento não foi possível mensurar o TRC. O lento crescimento da temperatura média da superfície não gera diferenças no Delta-T nos momentos iniciais. A

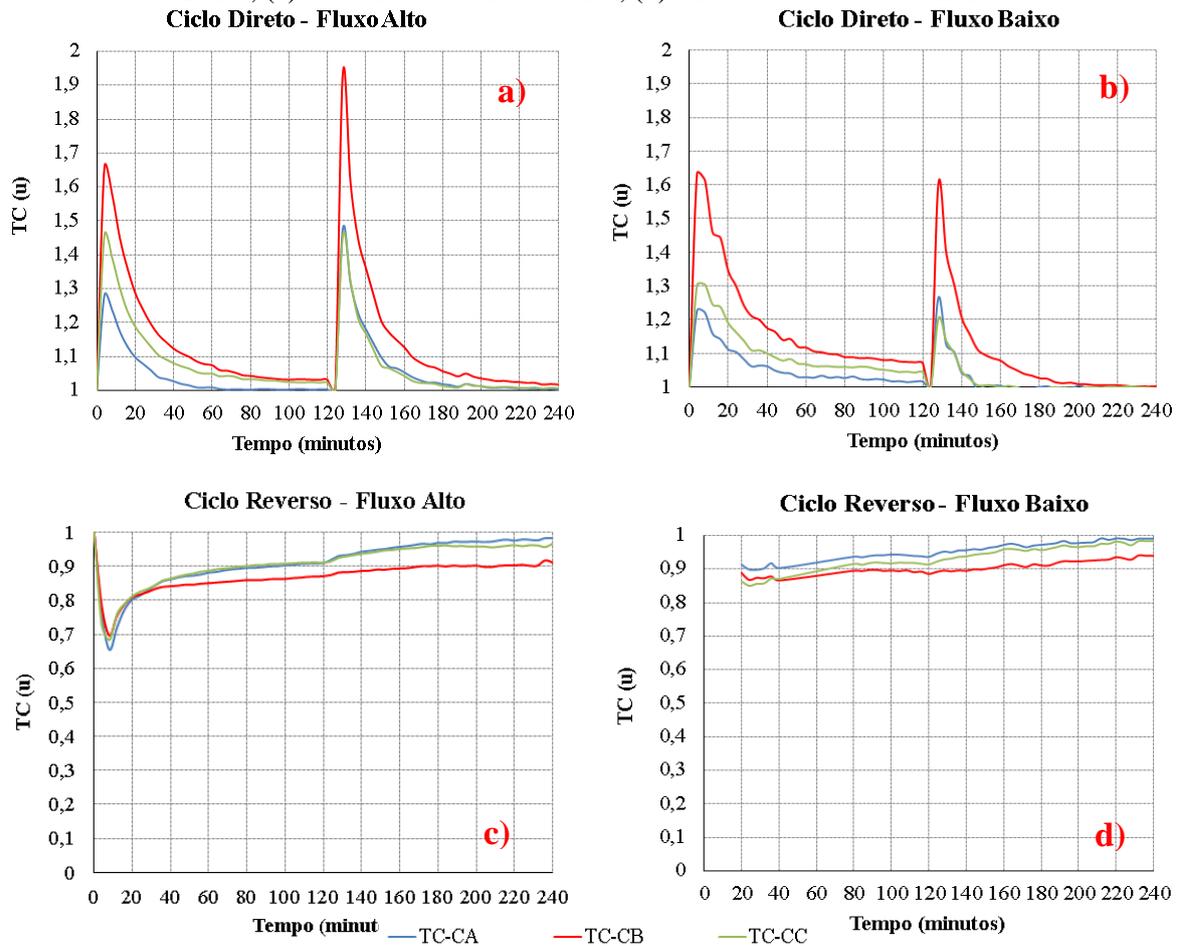
partir dos 40 minutos se percebe a diferença entre as cerâmicas, comprovando-se que, a menor espessura gera maiores valores (módulo) do TRC.

De modo geral, se pode concluir que, os picos de TRC estão diretamente relacionados com a taxa de crescimento ou queda média da temperatura da superfície. No caso do ciclo direto os picos do TRC coincidem ou ficam bem próximos (período de tempo) dos máximos valores de Delta-T, tanto no aquecimento quanto no arrefecimento, o que indica que, a melhor visibilidade do defeito deverá aparecer nos momentos de maior crescimento ou queda da temperatura média da superfície e do gradiente. No caso do ciclo reverso, os picos de TRC e Delta-T não coincidem durante o aquecimento. No entanto, observou-se que estes picos estão associados à variação de temperatura da superfície. O ciclo reverso-fluxo baixo comprova que quando o aumento ou queda de temperatura é pequeno o TRC não apresenta picos

Os picos de TRC que indicam o momento onde os limites dos defeitos aparecem melhor definidos, não coincidem com o momento em que o Delta-T é o maior. Este comportamento sugere que, no ciclo reverso, os momentos para a identificação do defeito e para a mensuração deles podem ser diferentes. Já no arrefecimento, coincidem ou ficam bem próximos ambos os parâmetros, similar ao que acontece no arrefecimento do ciclo direto.

O contraste térmico (TC) avalia o crescimento da temperatura da área com defeito em relação ao crescimento da temperatura da área sem defeito. Na Figura 56 se observa que o comportamento dos valores de TC foi similar ao TRC, sendo que os máximos valores (picos) são obtidos no começo de cada etapa. A partir da função TC foi possível perceber as diferenças geradas pela espessura das cerâmicas no ciclo direto desde o começo do experimento (Figura 56a,b), já no ciclo reverso essas diferenças somente são visíveis a partir dos 40 (Figura 56c) ou 60 minutos (Figura 56d) dependendo do fluxo.

Figura 56 – Resultado do TC da placa 10. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.



Fonte: Próprio autor.

No ciclo reverso no fluxo alto (Figura 56c) os valores máximos de TC são obtidos no começo do aquecimento. Já no fluxo baixo (Figura 56d) não é possível definir claramente os máximos valores da função, se percebe que quando avança o experimento os valores de TC tendem a diminuir. Nota-se que o comportamento do TC foi similar ao obtido no TRC, comprovando-se que, os resultados obtidos nestas funções estão diretamente relacionados com a taxa de variação da temperatura da superfície. Os picos em ambos os ciclos se encontraram nos momentos de máximo crescimento ou queda da temperatura da superfície revestida.

3.9.2 Resultados da placa 11 (influência do tamanho do defeito)

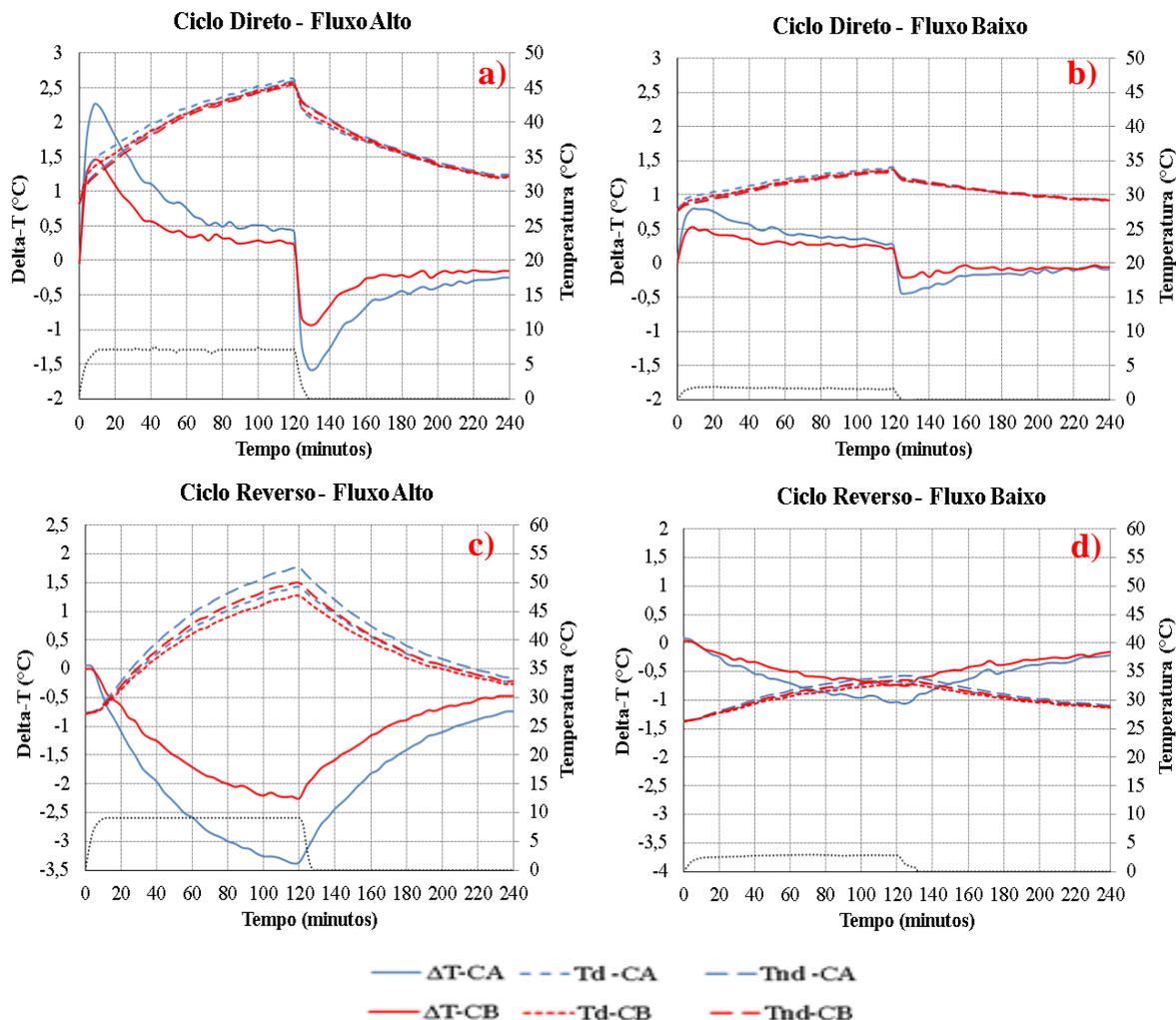
Na placa 11 foi analisada a influência do tamanho dos defeitos. A Figura 57 (a,b) mostra os resultados do Delta-T para o ciclo direto e a Figura 57 (c,d) mostra os resultados do Delta-

T para o ciclo reverso, com fluxo alto e baixo, respetivamente. Pode-se observar que o comportamento das temperaturas das áreas com defeito (T_d) e sem defeito (T_{nd}) foi o mesmo ao obtido na placa 10, nos dos ciclos nas duas condições de fluxo.

O Delta-T da placa cerâmica A (ΔT_{CA}) apresentou maiores valores (módulo) ao longo dos experimentos, o que indica que, o maior tamanho do defeito gera maiores valores de Delta-T nos dois ciclos. Como a camada de ar por trás da cerâmica é responsável pelas diferenças de temperatura da superfície, e a mesma possui um volume maior no caso do defeito de maior tamanho, era esperado que o defeito de maior tamanho apresentasse maiores valores de Delta-T.

Observe-se que, em ambos os ciclos os maiores valores de Delta-T se obtiveram durante o aquecimento, momento no qual o gradiente apresenta valores maiores pelo fluxo de calor que atravessa a placa, resultado do aquecimento com as lâmpadas. Já no caso de arrefecimento, os valores do Delta-T são menores porque a intensidade do fluxo de calor diminui (resultado da saída de calor do interior da placa para o exterior através da superfície externa). No arrefecimento, com a inversão do sentido do fluxo de calor se obtiveram os picos de máximo Delta-T no ciclo direto (Figura 57 a,b). No ciclo reverso (Figura 57 c,d), os máximos valores de Delta-T se obtêm no final da etapa de aquecimento e começam a diminuir no arrefecimento, junto com a queda de temperatura. Apesar de existir diferenças nos valores, é importante destacar que o tamanho do defeito não gerou diferenças no comportamento do Delta-T.

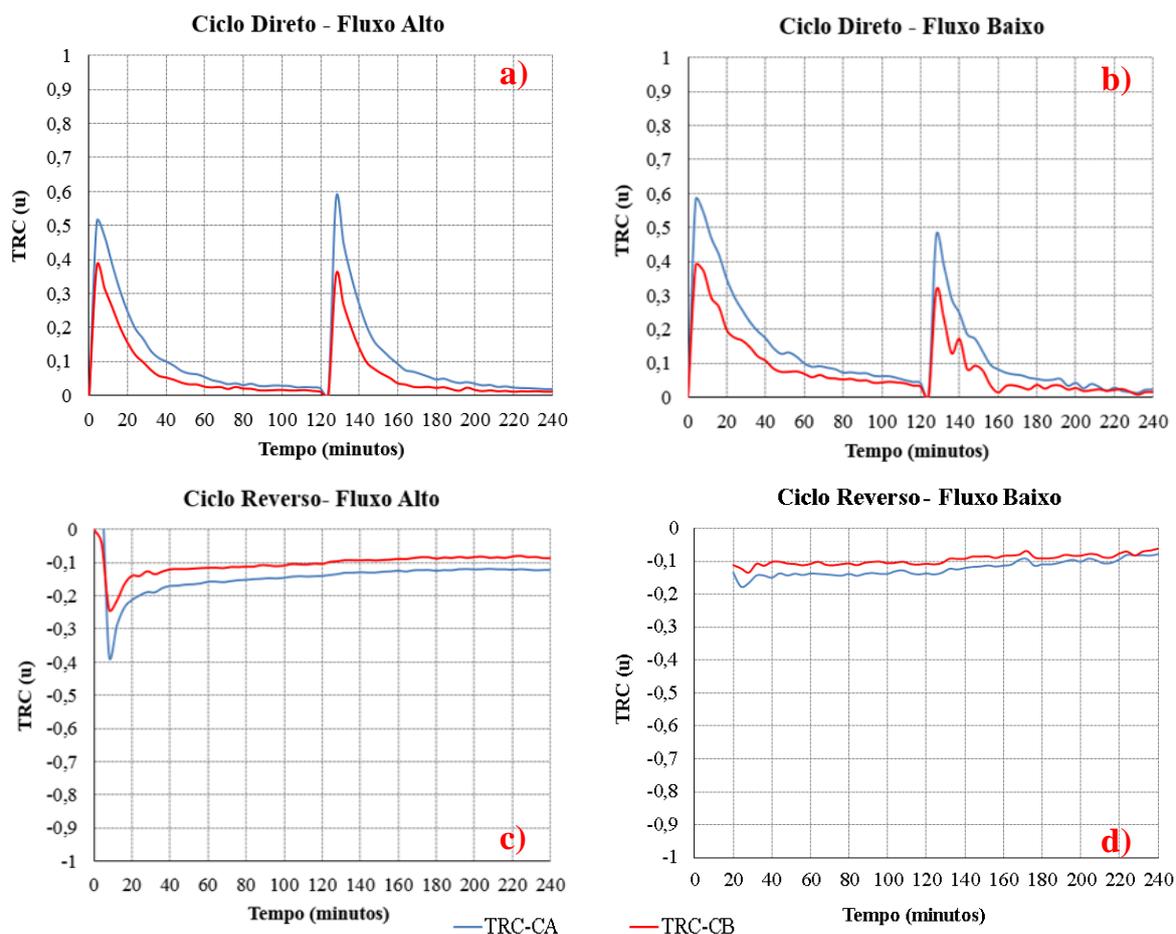
Figura 57 – Delta-T da placa 11. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 58 mostra o comportamento do TRC na placa 11. Nota-se que o comportamento é similar à placa 10. Os máximos valores de TRC aparecem no início das etapas, tanto de aquecimento, quanto de arrefecimento (Figura 58 a,b). Pode-se observar que os maiores valores correspondem ao defeito de maior tamanho em ambos os ciclos.

Figura 58 – Resultado do TRC da placa 11. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.

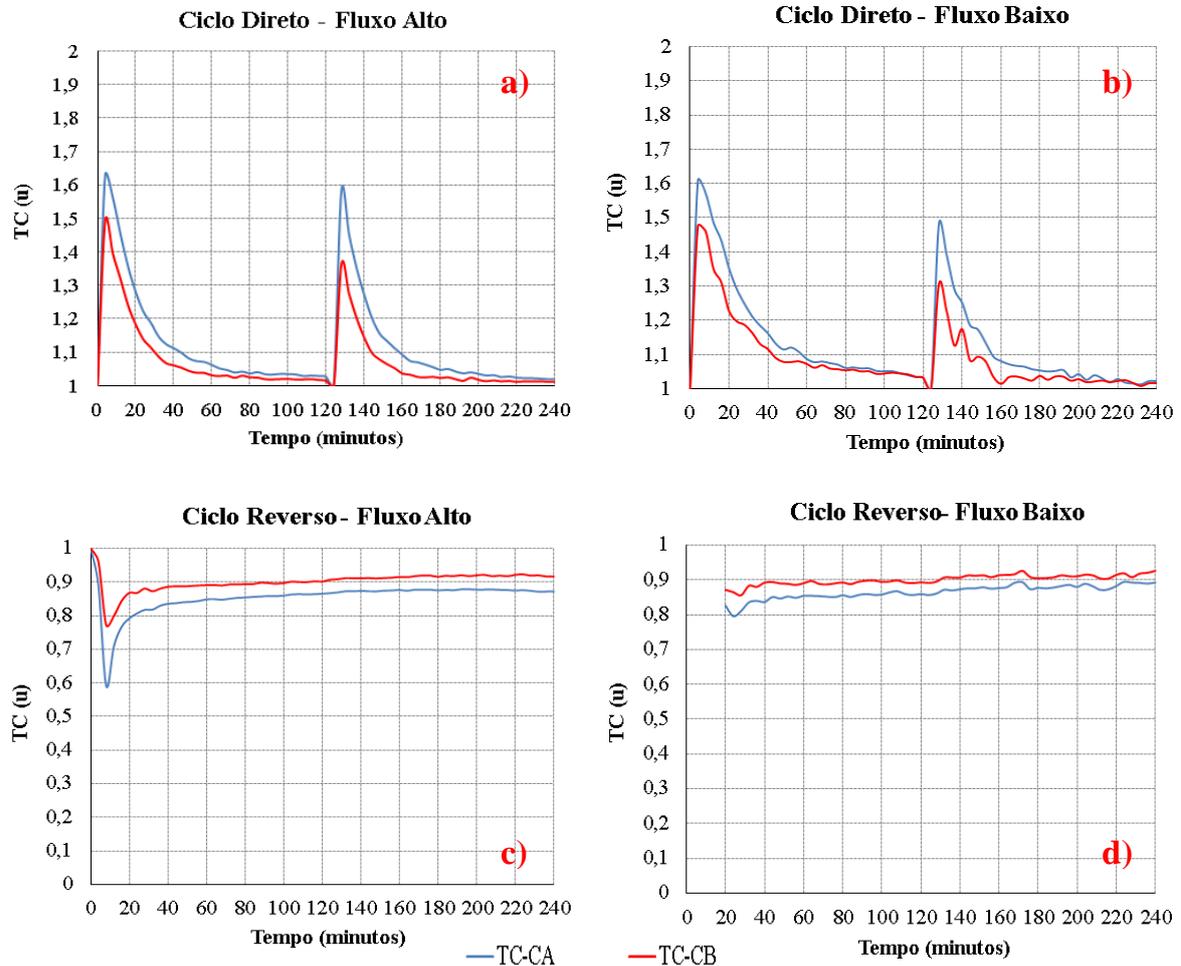


Fonte: Próprio autor.

No ciclo reverso com fluxo baixo (Figura 58d) não foi observado pico no TRC, devido à menor intensidade de fluxo, e ao fato do calor ter que atravessar a placa antes de começar a aquecer a superfície estudada (frontal com defeitos).

A Figura 59 mostra o resultado do TC da placa 11. No TC observaram-se também as diferenças nos valores causadas pelas diferenças no tamanho do defeito. O defeito de maior tamanho apresentou maiores valores (módulo) em ambos os ciclos e os picos das funções de contraste apareceram nos mesmos momentos que no caso do TRC (Figura 58).

Figura 59 – Resultado do TC da placa 11. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados obtidos não foi possível definir se, para o mesmo defeito, a maior intensidade do fluxo de calor vai gerar maiores valores de TRC e TC. Em relação às etapas (aquecimento ou arrefecimento), não foi possível identificar qual das duas gera maiores valores de TC e TRC em um mesmo defeito.

3.9.3 Resultado da placa 12 (influência da espessura do defeito)

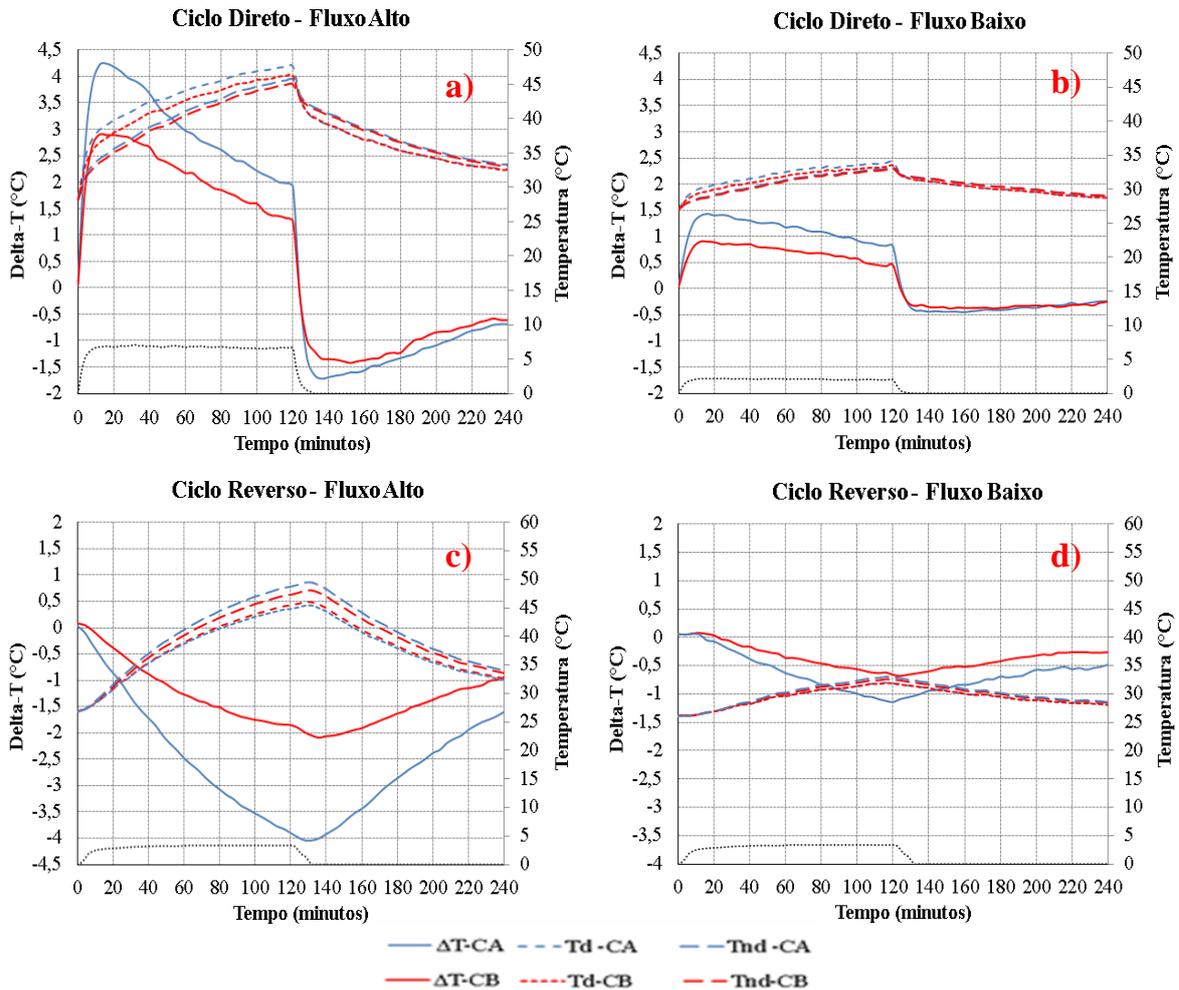
Na Figura 60 (a,b) se pode observar o comportamento do Delta-T na placa 12, no ciclo direto com fluxo alto e baixo. Na Figura 60 (c,d) se observa o ciclo reverso com fluxo alto e baixo. Esta placa foi desenhada com defeitos de igual tamanho à placa 11, mudando somente a profundidade do defeito (dimensão lateral). Nota-se que as curvas do Delta-T

em ambos os ciclos têm comportamento similar à placa 11 e novamente pode ser observado que o tamanho do defeito gerou valores de Delta-T maiores. Analisando a influência da profundidade, observou-se que os valores de Delta-T na placa 12 são maiores do que a placa 11 quando se compara o mesmo defeito no mesmo tempo e ciclo. Esta diferença será verificada de forma estatística no item 3.9.5.

Apesar de o comportamento ser considerado similar, observaram-se algumas diferenças no Delta-T em relação à placa 11. A principal diferença observada em relação à placa 11 foi o comportamento na fase final da etapa de aquecimento. A placa 12 não teve uma tendência a se estabilizar no final da etapa, como acontece nos defeitos de menor profundidade da placa 11. Talvez este processo demore mais tempo pelo fato da camada de ar ter maior espessura nos defeitos da placa 12. De acordo com o observado, considera-se que o período de 120 minutos não foi suficiente para observar a tendência à estabilização comprovados nas placas 10 e 11.

Este fato foi responsável também pelas diferenças observadas no Delta-T no ciclo reverso fluxo alto (Figura 60c), onde, após o desligamento das lâmpadas se manteve o crescimento do Delta-T, provocado pelo atraso térmico devido a maior dimensão lateral do defeito e da placa em geral. Este comportamento sugere que, quando esteja sendo avaliada uma fachada em campo, deve ser considerado o fenômeno do atraso térmico no período de inversão de fluxo, analisando-se o gradiente de temperatura que atravessa o defeito e não o gradiente de temperatura correspondente à espessura total da parede, já que, este último, como aconteceu na placa, não reflete a real condição da zona do defeito.

Figura 60 – Delta-T da placa 12. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.



Fonte: Próprio autor.

Este comportamento comprova que quanto maior é a profundidade do defeito, maiores serão os valores do Delta-T, similar ao que acontece com o tamanho (área do defeito). Ambos os comportamentos podem ser justificados também pelo maior volume da camada de ar. Este fato poderia facilitar a avaliação da gravidade do defeito nas inspeções em campo, sendo que, em defeitos de tamanhos similares, daria para identificar em qual deles o vazio por trás da cerâmica é maior e com isso tentar quantificar a gravidade do mesmo.

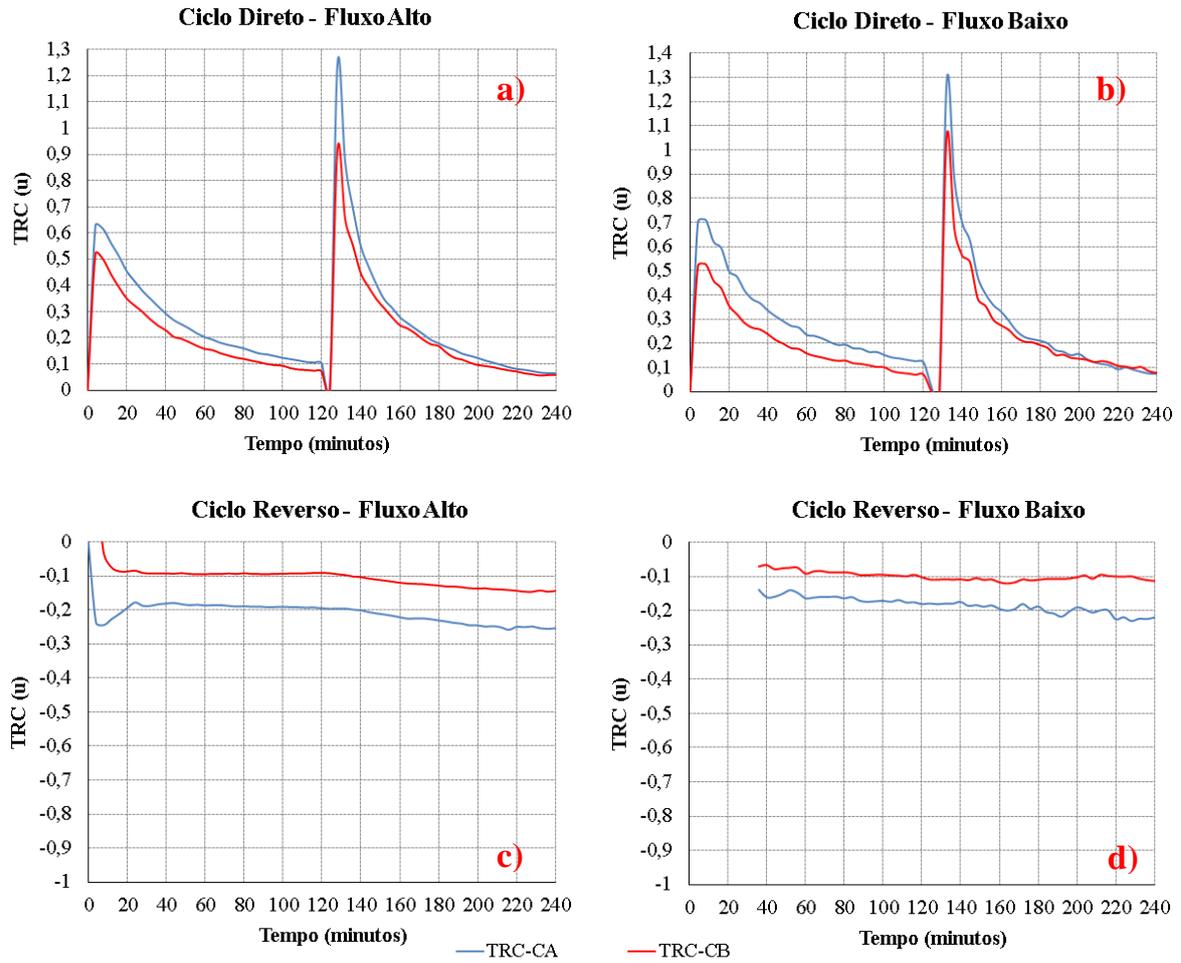
Na Figura 61 encontram-se os resultados do TRC da placa 12. Os picos das funções aparecem aproximadamente nos mesmos intervalos de tempo que nos casos anteriores. Na placa 12 observou-se que os picos na etapa de arrefecimento foram maiores que os picos

da etapa de aquecimento (Figura 61 a,b). Este comportamento se deve à baixa condutividade térmica da camada de ar e sua maior espessura.

Na etapa de arrefecimento, o calor sai do interior da placa e tem que atravessar o defeito e a placa cerâmica, chegando ao ambiente frontal (externo). Por tais motivos a superfície da placa cerâmica na frente do defeito sofre uma queda mais rápida da temperatura em relação à área sem defeito onde o calor passa através da argamassa colante com condutividade maior do que o ar. Como ambas as áreas perdem calor para o ambiente, a queda será mais rápida na área da frente do defeito porque o calor que vem do interior da placa demora mais em chegar acelerando o arrefecimento dessa região.

Observou que, diferente à placa 11, no ciclo reverso fluxo alto (Figura 61c) os picos não apareceram bem definidos, devido à maior espessura da camada de ar e conseqüentemente a maior espessura da placa, que demorou a chegada de calor a superfície frontal e diminuiu a taxa de crescimento da temperatura da superfície frontal. Outra diferença observa no TRC da placa 12 em relação à placa 11, foi o ligeiro aumento e estabilização dos valores do Delta-T a partir dos 120 minutos no fluxo alto e baixo no ciclo reverso (Figura 61 c,d), respectivamente. Esta diferença esteve relacionada também ao atraso térmico que demorou o arrefecimento da superfície de revestimento diminuindo a taxa de variação da temperatura da superfície e conseqüentemente.

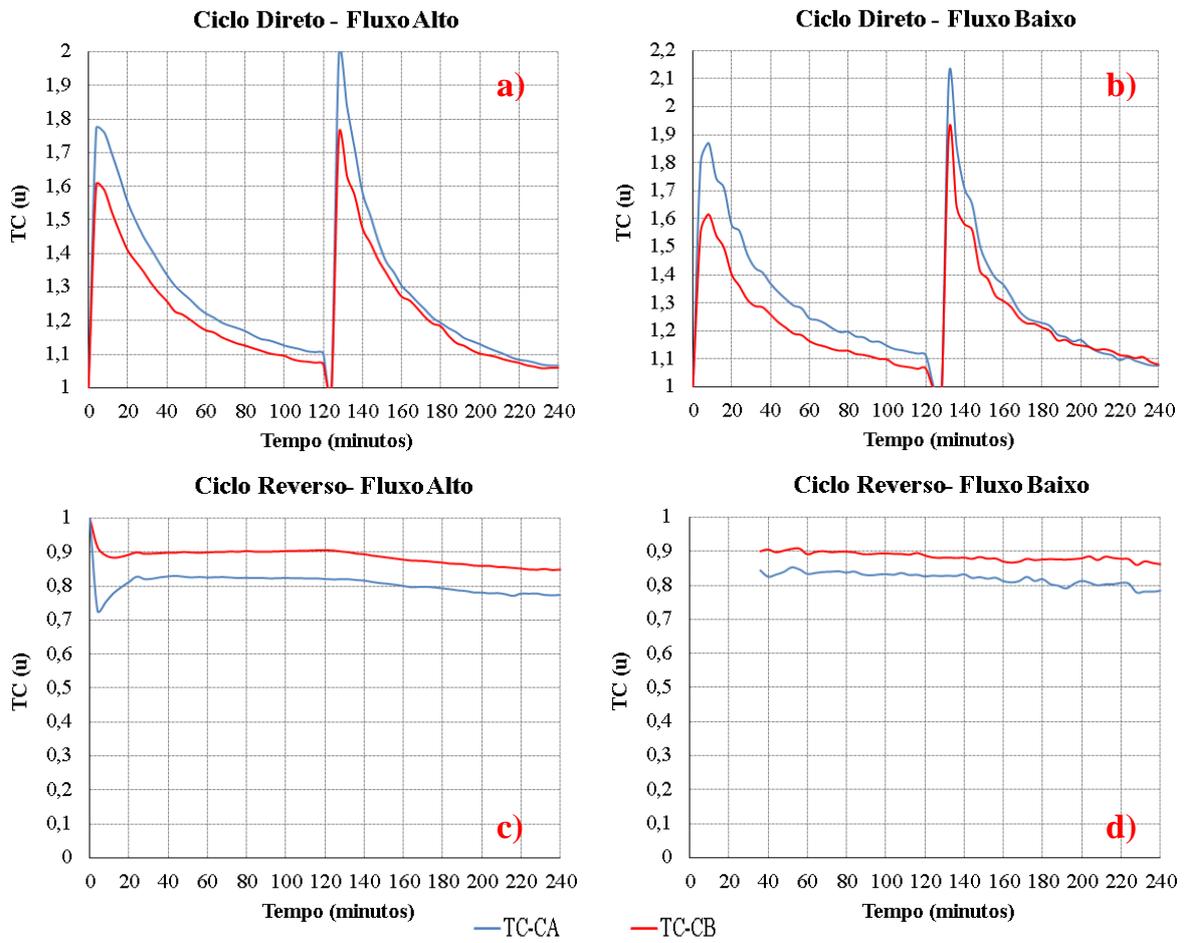
Figura 61 – Resultados do TRC da placa 12. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 62 mostra os resultados do TC da placa 12. Os resultados desta função foram similares aos resultados do TC, no que diz respeito às diferenças relativas ao tamanho do defeito e ao momento onde aparecem os picos da função.

Figura 62 – Resultado do TC da placa 12. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.



Fonte: Próprio autor.

Comparando ambas as funções na placa 11 e 12, pode-se verificar que, o tamanho do defeito não mudou o comportamento das funções, já a profundidade do defeito apesar das curvas terem um formato similar, gerou diferenças em relação ao comportamento de alguns picos e o comportamento no final da etapa de aquecimento em ambos os ciclos. No entanto, os valores máximos das funções apareceram aproximadamente no mesmo momento do tempo (Figura 62 a,b,c), independente da variável estudada (tamanho ou profundidade do defeito).

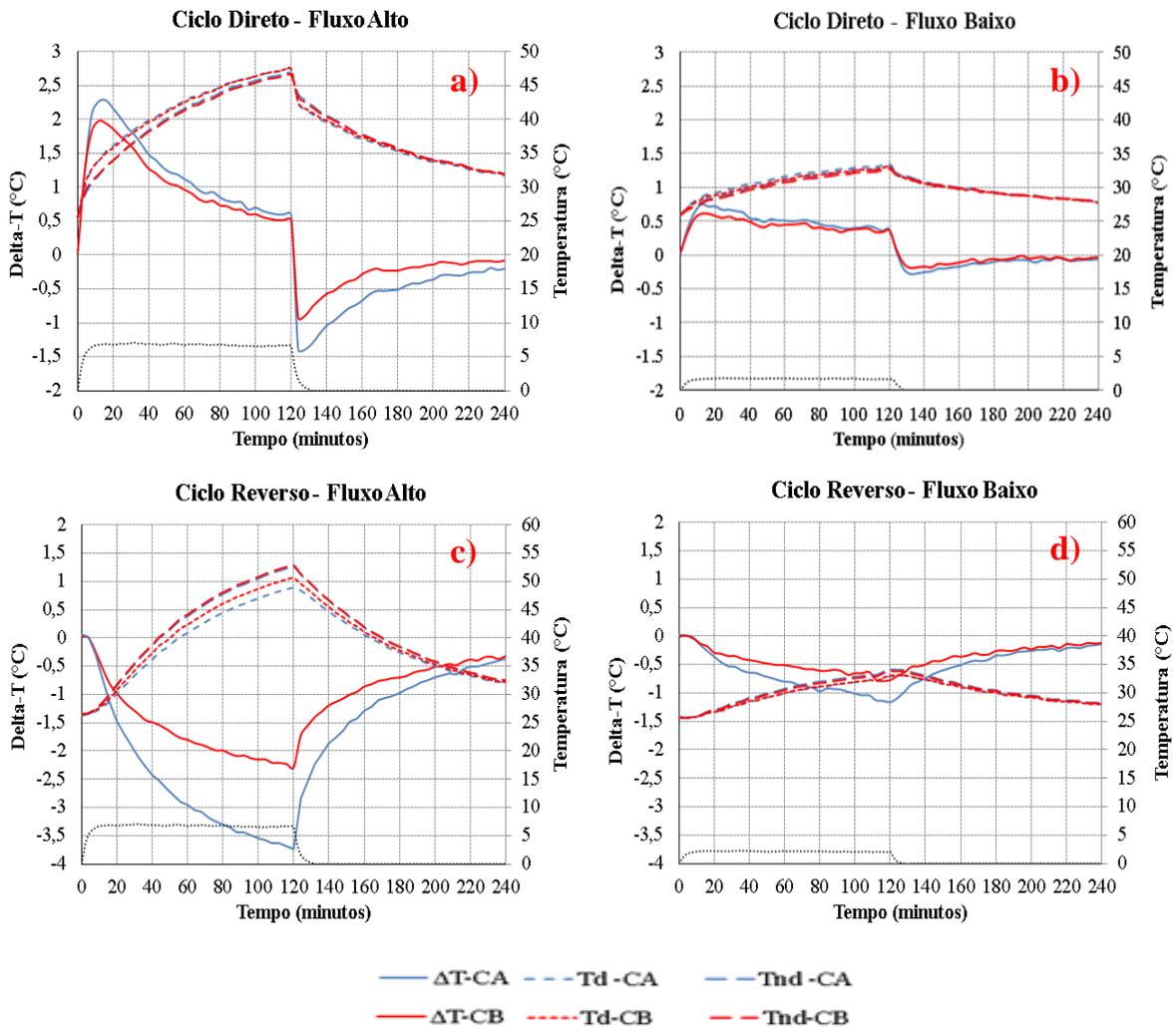
3.9.4 Resultados da placa 13 (influência da geometria do defeito)

A Figura 63 apresenta os resultados do Delta-T da placa 13 onde foi analisado a influência da geometria do defeito. Esta condição é uma das que frequentemente é encontrada nas inspeções, refere-se ao caso onde temos um mesmo tipo de cerâmica e descolamentos

geometricamente diferentes. O comportamento de forma geral foi o mesmo que nas placas anteriores, com picos de Delta-T no começo da etapa de aquecimento e arrefecimento no ciclo direto (Figura 63 a,b) e máximos valores de Delta-T no final do aquecimento no ciclo reverso (Figura 63 c,d).

Os resultados mostraram que os defeitos de maiores tamanhos geram maiores Delta-T nas duas etapas, tanto no ciclo direto quanto no ciclo reverso. Este comportamento confirma que, independentemente da sua geometria, quanto maior seja o tamanho do defeito mais visível o mesmo será no termograma.

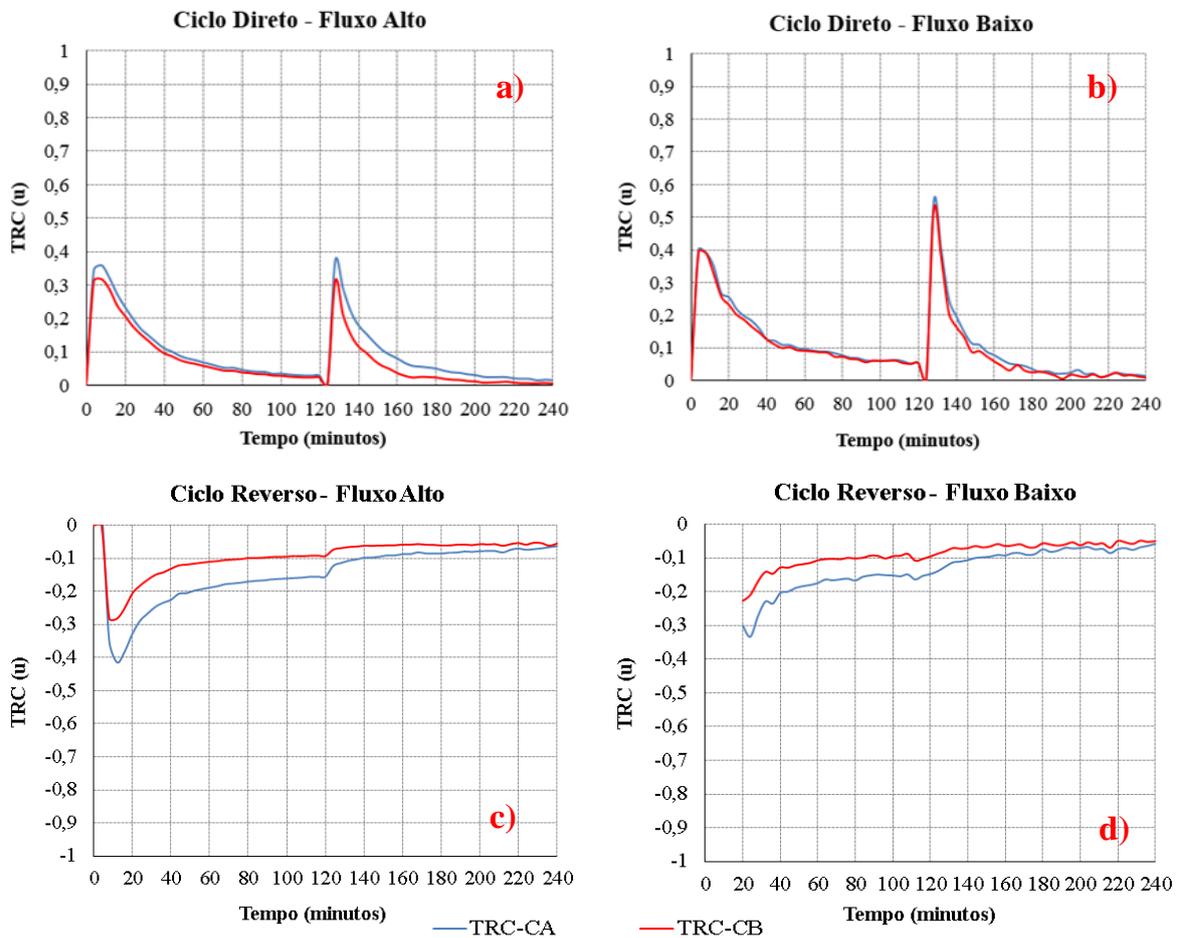
Figura 63 – Delta-T da placa 13. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 64 mostra os resultados do TRC da placa 13. Similar ao acontecido nas placas anteriores os picos do TRC apareceram no início da etapa de aquecimento e arrefecimento no ciclo direto (Figura 64 a,b). No ciclo reverso, o pico da função apareceu no começo do aquecimento no caso do fluxo alto (Figura 64c) e não ficou bem definido no caso do fluxo baixo (Figura 64d). Como o Delta-T no ciclo direto os valores ficaram com diferenças menores do que 15% (máxima diferença ao longo do ciclo), as diferenças no TRC não foram percebidas com clareza na Figura 64 (a,b).

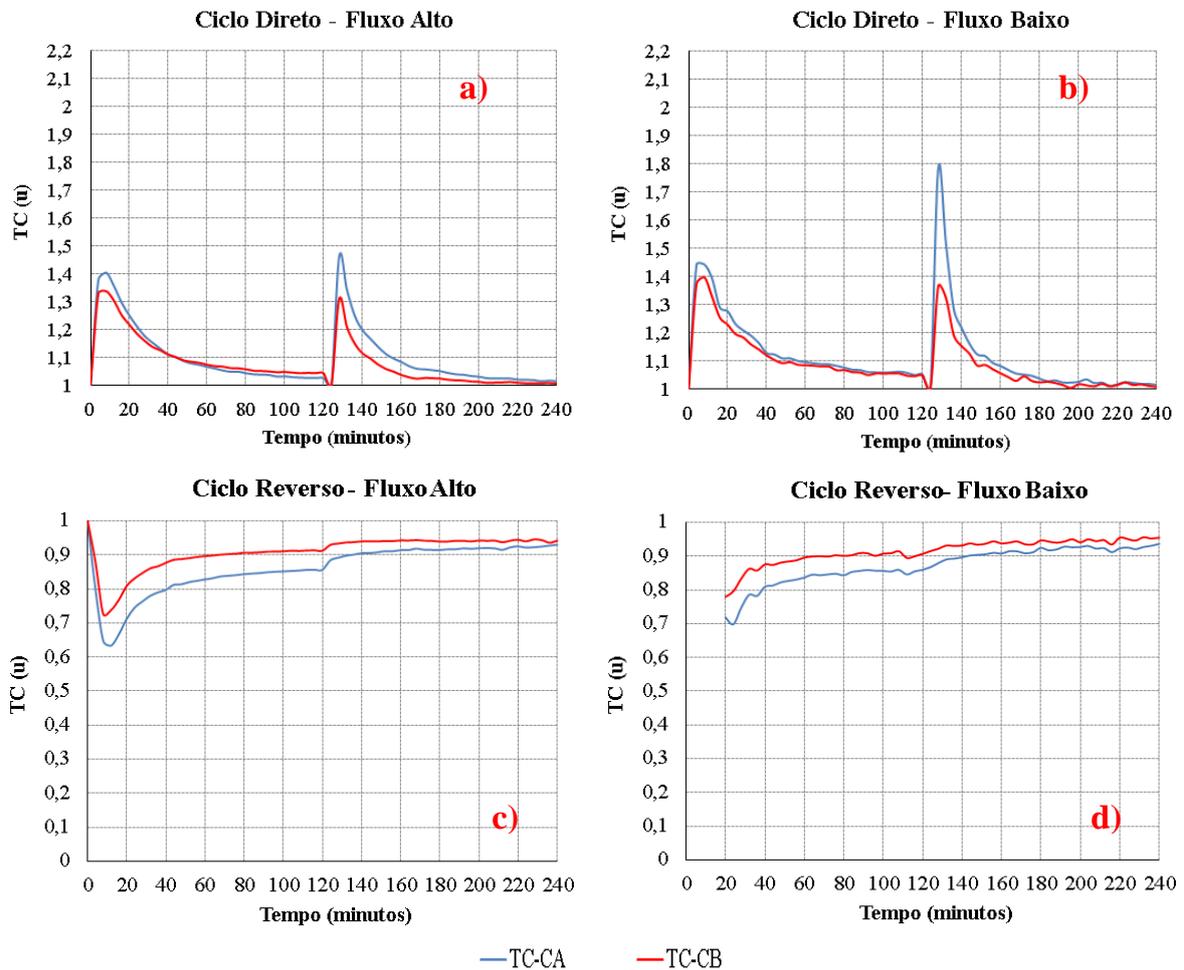
Figura 64 – Resultados do TRC da placa 13. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.



A Figura 65 mostra os resultados do TC da placa 13. No ciclo direto as diferenças nos valores de TC gerados pela geometria do defeito foram observadas com clareza somente nos pontos próximos aos picos da função. Após este os valores na maioria dos casos ficaram bem próximos. No fluxo reverso as diferenças no TC geradas pela geometria

podem ser observadas ao longo do experimento. O comportamento do TC em relação ao TRC foi semelhante.

Figura 65 – Resultados do TC da placa 13. (a) Ciclo Direto- Fluxo Alto, (b) Ciclo Direto- Fluxo Baixo, (c) Ciclo Reverso- Fluxo Alto, (d) Ciclo Reverso- Fluxo Baixo.



Fonte: Próprio autor.

As funções de contraste TRC e TC, tiveram um comportamento similar nas placas com revestimento cerâmico. Percebeu-se que as mesmas estão diretamente vinculadas à forma de aquecimento das placas e que as variáveis estudadas (tamanho do defeito, geometria e profundidade) do defeito geram diferenças nos valores das funções ao longo dos ciclos, principalmente nos momentos próximos aos picos das funções. Os picos de ambas as funções de contraste apareceram no mesmo intervalo de tempo independentemente do tamanho, geometria e profundidade do defeito. O comportamento delas mudou com a forma de aquecimento (direto ou reverso) e a intensidade de fluxo no caso do ciclo reverso, não sendo muito influenciado pelas características dos defeitos (descolamentos). O fato das

funções de contraste identificar os momentos onde melhor aparecem definidos os limites dos defeitos (BAUER *et al.*, 2016) ressalta a importância e a necessidade de analisar a forma em que são aquecidas as fachadas antes de fazer a avaliação termográfica dos descolamentos.

3.9.5 Análise estatística do estudo em placas com revestimento cerâmico

Para validar os resultados relativos às diferenças encontradas nos valores do Delta-T foi realizada uma análise estatística. Utilizou-se uma análise de variância (ANOVA - Fatorial) para avaliar a influência das variáveis relativas aos defeitos e ao fluxo de calor nos resultados do Delta-T. A análise foi realizada por placas incluindo em cada caso os dois ciclos estudados. Foram utilizadas 60 leituras em cada ciclo, sendo excluída somente a leitura correspondente ao momento inicial (tempo = 0 minutos). Foi utilizado o *software* STATISTICA v8.0.

A Tabela 13 mostra os resultados da análise estatística da placa 10. Foi avaliada a influência da espessura da cerâmica (fator 1) e do fluxo de calor (fator 2) através de uma análise fatorial $2^{2 \times 3}$, sendo considerados dois níveis para o fluxo de calor (alto e baixo) e três níveis para a variável espessura da cerâmica (A, B e C). De acordo com os valores de p-valor (inferiores a 0,05), verificou-se que a espessura da cerâmica e o fluxo de calor geram diferenças significativas nos valores do Delta-T nos termogramas.

Tabela 13 – Análise de variância. Avaliação da influência da espessura da cerâmica e o fluxo de calor.

	SQ	GI	MQ	F	p-valor
Intercepto	75,5134	1	75,51341	95,58631	0,000000
Espessura da cerâmica	4,0914	2	2,34568	2,88946	0,035784
Fluxo	34,7373	1	34,73732	43,97116	0,000000
Espessura*Fluxo	1,5883	2	0,79416	1,00527	0,366478

Legenda:

SQ: soma dos quadrados

GI: graus de liberdade

MQ: média quadrática

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 14 mostra os resultados da análise estatística da placa 11. Foi avaliada a influência do tamanho do defeito (fator 1) e do fluxo de calor (fator 2) através de uma

análise fatorial 2^2 , sendo considerados dois níveis para o fluxo de calor (alto e baixo) e dois níveis para a variável tamanho do defeito (A e B). De acordo com os valores de p-valor (inferiores a 0,05) pode-se concluir que o tamanho do defeito e o fluxo de calor geram diferenças significativas no Delta-T.

Tabela 14 – Análise de variância. Avaliação do tamanho do defeito e o fluxo de calor.

	SQ	GI	MQ	F	p-valor
Intercepto	61,9148	1	61,91481	72,08571	0,000000
Tamanho do defeito	6,1160	1	6,11601	7,12070	0,007913
Fluxo	47,1099	1	47,10989	54,84874	0,000000
Tamanho *Fluxo	0,5442	1	0,54421	0,63361	0,426481

Legenda:

SQ: soma dos quadrados

GI: graus de liberdade

MQ: média quadrática

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 15 mostra os resultados da análise estatística da influência da espessura do defeito (fator 1) e do fluxo de calor (fator 2). Neste caso, foram utilizados os dados do defeito A na placa 11 e 12 respectivamente. O defeito A, corresponde em ambos os casos ao de maior tamanho, o qual se encontra na cerâmica colocada na parte superior da placa. De acordo com os valores de p-valor (inferiores a 0,05), pode-se concluir que a espessura do defeito e o fluxo de calor geram diferenças significativas no Delta-T.

Tabela 15 – Análise de variância. Avaliação da influência da espessura do defeito e o fluxo de calor.

	SQ	GI	MQ	F	p-valor
Intercepto	48,0383	1	48,03826	30,65888	0,000000
Espessura do defeito	21,4495	1	21,44946	13,68943	0,000240
Fluxo	22,3476	1	22,34759	14,26263	0,000179
Espessura*Fluxo	4,5016	1	4,50163	2,87302	0,090719

Legenda:

SQ: soma dos quadrados

GI: graus de liberdade

MQ: média quadrática

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 16 mostra os resultados da análise estatística da placa 13. Foi analisada a influência da geometria do defeito (fator 1) e do fluxo de calor (fator 2) através de uma análise fatorial 2^2 , sendo considerados dois níveis para o fluxo de calor (alto e baixo) e dois níveis para a variável geometria do defeito (A e B). De acordo com os valores de p-valor

(inferiores a 0,05) pode-se concluir que a geometria do defeito e o fluxo de calor geram diferenças significativas no Delta-T.

Tabela 16 – Análise de variância. Avaliação da influência da geometria do defeito e o fluxo de calor.

	SQ	Gl	MQ	F	p-valor
Intercepto	39,4099	1	39,40995	36,15412	0,000000
Geometria do defeito	11,6974	1	11,69741	10,73103	0,001140
Fluxo	38,4600	1	38,46003	35,28269	0,000000
Geometria *Fluxo	0,0600	1	0,05998	0,05502	0,814659

Legenda:

SQ: soma dos quadrados

Gl: graus de liberdade

MQ: média quadrática

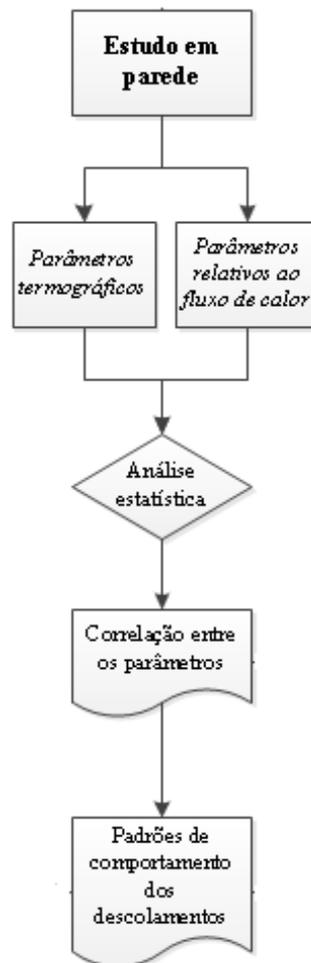
Fonte: Próprio autor.

A análise estatística mostrou que as quatro variáveis (espessura da cerâmica, tamanho, espessura e geometria do defeito) analisadas nas placas e o fluxo de calor geram diferenças significativas ($\alpha=0,05$) no Delta-T. Percebeu-se que em cada ciclo, a interação do fluxo de calor com o resto das variáveis não foi significativa, o que indica que independentemente do nível (intensidade) do fluxo a variável analisada vai ter o mesmo efeito sobre o Delta-T. Este comportamento foi observado no Delta-T, sendo que as diferenças geradas pelas variáveis estudadas foram visíveis independente do fluxo (alto ou baixo).

4 ESTUDO EM PAREDES

O estudo em parede constitui a segunda etapa experimental do trabalho. A Figura 66 resume a metodologia da etapa 2.

Figura 66 – Metodologia da etapa 2. Estudo em parede.



Fonte: Próprio autor.

Para a segunda etapa experimental foi construída uma parede de alvenaria de 13 x 40 x 60 cm (espessura x largura x altura) para a avaliação dos defeitos em maior escala. O principal objetivo do estudo na parede foi associar os parâmetros relacionados ao fluxo de calor (gradientes de temperatura e variação de temperatura da superfície) com os parâmetros termográficos (Delta-T e funções de contraste) usados no estudo em placas. Nesta etapa foi estudado o defeito que simula o descolamento na cerâmica. Foram avaliadas as variáveis:

tamanho do defeito e espessura da placa cerâmica. A Tabela 17 resume as variáveis do estudo.

Tabela 17 – Resumo dos defeitos, elementos e variáveis analisadas no estudo em parede.

Defeitos ou elementos	Tipos	Variáveis	Parede
Defeitos em revestimento cerâmico	Descolamento	Espessura da placa cerâmica Tamanho do defeito	Pd1

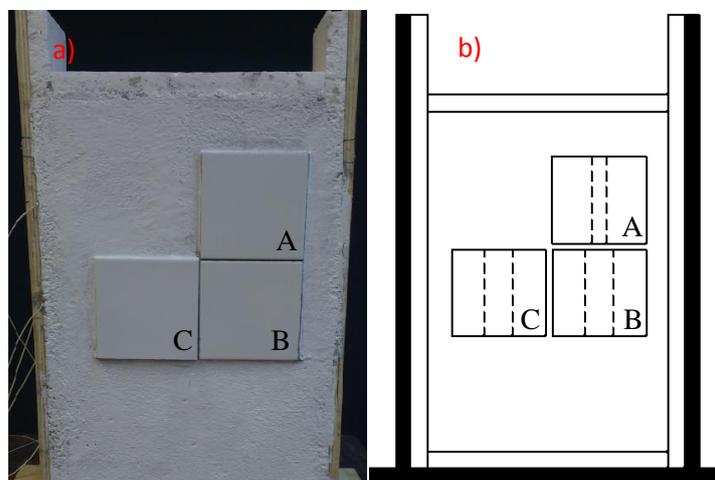
Fonte: Próprio autor.

Baseados nas variáveis definidas, os objetivos específicos do estudo foram:

- Quantificar os parâmetros termográficos nas placas cerâmicas;
- Quantificar os parâmetros relativos ao fluxo de calor (gradientes de temperatura e variação da temperatura da superfície) nas placas cerâmicas;
- Associar o comportamento dos parâmetros relativos ao fluxo de calor com os parâmetros termográficos nas placas;
- Definir os parâmetros relativos ao fluxo de calor, utilizados no estudo de fachadas.

A Figura 67 mostra a imagem digital e o esquema da parede com as dimensões. As placas cerâmicas A e B são de 155 x 155 x 4 mm e a placa cerâmica C é de 155 x 155 x 6,5 mm. O defeito por trás da placa cerâmica A tem uma largura de 2cm e o defeito por trás das cerâmicas B e C tem uma largura de 4cm. O comprimento de todos os defeitos foi de 155mm equivalente à dimensão da placa.

Figura 67 – Parede. (a) Imagem digital. (b) Croqui da parede.



Fonte: Próprio autor.

Para a análise dos gradientes foram colocados termopares nas diferentes camadas da parede. A posição dos termopares e o cálculo dos gradientes são explicados no item 4.4. Nos itens a seguir são descritos os materiais, o processo de fabricação e as características do experimento.

4.1 MATERIAIS E PROCESSO CONSTRUTIVO DA PAREDE

Os materiais utilizados na fabricação da parede foram: seis blocos cerâmicos de oito furos de 9x19x19cm, argamassa convencional para chapisco de cimento e areia com traço em volume 1:3 (cimento: areia) e argamassa mista (para emboço e assentamento dos blocos) de cimento, cal e areia com traço 1:1:5,5:1,8. Em um dos lados, utilizou-se argamassa colante ACIII e placas cerâmicas da cor branca. No outro lado, após a aplicação do chapisco, aplicou-se uma camada única de argamassa convencional com traço similar ao emboço.

A construção da parede se iniciou com a preparação da estrutura de madeira e poliestireno expandido e a verificação da largura da mesma colocando os blocos a serem utilizados na primeira fiada. Posteriormente os blocos cerâmicos foram assentados e seguidamente colocadas as barras de aço (travamento) na primeira e terceira fiada. Uma vez levantada a parede foram colocados os termopares na superfície dos blocos para a mensuração do gradiente nas camadas internas da parede.

Após 72 horas foi aplicada a camada de emboço por um dos lados e pelo outro lado massa única. Posteriormente foram assentadas as placas cerâmicas com os defeitos na argamassa colante. O procedimento para a execução dos defeitos foi o mesmo utilizados nas placas cerâmicas. Utilizou-se uma fita crepe, a qual retirou a argamassa colante na parte central da placa e na área do emboço, deixando assim a área vazia correspondente ao defeito (mesmo procedimento usado nas placas com revestimento cerâmico). Posteriormente a parte do revestimento em argamassa foi pintada. A Figura 68 mostra a sequência de passos para a construção da parede.

Figura 68 – Sequência de passos para a construção da parede. (a) Montagem da estrutura e verificação da largura. (b) Assentamento dos blocos. (c) Colocação dos termopares. (d) Aplicação do emboço. (e) Assentamento da cerâmica. (f) Pintura da parede.



Fonte: Próprio autor.

A estrutura da madeira foi utilizada com o objetivo de poder movimentar a parede e o poliestireno expandido (isopor) colocado no interior da estrutura teve por objetivo isolar as bordas e evitar as perdas de calor pelas laterais. Além disso, foram utilizadas duas barras de aço para evitar que as laterais de madeira abrissem durante o transporte (travamento) e para melhorar o contato dos blocos com o isopor (Figura 69).

Figura 69 – Posição da barra de aço na parede.



Fonte: Próprio autor.

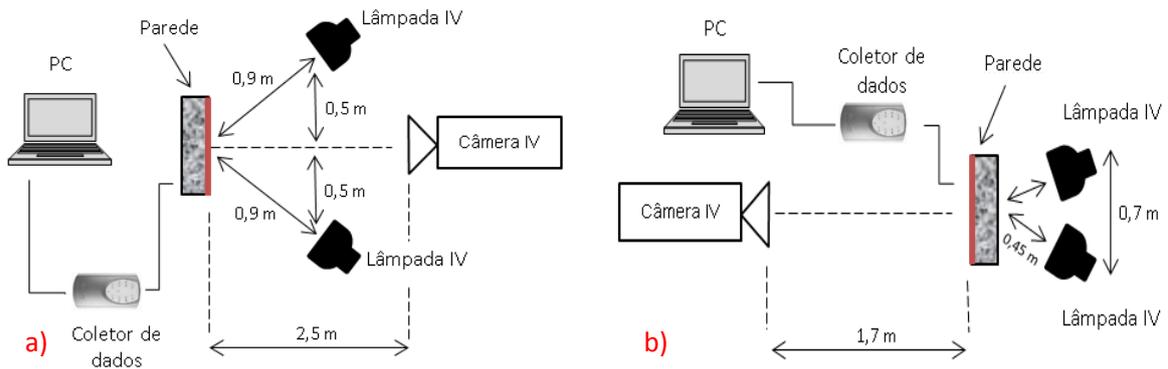
4.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os equipamentos utilizados para a determinação dos parâmetros de estudo, foram os mesmos do estudo em placas (item 3.5). A diferença com respeito ao estudo em placas foi a utilização de maior quantidade de termopares para a mensuração da temperatura em diferentes camadas da parede e no ambiente frontal e traseiro.

4.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi desenvolvido no laboratório nas mesmas condições que o estudo em placas. A parede foi estudada na condição direta e reversa. A Figura 70 mostra a distribuição do experimento no ciclo direto e no ciclo reverso. No caso do ciclo direto, a distribuição dos equipamentos foi similar ao estudo em placas. Foi modificada a distância da câmera infravermelha (sendo preciso afastar a câmera até 2,5 m) ao alvo para que a imagem infravermelha incluísse toda a área da parede e fosse possível verificar os possíveis reflexos na imagem.

Figura 70 – Distribuição do experimento em parede. (a) Ciclo direto. (b) Ciclo reverso.



Fonte: Próprio autor.

Os experimentos tiveram duração de 300 minutos, sendo 180 minutos de aquecimento e 120 minutos de arrefecimento. O tempo do aquecimento foi aumentado em relação ao estudo em placas devido a maior espessura da parede, que faz o calor demorar mais em sair pela superfície traseira, sendo necessário mais tempo para mensurar os parâmetros relacionados ao fluxo de calor e para avaliar os defeitos com a termografia.

O ciclo reverso teve uma modificação importante em relação ao experimento em placas. Observa-se que, foram utilizadas duas lâmpadas, uma a mais que no estudo em placas para a mesma condição. O objetivo foi garantir maior homogeneidade no aquecimento e obter valores de temperaturas na superfície estudada próximos aos valores obtidos na condição direta, sem variar a duração (300 minutos) do experimento.

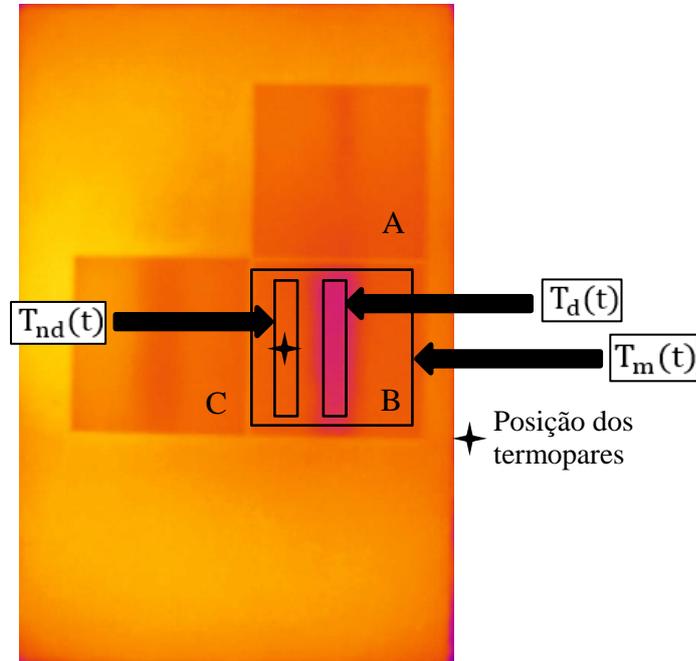
As imagens térmicas foram realizadas em intervalos de 4 minutos e a mensuração da temperatura nos termopares a cada 4 minutos. Os termopares fizeram simultaneamente 6 leituras de temperatura, as quais foram utilizadas no cálculo dos gradientes de temperatura.

4.4 PROCEDIMENTO DE COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados foram coletados de forma similar ao estudo em placas. Em cada imagem térmica foram mensuradas as temperaturas das áreas com e sem defeito e a temperatura média das placas cerâmicas como mostrado na Figura 71, para o caso da placa Cerâmica B. Estes dados foram obtidos nas três placas cerâmicas. Foram avaliados os defeitos das três placas

cerâmicas (A, B e C) e com os dados de temperaturas foram calculados o Delta-T e as funções de contraste de acordo com o item 3.2.5.

Figura 71 – Determinação das temperaturas a partir dos termogramas obtido na parede. Exemplo da placa B.



Legenda:

$T_d(t)$: Temperatura da área com defeito no tempo t
 $T_{nd}(t)$: Temperatura da área sem defeito no tempo t
 $T_m(t)$: Temperatura média da placa no tempo t

Fonte: Próprio autor.

Simultaneamente à captura das imagens térmicas foram coletadas as leituras em seis pontos dentro e fora da parede, com termopares tipo k. A Figura 72 mostra as camadas da parede representadas por letras: Placa cerâmica (A), Argamassa colante (B), Argamassa de emboço (C), Bloco cerâmico (D) e Camada única (E). Os pontos de mensuração da temperatura em cada uma das camadas foram: Ar frontal (T1), Superfície frontal do revestimento (T2), Superfície frontal do bloco (T4), Superfície traseira do bloco (T6), Superfície traseira do revestimento (T7) e Ar traseiro (T8). A posição dos pontos em relação ao plano da superfície pode ser observado na Figura 71. Os gradientes calculados correspondem a placa cerâmica B.

Figura 72 – Representação da seção da parede incluindo os pontos de mensuração de temperatura com os termopares.



Fonte: Próprio autor.

Com os dados obtidos da temperatura foram calculados os parâmetros vinculados ao fluxo de calor (gradientes de temperatura e variação da temperatura da superfície). A Tabela 18 resume os gradientes calculados.

Tabela 18 – Gradientes de temperatura calculados a partir dos termopares na parede.

Gradiente	Nomenclatura	Cálculo
Gradiente Ar	GAr	T1-T8
Gradiente superfícies	GSp	T2-T7
Gradiente bloco	GBc	T4-T6
Gradiente Ar - superfície	GArSp	T1-T2
Gradiente superfície - bloco	GSpBc	T2-T4
Variação de temperatura da superfície	VTSp	$T2_{(i+1)} - T2_{(i)}$

Fonte: Próprio autor.

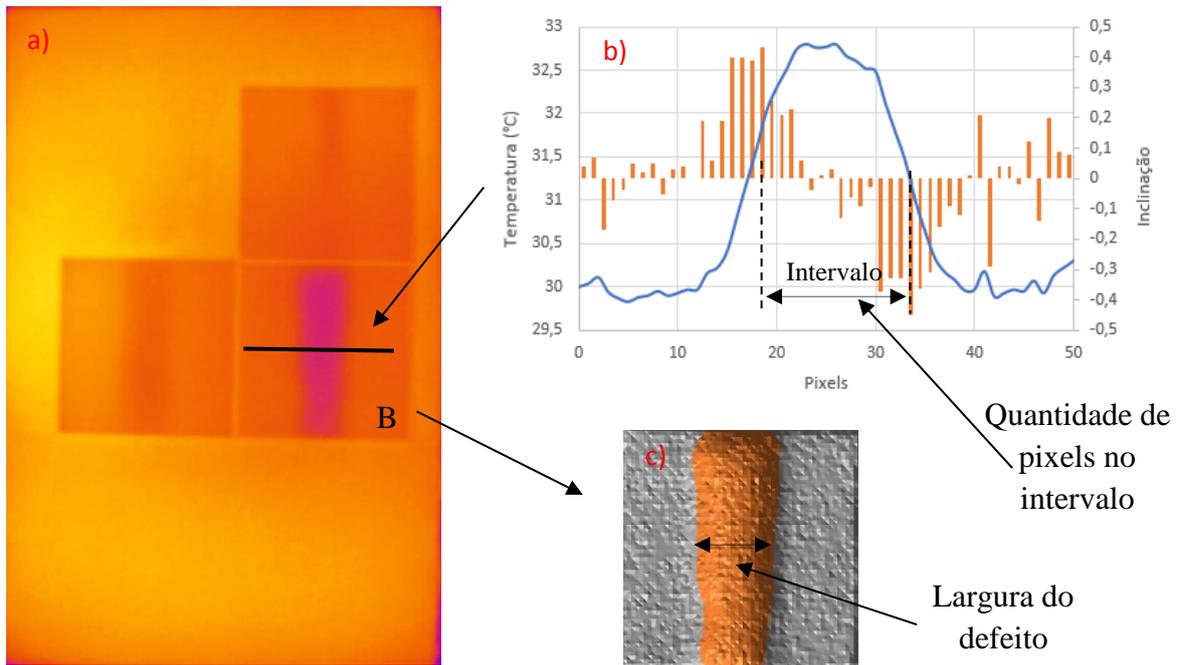
4.5 MENSURAÇÃO DA ÁREA DOS DEFEITOS

Na parede estudada, os defeitos têm tamanhos conhecidos, sendo possível validar um procedimento para determinar a dimensão dos mesmos. Neste caso, o objetivo foi mensurar a área com defeito através da termografia infravermelha e comparar com a real dimensão do defeito. A determinação da área dos defeitos foi baseada no IFOV da câmera infravermelha e na identificação dos pontos de máxima e mínima inclinação. A quantidade de pixels entre estes pontos corresponde à largura do defeito, segundo diversos autores (DUFOUR, 2009; LAI *et al.*, 2010; LAI, 2015)

A partir do IFOV e a posição da câmera no experimento foi possível converter os pixels da imagem em área e comparar com a real dimensão do defeito. A Figura 73 mostra de forma simplificada o procedimento utilizado para analisar a área do defeito. A sequência de passos foi a seguinte:

- Determinação da temperatura em cada pixel de uma linha na parte central da placa atravessando o defeito (*software* de processamento de imagem);
- Cálculo das médias entre cada dois pontos consecutivos de temperatura para toda a linha;
- Diferença de temperaturas (inclinação) entre as médias consecutivas obtidas no item anterior;
- Localização dos pixels de mínima e máxima inclinação da curva;
- Quantificação do número de pixels no intervalo de mínima e máxima inclinação (defeito);
- Determinação da dimensão correspondente a cada pixel, multiplicando o IFOV pela distância da câmera ao alvo.
- Determinação da largura do defeito através da multiplicação da quantidade de pixels pelo dimensão correspondente a um pixel.
- Repetição do procedimento para determinação do comprimento do defeito.
- Determinação da área do defeito (multiplicação a largura pelo comprimento)

Figura 73 – Procedimento para mensuração da largura do defeito. (a) Termograma com linha para mensuração da largura defeito. (b) Linha com valores de temperatura para determinação da inclinação mínima e máxima. (c) Quantificação dos pixels.



Fonte: Próprio autor.

Está análise foi realizada em 6 momentos do experimento. Calculou-se a área no início do aquecimento (12 minutos), na metade do aquecimento (82-96 minutos), no final do aquecimento (164-180 minutos), no início do arrefecimento (188 minutos), na metade do arrefecimento (232-248 minutos) e no final do aquecimento (284-300 minutos).

Está análise foi realizada em 4 momentos do experimento no ciclo reverso. Calculou-se a área na metade do aquecimento (82-96 minutos), no final do aquecimento (164-180 minutos), na metade do arrefecimento (232-248 minutos) e no final do arrefecimento (284-300 minutos). No caso reverso a metade da etapa de arrefecimento coincidiu com os máximos valores de Delta-T do ciclo.

Em ambos os ciclos, a análise na metade e no final do experimento foi realizada utilizando 5 termogramas em cada caso, analisando a variabilidade no cálculo da área.

4.6 RESULTADO DO ESTUDO EM PAREDE

Neste item são apresentados os resultados do estudo em parede correspondentes aos parâmetros termográficos (Delta-T e funções de contraste) e aos parâmetros relativos ao

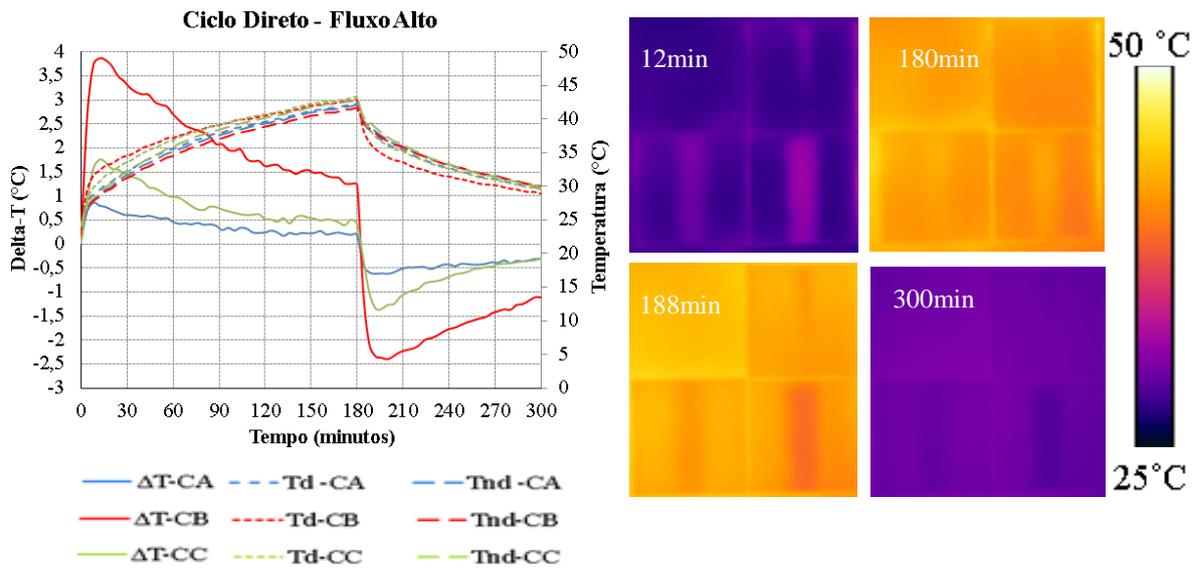
fluxo de calor (gradiente e variação da temperatura). Junto aos resultados do Delta-T se mostraram os termogramas com as três placas cerâmicas estudadas.

4.6.1 Comportamento dos parâmetros termográficos

A Figura 74 e Figura 75 mostra o comportamento do Delta-T das placas cerâmicas na parede (ciclo direto e reverso) e os principais termogramas de cada etapa. Como foi comprovado no estudo em placas, o maior tamanho do defeito e a menor espessura da placa geram maiores valores de Delta-T. Pode-se observar que os picos do Delta-T, no ciclo direto, apareceram no começo do aquecimento e do arrefecimento, similar ao acontecido no estudo em placas. Já no ciclo reverso, os máximos valores foram obtidos após o final da etapa de aquecimento devido ao atraso térmico da parede. Neste caso, a diminuição do fluxo de calor não é imediata, gerando um aumento da temperatura posterior ao desligamento das lâmpadas. Por tais motivos, os máximos valores do Delta-T foram obtidos aproximadamente aos 220 minutos.

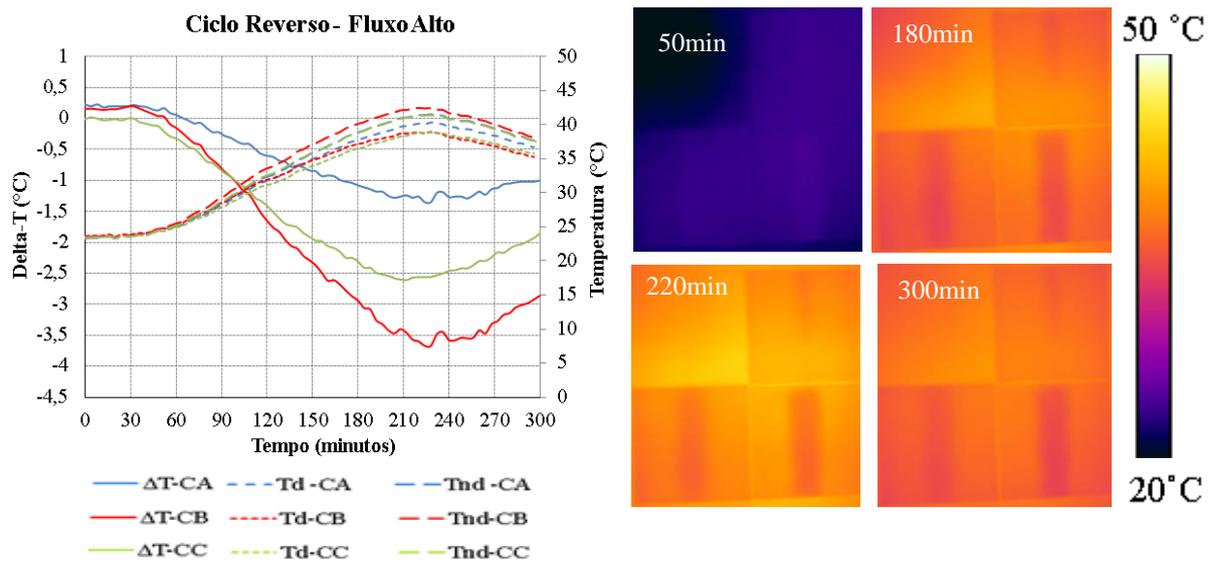
Outra diferença observada em relação ao estudo em placas foi relativa ao momento onde começam a aparecer, no ciclo reverso, os valores negativos do Delta-T. Neste caso, como a espessura da parede é três vezes maior do que as placas, o calor demora mais tempo para sair pela superfície estudada, não sendo observados valores de Delta-T gerados pela presença dos defeitos no revestimento cerâmico antes dos 50 minutos. Observe-se que foi necessário que o experimento fosse realizado por mais uma hora (total 300 minutos) para avaliar o comportamento do Delta-T, devido à maior espessura da parede. Outro fato importante foi o momento onde começaram a aparecer as diferenças entre os defeitos. As diferenças em relação ao tamanho (Cerâmica A vs Cerâmica B) do defeito foram percebidas após 50 minutos e as diferenças geradas pela espessura da placa cerâmica (Cerâmica B vs Cerâmica C) somente foi percebida aos 110 minutos.

Figura 74 – Comportamento do Delta-T na parede, Ciclo Direto-Fluxo alto.



Fonte: Próprio autor.

Figura 75 – Comportamento do Delta-T na parede, Ciclo Reverso- Fluxo Alto.

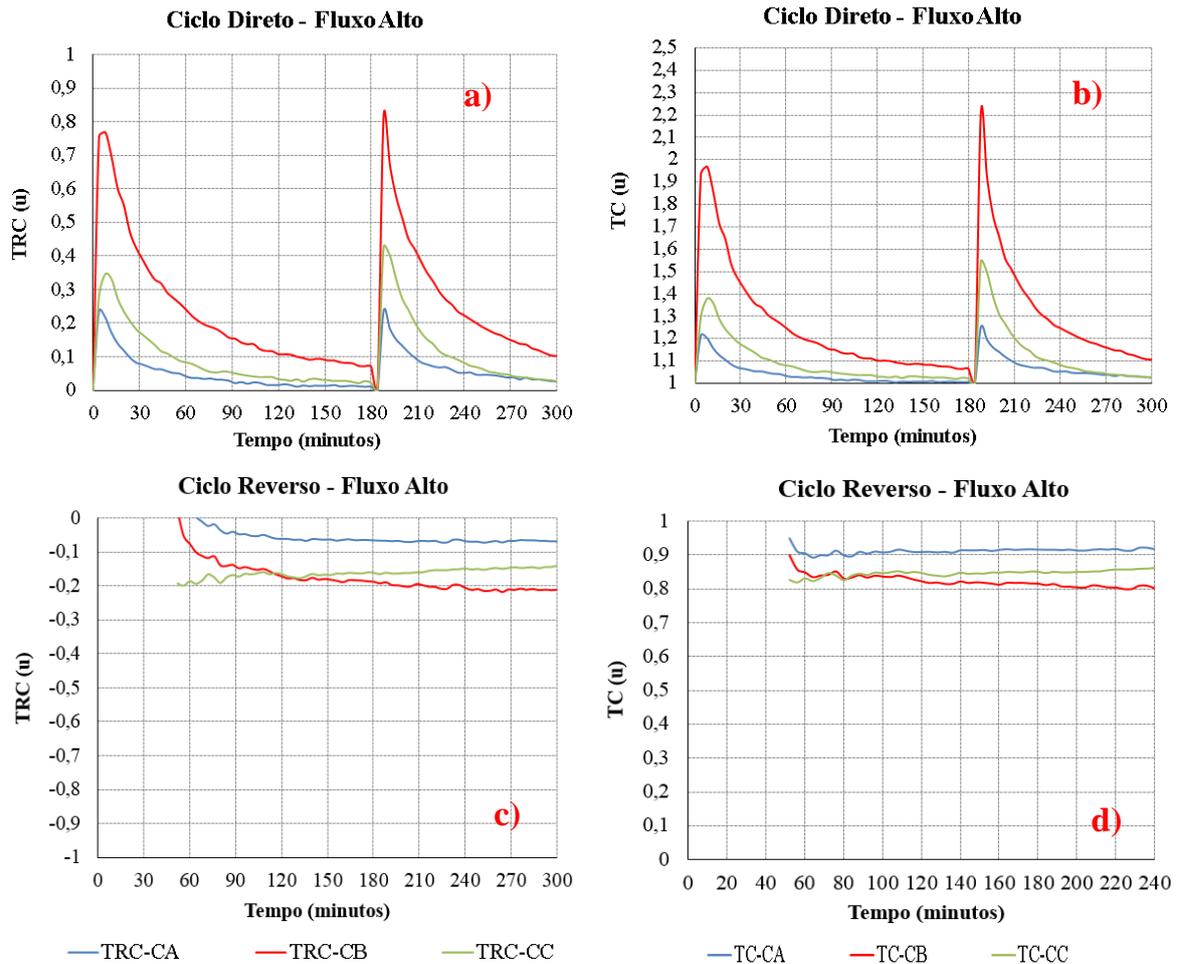


Fonte: Próprio autor.

Os resultados das funções de contraste podem ser observados nas Figura 76. No ciclo direto, o TRC e o TC têm os picos no começo do aquecimento e do arrefecimento (Figura 76 a,b), similar ao comportamento obtido nas placas. No ciclo reverso (Figura 76 c,d), como o aquecimento da superfície estudada foi bem mais demorado em ambas as funções de contraste (TRC e TC) não apresentaram picos bem definidos. Inclusive, no início do aquecimento fica inviável a mensuração das duas funções de contraste por se manter aproximadamente constante a temperatura média da superfície da placa cerâmica (por aproximadamente 50 minutos).

Se fosse mensurado o TRC ou TC no início do aquecimento existiriam variações nos valores, os quais não podem ser associados à presença de defeitos. Neste ciclo foram representados os valores negativos da função para analisar somente os resultados que podem ser associados à presença de defeitos.

Figura 76 – Comportamento do TRC e do TC na parede, ciclo direto e ciclo reverso.



Fonte: Próprio autor.

Comparado com o estudo em placas, o comportamento do Delta-T e as funções de contraste sugerem que, no ciclo direto, a espessura da parede não variou o comportamento destes três parâmetros. Não sendo assim no ciclo reverso, onde o aquecimento da superfície foi mais demorado e não gerou picos nas funções de contraste, sendo difícil determinar os momentos (tempo) de melhor visibilidade dos defeitos.

O ciclo reverso apresentou ainda, diferenças em relação ao momento onde aparece o máximo valor de Delta-T e a maior espessura em relação às placas gerou um atraso

térmico. Após o desligamento das lâmpadas se manteve o fluxo principal de calor no mesmo sentido por mais 30 minutos. Este fato comprova a necessidade de avaliar em um estudo em campo os gradientes de temperatura entre as camadas da fachada, com o intuito de conhecer a real condição do fluxo de calor, tendo em vista que após a incidência direta do sol o processo de inversão de fluxo vai demorar a depender das propriedades térmicas dos materiais constituintes das camadas.

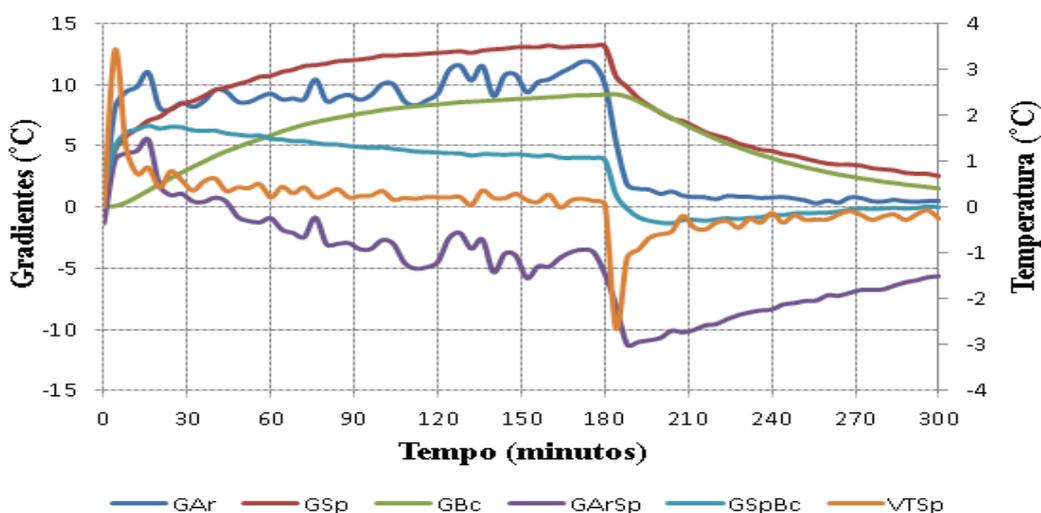
4.6.2 Comportamento dos parâmetros relativos ao fluxo de calor

A avaliação termográfica foi acompanhada da mensuração de parâmetros relacionados ao fluxo de calor que atravessa a parede durante o experimento. De acordo com o descrito na metodologia, foram colocados termopares nas diferentes camadas da parede para calcular os valores de gradiente de temperatura. O objetivo foi observar o comportamento dos diferentes gradientes para analisar qual deles pode ser associado aos momentos de melhor visibilidade dos defeitos.

A Figura 77 mostra o resultado dos gradientes calculados a partir dos dados mensurados pelos termopares no ciclo direto. Inicialmente foram calculados os gradientes correspondentes a mesma camada na parte interna e externa: Gradiente Ar (GAr), Gradiente superfícies (GSp) e Gradiente bloco (GBc), comumente utilizados em estudos vinculados ao fluxo de calor em paredes.

Posteriormente foi determinado o gradiente entre a superfície do revestimento e a superfície do bloco (GSpBc), que representa o gradiente de calor que atravessa o defeito, considerando que o vazio pode estar na interfase cerâmica/ argamassa, na argamassa ou na interfase argamassa/bloco. Este gradiente serve para analisar as três possibilidades de presença de vazio.

Figura 77 – Comportamento dos gradientes de temperatura na parede, Ciclo Direto.



Legenda:

GAr: Gradiente Ar **GSp:** Gradiente superfícies **GBc:** Gradiente Bloco
GArSp: Gradiente Ar – Superfície **GSpBc:** Gradiente Superfície - Bloco
VTSp: Variação de temperatura da superfície

Fonte: Próprio autor.

O outro gradiente analisado foi a diferença entre o ar externo e a superfície externa (GARSp). Considera-se que este gradiente pode auxiliar na avaliação da condição que se encontra o revestimento, ou seja, se o mesmo está ganhando ou perdendo calor para o ambiente. Além disso, determinou-se a variação da temperatura da superfície (VTSp) pela relação que foi encontrada nos estudos em placas.

No ciclo direto o gradiente gerado pela diferença de temperatura do ar entre o ambiente frontal e traseiro (Gar), teve um rápido crescimento inicial devido ao acréscimo da temperatura no ambiente frontal pelo acendimento das lâmpadas. Após este período inicial se manteve aproximadamente constante ao redor dos 10°C. O gradiente calculado entre a superfície frontal e traseira do revestimento (GSp) e entre o bloco frontal e traseiro (GBc) tiveram um comportamento similar, com crescimento mais intenso no começo do ciclo e uma tendência a se estabilizar para o final do ciclo. Ambos os gradientes seguiram o comportamento esperado, associado diretamente à forma como foi aquecida a parede em ambos os ciclos, ou seja, as curvas mostraram com clareza a condição transiente do experimento. De acordo com o comportamento encontrado se pode concluir que no ciclo direto estes três gradientes dificilmente possam ser associados aos parâmetros termográficos.

No ciclo direto o gradiente entre superfície frontal e o bloco (GSpBc) parece efetivamente mostrar uma boa relação com o comportamento do Delta-T. Observa-se similitude no comportamento da curva do gradiente e do Delta-T, onde os maiores valores foram obtidos ao início de cada etapa e diminuíram para o final, tanto na etapa de aquecimento quanto na etapa de arrefecimento. Inclusive o momento onde este gradiente foi zero coincidiu com o momento onde o defeito não era visível no termograma ($\Delta T = 0$). Este comportamento sugere que é preciso mensurar o GSpBc antes da realização da avaliação termográfica, porque o mesmo está associado ao fluxo calor que atravessa o defeito e vai definir o período de tempo onde o mesmo pode ser avaliado.

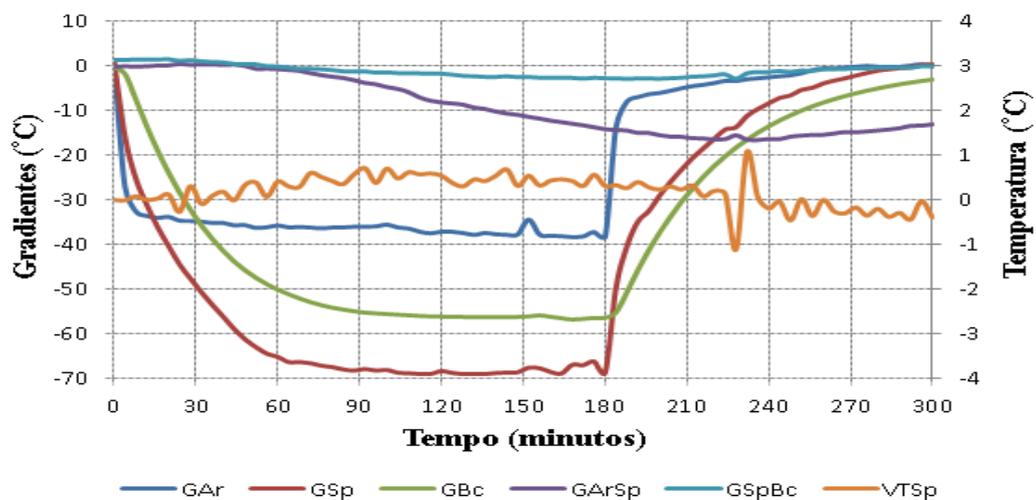
A variação da temperatura da superfície (VTSp) mostrou um comportamento similar às funções de contraste no que diz respeito aos picos da função e a forma das curvas. O seu comportamento esteve diretamente vinculado à forma de aquecimento utilizada no experimento. A VTSp apresentou rápido crescimento no início da etapa, diminuição da taxa de crescimento em um segundo momento e estabilização a partir dos 60 minutos. O mais importante foi que os picos deste gradiente coincidiram em tempo com os picos das funções de contraste. Isto sugere que é preciso procurar os picos (valores máximos) de VTSp para identificar os momentos onde os limites dos defeitos apareceram melhor definidos no termograma, especificamente dentro do intervalo de tempo onde o GSpBc confirme a passagem de calor através do defeito.

O gradiente entre o ar frontal e a superfície frontal (GArSp), nos primeiros minutos, aumentou como resultado do acendimento das lâmpadas, comportamento específico da forma de aquecimento usada no experimento. Passada essa fase inicial, o GArSp se manteve em queda durante o aquecimento, o que indica que a superfície está sendo aquecida (ganhando calor). No arrefecimento, o valor foi aumentando, o que indica que está saindo calor da superfície estudada (perdendo calor). A mudança na inclinação deste gradiente aconteceu aos 188 minutos, momento onde começa a ser observado o defeito na condição reversa. De acordo com os resultados se pode concluir que o GArSp poderia auxiliar na identificação da condição em que se encontra a superfície do revestimento da fachada estudada.

A Figura 78 mostra o resultado dos gradientes calculados a partir dos dados mensurados pelos termopares no ciclo reverso. No ciclo direto e reverso os gradientes GAR, GBc e GSp tiveram o mesmo comportamento, com diferenças nos valores. No ciclo direto foram positivos e no ciclo reverso negativos, justificado pela mudança do sentido do fluxo de calor. Os valores dos três gradientes foram maiores no ciclo reverso produto das lâmpadas infravermelhas ficar mais próximas da superfície aquecida.

O GSpBc também mostrou certa relação com o comportamento do Delta-T, apesar dos valores serem pequenos, a forma das curvas foi parecida, porém ficou difícil definir se os máximos valores do gradiente coincidem com os máximos valores de Delta-T. O GARSp, ficou bem semelhante ao Delta-T, coincidindo a forma da curva e os máximos valores. O parâmetro de variação de temperatura da superfície (VtSp) não teve um comportamento que a priori possa ser associado a algum parâmetro termográfico.

Figura 78 – Comportamento dos gradientes de temperatura na parede, Ciclo Reverso.



Legenda:

GAr: Gradiente Ar **GSp:** Gradiente superfícies **GBc:** Gradiente Bloco
GArSp: Gradiente Ar – Superfície **GSpBc:** Gradiente Superfície - Bloco
VTSp: Variação de temperatura da superfície

Fonte: Próprio autor.

Percebeu-se que alguns dos parâmetros analisados podem ser associados às funções utilizadas nas análises termográficas. No item seguinte se realiza a análise estatística dos

dados para determinar que parâmetros relativos ao fluxo de calor podem ser correlacionados com os parâmetros utilizados na avaliação termográfica.

4.7 CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS RELATIVOS AO FLUXO DE CALOR COM OS PARÂMETROS TERMOGRÁFICOS

Foi realizada uma análise estatística com o objetivo determinar a correlação (R^2) entre os parâmetros vinculados ao fluxo de calor (gradientes e variação de temperatura da superfície) e os parâmetros resultantes da análise termográfica (Delta-T e as funções de contraste). Os valores dos parâmetros utilizados nas análises estatísticas podem ser observados no Apêndice B. Como as variáveis são contínuas e existe interferência entre elas foi preciso utilizar uma análise de associação com interferência. Por tais motivos, foi realizada uma análise multivariada, especificamente uma análise de fatores que permitiu determinar a correlação entre os parâmetros do fluxo e os parâmetros termográficos. Os parâmetros relacionados ao fluxo de calor e os parâmetros termográficos foram tratados como variáveis contínuas.

O resultado da análise foi a obtenção da matriz de correlação (R^2) entre os parâmetros. Foram utilizados os correspondentes à placa Cerâmica B e foram considerados os valores de 0,75 ou superiores como indicadores de boa correlação (R^2). A análise foi realizada no *software* STATISTICA v8.0.

A Tabela 19 mostra os resultados da análise multivariada para o ciclo direto. Nota-se que os parâmetros vinculados ao fluxo de calor que apresentaram correlação com os parâmetros termográficos foram o gradiente entre a superfície frontal e o bloco (GSpBc), o gradiente entre o ar frontal e a superfície frontal (GArSp) e a variação de temperatura da superfície (VTSp).

O Delta-T ficou correlacionado, tanto na etapa de aquecimento quanto na etapa de arrefecimento, ao calor que atravessa o defeito representado por GSpBc e ao sentido do fluxo de calor através da superfície representado por GArSp. As funções de contraste (TRC e TC) ficaram correlacionadas, na etapa de aquecimento, com o GArSp e com a variação da temperatura da superfície (VTSp), o que indica que as funções de contraste na condição direta, estão relacionadas com o sentido do fluxo de calor e ao ganho de calor na

superfície. Na etapa de arrefecimento as funções de contraste não apresentaram correlação com nenhum dos parâmetros analisados.

Tabela 19 – Matriz de correlação (R^2) do Ciclo Direto. Resultado da análise multivariada.

Ciclo Direto - aquecimento			
	ΔT-CB	TRC-CB	TC-CB
Gar	-0,02	-0,12	-0,12
GSp	-0,51	-0,53	-0,53
GBc	-0,70	-0,65	-0,65
GArSp	0,81	0,91	0,91
GSpBc	0,97	0,73	0,70
VTSp	0,45	0,75	0,75
Ciclo Direto - arrefecimento			
	ΔT-CB	TRC-CB	TC-CB
Gar	0,69	0,14	0,19
GSp	0,10	0,50	0,50
GBc	-0,17	0,63	0,61
GArSp	0,79	-0,65	-0,68
GSpBc	0,96	-0,28	-0,20
VTSp	0,16	-0,76	-0,81

Fonte: Próprio autor.

Na etapa de aquecimento o calor proveniente do ambiente externo atravessa a placa cerâmica e encontra uma camada de ar (defeito) ou uma camada de argamassa colante (sem defeito). A diferença na resistência térmica de ambas as camadas gera acumulação de calor na superfície da placa cerâmica que fica na frente do defeito. Para o defeito aparecer visível no termograma é preciso que o calor atravesse o mesmo, e para que os limites apareçam melhor definidos é preciso encontrar a maior taxa de crescimento da temperatura da superfície, ou seja, o momento onde mais rapidamente a superfície ganhe calor.

Estes fatos indicam que na condição direta (calor entrando na edificação pela superfície revestida), deve-se procurar nas inspeções de fachadas o intervalo onde o GSpBc é positivo para garantir que o calor esteja atravessando o defeito e o momento de máximo crescimento (picos) da temperatura da superfície, o qual estaria indicando o momento onde o defeito apresentaria seus limites melhor definidos. O GArSp, poderia ajudar na indicação da condição em que se encontra a superfície.

No arrefecimento pode ser observado que o GSpBc e o GArSp foram os parâmetros que apresentaram correlação com o Delta-T, não sendo possível nesta etapa associar as funções

de contraste com nenhum dos parâmetros relacionados ao fluxo de calor. Esta correlação indica que após a inversão do fluxo na fachada (quando o calor estiver saindo pela superfície revestida) é necessário encontrar o intervalo onde o GSpBc apresenta valores negativos, além de identificar os momentos onde a diferença da temperatura do ar externo (temperatura ambiente) e a temperatura do revestimento seja a maior possível. Esse momento provavelmente seja o mais indicado para avaliar o descolamento após a inversão de fluxo, tendo em vista que deve corresponder com máximo valor do Delta-T.

A inversão do fluxo de calor nas fachadas não acontece de forma imediata após o cese da incidência do sol. Nesta condição o GARSp poderia mostrar que a superfície da fachada está começando a arrefecer e não necessariamente o calor estaria atravessando o defeito. Este motivo ressalta ainda mais, a importância de utilizar nesta condição o GSpBc, sendo que o mesmo mostra o intervalo onde o calor está atravessando o defeito, condição necessária para que o mesmo seja visível no termograma.

A Tabela 20 mostra os resultados da análise multivariada para o ciclo reverso. No ciclo reverso, na etapa de aquecimento, o GARSp e o GSpBc têm correlação com o Delta-T. Este comportamento está em correspondência com os resultados do Delta-T e as funções de contraste. Nos experimentos os máximos (módulos) valores de Delta-T foram obtidos no momento que a diferença de temperatura da superfície ambiente e o gradiente foram maiores, no final do aquecimento.

No ciclo reverso no arrefecimento, observou-se também que o GSpBc e o GARSp foram os parâmetros que apresentaram correlação com o Delta-T. As funções de contraste não apresentaram correlação com nenhum dos parâmetros relacionados ao fluxo de calor, similar ao acontecido no ciclo direto na etapa de arrefecimento. Este fato comprova que quando o calor estiver saindo pela superfície revestida e a temperatura do revestimento estiver diminuindo, seja produto de uma inversão do fluxo de calor ou produto de uma diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo se deve analisar o comportamento do GARSp e o GSpBc. A não correlação das funções de contraste com nenhum dos parâmetros associados ao fluxo de calor sugere que na condição reversa não existe um momento no qual se possa afirmar que os limites dos defeitos vão aparecer melhor definidos.

Tabela 20 – Matriz de correlação (R^2) do Ciclo Reverso. Resultado da análise multivariada.

Ciclo Reverso - aquecimento			
	ΔT -CB	TRC-CB	TC-CB
GAr	-0.71	-0.27	-0.08
GSp	-0.66	-0.20	-0.01
GBc	-0.60	-0.23	-0.08
GArSp	0.97	0.54	0.27
GSpBc	0.80	0.58	0.68
VTSp	0.44	0.11	-0.01
Ciclo Reverso - arrefecimento			
	ΔT -CB	TRC-CB	TC-CB
GAr	0.15	0.04	0.06
GSp	0.32	0.23	0.25
GBc	0.06	-0.05	-0.03
GArSp	0.81	0.54	0.54
GSpBc	0.78	0.70	0.70
VTSp	-0.17	-0.08	-0.09

Fonte: Próprio autor.

O ciclo reverso mostrou também que com o aumento da espessura da parede deve ser considerado o atraso térmico, tendo em vista que neste ciclo os máximos valores de Delta-T foram obtidos vários minutos após o desligamento das lâmpadas. O que justifica ainda mais a utilização tanto do GArSp quanto do GSpBc para analisar o que acontece na superfície do revestimento e no defeito, respetivamente, antes da análise termográfica.

Analisando os resultados de ambos os ciclos se pode concluir que os parâmetros associados ao fluxo de calor podem auxiliar na identificação dos defeitos, de forma a indicar os melhores momentos para a realização da inspeção termográfica. Na condição direta (quando calor estiver entrando pela superfície revestida) a variação de temperatura da superfície (VTSp), o gradiente entre o ar frontal e a superfície frontal (GArSp) e o gradiente entre a superfície frontal e o bloco (GSpBc), devem ser os parâmetros analisados na simulação prévia à inspeção do edifício.

Na condição reversa (quando calor estiver entrando pelo revestimento cerâmico) devem ser analisados o gradiente ar frontal, a superfície frontal (GArSp), o gradiente entre a superfície frontal e o bloco (GSpBc). Os resultados mostraram também que, na condição direta é possível encontrar um momento onde o defeito terá melhor visibilidade, já no

arrefecimento não existe garantia de que existe um momento onde os limites dos defeitos aparecem melhor definidos.

Comparando-se os resultados obtidos no estudo da parede com o estudo em placas se comprova que a espessura da parede (no caso do estudo em parede com dimensões similares às encontradas em fachadas) não teve influência na condição direta e teve uma grande influência na condição reversa. Na condição direta o Delta-T e as funções de contraste tiveram o mesmo comportamento que no estudo em placas, já na condição reversa pelo efeito do atraso térmico foi difícil associar as funções de contraste com a melhor visibilidade dos defeitos, inclusive em todo o ciclo reverso não foi possível encontrar os picos das funções.

4.8 MENSURAÇÃO DA ÁREA COM DEFEITO (DESCOLAMENTO NOS REVESTIMENTOS CERÂMICOS)

Para a mensuração da área do defeito através da termografia infravermelha foi escolhida a parede construída no laboratório, especificamente a placa cerâmica B. A determinação da área do defeito foi baseada no IFOV da câmera infravermelha e na determinação dos pontos de máxima e mínima inclinação de linhas de temperatura que atravessam o defeito. Os valores da inclinação utilizados na determinação dos pixels equivalente à dimensão do defeito podem ser observados no Apêndice C. A partir do IFOV e da posição da câmera no experimento foi possível converter os pixels da imagem em área e comparar com a real dimensão do defeito, segundo o explicado no item 4.6.

A Tabela 21 mostra os resultados médios da contagem dos pixels, o coeficiente de variação em relação à quantidade de pixels e a relação da área calculada com a área real do defeito, para o ciclo direto. Utilizou-se o valor de 62cm^2 como área real do defeito.

Tabela 21 – Cálculo da área do defeito no ciclo direto

Tempo (min)	Pixels	CV das amostras (%)	Área média calculada (cm²)	Área média calculada/real (%)	Observação
12	12	-	63,4	2,2	Máximo: ΔT , TRC e TC
80-96	12,8	2,3	67,6	9,0	Metade do aquecimento
164-180	12,6	9,3	66,5	7,3	Final do aquecimento
188	12	-	63,4	2,2	Máximo: ΔT , TRC e TC
232-248	12,4	9,3	65,5	5,6	Metade do arrefecimento
284-300	12,6	15,1	66,5	7,3	Final do arrefecimento

Fonte: Próprio autor.

Para o termograma com maior Delta-T e contraste térmico, a largura do defeito foi aproximadamente 12 pixels, o que corresponde a 40,9mm de comprimento, tanto no aquecimento quanto no arrefecimento. Levando em consideração que a dimensão real (largura) do defeito é 40mm, a variação foi 2,2%. Este comportamento comprova as hipóteses relacionadas com as funções de contraste, podendo-se concluir que, efetivamente, estas funções indicam o momento onde os limites dos defeitos aparecem melhor definidos, facilitando a mensuração dos mesmos.

Nos termogramas da metade (80-96 minutos) e do final (164-180 minutos) do aquecimento, respetivamente, a tendência do defeito é ficar menos visível para o final do experimento. O mesmo comportamento foi observado na etapa de arrefecimento nos termogramas da metade (164-180 minutos) e do final (284-300 minutos). Em ambos os casos se obtiveram em média valores próximos aos 12,6 pixels, sendo assim a variação em relação ao tamanho real do defeito ficou em média 10% maior.

Este comportamento comprova a importância de encontrar nos estudos de campos os momentos de maiores contrastes e Delta-T, para que o resultado da mensuração do defeito fique bem próxima do tamanho real do mesmo. Para maiores valores de temperatura da superfície e menores valores de contraste, o cálculo do defeito a partir da termografia gerou maiores valores. Este comportamento pode ser atribuído à acumulação de calor na superfície na frente do defeito, que com o passar do tempo existe uma tendência expandir para as laterais da superfície.

A maior diferença obtida entre a área média calculada e a área real do defeito foi 9%, o que pode ser considerado uma boa aproximação na mensuração dos defeitos, se for levado em consideração que tradicionalmente a mensuração dos descolamentos nas fachadas é feito a partir da contagem de placas cerâmicas com som cavo a critério (subjetivo) do operador. No entanto, é importante observar que para o final de cada etapa (aquecimento e arrefecimento) o coeficiente de variação das amostras aumentou o que está relacionado com a pior visibilidade do defeito e fato de ser mais difícil definir o limite do mesmo.

No ciclo reverso foram analisados os termogramas da metade do aquecimento (82-96 minutos), do final do aquecimento (164-180 minutos), da metade do arrefecimento (232-248 minutos) e do final do arrefecimento (284-300 minutos). No caso reverso a metade da etapa de arrefecimento coincidiu com os máximos valores de Delta-T do ciclo.

Na Tabela 22 podem ser observados os resultados da contagem dos pixels no ciclo reverso, os coeficientes de variação das amostras (5 termogramas) e a relação da área calculada com a área real do defeito. O coeficiente de variação das amostras foi bem maior na primeira metade do experimento o que pode ser associado com a menor visibilidade do defeito devido aos menores valores do Delta-T no início do aquecimento. Este comportamento está em correspondência com o comportamento das funções de contraste, nas quais não foram observados picos no início do aquecimento como aconteceu no ciclo direto. Nota-se que próximo do momento de máximo Delta-T (230 minutos) a área calculada ficou mais próxima da área real e o coeficiente de variação pode ser considerado pequeno após 164 minutos.

Tabela 22 – Cálculo da área do defeito no ciclo reverso

Tempo (min)	Pixels	CV das amostras (%)	Área média calculada (cm²)	Área média calculada/real (%)	Observação
80-96	16,6	12,3	59,6	3,8	Metade do aquecimento
164-180	18,6	1,6	66,8	7,7	Final do aquecimento
232-248	17,8	3,8	63,9	3,1	Metade do arrefecimento (Máximo ΔT)
284-300	18,4	1,6	66,1	6,6	Final do arrefecimento

Fonte: Próprio autor.

Outro aspecto importante que deve ser observado foram os valores médios das áreas calculadas. No início do aquecimento a área calculada foi menor do que a área real do defeito e no restante do experimento a área calculada foi maior do que a área real do defeito.

A maior diferença obtida entre a área média calculada e a área real do defeito foi 7,7%, o que pode ser considerado uma boa aproximação na mensuração dos defeitos. Os fatos antes descritos sugerem que a mensuração do defeito em campo na condição reversa deve ser feita no termograma de máximo Delta-T para obter valores mais próximos da real dimensão do defeito. No início da condição reversa o defeito pode aparecer com menor tamanho no termograma e a precisão da mensuração pode ficar comprometida, levando em consideração os valores de coeficiente de variação obtidos.

Com os resultados da mensuração dos defeitos se verificou que em ambos os ciclos, quando aumenta o Delta-T o defeito fica mais visível e quando aumentam as funções de contraste os limites aparecem melhor definidos, facilitando a mensuração dos mesmos.

5 ESTUDO EM FACHADAS

A Etapa 3 corresponde ao estudo em campo. Nesta etapa foram estudadas diferentes fachadas, com o objetivo de validar os principais critérios e padrões observados nos estudos das etapas 1 e 2. A metodologia pode ser observada na Figura 79.

Figura 79 — Metodologia da etapa 3. Estudo em fachadas.



Fonte: Próprio autor.

Para esse fim foram selecionados prédios da região de Brasília, com fachadas que apresentavam defeitos conhecidos de inspeções prévias ou suspeita de presença de descolamentos. Neste capítulo são apresentadas as características das fachadas e da incidência do sol, os resultados da simulação térmica (no WUFI) e os resultados da inspeção termográfica nas fachadas.

5.1 SELEÇÃO DAS FACHADAS DE ESTUDO

As fachadas foram escolhidas em função da sua orientação, das características e do local. Em relação à orientação, se tentou procurar amostras das orientações com maior incidência de patologias de Brasília de acordo com os resultados de Silva (2014). Em relação às características das fachadas, se procuraram amostras com presença e/ou suspeita de descolamentos, além de características geométricas como altura e forma que permitissem a

realização das imagens respeitando o ângulo de 45° e distância de acordo com o alcance da lente. Em relação às características do local se requer de fachadas situadas em zonas abertas, livre de matos e de outros obstáculos, para garantir a melhor visibilidade, e evitar graves problemas de reflexão. As fachadas foram avaliadas nos meses de junho e julho e os valores de temperatura, umidade e as condições climáticas no dia da inspeção podem ser observados no Apêndice D. A Tabela 23 mostra as características das fachadas estudadas.

Tabela 23 – Características das fachadas de estudo.

Fachada	Imagem	Horário	Mês
F1		8-18h	Julho
F2		8-18h	Julho
F3		11-18h	Junho

F4		9-18h	Junho
F5		9-18h	Junho

Fonte: Próprio autor.

A fachada 1 (F1) corresponde a um prédio de dois andares na Asa Norte, no plano piloto em Brasília. A fachada tem orientação predominantemente norte e aproximadamente 10m de altura. Durante a inspeção visual foram detectadas duas fissuras. Neste caso se tentou avaliar si estas fissuras estavam associadas a descolamentos na cerâmica.

A fachada 2 (F2) corresponde a um prédio de 4 andares da Asa Norte, no Plano Piloto em Brasília. A fachada tem orientação predominantemente leste e aproximadamente 12m de altura. Durante a inspeção visual foram detectadas várias áreas com deslocamentos. Neste caso se tentou avaliar se existiam outras áreas descoladas associadas aos deslocamentos detectados na inspeção visual.

A fachada 3 (F3) corresponde a um prédio de cinco andares no Cruzeiro Novo, em Brasília. A fachada tem orientação predominantemente oeste. Na inspeção visual se detectou um pequeno problema de rejunte no canto da torre. Neste caso se tentou avaliar se existiam áreas na torre com problema de descolamento associado à falha encontrada.

As fachadas 4 (F4) e 5 (F5) correspondem a um prédio de cinco andares no Cruzeiro Novo, em Brasília. A fachada 4 (F4) tem orientação predominantemente noroeste. Nesta fachada

foi realizado um estudo prévio detectando várias falhas de rejunte e áreas descoladas, procurou-se identificar com a termografia as falhas de rejunte e avaliar (na imagem) os descolamentos. A fachada 5 (F5) tem orientação predominantemente noroeste. Neste caso se procurou identificar falhas do rejunte e avaliar descolamentos detectados em uma inspeção prévia.

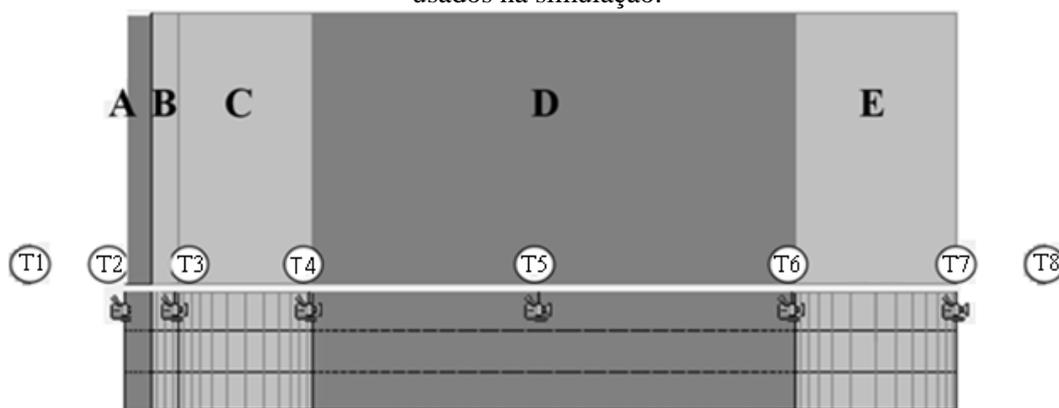
5.2 SIMULAÇÃO NO WUFI

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

A simulação no software WUFI PRO 5.3 teve como objetivo determinar o comportamento dos gradientes de temperatura nas fachadas de estudo, nas condições climáticas de Brasília. A partir desses dados foram elaborados os gráficos com o comportamento dos gradientes vs. tempo para auxiliar na escolha dos melhores momentos para a avaliação dos defeitos no revestimento cerâmico. Os dados e o procedimento utilizado na simulação foram os descritos por Nascimento (2016) e podem ser observados no Anexo A.

Para a simulação se utilizou o arquivo “*Typical Meteorological Year*” (TMY) elaborado por Roriz (2012) com base na medição da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Brasília-DF entre os anos de 2000 e 2010. A Figura 80 mostra as camadas e os pontos onde foram determinados os valores de temperatura.

Figura 80 – Esquema com as camadas da fachada e com os pontos de mensuração de temperatura usados na simulação.



Fonte: Modificada de Nascimento (2016).

As dimensões das camadas foram a seguintes:

Camada A: Placa cerâmica = 5mm

Camada B: Argamassa colante = 5mm

Camada C: Argamassa de emboço externa = 25mm

Camada D: Bloco cerâmico = 9cm

Camada E: Argamassa de emboço interno = 30mm

Os dados referentes à orientação, absorvância e altura foram específicos de cada fachada. A Tabela 24 resume estas propriedades nas edificações estudadas:

Tabela 24 – Propriedades das edificações estudadas.

Fachada	Orientação	Cor predominante	Absortância	Altura
F1	Norte	Cinza claro	0,603	10m
F2	Leste	Bege	0,522	12m
F3	Oeste	Branco amarelado	0,322	20m
F4	Noroeste	Branco	0,282	18m
F5	Noroeste	Marrom	0,786	18m

Fonte: Próprio autor.

A partir da mensuração da temperatura nos pontos marcados na Figura 80, foram calculados os gradientes definidos no estudo estatístico da parede. A Tabela 25 mostra os parâmetros calculados. Para o cálculo dos parâmetros somente foi necessário utilizar os valores de temperatura dos pontos T1, T2 e T4. No entanto na simulação foram

determinadas as temperaturas em todos os pontos para evitar possíveis erros na interpretação dos dados.

Tabela 25 – Parâmetros relacionados ao fluxo de calor.

Gradiente	Nomenclatura	Cálculo
Gradiente Ar - superfície	GArSp	T1-T2
Gradiente superfície - bloco	GSpBc	T2-T4
Variação de temperatura da superfície	VTSp	$T2_{(i+1)}-T2_{(i)}$

Fonte: Próprio autor.

5.3 PROCEDIMENTO E COLETA DE DADOS

O procedimento e a coleta de dados foram realizados segundo Bauer *et al.* (2016b). O levantamento de campo consistiu na captura dos termogramas a cada hora durante o período da inspeção, o qual variou dependendo da orientação solar da fachada estudada, sempre no intervalo das 8h às 18h. Foi mantido um ponto fixo para aquisição dos termogramas. A distância de aquisição variou dependendo da altura e as características geométricas de cada fachada, procurando sempre posições que evitassem o aparecimento de reflexos do sol e de objetos externos respeitando o limite máximo de 45°.

A determinação da temperatura aparente refletida foi efetuada empregando o método da lâmina de alumínio corrugada, conforme prescreve a ASTM E1862 (ASTM E1862-97, 2010). A emissividade foi determinada conforme o método da fita padrão, conforme prescreve a ASTM 1933 (ASTM 1933-99, 1999). Para a medição da temperatura ambiente e da umidade relativa, a cada momento da aquisição, foi empregado um termohigrômetro Meterlink MO297, o qual pode ser observado na Figura 33. A câmera infravermelha empregada foi do modelo Flir T400, a mesma que foi utilizada nos estudos de laboratório (Figura 39).

O software para análise das imagens foi o Flir QuickReport 1.2. A rotina para aquisição dos termogramas consistiu das seguintes etapas (BAUER *et al.*, 2016b):

- Fixação da lâmina de alumínio na superfície da fachada e obtenção da imagem a uma distância de 2,0m. Essa etapa é necessária de modo a obter a temperatura aparente refletida;

- Determinação da temperatura ambiente e a umidade relativa;
- Posicionamento do termografista no ponto de aquisição das imagens e inserção dos dados obtidos no software da câmera;
- Ajuste do foco térmico e aquisição das imagens (termogramas);
- Análise posterior das imagens no Flir QuickReport 1.2, obtendo-se as temperaturas nas áreas de estudo.

Além da determinação da temperatura no software e o cálculo dos parâmetros termográficos, foi realizada a mensuração das áreas com defeito nas imagens previamente definidas na simulação no WUFI, de acordo com o procedimento descrito nas paredes. A depender da geometria do defeito foi necessário aumentar a quantidade de linhas de temperatura atravessando o defeito. Neste caso, foram utilizados os intervalos de temperatura para determinar as quantidades de pixels na área do defeito. A diferença em relação ao estudo em parede foi a utilização de uma trena laser para a mensuração da distância entre a câmera e o alvo (área com defeito).

5.4 RESULTADO DO ESTUDO EM FACHADAS

Este item apresenta os resultados da análise das fachadas com descolamentos cerâmicos. Em cada análise foram apresentadas e discutidas as figuras com a incidência do sol (no dia da inspeção), a simulação no WUFI, os principais termogramas e o comportamento do Delta-T na área de maior gravidade. A análise foi baseada nos parâmetros termográficos e nos parâmetros relativos ao fluxo de calor. O objetivo destes estudos foi avaliar descolamentos a partir dos principais critérios e comportamentos obtidos no estudo das placas e da parede.

5.4.1 Resultados do estudo da fachada 1 (F1)

A fachada 1 (F1) corresponde a um prédio de dois andares na Asa Norte, no plano piloto em Brasília. A fachada tem orientação norte e aproximadamente 10m de altura. A área estudada, que aparece na Figura 81 marcada de vermelho, está composta por uma estrutura de concreto (viga e pilar) e blocos cerâmicos, ambos revestidos com placas cerâmicas da cor cinza claro.

Figura 81 – Imagem digital da fachada 1 (F1).

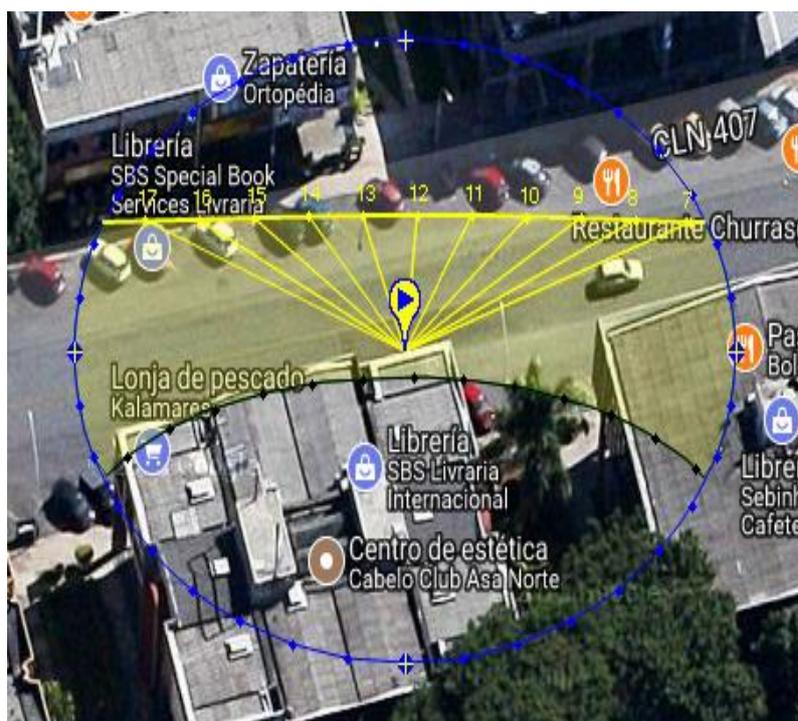


Fonte: Próprio autor.

A fachada com orientação norte no período de inverno (seca) recebe sol durante todo o dia. Na Figura 82 pode ser observado o horário e ângulo de incidência do sol na fachada. Os dados correspondem ao dia da inspeção.

Na inspeção visual foi possível detectar uma fissura horizontal, marcada com uma seta na Figura 81. Com a termografia infravermelha foi possível identificar o tamanho do dano e avaliar a presença de descolamentos na cerâmica além da fissura.

Figura 82 – Incidência do sol na fachada 1 (F1).

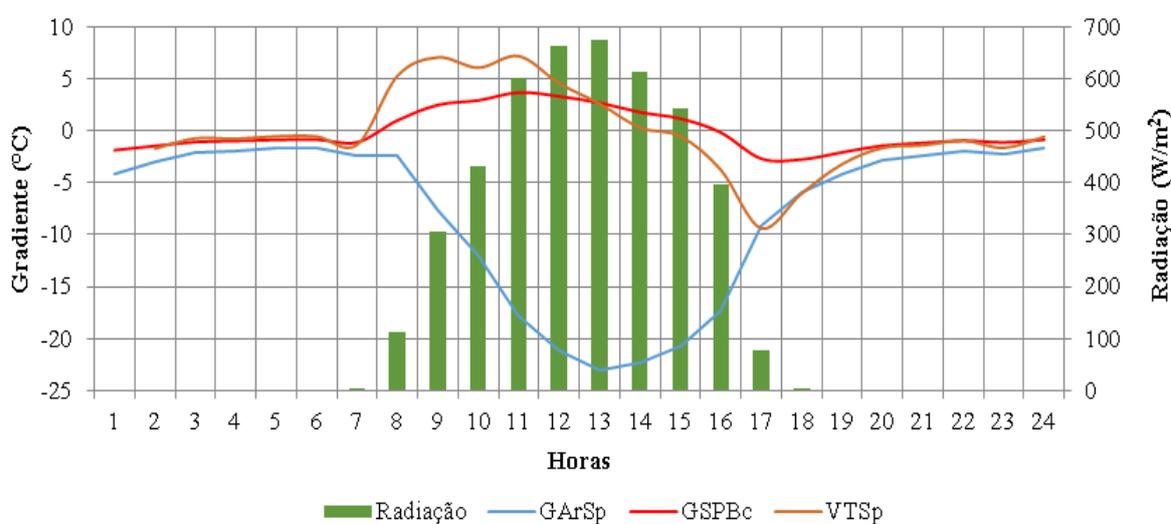


Fonte: <https://www.sunearthtools.com/pt/tools/coordinates-latlong-sunpath-map.php>. Acesso em: Julho de 2017.

Na Figura 83 se mostram os resultados da simulação na fachada. São apresentados os principais parâmetros utilizados na identificação do melhor horário para a detecção dos defeitos. Observe-se que a fachada recebe radiação direta das 8h às 17h, o valor máximo de radiação acontece às 13h. Os diferentes gradientes calculados a partir da temperatura nos diferentes pontos da secção da fachada mostram os máximos valores em horários distintos.

De acordo com o comportamento obtido na parede na condição direta, o melhor momento para a avaliação do defeito coincide com o momento de maior crescimento da temperatura média da superfície (VTSp), dentro do intervalo positivo do gradiente entre a superfície frontal e o bloco (GSpBc). Tomando como referencia esta hipótese, pode-se definir às 9h e às 11h como os momentos ótimos para a avaliação do defeito e determinação do tamanho do mesmo.

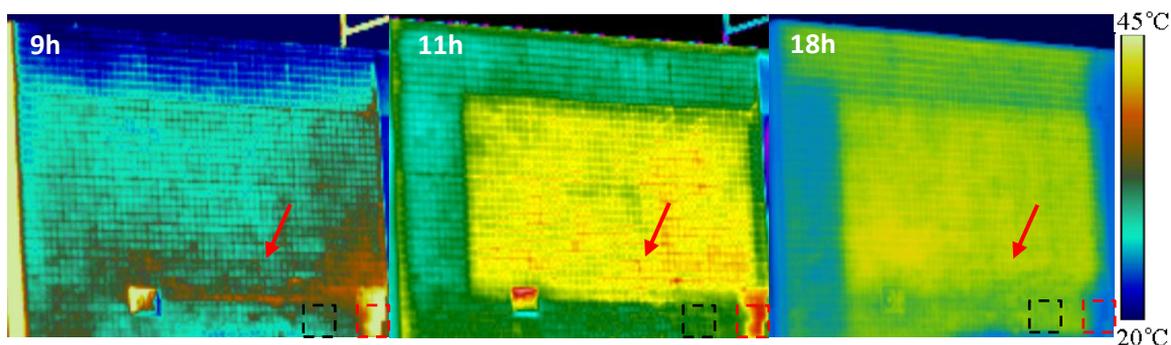
Figura 83 – Resultados da simulação das temperaturas no WUFIInda fachada 1 (F1).



Fonte: Elaboração própria.

Na análise das imagens termográficas (Figura 84) se comprova que às 9h foi o momento onde o defeito aparece melhor definido, sendo possível mensurar o tamanho dele. Neste horário o defeito aparece como uma área mais quente pelo fato do sistema se encontrar em uma condição direta. Nota-se que por trás da fissura existe uma grande área descolada da cerâmica que foi possível detectar com a termografia infravermelha. Os termogramas mostraram o comportamento esperado de acordo com a simulação. Em vermelho e preto aparecem marcadas as áreas com e sem defeito utilizadas no cálculo do Delta-T.

Figura 84 – Termogramas da fachada 1 (F1).

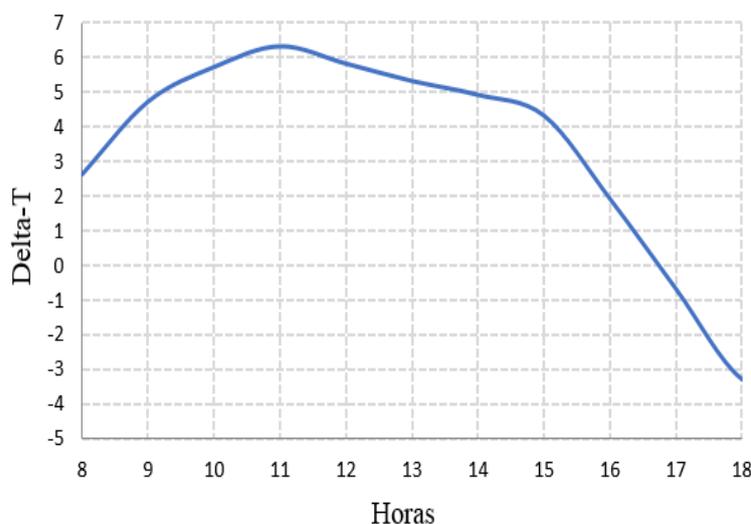


Fonte: Próprio autor.

Quando se seleciona a área onde aparentemente o descolamento foi mais grave (canto inferior direito da Figura 84), se analisa o comportamento do Delta-T e se comprova que os valores máximos aparecem ao redor das 11h, onde a função de variação de temperatura da

superfície (VTSp) tem outro pico, de acordo com o que mostra a simulação. Os maiores valores do gradiente entre a superfície externa e a interface argamassa/bloco (GSpBc) coincidem com os máximos valores de Delta-T. No entanto, a visibilidade do defeito fica comprometida pela presença de um elemento diferente (estrutura de concreto) por trás da cerâmica. Sendo assim, às 9h da manhã é o horário onde foi possível mensurar a dimensão do defeito e nesse momento se pode observar que a temperatura da superfície cresceu aproximadamente 7°C em um intervalo de uma hora (Figura 83).

Figura 85 – Comportamento do Delta-T da área com maior gravidade.



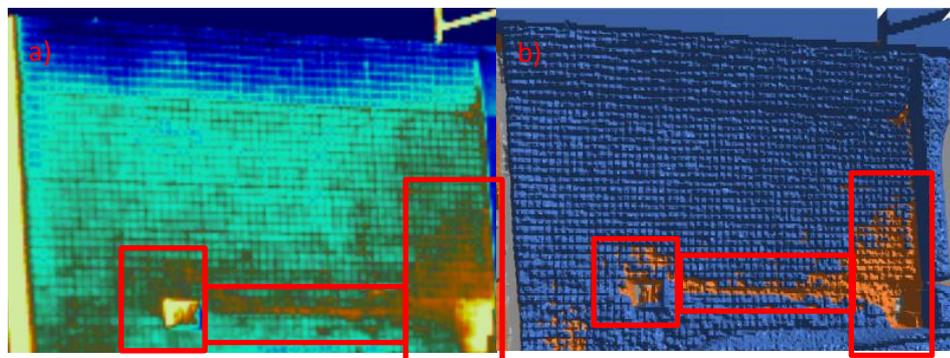
Fonte: Próprio autor.

O resultado do Delta-T mostrou que aproximadamente às 16h30min existe uma inversão do fluxo de calor o que gera valores negativos do Delta-T, coincidindo aproximadamente com o resultado do GSpBc na simulação, o qual obteve o valor zero próximo das 16h. Pode-se observar que às 18h se obtém o maior valor do Delta-T na condição reversa, no entanto, pelas características da estrutura por trás da fachada foi praticamente impossível identificar a áreas com descolamento. Temperaturas menores estiveram associadas à presença da estrutura e não somente à existência do defeito. Os valores do Delta-T neste caso não podem ser associados ao momento de melhor visibilidade do defeito.

Para a mensuração da área do defeito se utilizou o termograma correspondente às 9h, tendo em vista que corresponde com o momento de melhor visibilidade. É importante salientar que nesse horário o ângulo de incidência do sol e a intensidade da radiação favorecem a análise termográfica porque diminui as áreas que apresentaram grandes reflexos. A Figura

86 mostra o termograma e a imagem 3D onde aparecem marcados os pixels correspondentes à área com defeito às 9h.

Figura 86 – Cálculo da área com defeito na fachada 1. a) Termograma das 9h. b) Imagem 3D com os pixels correspondentes à área com defeito.



Fonte: Próprio autor.

A área do defeito tem aproximadamente 2046 pixels, o que equivale a uma área aproximada de $0,44\text{m}^2$, considerando que foi utilizada a lente de 15° . No caso da fachada não existe uma condição de fluxo reverso onde possa ser mensurada a área para a verificação dos valores obtidos na condição de fluxo direto. Este fato pode ser considerado uma deficiência para as fachadas onde, por trás da área descolada no revestimento cerâmico, existem diferentes componentes na vedação vertical.

5.4.2 Resultados do estudo da fachada 2 (F2)

A fachada 2 (F2) corresponde a um prédio de quatro andares na Asa Norte, em Brasília. A fachada escolhida para a análise foi a lateral voltada para a calçada, especificamente a área marcada em vermelho na Figura 87. A vedação externa é de estrutura de concreto e bloco cerâmicos, revestida com placas cerâmicas da cor bege.

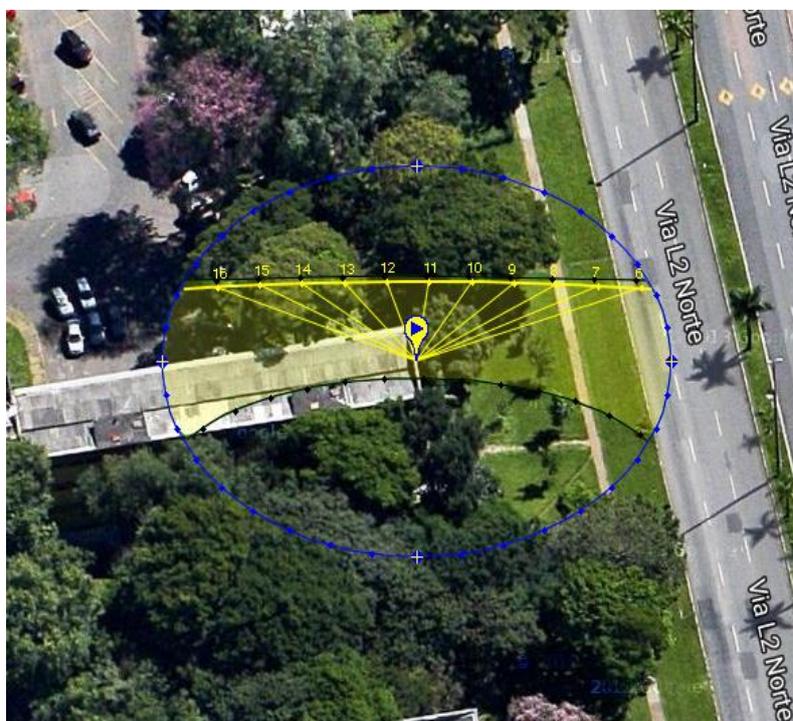
Figura 87 – Imagem digital da fachada 2 (F2).



Fonte: Próprio autor.

A fachada 2 (F2) tem orientação leste e recebe sol principalmente no horário da manhã. Na Figura 88 pode ser observado o intervalo e o ângulo de incidência do sol (radiação direta), no dia da inspeção. Nota-se que antes do meio dia a fachada deixa de receber radiação solar direta.

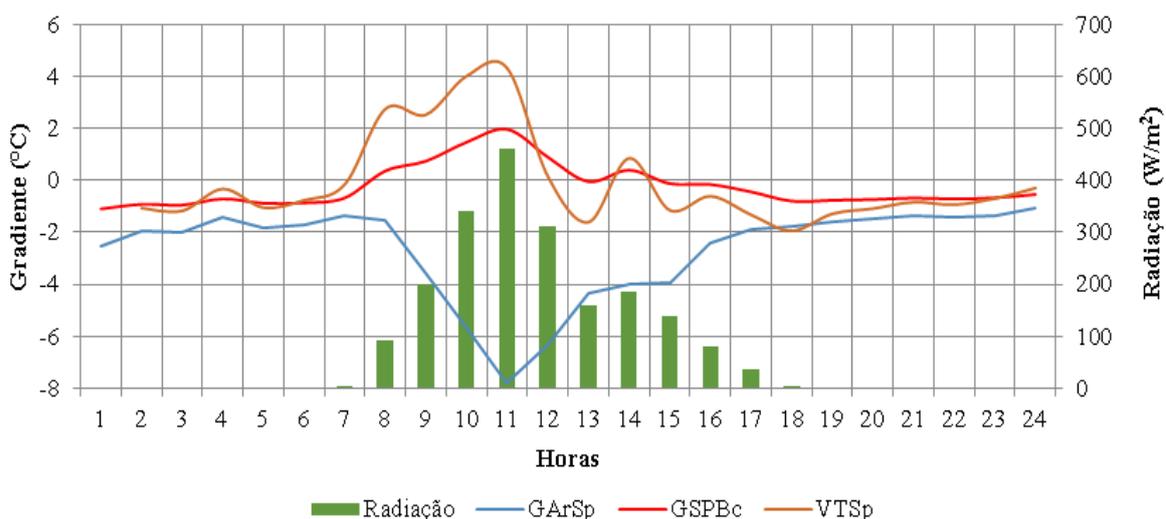
Figura 88 – Incidência do sol na fachada 2 (F2).



Fonte: <https://www.sunearthtools.com/pt/tools/coordinates-latlong-sunpath-map.php>. Acesso em: Julho de 2017.

Na inspeção visual se detectaram vários deslocamentos na fachada que podem ser observados na Figura 87. O objetivo da termografia infravermelha foi detectar a área descolada, principalmente a vinculada aos deslocamentos. Na Figura 89 podem ser observados os resultados da simulação da temperatura na fachada.

Figura 89 – Resultados da simulação das temperaturas no WUFI da fachada 2 (F2).



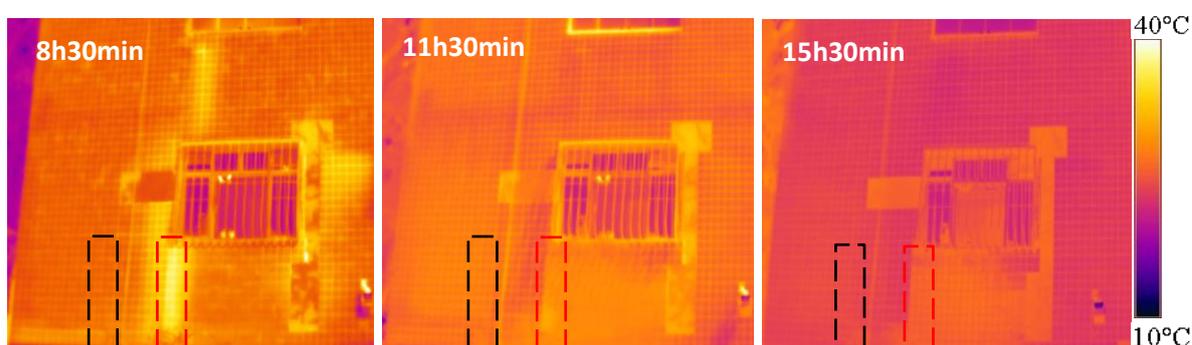
Fonte: Próprio autor.

Os picos da variação de temperatura da superfície (VTSp) foram obtidos aproximadamente às 8h e 11h. O parâmetro GSpBc, mostrou que a fachada estudada esteve em condição direta das 8h às 13h, que das 13 às 16h (gradiente próximo de zero) foi o período de inversão de fluxo e que a partir das 16h está em condição reversa. Pelo comportamento deste parâmetro foi esperado que os defeitos fossem visíveis somente das 8 às 13h. Das 13 às 16h como o gradiente foi praticamente zero não devem aparecer os defeitos nos termogramas. A partir das 16h não foi possível identificar picos nos gradientes GSpBc e GArSp e os valores máximos deles não ultrapassaram -1°C e -2°C. Esperou-se então, que a visibilidade dos defeitos fosse reduzida, o que foi comprovado nos termogramas.

No início da manhã os defeitos apareceram mais visíveis (Figura 90), sendo possível mensurar o tamanho deles. Em vermelho e preto aparecem marcadas as áreas com e sem defeito utilizadas no cálculo do Delta-T. Perto das 11h onde teoricamente deveriam ser encontrados os maiores valores de Delta-T, segundo a simulação, os reflexos provocados pelo ângulo de incidência do sol fazem praticamente impossíveis observar as diferenças

entre as áreas com e sem defeito, principalmente as que ficam embaixo da janela. A não visibilidade dos defeitos no termograma das 11h30min pode ser associada ao comportamento obtido nos estudos de laboratório, onde se verificou que ao longo do aquecimento os valores do Delta-T nos descolamentos vão diminuindo e consequentemente a sua visibilidade. Neste caso, como a fachada começou a receber radiação direta desde cedo (7h), 4h30min depois (11h30min) os descolamentos não foram visíveis no termograma.

Figura 90 – Termogramas da fachada 2 (F2).

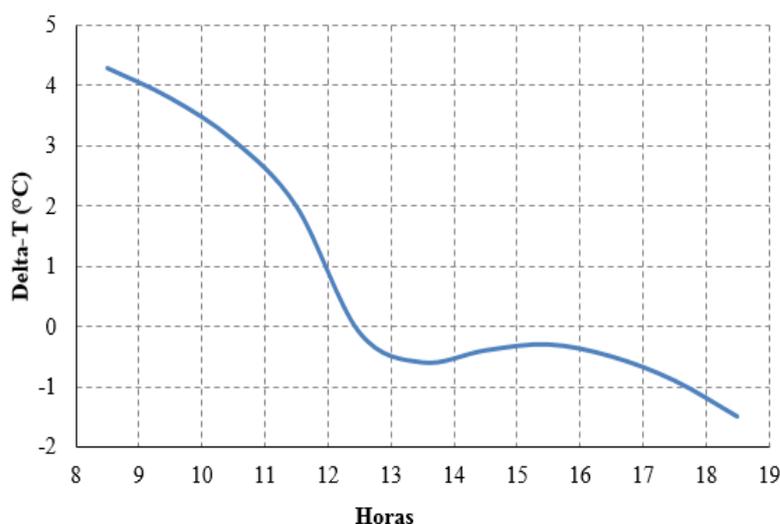


Fonte: Próprio autor.

No termograma perto das 15-16h, comprova-se que não foi possível detectar estas diferenças, pelo fato do valor do gradiente ser próximo de zero (como mostrou a simulação do clima na fachada). Este comportamento sugere que nas fachadas com orientação leste, o início da manhã poderia ser o momento indicado para fazer as avaliações termográficas, identificação e mensuração dos defeitos. Esta fachada apresentou um problema similar ao caso da fachada 1 (F1), onde não foi possível avaliar o defeito na condição reversa pelo comportamento dos gradientes de temperatura nesta orientação.

A Figura 91 mostra o comportamento do Delta-T da área com maior gravidade (parte central inferior da imagem). Observa-se que o máximo valor foi obtido às 8h30min e que a partir desse momento os valores começaram diminuir. Das 13 às 16h horas o Delta-T fica bem próximo de zero e somente às 18h30min percebe-se um pequeno aumento do mesmo.

Figura 91 – Comportamento do Delta-T da área com maior gravidade.



Fonte: Próprio autor.

Este comportamento sugere que o pico do Delta-T apareceu às 8h30min horas. Não foi possível verificar esta hipótese pelo fato de não ter sido feito o termograma correspondente às 7h30min. Sendo assim, o resultado obtido está em correspondência com os resultados do estudo em placas, onde aparece um pico do Delta-T no início do aquecimento e posteriormente diminui até o momento de inversão do fluxo de calor. Os resultados sugerem que os estudos das fachadas com orientação leste, nas condições do clima de Brasília, sejam feitos bem no início da manhã, ou seja, começando às 7h a avaliação destas fachadas.

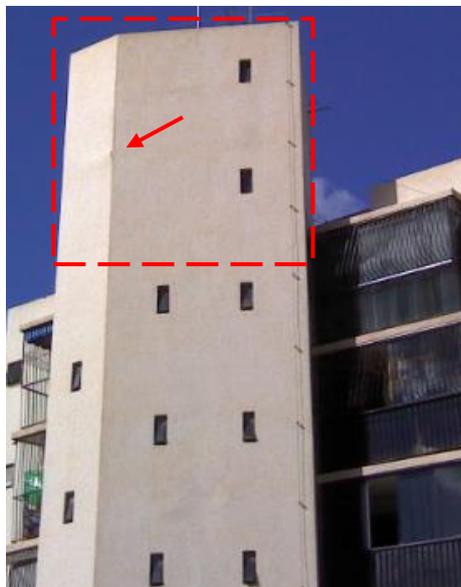
Neste caso, similar ao acontecido na fachada 1 (F1), a mensuração dos defeitos somente poderá ser feita na condição direta, no início da manhã. Neste caso, não foi mensurada a área com defeito dado que na condição em que se encontra à fachada não existe necessidade de mensuração da área, tendo em vista que a norma de desempenho NBR15575 (2013) considerada que uma área superior a 5% é suficiente para atingir o desempenho mínimo do revestimento.

5.4.3 Resultados do estudo da fachada 3 (F3)

A fachada 3 (F3) corresponde a um prédio de cinco andares no bairro Cruzeiro Novo, em Brasília. A parte superior da torre do prédio foi a área escolhida para o estudo, tem orientação predominantemente oeste. A área estudada (marcada em vermelho na Figura

92) está composta por uma estrutura de vigas e pilares de concreto e bloco cerâmico como vedação. O revestimento é de cerâmica tipo pastilhas de cor branco amarelado.

Figura 92 – Imagem digital de fachada 3 (F3).

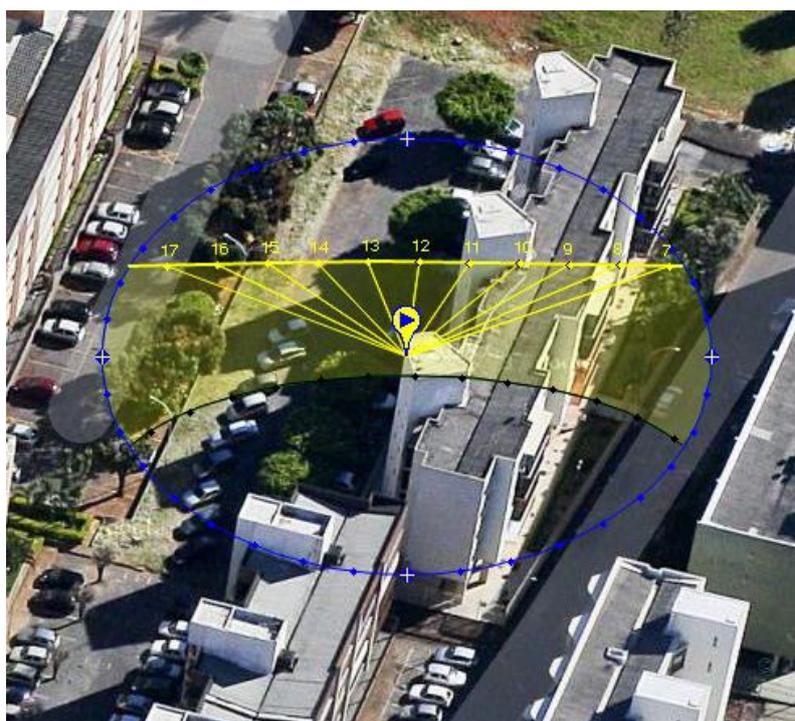


Fonte: Próprio autor.

A fachada com orientação oeste recebe sol (radiação direta) no horário da tarde. Na Figura 93 pode ser observado que a incidência direta do sol começa próximo das 14h e termina após as 17h. Os dados correspondem ao dia da inspeção.

Na inspeção visual se detectou um pequeno descolamento no canto da torre, indicado na Figura 92 com a seta. Com a termografia infravermelha foi possível identificar duas grandes áreas com descolamento cerâmico.

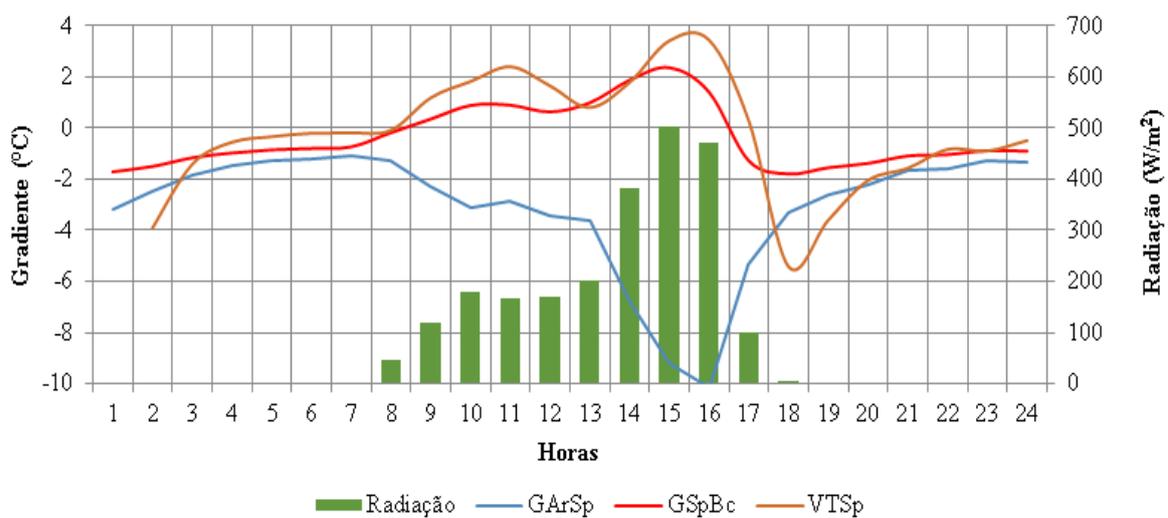
Figura 93 – Incidência do sol na fachada 3 (F3).



Fonte: <https://www.sunearthtools.com/pt/tools/coordinates-latlong-sunpath-map.php>. Acesso em: Julho de 2017.

Na Figura 94 podem ser observados os resultados da simulação da fachada. Nota-se que a fachada recebe radiação direta entre as 14 e as 17h, com valor máximo de radiação às 15h e que durante o horário da manhã recebe radiação solar indireta.

Figura 94 – Resultados da simulação das temperaturas no WUFI na fachada 3 (F3).

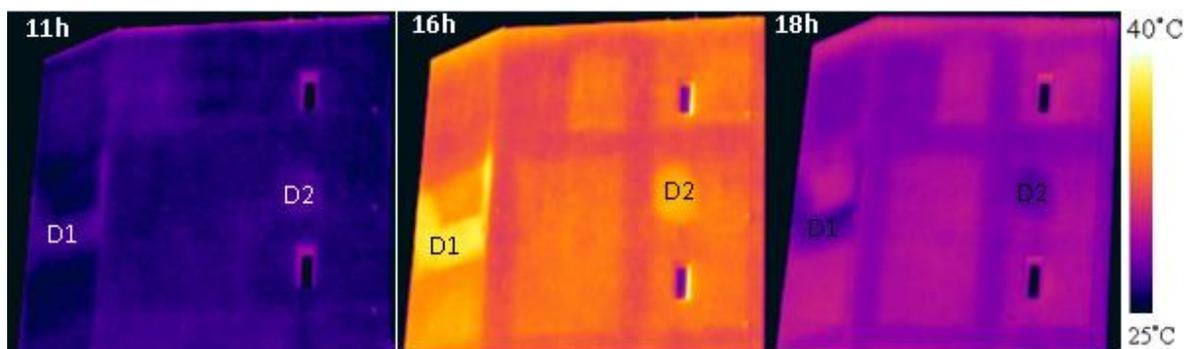


Fonte: Próprio autor.

O intervalo positivo do gradiente entre a superfície externa e o bloco (GSpBc), acontece entre as 9h e as 16h30min, com o máximo valor (pico) próximo das 15h. O máximo valor da variação da temperatura da superfície foi obtido aproximadamente às 16h. Estes parâmetros indicaram que o melhor momento para avaliar o descolamento corresponde ao intervalo das 15 às 16h. Neste horário, o calor vai de fora para dentro da edificação (condição direta) e coincide com o momento de máxima diferença entre a temperatura ambiente externa e a temperatura da superfície (pico do GArSp). Às 18h, quando apareceu o máximo valor do GSpBc, temos o melhor momento para avaliar o descolamento na condição reversa, dado que o mesmo deve coincidir com o máximo Delta-T. O valor (-3°C) e a inclinação do gradiente (GArSp) indicaram também que o calor às 18h estava saindo pela superfície revestida.

Na análise das imagens termográficas (Figura 95) se comprova que às 16h é o momento onde os defeitos (D1 e D2) aparecem melhor definidos, sendo possível mensurar os tamanhos deles na condição direta. Comprovou-se também, que às 18h aparecem os defeitos bem definidos com possibilidade de mensuração na condição reversa. Os defeitos ficaram na área com presença de blocos cerâmicos e não coincidiram com a presença de elementos estruturais, o que facilitou a avaliação dos mesmos. É importante destacar que os defeitos na condição direta foram visíveis em momentos quando a fachada não recebeu radiação solar direta (termograma 11h). No entanto, como o crescimento da temperatura da superfície nesse horário foi pequeno (2°C) os limites não apareceram bem definidos como no caso do termograma das 16h onde o crescimento da temperatura da superfície esteve perto dos 4°C. Este comportamento sugere que a incidência direta do sol não é uma limitante para os estudos das fachadas na condição direta, mas poderia dificultar a definição dos limites dos defeitos.

Figura 95 – Termogramas da fachada 3 (F3).

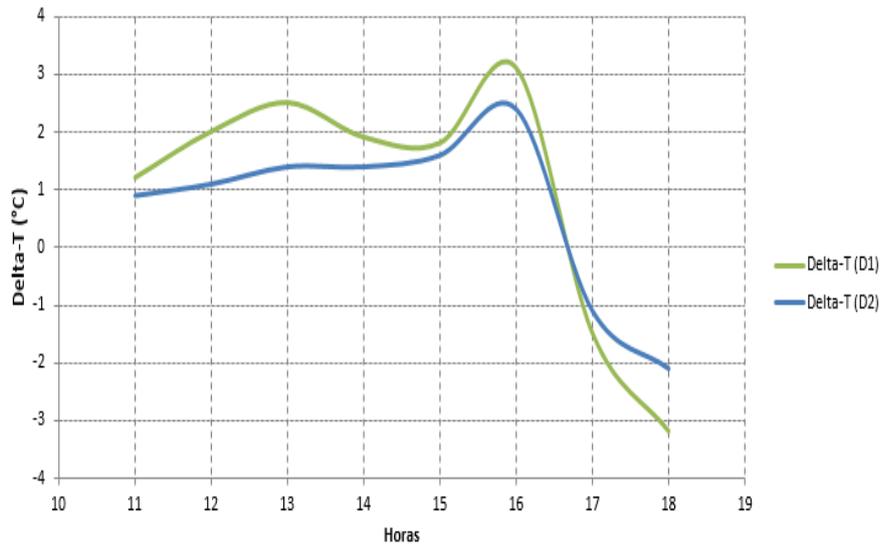


Fonte: Próprio autor.

Em relação ao Delta-T dos defeitos, verificou-se que às 16h e às 18h se obtém os máximos valores na condição direta e reversa, respectivamente. Os resultados coincidiram com os momentos que indicaram os parâmetros da simulação nas duas condições. Os máximos valores do Delta-T tanto positivo quanto negativo estão na faixa de 3°C (módulo), para valores de variação de temperatura da superfície (VTSp) diferentes. Este comportamento indica que a simulação permitirá definir os momentos de identificação e mensuração dos defeitos, no entanto, para associar os valores da simulação com os valores do Delta-T, deverão ser incluídos outros parâmetros de estudo.

Quando se analisa os resultados do Delta-T se comprova que o defeito 1 (D1), é de maior gravidade, sendo que, os maiores valores de Delta-T podem ser associados as maiores dimensões do defeito ou a maior volume de vazio por trás da cerâmica. A Figura 96 mostra o comportamento do Delta-T no período estudado.

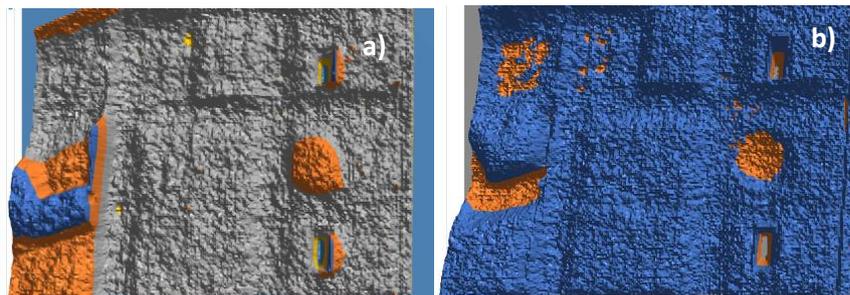
Figura 96 – Comportamento do Delta-T dos defeitos (D1 e D2).



Fonte: Próprio autor.

Para a mensuração da área do defeito se utilizaram os termogramas correspondentes às 16h e às 18h, tendo em vista que correspondem com os momentos de melhor visibilidade, na condição direta e reversa, respectivamente. Como ambos os defeitos se encontram na área da alvenaria de vedação a mensuração dos mesmos é facilitada. A Figura 97 mostra à imagem 3D onde aparecem marcados os pixels correspondentes as áreas com defeito no termograma das 16h e das 18h.

Figura 97 – Imagem 3D com os pixels correspondentes à área com defeito. a) 16h. b) 18h.



Fonte: Próprio autor.

A área do defeito 1 (D1) tem em média 983 pixels. Foi determinado na condição direta 977 pixels e 989 pixels na condição reversa. Levando em consideração que foi usada a lente de

15°, a área do defeito 1 tem aproximadamente 0,25m². A diferença dos resultados da área na condição direta e reversa foi menor de 1,2%.

A área do defeito 2 (D2) tem em média 638 pixels. Foi determinado na condição direta 660 pixels e 615 pixels na condição reversa. Levando em consideração que foi usada a lente de 15°, a área do defeito 2 tem aproximadamente 0,16m². A diferença dos resultados da área na condição direta e reversa foi menor de 7,3%.

A diferença nos resultados entre a condição direta e reversa em ambos os defeitos, pode ser considerada pequena e de boa precisão se comparada com o método convencional onde o cálculo é feito pela contagem das placas com som cavo, a critério do operário. O fato de poder mensurar o defeito nas duas condições, em princípio garante uma maior probabilidade do que o tamanho real do defeito esteja próximo da área determinada pela termografia.

5.4.4 Resultados do estudo da fachada 4 (F4)

A fachada 4 (F4) corresponde com o terceiro bloco da fachada noroeste de um prédio de cinco andares no bairro Cruzeiro Novo, em Brasília. A parte superior do bloco foi a área escolhida para o estudo (marcada em vermelho na Figura 98). Está composta por uma estrutura de concreto, blocos cerâmico de vedação e janelas de vidro de correr. O revestimento é cerâmico tipo pastilhas da cor branca e da cor marrom.

Na inspeção prévia realizada ao bloco da fachada (por meio de descida com rapel) foram detectadas falhas de rejunte e descolamentos na área entre as janelas do quinto e quarto pavimento. Na inspeção visual foram detectados deslocamentos na cerâmica da cor marrom na janela esquerda.

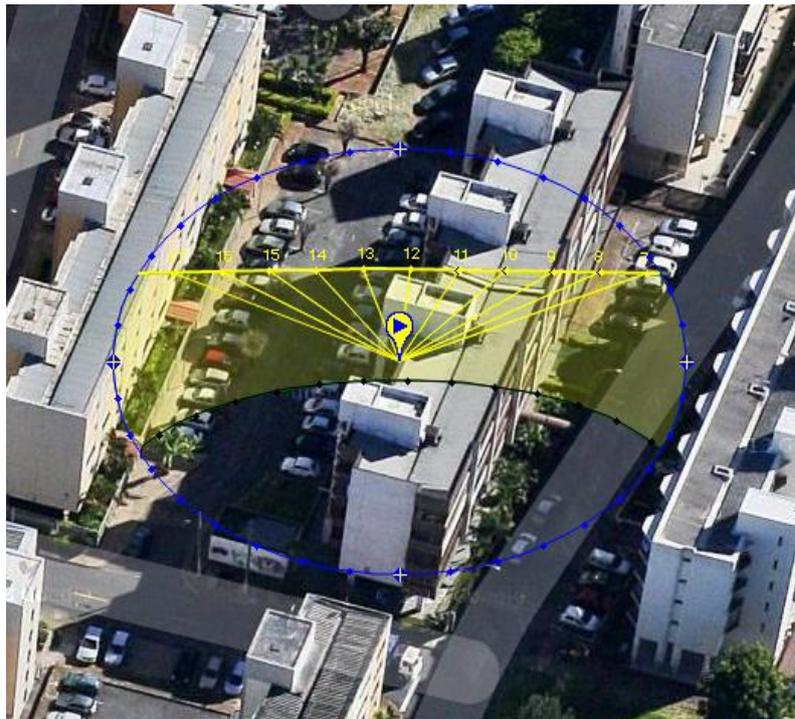
Figura 98 – Imagem digital de fachada 4 (F4).



Fonte: Próprio autor.

A fachada com orientação noroeste recebe sol (radiação direta) no horário da tarde. Na Figura 99 pode ser observado que a incidência direta do sol no dia da inspeção, começou próximo das 14h e terminou passada às 18h. É importante salientar que pelo ângulo de incidência do sol no horário da tarde (das 12 às 15h) a parte esquerda da fachada fica sombreada, diminuindo consideravelmente os valores de temperatura nessas áreas e dificultando a análise em diversos termogramas. Nota-se a importância de fazer a simulação e conferir em uma visita prévia ao local, as condições de exposição da área a ser estudada antes da realização análise termográfica, para identificar eventuais mudanças devidas às características arquitetônicas da edificação.

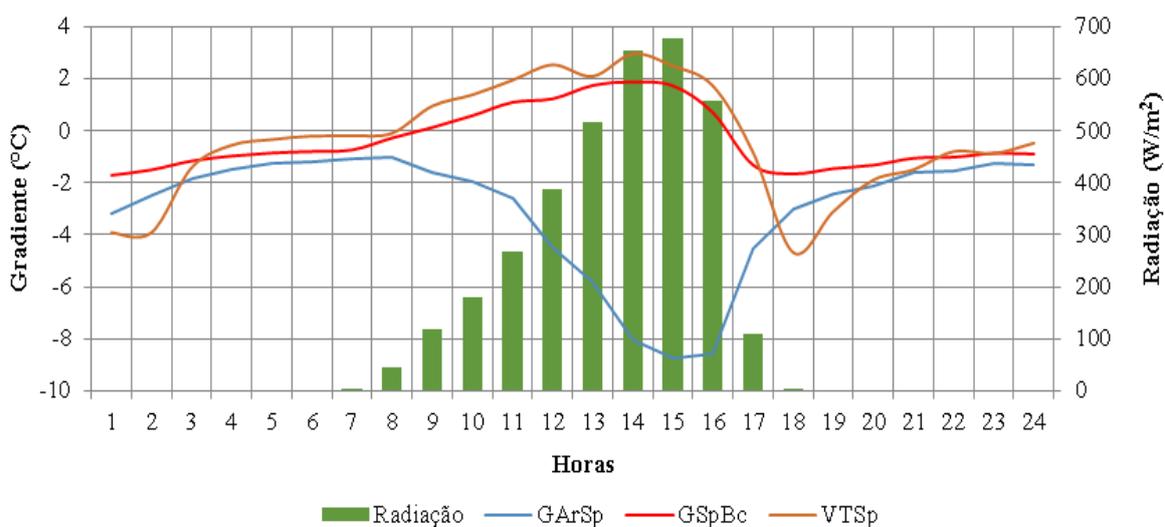
Figura 99– Incidência do sol na fachada 4 (F4).



Fonte: <https://www.sunearthtools.com/pt/tools/coordinates-latlong-sunpath-map.php>. Acesso em: Julho de 2017.

A Figura 100 mostra os resultados da simulação no WUFI, para a cor branca. A fachada se encontra com valores positivos de G_{SpBc} no intervalo das 9 às 16h e o G_{ArSp} e o VT_{Sp} mostram que o valores máximos aparecem aproximadamente às 14h. Estes resultados indicam que das 9 às 16h é o intervalo para avaliar a patologia na condição direta e que calor penetra na fachada com maior intensidade perto das 14h. No entanto, deverão existir mudanças no comportamento em campo do G_{ArSp} no intervalo das 12 às 15h devido à sombra gerada pelo ângulo de incidência do sol e a geometria da fachada, provavelmente a curva real não tenha a inclinação mostrada na simulação.

Figura 100 – Resultados da modelação das temperaturas no WUFI da fachada 4.

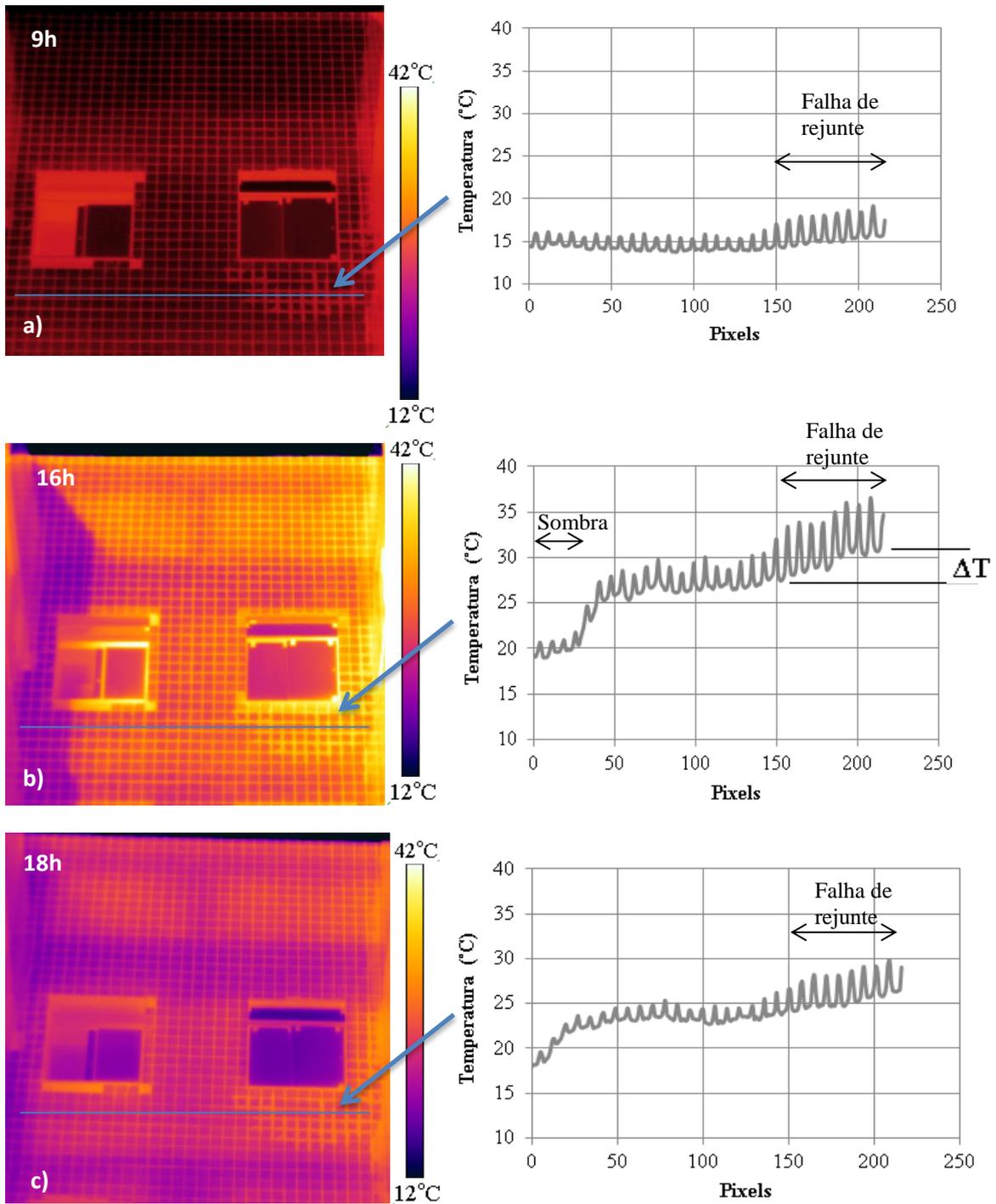


Fonte: Próprio autor.

Nos termogramas mostrados na Figura 101, foram detectadas falhas no rejunte na área embaixo da janela direita. Nas áreas aonde a temperatura do rejunte e as placas têm a maior diferença se pode considerar como uma área com falhas de rejuntas. No momento onde a entrada de calor na fachada foi mais intensa (14h), segundo indicam o GArSp e GSpBc, se obtiveram as maiores diferenças entre a temperatura do rejunte e a temperatura da placa cerâmica. Nota-se que embaixo da janela direita, estas diferenças foram maiores e podem ser percebidas nos três termogramas. Este comportamento pode ser observado nas linhas de temperatura que acompanham os termogramas (Figura 101).

Analisando os termogramas não foi possível confirmar a presença de descolamentos, somente se pode suspeitar que a área com problemas de rejunte embaixo da janela direita poderia estar associada a um descolamento. Observe-se no segundo termograma da Figura 101 (b), que existe um Delta-T de aproximadamente 4°C que pode ser associado a este problema patológico.

Figura 101 – Termogramas e linhas de temperatura na fachada 4 (F4).



Fonte: Próprio autor.

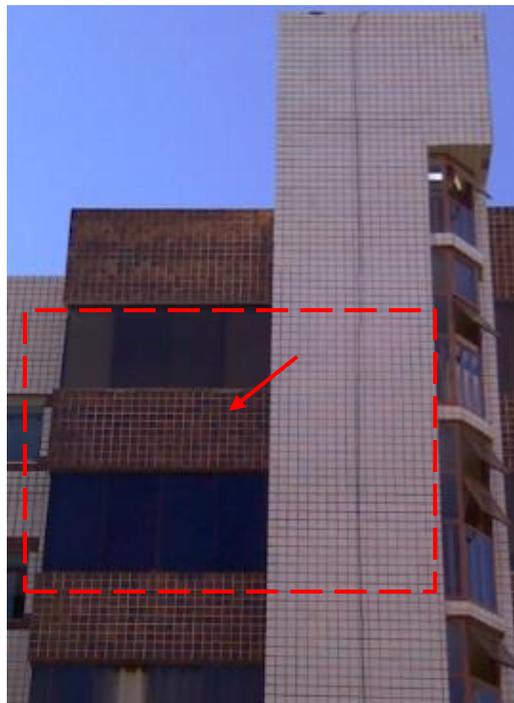
No termograma das 18h quando a fachada se encontra em uma condição reversa, a área embaixo da janela direita aparece mais quente do que a área vizinha (central). No entanto, quando se compara a linha de temperatura (intervalo de pixels 150 a 200) do termograma

correspondente às 18h com o termograma correspondente às 16h, se comprova que a temperatura dessa área está diminuindo. Este fato comprova que a presença de falhas de rejuntas na condição reversa constitui uma limitação na avaliação dos descolamentos. Como a temperatura na argamassa provavelmente será maior do que nas cerâmicas e os descolamentos nessa condição aparecem mais frios, dificilmente possam ser definidos os limites dos descolamentos pelo comportamento oposto de ambos os fenômenos.

5.4.5 Resultados de estudo da fachada 5 (f5)

A fachada 5 (F5) corresponde com o bloco G da fachada noroeste de um prédio de cinco andares, Cruzeiro Novo, em Brasília. A área estudada (marcada em vermelho na Figura 102) está composta de bloco cerâmico e laje de concreto com revestimento cerâmico e janelas de vidro de correr. O revestimento é de placas cerâmicas tipo pastilhas da cor marrom e branca.

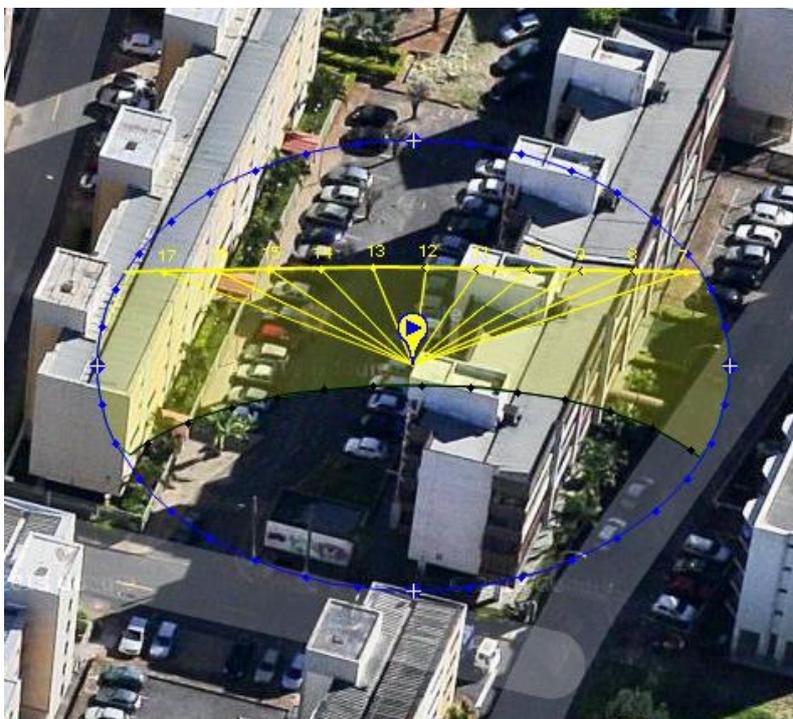
Figura 102 – Imagem digital da fachada 5 (F5).



Fonte: Próprio autor.

A fachada com orientação noroeste recebe sol (radiação direta) no horário da tarde. Na Figura 103 pode ser observado que a incidência direta do sol no dia da inspeção, começa depois de 12h e termina depois de 17h.

Figura 103 – Incidência do sol na fachada 5 (F5).

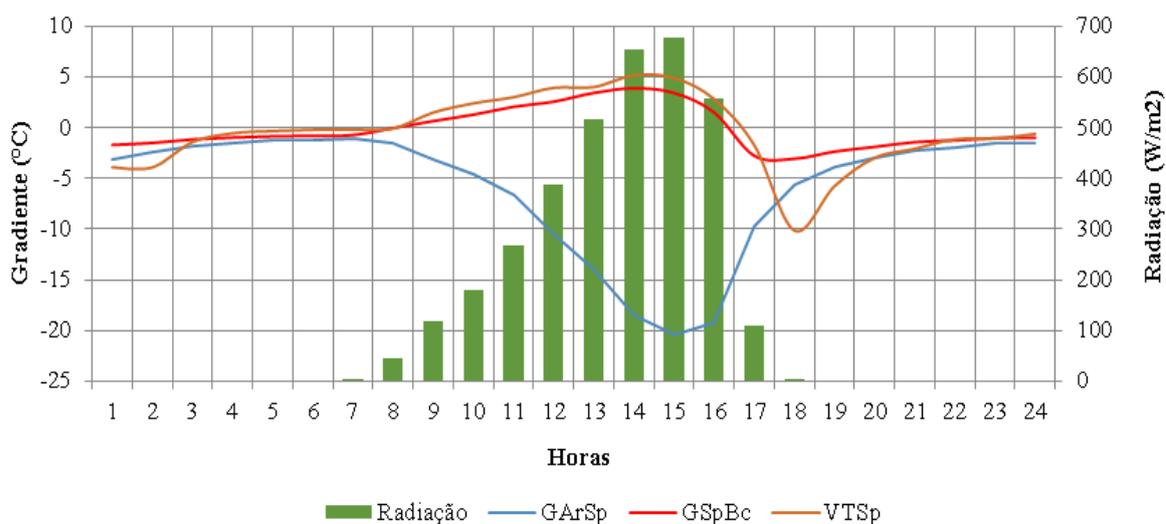


Fonte: <https://www.sunearthtools.com/pt/tools/coordinates-latlong-sunpath-map.php>. Acesso em: Julho de 2017.

Na inspeção prévia realizada ao bloco G da fachada (por meio de descida com rapel) foram detectadas falhas de rejunte e descolamentos na área marcada com a seta na Figura 102. Como visualmente não foi possível detectar com clareza estes problemas patológicos o objetivo da termografia foi verificar a existência dos mesmos. A

Figura 104 mostra os resultados na simulação no WUFI para a cor marrom. Os valores positivos de GSpBc foram encontrados no intervalo das 9 às 16h e os máximos valores de GArSp e o VTSp apareceram próximos às 15h. Estes resultados indicam que das 9 às 16h é o intervalo para avaliar a patologia na condição direta e que calor penetra na fachada com maior intensidade perto das 15h.

Figura 104 – Resultados da simulação das temperaturas no WUFI da fachada 5.

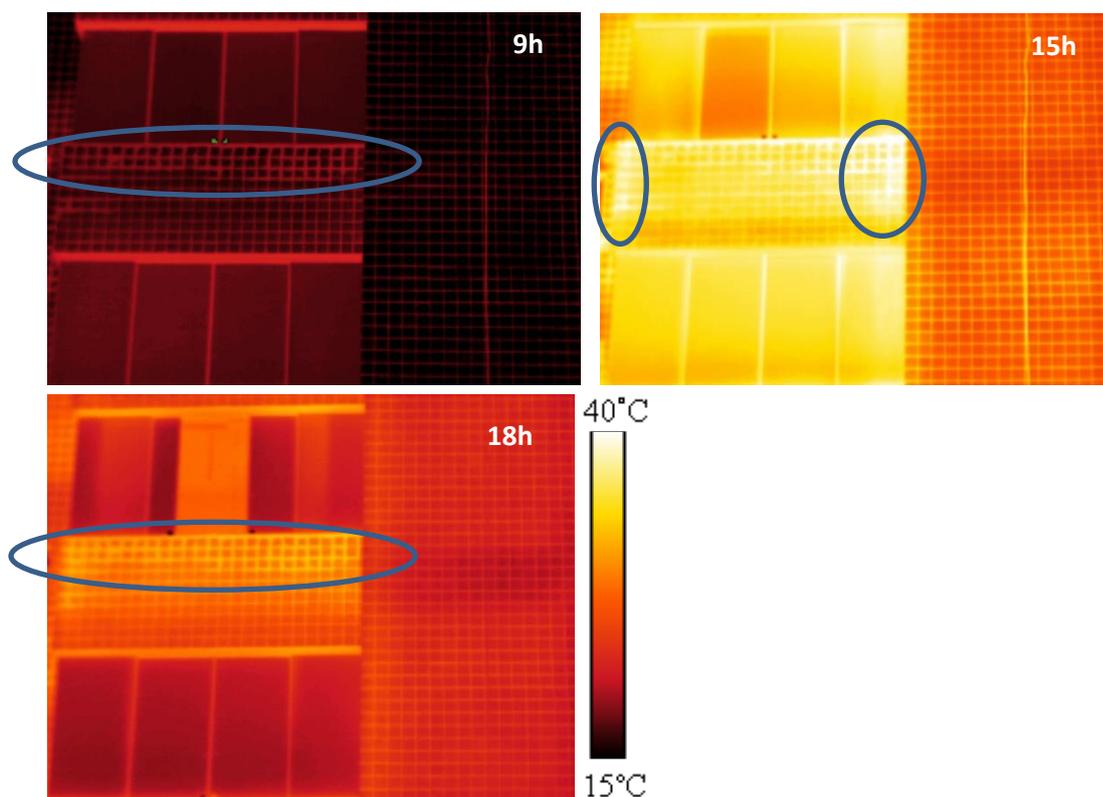


Fonte: Próprio autor.

A Figura 105 mostra os termogramas da área estudada. Nota-se que a partir das 9h, quando o calor começa a atravessar as camadas com o defeito, foi possível detectar os problemas patológicos. No termograma às 9h na área marcada se percebe as falhas de rejunte. Nota-se que nessa área a temperatura das juntas foram superiores ao resto das áreas da mesma cor. Como os problemas de rejunte incluem áreas com fissuras ou vazios na argamassa, na condição direta geram maiores temperaturas que em um rejunte na condição normal, onde não existem fissuras ou vazios.

No termograma às 15h foram detectados os descolamentos, este termograma foi de acordo com os parâmetros obtidos na simulação o mais adequado para a detecção desta patologia na condição direta. No entanto, não foi possível quantificar o Delta-T pelas grandes diferenças de temperatura das placas cerâmicas e dos rejuntas com falhas associados aos descolamentos. Neste caso, a melhor resolução da imagem permitiu definir com clareza as falhas nos rejuntas, mas dificultou a mensuração das áreas descoladas pelas diferenças de temperaturas antes citadas.

Figura 105 – Termogramas da fachada 5 (F5).



Fonte: Próprio autor.

No termograma às 18h, que segundo a simulação na fachada se encontra na condição reversa, não foi possível identificar os descolamentos, apesar de sofrer o revestimento uma importante queda na temperatura (observar VTSp na Figura 104).

Conclui-se que as falhas de rejuntas associadas aos descolamentos cerâmicos podem dificultar a mensuração das áreas descoladas, quando é utilizado um valor de IFOV que permite visualizar com clareza as juntas. Sugere-se então que nestes casos, seja avaliada inicialmente a falha dos rejuntas e posteriormente mensuradas as áreas descoladas. A avaliação das falhas de rejunte deverá ser realizada com a utilização de lentes com ângulo pequenos para melhorar os detalhes na imagem e a avaliação dos descolamentos deverá ser realizada de uma distância onde não apareçam visíveis as juntas no termograma.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos os principais resultados do estudo em placas, na parede e nas fachadas a partir de tabelas e figuras que resumem os valores e comportamentos dos parâmetros (termográficos e os relacionados ao fluxo de calor), baseados nos objetivos definidos em cada uma das etapas da pesquisa. Após a discussão dos resultados são propostos critérios para a avaliação de descolamentos de fachadas com revestimento cerâmico utilizando termografia infravermelha apoiada na simulação térmica.

6.1 ESTUDO PRELIMINAR EM PLACAS

A Tabela 26 apresenta o resumo dos resultados do estudo preliminar relacionados com a visibilidade dos defeitos. Verificou-se que descolamentos em revestimento cerâmico, fissuras superficiais em revestimento em argamassa e elementos inseridos e ocultos podem ser detectados utilizando a termografia de infravermelho. Estudos de detecção e avaliação de descolamentos em laboratórios (BAUER *et al.*, 2016; FREITAS, S *et al.*, 2014) e em campo (BAUER *et al.*, 2016b; EDIS *et al.*, 2015a; LOURENÇO *et al.*, 2017), de fissuras (BAUER *et al.*, 2016a; FREITAS *et al.*, 2014; SHAM *et al.*, 2008), de protótipos de laboratório que detectam a presença de vazios ou materiais inseridos (CHENG *et al.*, 2008; LAI *et al.*, 2010, 2015; NOWAK e KUCYPERA, 2010; WERITZ *et al.*, 2005), de estudos que incluem a identificação de elementos inseridos em paredes, como elementos estruturais (CORTIZO, 2007; TITMAN, 2001) ou que detectam a presença de elementos estruturais por trás da fachada (IBARRA-CASTANEDO *et al.*, 2017), corroboram os resultados obtidos na pesquisa.

Tabela 26 – Visibilidade dos defeitos no estudo preliminar em placas.

Defeitos ou elementos	Tipos	Variáveis	Visibilidade
Defeitos em revestimento cerâmico	Descolamento	Espessura da placa cerâmica	Sim
	Baixa aderência	Tempo para assentamento	Não
Defeito em revestimento em argamassa	Fissura superficial	Profundidade	Sim
	Fissura oculta	Separação da superfície	Não
Elementos inseridos	Inseridos na superfície	Tipo de material	Sim
	Inseridos na placa	Tipo de material	Sim
Elementos ocultos	Paralelo	Tamanho	Sim
	Perpendiculares		Sim

Fonte: Próprio autor.

Os defeitos: baixa aderência no revestimento cerâmico e as fissuras ocultas no revestimento em argamassa não foram visíveis nos termogramas em nenhum dos ciclos. Em relação a baixa aderência, não foram encontrados estudos que indiquem que este problema patológico possa ser detectado. Estudos onde a falta de aderência é avaliada com a termografia incluem ao menos uma camada de ar por trás do revestimento como nos caso dos estudos do concreto reforçado com PRF (LAI *et al.*, 2010, 2012).

Em relação às fissuras ocultas (por trás da camada de revestimento) a não detecção delas se justifica pela relação entre a espessura e a profundidade da fissura, que no caso do estudo foi igual 1. Apesar de estudos de elementos de concreto terem encontrado visíveis defeitos com relação de 0,9 (COTIČ *et al.*, 2015), Maldague (2001) relaciona a visibilidade do defeito com a relação dimensão/profundidade superior a dois. No caso de estudo verificou-se está limitante e concluiu-se que dificilmente possam ser detectadas fissuras ocultas no revestimento por se tratar de um defeito com uma de suas dimensões muito pequenas.

A Tabela 27 apresenta o resumo dos resultados do estudo preliminar relacionados com as condições (ciclo e etapa) e a forma como apareceram os defeitos (mais frios ou quentes do que as áreas sem defeito ou normal).

Tabela 27 – Condição e forma como aparecem os defeitos.

Defeitos ou elementos	Tipos	Variáveis	CD - Aquec	CD - Arref	CR - Aquec	CR - Arref
Defeitos em revestimento cerâmico	Descolamento	Espessura da placa cerâmica	Quente	Frio	Frio	Frio
	Baixa aderência	Tempo para assentamento	-	-	-	-
Defeito em revestimento em argamassa	Fissura superficial	Profundidade	Fria	Quente	Quente	Quente
	Fissura oculta	Separação da superfície	-	-	-	-
Elementos inseridos	Inseridos na superfície	Tipo de material	Dep*	Dep*	Dep*	Dep*
	Inseridos na placa	Tipo de material	Dep*	Dep*	Dep*	Dep*
Elementos ocultos	Paralelo	Tamanho	-	-	Frio	-
	Perpendicular		-	-	Frio	-

Dep*: depende das propriedades térmicas do material inserido

Fonte: Próprio autor.

Os descolamentos no revestimento cerâmico foram visíveis nos dois ciclos. Nas quatro etapas apareceram como áreas mais quentes, quando o calor penetrou pela superfície revestida (condição direta) e como áreas mais frias quando, o calor saiu pela superfície revestida (condição reversa). Este comportamento se justifica pela presença da camada de ar (defeito) que constitui uma zona com resistência térmica maior e faz com que o calor se acumule na superfície a frente do defeito.

No caso do ciclo direto no aquecimento o calor se acumula na superfície da placa cerâmica (na frente do defeito) e no caso do ciclo reverso e na etapa de arrefecimento do ciclo direto o calor se acumula na interfase do defeito e a placa de concreto e a área da placa cerâmica na frente do defeito fica mais fria.

Os estudos encontrados na revisão da bibliografia corroboram o comportamento encontrado na pesquisa. Nas inspeções sob a incidência do sol (condição direta), os descolamentos apareceram como áreas mais quentes e no final da tarde e a noite (condição reversa) como áreas mais frias (BAUER *et al.*, 2016b; BAUER *et al.*, 2015c; EDIS *et al.*, 2015; LOURENÇO *et al.*, 2017). No entanto, é importante comentar que nos estudos de campo a depender da espessura e quantidade de camadas da parede e as diferenças de temperaturas entre o ambiente externo interno, os horários onde se observam estes comportamentos nem sempre coincidem.

As fissuras foram as patologias que mais dúvidas geraram em relação a como as mesmas aparecem nos termogramas a depender do momento analisado. Não foi possível definir com clareza através da análise da bibliografia o comportamento térmico das fissuras. Os resultados do presente estudo mostraram que as fissuras devem aparecer como áreas mais frias quando o calor penetra pela superfície revestida (condição direta) e como áreas mais quentes quando o calor sai pela superfície revestida (condição reversa).

A forma em que aparecem as fissuras no termograma tem relação direta com a profundidade da camada onde se encontram as mesmas (BAUER, 2016). Como a temperatura do defeito (fissura) correspondente com a camada mais profunda, quando a superfície estudada está na condição direta (CD-Aquec) o calor demora mais em chegar à área com defeito, aparecendo o mesmo como uma área mais fria no termograma. Quando a superfície estudada está na condição reversa (CD-Aref, CR-Aquec e CR-Aref), a área

com defeito fica mais próxima do centro da placa (CD-Arref e CR-Arref) ou da superfície esquentada (CR-Aquec), aparecendo então como uma área mais quente na etapa de arrefecimento.

Para justificar este comportamento Sham *et al.*, (2008) relatam que, na condição direta a radiação penetra na fissura sendo refletida nas paredes, somente uma porção é absorvida, por esse motivo, esta região não fica aquecida da mesma forma que a superfície normal sem defeito, tendo uma temperatura mais baixa. Para justificar este comportamento Rocha *et al.* (2017) relatam que, na condição reversa as fissuras perdem calor em uma taxa mais lenta em sentido inverso, a radiação térmica é emitida a partir das paredes, não sendo diretamente exposta, pois reflete nas últimas, sendo uma parte absorvida, a qual gera aumentos de temperatura na fissura, em relação área sem defeito. Estudos onde não foi observado este comportamento provavelmente estejam relacionados com a cor diferente das fissuras ou talvez pela possível presença de áreas descoladas produto da elevada concentração das mesmas (BAUER, *et al.*, 2016a).

Em relação à profundidade das fissuras, observou-se que gera diferenças nos termogramas, quanto mais profundas são as fissuras mais frias (CD-aquecimento) ou mais quentes (CD-arrefecimento, CR-aquecimento e CR-arrefecimento), vão aparecer no termograma, ou seja, vão gerar maiores valores (módulo) de Delta-T.

Em relação aos elementos inseridos na superfície a forma como aparecem os materiais depende das propriedades térmicas e não pode ser associado com o sentido do fluxo de calor sem levar em consideração suas propriedades térmicas. Os inseridos na superfície na condição direta dependem do calor específico do material e da sua condutividade, não é possível prever a partir de uma análise simples a forma como o defeito deve aparecer, neste caso, deve ser observado também as características da superfície do material.

Em uma condição reversa, seja durante o aquecimento ou o arrefecimento a forma como aparecem os materiais está diretamente relacionada com a condutividade térmica, a princípio os materiais com condutividade térmica menor aparecem mais frios no termograma na condição reversa. Os materiais inseridos na placa por trás da camada de revestimento, a forma em que aparecem nos termogramas depende principalmente da condutividade térmica do material. Este comportamento foi verificado também por Nowak

e Kucypera (2010) que avaliaram materiais inseridos com condutividade térmica bem diferente.

Em relação aos elementos ocultos se observou que no caso do ciclo direto não é possível visualizar os elementos com a termografia o que pode estar associado à relação entre a profundidade do defeito (espessura da placa) e a dimensões do defeito, além das condições do experimento que facilitaram a saída de calor do elemento, não se acumulando no mesmo. No caso do arrefecimento, como o calor sai do centro da placa para o exterior, o calor que sai pela superfície frontal não atravessa o defeito e por tais motivos não gera diferenças de temperatura na superfície, sendo assim os elementos não apareceram visíveis no termograma.

No ciclo reverso os elementos podem ser detectados no termograma na etapa de aquecimento, como a espessura para atravessar o elemento e chegar à superfície é maior, a superfície na frente do defeito aparece neste caso como uma área mais fria. Já no caso do arrefecimento, similar ao que acontece no ciclo direto os elementos não foram visíveis no termograma. Este comportamento coincide com vários dos estudos encontrados na bibliografia onde a detecção de elementos estruturais no interior da vedação por trás do revestimento (BAUER *et al.*, 2016b; BAUER E PAVÓN, 2015; CORTIZO, 2007) e por trás da fachada (IBARRA-CASTANEDO *et al.*, 2017) foram visualizados na condição reversa, ou seja, com o calor saindo pela superfície estudada.

6.2 ESTUDO EM PLACAS COM REVESTIMENTO CERÂMICO

No estudo em placas com revestimento cerâmico foi possível quantificar os valores dos parâmetros termográficos (Delta-T e funções de contraste), sendo estes um dos principais objetivos da etapa. Nas condições do experimento, no fluxo alto os máximos valores do Delta-T ficaram próximos de $\pm 4,5^{\circ}\text{C}$ e no fluxo baixo de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, a depender do sentido do fluxo de calor. Não foi possível definir, através da análise dos termogramas, o limite de Delta-T a partir do qual o defeito fica visível, porque o mesmo depende da escala utilizada, da paleta de cores do programa, além da experiência do observador. No entanto, observou-se que, com valores de Delta-T (módulo) acima de $0,5^{\circ}\text{C}$ sempre foi possível visualizar o defeito, independentemente do sentido do fluxo de calor na placa.

A menor espessura da cerâmica, o maior tamanho e profundidade do defeito geraram maiores valores do Delta-T. É difícil gerar conclusões a partir da comparação com resultados de estudos da bibliografia porque a distribuição do experimento, a forma de aquecimento, as dimensões das camadas e os tipos de materiais mudam de estudo para estudo. No entanto, se observou que os valores encontrados na pesquisa estão na faixa dos principais estudos de laboratórios, onde os descolamentos têm sido detectados com valores menores que 5°C (BAUER *et al.*, 2016; CERDEIRA *et al.*, 2011; FREITAS, S *et al.*, 2014).

Os valores das funções de contraste TRC e TC, foram também quantificados nas placas com revestimento cerâmico. No entanto, não foi possível gerar muitas conclusões a partir dos valores das funções, os principais resultados da aplicação das funções estiveram relacionados com a identificação dos picos da função. Conclui-se então, que estas funções devem ser utilizadas para identificar os momentos onde os limites dos defeitos aparecem melhor definidos. Em relação aos valores se observou a modo geral que os mesmos foram similares quando comparado o fluxo alto com o fluxo baixo.

As diferenças particulares que se apresentaram em alguns picos na etapa de arrefecimento o autor acredita que estiveram relacionadas com a estimativa da temperatura no momento da inversão do fluxo de calor, o qual corresponde ao valor de temperatura utilizado como referência para o cálculo das funções de contraste na etapa de arrefecimento. Como a interpolação foi linear não existe total garantia que a inversão do fluxo aconteceu exatamente no valor de temperatura estimado.

Não foi possível definir qual das etapas (aquecimento ou arrefecimento) gera os maiores valores em um mesmo defeito. As diferenças entre os valores das funções (principalmente dos picos) entre as etapas de aquecimento e arrefecimento podem estar relacionados também com a estimativa da temperatura correspondente à inversão do fluxo de calor. Acredita-se que a precisão na mensuração da temperatura no momento da inversão do fluxo possa ter influenciado nos resultados, encontrando-se indistintamente menores e maiores valores quando comparadas as etapas. As curvas de temperatura das áreas com e sem defeito apresentam uma forma aproximadamente logarítmica no arrefecimento e a estimativa foi feita de forma linear, o que pode justificar em certa medida a precisão dos resultados.

A Tabela 28 mostra um resumo dos resultados referentes à avaliação da influência das variáveis relacionadas com as placas cerâmicas e os defeitos. Nota-se que as quatro variáveis definidas têm uma influência significativa (>95%) nos resultados do Delta-T. O que indica de acordo com o estudo que a menor espessura, o maior tamanho e profundidade do defeito geram maiores valores no Delta-T.

Tabela 28 – Influência das variáveis analisadas no estudo em placas com revestimento cerâmico.

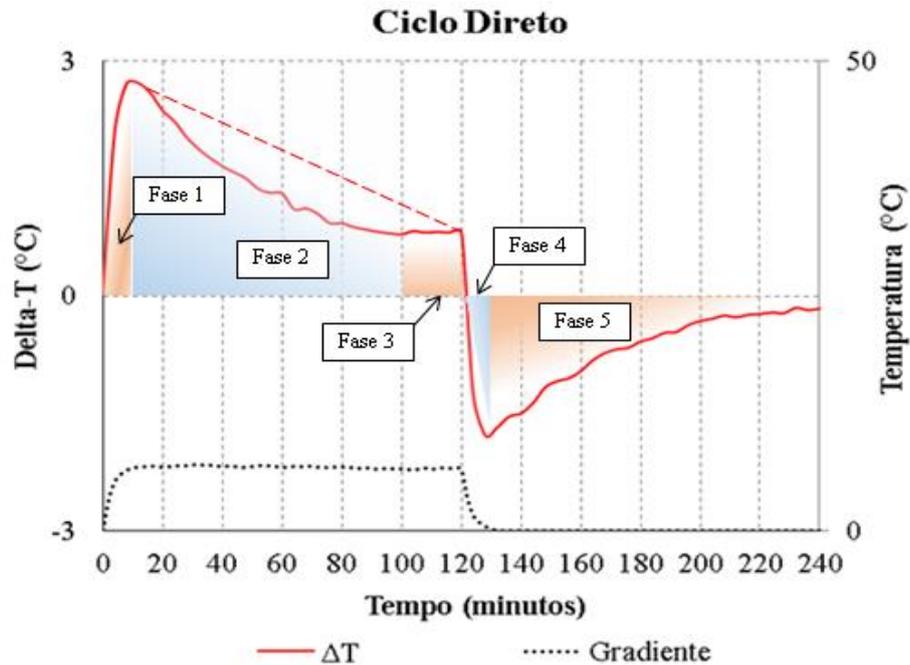
Defeitos ou elementos	Tipos	Variáveis	Influência (p-valor)
Defeitos em revestimento o cerâmico	Descolamento	Espessura da placa cerâmica	0,035784
		Geometria do defeito	0,007913
		Tamanho do defeito	0,000240
		Profundidade do defeito	0,001140

Fonte: Próprio autor.

A análise estatística dos resultados do Delta-T nas placas cerâmicas também mostrou que as variáveis analisadas são independentes do fluxo, ou seja, a espessura, a geometria, o tamanho e a profundidade do defeito (descolamento) vão gerar diferenças no termograma independentemente da intensidade do fluxo de calor que esteja atravessando o defeito. Em termos de aplicação prática, este comportamento sugere que independentemente do estímulo (radiação solar ou diferença de temperaturas entre o ambiente externo ou interno) descolamentos de tamanho, geometria e profundidade diferente poderão ser diferenciados no termograma, o que sugere que será possível quantificar a gravidade dos defeitos através da termografia. Estes aspectos deverão ser analisados em novas pesquisas de campo.

A Figura 106 mostra o modelo que resume o comportamento padrão relativa aos resultados do Delta-T no ciclo direto. O comportamento do Delta-T esteve diretamente relacionado com a forma do aquecimento, especificamente com a velocidade com que a superfície foi aquecida e com o gradiente de temperatura que atravessa a superfície (diferença de temperatura entre a superfície frontal e traseira).

Figura 106 – Resumo do comportamento padrão do Delta-T no ciclo direto.



Fonte: Próprio autor.

No ciclo direto quando as lâmpadas foram ligadas o Delta-T cresceu rapidamente influenciado pela resistência térmica que oferece a camada de ar (defeito) por trás da cerâmica fazendo com que o calor se acumule rapidamente na superfície na frente do defeito. O crescimento da temperatura da superfície junto com o crescimento do gradiente gera um aumento do Delta-T, obtendo-se o máximo valor quando o gradiente de temperatura no período inicial chega ao valor máximo (Fase 1).

A partir desse momento (continuando no aquecimento) o gradiente é constante e o calor começa a se movimentar mais intensamente por convecção através do defeito. Nesse tempo o calor começa também a se movimentar para as laterais do defeito, diminuindo assim, os valores de Delta-T (Fase 2). Em relação ao comportamento encontrado na fase 2, Caldeira (2016) explica que com o passar do tempo o Delta-T, chamado por ela de contraste térmico, se enfraquece devido a difusão térmica que tende a uniformizar a distribuição de temperatura na superfície, aumentando os ruídos dos dados. Outros autores detectaram também que prazos longos de aquecimento diminuem os valores de Delta-T para o final do ciclo (WERITZ *et al.*, 2005).

Para o final da etapa de aquecimento onde o gradiente de temperatura é constante e a temperatura da superfície praticamente não cresce (tende a ser constante) o sistema se encontra próximo de uma condição estacionária onde o valor do Delta-T tende a ser constante também para o final do ciclo (Fase 3).

No início do arrefecimento (Fase 4) como a diferença da temperatura da superfície e o ambiente é grande, devido ao desligamento das lâmpadas, o gradiente de temperatura teve uma queda intensa a qual foi acompanhada pelo Delta-T. Neste momento não existe uma fonte de calor sendo o Delta-T, resultado do arrefecimento da superfície. Uma vez que neste período aparecem as maiores diferenças de temperatura entre a superfície revestida e o ambiente, são obtidos então os máximos valores de Delta-T (Fase 4). É importante comentar que na fase 4 existe uma inversão de fluxo motivada pela mudança de sentido do fluxo de calor, no aquecimento é proveniente das lâmpadas indo do exterior para o interior e no arrefecimento é gerado pelo calor que sai do interior da placa para o exterior.

Após a queda brusca pelo desligamento das lâmpadas, a diferença de temperatura entre o ambiente e a superfície começa a diminuir e a superfície vai perdendo temperatura mais lentamente, fato que é acompanhado também pelo Delta-T. Além disso, para o final do arrefecimento o gradiente de temperatura entre as superfícies frontal e traseira é praticamente zero e o Delta-T depende do calor que sai do interior da placa para o exterior através da superfície revestida. Este comportamento caracteriza a Fase 5.

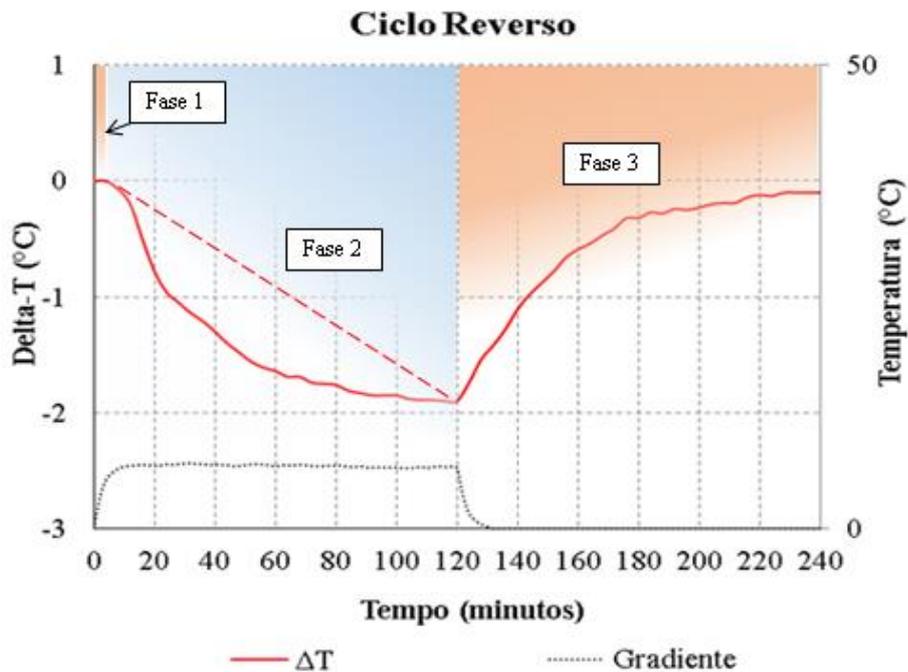
A profundidade do defeito foi a única variável que mudou ligeiramente o comportamento do Delta-T, no ciclo direto. A maior profundidade dos defeitos (maior dimensão lateral) não gerou diferenças entre as fases 2 e 3 (Figura 60 a,b). O Delta-T comportou-se como a linha representada na Figura 106. Possivelmente como a dimensão lateral do defeito é maior, o sistema vai demorar ainda para chegar a uma condição estacionária, neste caso pela duração do experimento a lâmpadas foram desligadas no momento correspondente ainda à fase 2.

A Figura 107 mostra o modelo que resume o comportamento padrão relativo aos resultados do Delta-T no ciclo reverso. Neste ciclo a fonte de calor (lâmpadas) não participa diretamente do aquecimento da superfície estudada. A visibilidade do defeito depende do

calor que atravessa o mesmo, proveniente da parte traseira da placa. Neste caso, o comportamento do Delta-T foi dividido em três fases.

Inicialmente quando as lâmpadas foram ligadas não se observaram diferenças no Delta-T, devido a que calor deve atravessar as diferentes camadas da placa antes de passar pelo defeito e sair pela superfície revestida (Fase 1). Uma vez que o calor chega na superfície frontal (revestida), na medida que aumenta a temperatura da superfície traseira vai aumentando o calor que atravessa o defeito e sai pela superfície frontal. Sendo assim, o Delta-T vá aumentando na mesma proporção com que a superfície é aquecida pelas lâmpadas. Como a camada de ar que constitui o defeito tem uma resistência térmica maior o calor se movimentava mais rapidamente pelas laterais e área na frente do defeito fica mais fria que a área normal ou sem defeito (Fase 2). No momento que são desligadas as lâmpadas, a intensidade do calor que atravessa o defeito é menor e conseqüentemente o Delta-T diminui seus valores acompanhando o arrefecimento da superfície revestida (Fase 3).

Figura 107 – Resumo do comportamento padrão do Delta-T no ciclo reverso.



Fonte: Próprio autor.

Foram observadas pequenas diferenças no comportamento (linha da Figura 107), no fluxo baixo em relação ao modelo mostrado. A curva do Delta-T na fase 2, não tem uma

inclinação tão forte e mantém aproximadamente a mesma inclinação durante todo o aquecimento após os momentos iniciais. Esta diferença é devida ao aquecimento mais lento da superfície frontal e traseira pela menor potência das lâmpadas nesta condição (fluxo baixo). Este comportamento foi observado no ciclo reverso - fluxo baixo em todas as placas (Figura 54d, Figura 57d, Figura 60d e Figura 63d) e na placa 12 no ciclo reverso – fluxo alto Figura 60c, provavelmente pela maior espessura da camada do defeito.

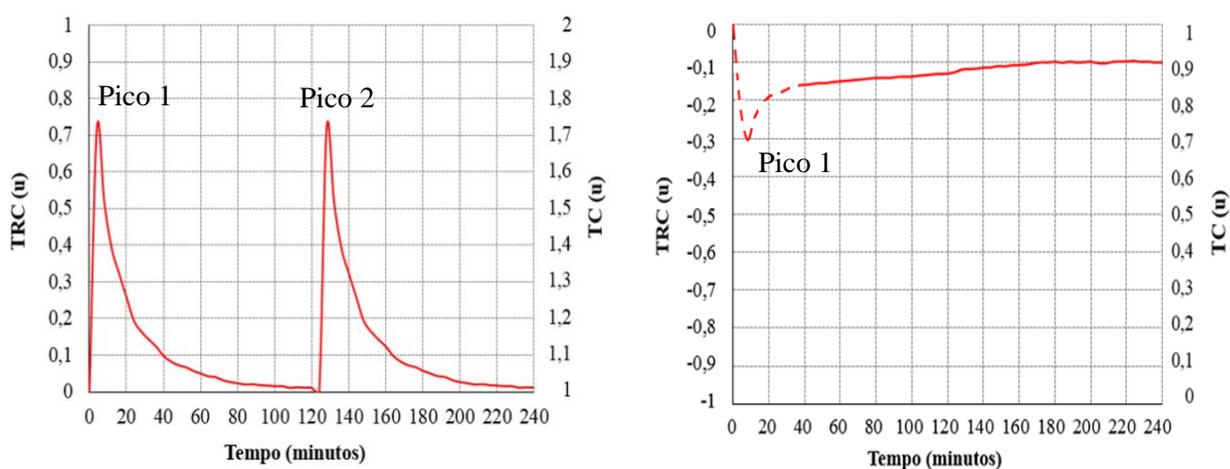
A Figura 108 mostra um modelo que resume o comportamento das funções de contraste (TRC e TC) no ciclo direto e reverso. O comportamento destas funções esteve relacionado com a variação de temperatura da superfície (taxa de crescimento ou queda), a qual dependeu diretamente da forma de aquecimento utilizada no estudo. As duas funções de contraste (TRC e TC) tiveram a mesma evolução nas placas, coincidindo os picos e o formato das curvas tanto para o fluxo alto quanto para o fluxo baixo. No ciclo direto (Figura 108a), no instante inicial quando as lâmpadas foram ligadas apareceu o Pico 1 da função de contraste na etapa de aquecimento coincidindo com o momento de máxima taxa de crescimento da temperatura da superfície. No ciclo direto – aquecimento, os valores de TRC são positivos porque o ΔT é positivo e a temperatura média da superfície vai aumentando. Os valores de TC são também positivos porque as áreas com defeito e sem defeito aumentam sua temperatura.

Quando as lâmpadas são desligadas e começa a etapa de arrefecimento aparece o Pico 2 das funções de contraste, coincidindo com o momento onde a queda de temperatura da superfície foi maior, devido às diferenças entre a temperatura da superfície revestida e o ambiente na parte frontal da placa. No ciclo direto – arrefecimento, os valores de TRC são positivos porque o ΔT é negativo e a temperatura média da superfície vai diminuindo (TRC). Os valores de TC são também negativos porque a área com defeito e sem defeito diminuem ambas suas temperaturas.

No ciclo reverso (Figura 108b) o comportamento das funções de contraste apresentou diferenças a depender do fluxo (alto ou baixo). No fluxo alto nos momentos iniciais se observou o Pico 1 da função de contraste. A maior intensidade do fluxo de calor faz com que o calor chegue relativamente rápido à superfície revestida e o aumento da temperatura da superfície gere o valor máximo do contraste. No fluxo baixo o calor demora em chegar à superfície revestida devido à menor intensidade do fluxo, por tais motivos não é possível

observar o pico na função. Neste caso desaparece a parte tracejada da Figura 108 (b). Além disso, a taxa de crescimento da temperatura da superfície no resto do experimento é pequena, o que não permite o aparecimento de picos das funções em nenhum outro momento do ciclo.

Figura 108 – Modelo de comportamento das funções de contraste (TRC e TC).



Fonte: Próprio autor.

Na etapa de arrefecimento quando são desligadas as lâmpadas não existe uma queda da temperatura do ambiente na parte frontal da placa, por tais motivos não muda bruscamente a diferença de temperatura entre a superfície revestida e o ambiente, e conseqüentemente não aparece pico na função de contraste.

A análise dos parâmetros termográficos (Delta-T e funções de contraste) em placas com revestimento cerâmico mostrou que em campo deve ser procurado na condição direta o momento onde coincidem o máximo valor de Delta-T e o máximo valor das funções de contraste. Como nas condições de campo não podem ser mensuradas as funções de contraste se deve procurar então os momentos de máximo crescimento da temperatura da superfície (revestimento cerâmico).

Associando o comportamento no laboratório com os prováveis resultados em campo, acredita-se que os momentos iniciais de exposição ao sol possam ser os indicados para avaliar os descolamentos na condição direta. Na condição reversa os estudos de laboratório mostraram que a avaliação dos descolamentos pode ser mais complexa, pelo fato que não sempre coincidem no mesmo intervalo os máximos valores do Delta-T e das funções de

contraste. Sendo assim, é necessário considerar os parâmetros relativos ao fluxo de calor para definir os momentos de avaliação dos descolamentos na condição reversa. No entanto, alguns comportamentos geram importantes critérios na avaliação dos descolamentos na condição reversa, fato da inversão do sentido de o fluxo de calor gerar picos no Delta-T e na função de contraste, pode ser um indicador do momento de avaliação da condição após cessada a incidência do sol, como acontece no caso da orientação oeste.

6.3 ESTUDO EM PAREDE

No estudo da parede foi possível quantificar os valores dos parâmetros termográficos assim como os parâmetros relativos ao fluxo de calor (gradientes e variação de temperatura da superfície). Os máximos valores do Delta-T ficaram próximos de $\pm 4^{\circ}\text{C}$ a depender do sentido do fluxo de calor. Em relação às variáveis estudadas se verificou que a menor espessura da placa cerâmica e o maior tamanho do defeito geram maiores valores do Delta-T ao longo dos ciclos, comportamento verificado também nos resultados obtidos no estudo em placas.

As funções de contraste TRC e TC apresentaram comportamento similar às placas no ciclo direto e no início do ciclo reverso o comportamento foi equivalente ao comportamento das placas com fluxo baixo. O TRC e TC não foram mensurados no início do ciclo reverso porque foi necessário esperar o calor sair pela superfície revestida para quantificar as funções. Em relação às variáveis estudadas se verificou que a espessura da placa cerâmica e o tamanho do defeito geram diferenças nos valores das funções de contraste (TRC e TC) ao longo dos ciclos, comportamento verificado também nos resultados obtidos no estudo em placas.

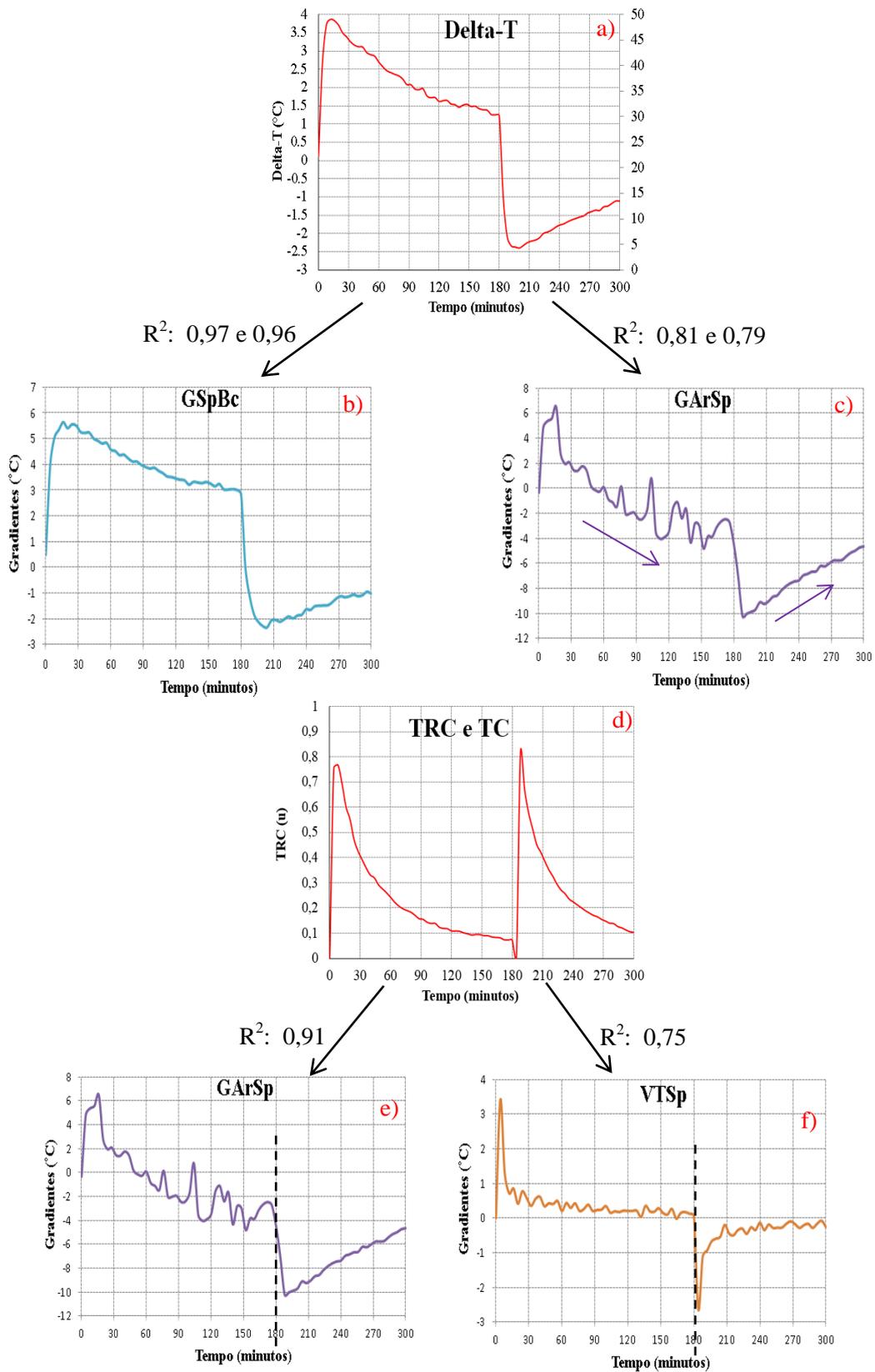
A Figura 109 resume o comportamento, no ciclo direto, dos parâmetros termográficos e dos parâmetros relativos ao fluxo de calor que tiveram correlação entre eles. As curvas que representam os comportamentos foram construídas a partir dos dados da placa cerâmica B, as setas indicam os valores das correlações determinadas na análise estatística multivariada. Os valores do lado da seta correspondem, na sequência, com a correlação obtida no aquecimento e no arrefecimento. Quando foi mostrado um único valor, o mesmo corresponde à correlação obtida no aquecimento, sendo que nesses casos não se obteve correlação no arrefecimento.

Em relação ao comportamento do Delta-T e as funções do contraste, no ciclo direto, verificou-se que os mesmos não mudaram em relação ao estudo em placas, o que indica que a maior espessura da parede não influenciou os parâmetros termográficos (Delta-T e funções de contraste) na condição direta. Fato importante nas inspeções, já que o mesmo sugere que independentemente da espessura das camadas da parede na condição direta o comportamento térmico dos descolamentos vai ser similar, respeitando as diferenças em relação à forma de aquecimento. No caso de estudos em campo não temos um desligamento brusco da fonte de calor (sol), o que poderia mudar a velocidade com que o fenômeno (arrefecimento) acontece na fachada.

Observa-se também uma excelente correlação entre os valores do Delta-T (Figura 109a) e o GSpBc (gradiente entre a superfície frontal e o bloco, Figura 109b), o formato da curva que representa ambos os comportamentos é praticamente o mesmo. Este comportamento sugere que na simulação térmica da fachada prévia à avaliação dos defeitos devem ser procurados os valores do GSpBc, nos intervalos que o mesmo seja positivo ou negativo o sistema estará em uma condição direta ou reversa, respectivamente. Além disso, os máximos valores do Delta-T devem coincidir em tempo com os máximos valores do GSpBc.

Observe-se que o Delta-T (Figura 109a) apresentou também uma boa correlação com o GArSp (gradiente entre o ar e a superfície frontal) (Figura 109c). Levando em consideração que este gradiente tem a ver com incidência da fonte de calor, a diminuição ou aumento deste parâmetro (como indicam as setas) pode ser utilizado como critério complementar para avaliar a condição em que se encontra a superfície do revestimento no momento da inspeção.

Figura 109 – Comportamento dos parâmetros termográficos e dos parâmetros relativos ao fluxo de calor, com dados da placa B. Resultados do ciclo direto. (a) Delta-T. (b) GSpBc. (c) GARSp. (d) TRC e TC. (e) GARSp. (f) VTSp.



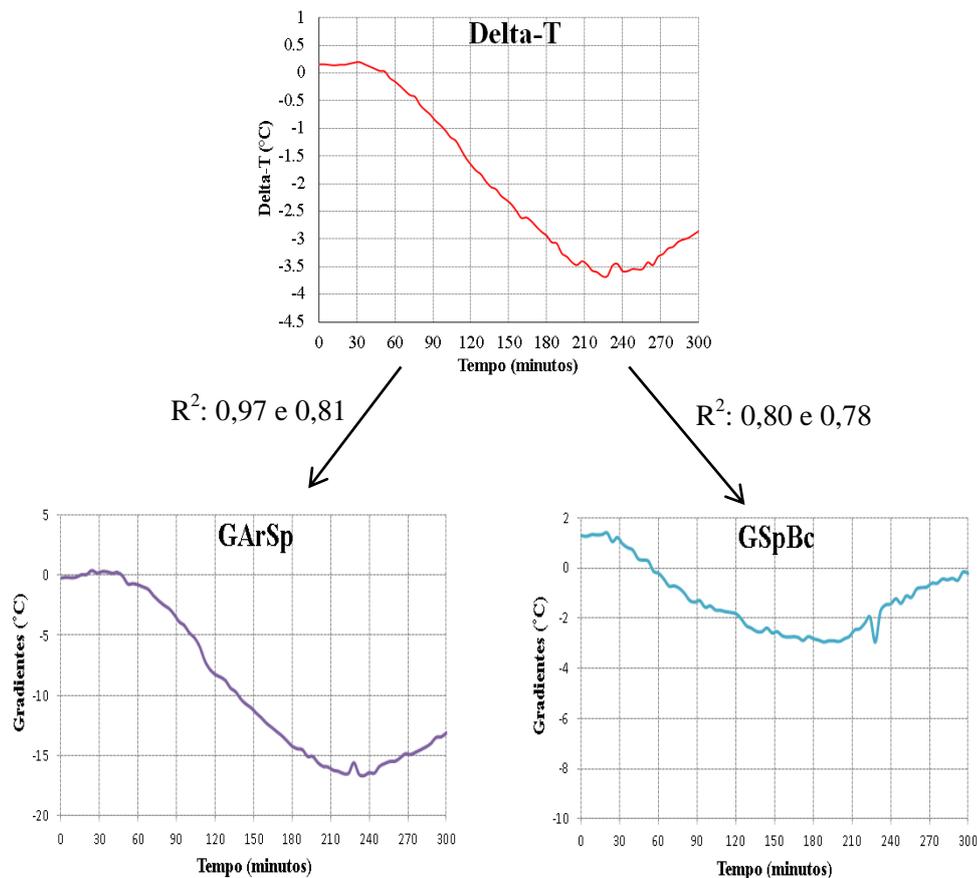
Fonte: Próprio autor.

As funções de contraste (Figura 109d) apresentaram correlação com os parâmetros GArSp (gradiente entre o ar e a superfície frontal) e VTSp (variação de temperatura da superfície) somente no aquecimento. Levando em consideração que as funções de contraste mostram os momentos onde os limites dos defeitos aparecem melhor definidos, em uma condição direta em campo se deve procurar os momentos de máximos valores do VTSp (Figura 109f). No caso do GArSp (Figura 109e), foram observados tanto valores positivos quanto negativos, por esses motivos os picos desta função talvez não tragam uma conclusão útil na avaliação, o valor deve ser verificado se no momento da análise estão aumentando ou diminuindo.

A Figura 110 resume um comportamento, no ciclo reverso, dos parâmetros termográficos e dos parâmetros relativos ao fluxo de calor que tiveram correlação entre eles. As curvas que representam os comportamentos foram construídas a partir dos dados da placa cerâmica B. Em relação ao comportamento do Delta-T, verificou-se que o mesmo mudou em relação ao estudo em placas, o que indica que a maior espessura da parede influencia o comportamento térmico dos descolamentos na condição reversa. A maior espessura da parede aumenta o tempo da Fase 1 e diminui a inclinação da curva na Fase 2 (Figura 107), aumentado também o intervalo da mesma. Após o desligamento das lâmpadas o Delta-T continuou aumentando o seu valor. Na Fase 3 se percebeu também que a inclinação da curva foi menor. De modo geral se observou que os efeitos de aumento e queda do Delta-T são menos bruscos com o aumento da espessura da parede.

No ciclo reverso se obteve correlação entre o Delta-T (Figura 110a) e os parâmetros GSpBc (Figura 110c) e o GArSp (Figura 110a). As curvas de ambos os parâmetros têm formato bem similar ao da curva do Delta-T. Comprovou-se que quando o calor sai pela superfície revestida, seja produto de uma inversão do sentido do fluxo de calor ou produto de uma diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo se deve analisar o comportamento do GArSp e o GSpBc. A não correlação das funções de contraste com nenhum dos parâmetros associados ao fluxo de calor sugere que na condição reversa não existe um momento no qual se possa afirmar que os limites dos defeitos vão aparecer melhor definidos, por tais motivos deve se procurar os maiores valores de GArSp e GSpBc.

Figura 110 – Comportamento dos parâmetros termográficos e dos parâmetros relativos ao fluxo de calor, com dados da placa B. Resultados do ciclo reverso. a) Delta-T. b) GArSp. c) GSpBc.



Fonte: Próprio autor.

Pode-se concluir que os parâmetros relativos ao fluxo de calor que devem ser utilizados no estudo de fachadas com descolamento cerâmico são: GSpBc, GArSp e VTSp, este último somente na condição direta. Em princípio se deve procurar os intervalos positivos e negativos do GSpBc para definir o intervalo de tempo para a realização do estudo na condição direta e reversa, respectivamente. Além disso, deve-se observar os máximos valores do GSpBc os quais podem estar ligados aos máximos valores do Delta-T.

Em relação ao GArSp deve ser observado os valores e a inclinação da curva para identificar se o revestimento está ganhando ou perdendo calor para o ambiente. Em relação ao VTSp se devem procurar os picos na condição direta (máximos valores) o que indica os momentos em que os limites dos defeitos estão melhor definidos.

Em relação à mensuração do tamanho do defeito (descolamento) na parede se verificou que a metodologia utilizada tem uma boa precisão se for levado em consideração a

mensuração dos descolamentos nas fachadas que é feita a partir da contagem de placas cerâmicas com som cavo a critério (subjetivo) do operador. As maiores diferenças obtidas entre a área média calculada e a área real do defeito foi 9% e 7,7%, para o ciclo direto e reverso, respetivamente.

Através da mensuração do defeito se verificou a hipótese relacionada com as funções de contraste, podendo-se concluir que, efetivamente, estas funções indicam o momento onde os limites dos defeitos aparecem melhor definidos, facilitando a mensuração dos mesmos. Além disso, foi observado que para o final de cada etapa (aquecimento e arrefecimento) o coeficiente de variação das amostras aumentou o que está relacionado com a pior visibilidade do defeito e fato de ser mais difícil definir o limite dos mesmos.

Os resultados da mensuração do defeito sugerem que em campo a mensuração do defeito na condição direta deve ser realizada nos momentos de maiores contrastes (maior crescimento da temperatura média da superfície) e Delta-T e na condição reversa deve ser realizada no termograma de máximo Delta-T, para obter valores mais próximos à real dimensão do defeito.

6.4 ESTUDO EM FACHADAS

De modo geral no estudo das fachadas com termografia de infravermelho se pode concluir que foi possível detectar os descolamentos no revestimento cerâmico, baseados nos critérios e padrões de comportamento observados no estudo em placas e parede. Não foi possível confirmar a presença de descolamentos nas duas fachadas com falhas do rejunte devido à dificuldade de interpretação dos resultados.

A Tabela 29 mostra o resumo dos parâmetros relativos ao fluxo de calor e o Delta-T, usados como critérios na avaliação dos descolamentos na fachada. O intervalo apresentado corresponde com o período de tempo definido na simulação, de acordo com os valores do GSpBc, onde é possível fazer a avaliação termográfica e a hora se refere ao horário correspondente ao termograma onde foi realizada a avaliação. Nota-se que os termogramas escolhidos estiveram dentro do intervalo definido pela simulação. Na maioria dos casos (F1, F2 e F3) foi possível avaliar o descolamento somente na condição direta a partir da identificação do momento de máximo VTSp, além da verificação do ganho de calor da

superfície, representado pelo valor negativo do GArSp e a inclinação do mesmo no momento escolhido, representado pela seta na tabela.

Tabela 29 – Resumo dos resultados dos parâmetros utilizados na avaliação das fachadas.

Fachadas	Orientação	Intervalo	Hora	GSpBc	GArSp	VTSp	Delta-T
F1	Norte	8-13h	9h	2,48	-7,66 ↘	7,05	4,7
F2	Leste	8-11h	8:30h	0,61	-2,54 ↘	2,64	4,2
F3	Oeste	9-16:30h	16h	1,40	-10,14 ↘	3,44	3,0
		Após 16:30	18h	-1,79	-3,33 ↗	-5,42	-3,1
F4	Noroeste	9-16h	14h	1,87	-8,02 ↘	2,95	4,0*
F5	Noroeste	8:30-16h	15h	3,42	-20,35 ↘	4,89	*

*Presença de escolamento não confirmado.

Fonte: Próprio autor.

Foram detectados descolamentos na condição reversa somente na fachada 3 (F3), nos outros casos os descolamentos não puderam ser detectados pela presença da estrutura por trás do defeito (F1), pelo comportamento do GSpBc devido ao atraso térmico da fachada (F2) e pela presença de falhas de rejunte (F4 e F5). A presença de falhas de rejunte dificultou também a identificação dos descolamentos na condição direta, mas neste caso ao menos foi possível suspeitar da presença dos mesmos utilizando linhas de temperaturas que atravessaram os defeitos.

Observou na análise das fachadas que é preciso verificar, além dos valores da radiação, o ângulo de incidência do sol nos horários das inspeções para evitar problemas de reflexão como no caso da F1 e limitar ainda mais o intervalo da inspeção pela presença de sombra, como aconteceu na F4.

Vale destacar que é necessário o entendimento do comportamento das anomalias mais comuns nos termogramas, como a presença da estrutura por trás do revestimento da fachada e de outros materiais ou elementos na fachada, para a correta interpretação dos termogramas e conseqüentemente a detecção da patologia.

Quando se analisam os parâmetros da Tabela 29 utilizados na avaliação dos descolamentos nas fachadas é possível detectar padrões de comportamento e definir índices que podem ajudar na criação de critério para a inspeção.

Em relação às orientações, as que recebem sol desde o início da manhã (Norte e Leste) devem ser avaliadas bem no começo da incidência do sol, já que ao longo do aquecimento os valores do Delta-T tendem a diminuir para o final do aquecimento e consequentemente diminui a visibilidade dos defeitos. Além disso, no começo da manhã não são visualizados os elementos por trás do revestimento o que facilita a identificação dos descolamentos. Outros estudos em condições climáticas diferentes sugeriram ou observaram maiores valores do Delta-T no começo da manhã (Brique, 2016; Lourenço, Matias e Faria, 2017).

Na orientação oeste deve ser avaliada próximo do momento de máxima incidência do sol. Neste caso como o aquecimento por radiação direta é intenso e acontece em um intervalo de tempo menor o comportamento é equivalente à fase 1, descrita no comportamento do Delta-T no ciclo direto (Figura 106). Esta orientação (oeste) favorece a avaliação na condição reversa, devido ao fato da diminuição da incidência do sol ser acompanhada da queda da temperatura ambiente no final da tarde. Sendo assim, a diminuição da temperatura do revestimento tem uma queda brusca o que favorece a visualização dos defeitos. Este comportamento é equivalente à fase 4 na etapa de arrefecimento após a inversão de fluxo de calor (Figura 106).

Em relação ao intervalo para avaliação dos defeitos, observou-se que, o mesmo muda dependendo da orientação da fachada, das características das camadas componentes da vedação (fachada), das características do clima e do momento do ano onde é realizada a avaliação. Por tais motivos se considera imprescindível a realização da simulação térmica da fachada prévia à avaliação termográfica. Na simulação devem ser obtidos e analisados os parâmetros relativos ao fluxo de calor: GSpBc, GArSp e VTSp.

Os valores de GSpBc estiveram no intervalo de 0,6 a 3,5°C aproximadamente, o que indica que valores acima de 0,6°C geraram diferenças de temperatura entre as áreas com e sem defeito na superfície do revestimento cerâmico, suficientes para avaliar os descolamentos.

Os valores do GArSp foram sempre negativos no momento da avaliação, indicando que nas condições do clima de Brasília a superfície do revestimento se encontrava mais quente do que o ambiente. Com valores abaixo de -2,5°C foi possível avaliar os descolamentos. A variabilidade deste parâmetro foi grande e obtiveram-se diferenças superiores a -20°C. As setas indicaram se no momento da avaliação a superfície do revestimento estava ganhando

ou perdendo calor para o ambiente. A inclinação das setas esteve em correspondência com os valores do GSpBc. Quando as setas tiveram inclinação crescente, o que indica que o revestimento está ganhando calor, os valores do GSpBc foram positivos, correspondendo com a condição direta. Quando as setas tiveram inclinação decrescente, o que indica que o revestimento está perdendo calor para o ambiente, os valores do GSpBc foram negativos, correspondendo com a condição direta.

Em relação ao VTSp foi observado que os valores acima de 2,6°C podem ser indicadores de uma boa definição dos limites dos defeitos na condição direta, garantido as condições para avaliação e mensuração dos mesmos. Na condição reversa foi obtido um valor inferior a -5°C, no caso da fachada oeste, que caracteriza uma queda brusca de temperatura momento após a inversão do fluxo, garantindo a visibilidade do defeito.

Os máximos valores (módulo) de Delta-T obtidos no estudo em fachadas ficaram inferiores a 5°C, em correspondência com estudos encontrados na bibliografia onde foram avaliados este tipo de revestimento (BAUER *et al.*, 2016b; EDIS *et al.*, 2014, 2015a; LOURENÇO *et al.*, 2017). Foi possível confirmar a presença de descolamento com valores (módulo) $\geq 3^\circ\text{C}$, em diferentes orientações e momentos do dia, valor que pode ser usado como confirmação da presença de este tipo de patologia.

Baseado no comportamento em placas e parede e nos valores dos parâmetros obtidos nas fachadas é possível propor alguns índices a serem utilizados na avaliação dos descolamentos de conjunto com o Delta-T.

Para que os descolamentos sejam visíveis nos termogramas é necessário ter um fluxo de calor atravessando o defeito. Por tais motivos, o primeiro índice a ser definido é o GSpBc, que representa o fluxo de calor que atravessa o defeito. Tendo em vista os resultados do estudo em fachadas o valor mínimo deste índice deve ser 0,6°C.

Na condição direta ficou definido como o melhor momento para avaliar os descolamentos, o início do aquecimento no qual se aprecia um rápido crescimento da temperatura da superfície (representado por VTSp) em relação ao fluxo de calor que atravessa o defeito (representado por GSpBc). Por tais motivos se sugere utilizar na condição direta o índice

VTSp/GSpBc. De acordo com os resultados em fachadas o valor mínimo de este índice deve ser 2,5.

Na condição reversa ficou definido como o melhor momento para avaliar os descolamentos os termogramas com máximos valores de Delta-T os quais corresponderam com o momento onde o calor que atravessa o defeito é o maior. Além disso, foi observado que os valores de Delta-T apresentaram uma boa correlação com o GARSp. Neste caso os índices GSpBc e GARSp seriam os indicados para a avaliação com valores menores -1,5 e 3°C. Quando a condição reversa é resultado do processo de inversão de fluxo de calor, o melhor momento para avaliar o descolamento foi o início do arrefecimento, além de aparecer as máximas diferenças entre a temperatura da superfície e o ambiente externo (representado por GARSp), se aprecia também uma rápida queda da temperatura da superfície (representado por VTSp), motivo pelo qual deve ser observado o VTSp.

De modo geral se pode concluir que, no estudo em fachadas foi possível validar os critérios relativos ao momento para avaliação dos descolamentos e validar os principais padrões de comportamento do Delta-T encontrados no estudo em placas e parede. Além disso, os valores obtidos nos parâmetros de estudo geraram índices que podem ser usado como critério preliminar na avaliação dos descolamentos em fachadas.

6.5 CRITÉRIOS E PADRÕES DE COMPORTAMENTO PARA AVALIAÇÃO DE DESCOLAMENTOS CERÂMICOS EM FACHADAS

Baseado nos resultados dos estudos em placas, parede e fachadas, a análise dos descolamentos cerâmicos em fachadas com termografia infravermelha deve levar em consideração os seguintes critérios relativos à escolha do momento da inspeção:

- Deve-se realizar a simulação térmica da fachada prévia à inspeção termográfica, utilizando os dados climáticos da cidade em questão;
- Devem-se escolher os intervalos de tempo para avaliação da fachada a partir dos valores do gradiente das camadas mais próximas que atravessem o defeito (GSpBc);
- No intervalo escolhido se deve analisar o ângulo de incidência do sol para detectar as possíveis zonas com sombra e com problemas de reflexão. Estes problemas devem ser

verificados posteriormente em campo e evitados no momento de avaliação do descolamento;

- Na condição direta, identificada por valores positivos de G_{SpBc} , escolher o termograma com o máximo valor de VT_{Sp} , desconsiderando os que apresentem os problemas descritos no item anterior;
- Na condição direta, deve ser verificado que no termograma escolhido o valor do G_{ArSp} seja negativo e que esteja diminuindo (diferença de temperatura entre o revestimento e o ambiente aumentando);
- Na condição reversa, identificada por valores negativos de G_{SpBc} , escolher o termograma com o máximo valor deste parâmetro, desconsiderando os que apresentem os problemas como sombra ou reflexão;
- Na condição reversa, deve ser verificado que no termograma escolhido o valor do G_{ArSp} esteja aumentando (diferença de temperatura entre o revestimento e o ambiente diminuindo);
- Momentos após a inversão do fluxo, identificado pelo valor zero do G_{SpBc} , deve ser observados os valores de VT_{Sp} , porque eventualmente poderiam indicar um bom momento para avaliação dos descolamentos;
- Sugere-se que uma hora antes e depois do termograma indicado na simulação para a análise, seja verificado em campo que as condições do clima e da fachada estão em correspondência com a simulação;
- Sugere-se no mínimo obter dos termogramas da fachada, um deles na condição direta e o outro na condição reversa, de ser possível nos momentos indicados na simulação. Confirmaria a presença de descolamentos e ajudaria na identificação das principais anomalias;

Baseados nos valores dos parâmetros obtidos no estudo em fachada devem ser levados em consideração os seguintes critérios relativos à avaliação dos descolamentos:

- Os descolamentos devem aparecer mais quentes ou mais frios que a área vizinha normal (sem defeito), na condição direta ou reversa, respectivamente. Deve ser usado como indicador da condição os valores positivos ou negativos do G_{SpBc} . A incidência ou não incidência do sol na fachada não deve ser usada como critério indicador (único) da condição em que se encontra o sistema.

- Deve-se verificar se possíveis anomalias como a presença de estruturas, falhas do rejunte, reflexos, dentre outras, coincidem com as áreas dos descolamentos. A identificação deste problema limita a avaliação do defeito com a termografia.
- Na avaliação dos defeitos deve ser usado o Delta-T em conjunto com parâmetros relacionados ao fluxo de calor. Valores (módulo) acima de $0,5^{\circ}\text{C}$ podem ser utilizados para justificar a presença de descolamentos. Valores (módulo) acima de 3°C garantem a presença de descolamento.
- Na avaliação dos defeitos com a termografia os valores do Delta-T, devem coincidir com valores (módulo) de GSpBc acima de $0,6^{\circ}\text{C}$ obtidos previamente na simulação térmica das fachadas, independentemente do sentido do fluxo de calor.
- Na condição direta os valores do Delta-T devem coincidir com valores de VTSp/GSpBc acima de 2,5, obtidos na simulação prévia.
- Na condição reversa os valores de Delta-T devem coincidir com os valores de GSpBc menores que $-1,5^{\circ}\text{C}$ e com valores de GArSp menores que 3°C , obtidos na simulação prévia.
- Quando o termograma avaliado na condição reversa corresponde com momentos próximos à inversão de fluxo o Delta-T deve ser observado o VTSp.

Além dos critérios citados anteriormente foram observados vários padrões de comportamento térmicos dos descolamentos que podem ser utilizados como referência na avaliação termográfica dos mesmos em campo. Observou-se que:

- Nas fachadas que recebem sol pela manhã (Leste e Norte), os maiores valores de Delta-T associados aos descolamentos, foram obtidos no início do aquecimento. Para o final do aquecimento o Delta-T diminui;
- Nas fachadas onde a inversão de fluxo de calor aconteceu rapidamente (Oeste) foi possível avaliar os descolamentos na condição direta e reversa, pelo rápido crescimento ou queda da temperatura da superfície do revestimento;
- As juntas no revestimento cerâmico apareceram mais quente nos termogramas durante todo o dia, o que dificulta a avaliação dos descolamentos, principalmente na condição reversa;

- As estruturas por trás do revestimento não foram visíveis no começo da manhã o que facilita a avaliação dos descolamentos nas primeiras horas do dia;
- As estruturas por trás do revestimento apareceram como áreas frias nas inspeções termográficas durante o dia, o que facilita a avaliação dos descolamentos na condição direta;
- A visibilidade do defeito não dependeu somente do valor do Delta-T, os maiores valores nem sempre estiveram associados aos momentos de melhor visibilidade.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados das etapas do estudo experimental são apresentadas neste item as conclusões do trabalho.

Em relação ao comportamento térmico das principais patologias e anomalias encontradas nos termogramas se conclui que:

- Os descolamentos, as fissuras superficiais, os materiais inseridos e os elementos ocultos podem ser detectados com a termografia de infravermelho;
- Os descolamentos aparecem como áreas mais quentes nos termogramas na condição direta e mais frias na condição reversa;
- Os problemas relacionados com a baixa aderência entre a placa e a argamassa colante no revestimento cerâmico poderão ser detectados somente se a falha de contato gerar um vazio. No presente estudo a baixa aderência não foi detectada com a termografia;
- As fissuras superficiais aparecem como áreas mais frias nos termogramas na condição direta e mais quentes na condição reversa. As fissuras ocultas não foram visíveis nos termogramas;
- A forma em que aparecem os elementos inseridos depende de suas propriedades térmicas. Os materiais inseridos na superfície na condição direta dependem do calor específico e da condutividade térmica e na condição reversa dependem principalmente da condutividade térmica. Quando inseridos no interior da placa o comportamento depende basicamente da condutividade térmica;
- Os elementos ocultos por trás das placas foram detectados com a termografia de infravermelho na condição reversa e apareceram como áreas mais frias nos termogramas.

Em relação ao comportamento dos parâmetros termográficos (Delta-T e funções de contraste) no defeito que simula descolamento do revestimento cerâmico se conclui que:

- O comportamento dos valores dos parâmetros termográficos depende principalmente da intensidade e do sentido do fluxo de calor;
- O comportamento do Delta-T no ciclo direto, nas condições do experimento, pode ser dividido em cinco fases, três correspondentes ao aquecimento e dois correspondentes ao arrefecimento;
- No ciclo direto, os máximos valores do Delta-T, no aquecimento, são obtidos no início do aquecimento, quando existe um rápido crescimento da temperatura da superfície do revestimento junto ao crescimento do gradiente de calor que atravessa a placa. O Delta-T vai diminuindo ao longo do aquecimento podendo chegar a ficar constante no final do aquecimento;
- No ciclo direto, os máximos valores do Delta-T, no arrefecimento, são obtidos no início do arrefecimento quando existe uma queda brusca da temperatura da superfície do revestimento. O Delta-T vai diminuindo ao longo do arrefecimento podendo chegar a ficar próximo de zero no final do arrefecimento;
- O comportamento do Delta-T no ciclo reverso, nas condições do experimento, pode ser dividido em três fases, dois correspondentes ao aquecimento e uma correspondente ao arrefecimento;
- No ciclo reverso, os máximos valores do Delta-T, no aquecimento, são obtidos no final do aquecimento coincidindo com os máximos valores de temperatura da superfície do revestimento e do gradiente de calor que atravessa a placa. O Delta-T se manteve crescente ao longo do aquecimento;
- No ciclo reverso, no arrefecimento, os valores do Delta-T diminuem ao longo do arrefecimento podendo chegar a ficar próximos de zero no final do arrefecimento;
- O comportamento das funções de contraste (TRC e TC) está relacionado com a variação de temperatura da superfície (taxa de crescimento ou queda), a qual depende diretamente da forma de aquecimento utilizada no estudo;
- As duas funções de contraste (TRC e TC) tem a mesma evolução nas placas, coincidindo os picos e o formato das curvas tanto para o fluxo alto quanto para o fluxo baixo;

- Os picos das funções de contraste identificam os momentos onde os limites dos defeitos aparecem melhor definidos. Eles são obtidos no início das etapas de aquecimento e arrefecimento, no ciclo direto e reverso;
- A menor intensidade de fluxo de calor na condição reversa não garante o aparecimento dos picos das funções de contraste, pelo lento crescimento da temperatura da superfície revestida, fato observado no estudo em placas e parede no ciclo reverso com fluxo baixo;
- Associando o comportamento do Delta-T e as funções de contraste (TRC e TC), percebeu-se que seus máximos valores coincidem em tempo no ciclo direto, bem no início da etapa de aquecimento e arrefecimento. No ciclo reverso os valores máximos de ambas as funções não coincidem no tempo.

Em relação ao efeito das variáveis relacionadas às condições de exposição (fluxo de calor) e aos defeitos no comportamento dos parâmetros termográficos se conclui que:

- A intensidade e o sentido do fluxo de calor geram diferenças nos valores de Delta-T. Os máximos valores obtidos no experimento foram de $\pm 4,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ para o fluxo alto e baixo respectivamente. De acordo com a análise estatística, o efeito do fluxo de calor foi significativo em todas as placas para uma probabilidade maior de 95%;
- As quatro variáveis relativas ao defeito (espessura da cerâmica, geometria, tamanho e profundidade) têm influência significativa (>95%) nos resultados do Delta-T. Menor espessura da cerâmica e maior tamanho e profundidade do defeito geram maiores valores de Delta-T;
- As variáveis relativas ao defeito são independentes do fluxo, ou seja, a espessura da cerâmica, a geometria, o tamanho e a profundidade do defeito (descolamento) vão gerar diferenças no termograma independentemente da intensidade do fluxo de calor que esteja atravessando o defeito;
- Foi possível quantificar os valores do TRC e TC nos experimentos, mas não foi possível definir o efeito da intensidade e sentido do fluxo de calor nos valores das funções. A princípio, percebe-se que não existem grandes diferenças nos valores, destas funções, do fluxo alto em relação aos seus valores do fluxo baixo;

- As quatro variáveis relativas ao defeito (espessura da cerâmica, geometria, tamanho e profundidade) influenciam os valores das funções de contraste. A priori, a menor espessura da cerâmica e o maior tamanho e profundidade do defeito geram maiores valores de TRC e TC, principalmente nos momentos do pico da função.
- Em relação ao comportamento do Delta-T e às funções do contraste na parede, no ciclo direto, verificou-se que os mesmos não mudaram em relação ao estudo em placas, o que indica que a maior espessura da parede não influenciou os parâmetros termográficos (Delta-T e funções de contraste) na condição direta.
- No ciclo reverso a maior espessura da parede mudou parcialmente o comportamento do Delta-T e as funções de contraste. A maior espessura da parede atrasou o aparecimento dos máximos valores do Delta-T e não gerou picos nas funções de contraste com intensidade do fluxo alto.

Em relação aos momentos e as condições apropriadas para a realização das inspeções termográficas nas fachadas a partir de parâmetros relacionados a fluxo de calor se conclui que:

- Os parâmetros relativos ao fluxo de calor que devem ser utilizados no estudo de fachadas com descolamento cerâmico são: o GSpBc, o GArSp e VTSp, este último somente na condição direta;
- Deve-se procurar os intervalos positivos e negativos do GSpBc para definir o intervalo de tempo na realização do estudo, na condição direta e reversa, respectivamente;
- Devem ser observados os valores e a inclinação da curva do GArSp para identificar se o revestimento está ganhando o perdendo calor para o ambiente;
- Devem-se procurar os picos do VTSp na condição direta (máximos valores), já que os mesmos indicam os momentos em que os limites dos defeitos aparecem melhor definidos nos termogramas.
- A escolha do momento da avaliação dos descolamentos com a termografia baseado nos parâmetros relacionados ao fluxo de calor, fica limitada com a presença de anomalias como as estruturas por trás do revestimento e os reflexos. A presença de sombra sob o revestimento deve ser (a priori) evitada nos momentos de avaliação.

Em relação à validação dos padrões de comportamento em estudos de casos de fachadas se conclui que:

- É possível detectar os descolamentos no revestimento cerâmico, baseados nos padrões de comportamento observados no estudo em placas e parede;
- Como comprovado no estudo em placas e parede, os descolamentos apareceram como áreas mais quentes na condição direta e como áreas mais frias na condição reversa;
- Os máximos valores (módulo) de Delta-T obtidos no estudo em fachadas ficaram inferiores 5°C e foi possível confirmar a presença de descolamento com valores (módulo) maior ou igual a 3°C ;
- Os termogramas onde foi realizada a avaliação dos descolamentos sempre estiveram dentro do intervalo definido pela simulação térmica da fachada;
- Quando o crescimento ou queda da temperatura da superfície acontece rapidamente é possível detectar com clareza os limites dos defeitos, como no caso da fachada oeste;
- Quando a presença de anomalias como as estruturas por trás do revestimento e os reflexos, não coincidiram com a área do defeito, os máximos valores do Delta-T coincidem com os máximos valores de GSpBc obtidos na simulação;
- Os máximos valores de Delta-T foram obtidos próximos do início do aquecimento, sempre dentro do intervalo de incidência do sol.
- Os valores de Delta-T diminuem e os descolamentos ficam menos visíveis nas fachadas norte e leste no final do aquecimento (condição direta);
- Os momentos de inversão de fluxo, quando o GSpBc está próximo de zero, não é possível visualizar os descolamentos;
- A presença de falhas de rejuntas inviabiliza a avaliação dos descolamentos. Na condição direta não é possível definir com clareza os limites e na condição reversa apresentam comportamento oposto ao descolamento;
- Os descolamentos associados às falhas de rejunte devem ser avaliados com termografia de infravermelho a uma distância que não permita detectar a temperatura das juntas no revestimento separadamente.
- Quando a presença de anomalias (como estruturas por trás do revestimento) coincide com a área do defeito, as mesmas impedem a avaliação dos descolamentos

com termografia infravermelha, principalmente na condição reversa e no final dos períodos de aquecimento muito longos.

7.2 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

A seguir, algumas sugestões para novas pesquisas:

- Realizar o estudo em placas e paredes com revestimento cerâmico variando a intensidade do fluxo durante o aquecimento.
- Criar no laboratório, ambientes: externo e interno à placa com temperaturas diferentes para avaliar o comportamento dos parâmetros termográficos associados aos descolamentos sem a presença de uma fonte de calor;
- Simular períodos de sombra em estudos de laboratório para analisar o comportamento dos parâmetros termográficos nestas condições;
- Avaliar destacamentos associados a falhas de rejuntas em estudos de laboratório;
- Realizar simulações numéricas dos experimentos em placas e parede, e comparar com os resultados experimentais;
- Testar outras formas de análises (subtração de imagens) nos termogramas, para determinar suas potencialidades na eliminação de anomalias;
- Realizar novos estudos de fachadas com revestimento cerâmico para aumentar a base de dados e analisar estatisticamente os resultados dos parâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, F. W. A.; PINZ, F. P.; TORRES, A. S.; PALIGA, C. M. Potencial da Termografia Infravermelha na Detecção de Manifestações Patológicas Ocultas Ocasionadas pela Umidade Acidental em Paredes de Alvenarias Cerâmicas com Revestimento de Argamassa e Pintura. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 5, n. 1, p. 28–47, 2016.

ANTUNES, G. R. **Estudo de manifestações patológicas em revestimento de fachada em Brasília- sistematização da incidência de casos**. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, 2010.

ASDRUBALI, F.; BALDINELLI, G.; BIANCHI, F. A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. **Applied Energy**, v. 97, p. 365–373, set. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1** Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **ABNT NBR 15220-2** Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 1933-99**. Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared. West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 1999.

_____. **ASTM E1316** – 14. Standard Terminology for Nondestructive Examinations. West Conshohocken, PA, United States, 2014.

_____. **ASTM E1862-97**. Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers. West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2010.

BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 761–769, abr. 2011.

BAGAVATHIAPPAN, S.; LAHIRI, B. B.; SARAVANAN, T.; PHILIP, J.;

JAYAKUMAR, T. Infrared thermography for condition monitoring – A review. **Infrared Physics & Technology**, v. 60, p. 35–55, set. 2013.

BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; DELGADO, J. M. P. Q. Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 251–269, maio 2016.

BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; FREITAS, V. P. DE; SOARES, T. **Sensitivity analysis of quantitative infrared thermography** (V. P. de Freitas, Ed.)1st Internacional Symposium on Building pathology. **Anais...Porto**, Portugal: 2015.

BARREIRA, E.; BAUER, E.; MUSTELIER, N.; FREITAS, V. P. DE. **Measurement of materials emissivity – Influence of the procedure**13th International Workshop on Advanced Infrared Technology & Applications. **Anais...Pisa**, Italy: 2015a.

BAUER, E. Procedimento metodológico para identificação de anomalias empregando termografia. **Relatório interno. Laboratório de ensaios de Materiais da Unb.**, p. 1–10, 2016.

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

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; PAVON, E.; OLIVEIRA, A. H. S. **Criteria for application and identification of anomalies on the facades of buildings with the use of passive infrared thermography** (V. P. Freitas, Ed.)1st Internacional symposium on building pathology. **Anais...Porto**, Portugal: 2015

BAUER, E.; FREITAS, V. P. DE; MUSTELIER, N.; BARREIRA, E.; FREITAS, S. S. DE. Infrared thermography – evaluation of the results reproducibility. **Structural Survey**, v. 31, n. 3, p. 181–193, 2015a.

BAUER, E.; PAVÓN, E. Termografia de infravermelho na identificação e avaliação de manifestações patológicas em edifícios. **Concreto & Construções**, n. Jul-Set, p. 93–98, 2015.

BAUER, E.; PAVÓN, E.; BARREIRA, E.; CASTRO, E. K. DE. Analysis of building facade defects using infrared thermography: Laboratory studies. **Journal of Building**

Engineering, v. 6, p. 93–104, 2016.

BAUER, E.; PAVON, E.; HILDENBERG, A.; CASTRO, E. K. **Erros na utilização de parâmetros termográficos da argamassa e da cerâmica na detecção de anomalias em revestimentos** (SBTA, Ed.)XI Simpósio Brasileiro de tecnologia das Argamassas. **Anais...**Porto Alegre: SBTA, 2015b.

BAUER, E.; PAVÓN, E.; OLIVEIRA, A. H. S.; CASTRO, E. K. **Análisis de parámetros cuantitativos de termografía infrarroja para la evaluación de fachadas de revestimientos cerámicos** (V. Freitas, Ed.)5to Congreso de patología y rehabilitación de edificios. **Anais...**Porto, Portugal: 2015c.

BAUER, E.; PAVÓN, E.; OLIVEIRA, E.; PEREIRA, H. F. Facades inspection with infrared thermography: cracks evaluation. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 2, p. 1–7, 2016a.

BAUER, E.; PAVON, E.; PEREIRA, H. F.; NASCIMENTO, M. L. M. Criteria for Identification of Ceramic Detachments in Building Facades with Infrared Thermography. *In: Recent Developments in Building Diagnostic*. 5p. 51–68, 2016b.

BELISÁRIO, W. DOS S. J. **Desempenho, durabilidade, degradação e vida útil: aspectos técnicos no desenvolvimento do plano de manutenção de fachadas**. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, 2016.

BISEGNA, F.; AMBROSINI, D.; PAOLETTI, D.; SFARRA, S.; GUGLIERMETTI, F. A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient wall structures by passive infrared thermography – A case study. **Journal of Cultural Heritage**, v. 15, n. 2, p. 199–202, mar. 2014.

BRIQUE, S. K. **Emprego da termografia infravermelha no diagnóstico de falhas de aderência de peças cerâmicas utilizadas em fachadas de edifícios**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

CALDEIRA, M. M. **Aplicação da termografia infravermelha para identificação de danos na aderência entre concreto e polímero reforçado com fibras**. Tese de doutorado, PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

CALDEIRA, M. M.; PADARATZ, I. J. Potentialities of infrared thermography to assess

damage in bonding between concrete and GFRP Potencialidades da termografia infravermelha na avaliação de danos na aderência entre concreto e PRFV. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 3, p. 296–322, 2015.

CAM, J.-B. LE; ROBIN, E.; BALANDRAUD, X.; TOUSSAINT, E. A new experimental route in thermomechanics of inorganic glasses using infrared thermography. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 366, p. 64–69, abr. 2013.

CERDEIRA, F.; VÁZQUEZ, M. E.; COLLAZO, J.; GRANADA, E. Applicability of infrared thermography to the study of the behaviour of stone panels as building envelopes. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 8, p. 1845–1851, ago. 2011.

CHENG, C.-C.; CHENG, T.-M.; CHIANG, C.-H. Defect detection of concrete structures using both infrared thermography and elastic waves. **Automation in Construction**, v. 18, p. 87–92, dez. 2008.

CHOI, M.; KANG, K.; PARK, J.; KIM, W.; KIM, K. Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography. **NDT & E International**, v. 41, n. 2, p. 119–124, mar. 2008.

CHUDZIK, S.; SYSTEMS, C. Thermal diffusivity measurement of insulating material using infrared thermography. **OPTO-ELECTRONICS REVIEW**, v. 20, n. 1, p. 40–46, 2012.

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 de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

COTIČ, P.; KOLARIČ, D.; BOSILJKOV, V. B.; BOSILJKOV, V.; JAGLIČIĆ, Z. Determination of the applicability and limits of void and delamination detection in concrete structures using infrared thermography. **NDT & E International**, v. 74, p. 87–93, set. 2015.

CRESPO, J. DE LA P.; RODRIGUEZ, F. J. R. **Inspección termográfica de fachadas de edificios. Comentarios a la norma europea en 13187**. [s.l: s.n.].

DUFOUR, M. B.; DEROME, D.; ZMEUREANU, R. Analysis of thermograms for the

estimation of dimensions of cracks in building envelope. **Infrared Physics & Technology**, v. 52, n. 2–3, p. 70–78, mar. 2009.

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. DE. Passive Thermographic Inspection of Adhered Ceramic Claddings: Limitations and Conditioning Factors. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, n. December, p. 258, 2012.

_____. Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding. **Construction and Building Materials**, v. 51, n. 0, p. 187–197, 31 jan. 2014.

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. DE. Quasi-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis. **Building and Environment**, v. 94, p. 97–108, 2015.

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. DE. Building Thermography: Detection of Delamination of Adhered Ceramic Claddings Using the Passive Approach. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 34, 2015.

FERRARINI, G.; BISON, P.; BORTOLIN, A.; CADELANO, G. Thermal response measurement of building insulating materials by infrared thermography. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 559–564, 2016.

FOKAIDES, P. A.; KALOGIROU, S. A. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. **Applied Energy**, v. 88, n. 12, p. 4358–4365, dez. 2011.

FOX, M.; COLEY, D.; GOODHEW, S.; WILDE, P. DE. Time-lapse thermography for building defect detection. **Energy and Buildings**, v. 92, p. 95–106, 2015.

FREITAS, J. G. DE; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 57–73, 2014.

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

GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; LAGÜELA, S.; RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P.;

HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D. Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades. **Energy and Buildings**, v. 65, p. 29–36, out. 2013.

GRINZATO, E.; CADELANO, G.; BISON, P. Moisture map by IR thermography. **Journal of Modern Optics**, v. 57, n. 18, p. 1770–1778, 20 out. 2010.

GUERRERO MENA, C. N. Evaluación de la aplicabilidad de la técnica de la termografía infrarroja al reconocimiento del estado de elementos de hormigón. 2013.

HENRIQUE, E. **Sensibilidade à degradação das fachadas – estudo dos aspectos construtivos**. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, 2017.

HUDA, A. S. N.; TAIB, S. Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. **Applied Thermal Engineering**, v. 61, n. 2, p. 220–227, nov. 2013.

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

INCROPERA, F. **Fundamentos de Transferencia de Calor y Masa**. [s.l: s.n.].

ITC. **Termografia Nivel 1. Manual do curso**. Infrared T ed. Sao Paulo: [s.n.].

JADIN, M. S.; TAIB, S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. **Infrared Physics & Technology**, v. 55, n. 4, p. 236–245, jul. 2012.

JUNYAN, L.; QINGJU, T.; XUN, L.; YANG, W. Research on the quantitative analysis of subsurface defects for non-destructive testing by lock-in thermography. **NDT & E International**, v. 45, n. 1, p. 104–110, jan. 2012.

KOMINSKY, J. R.; LUCKINO, J. S.; STREET, N. H.; MARTIN, T. F. Passive Infrared Thermography — A Qualitative Method for Detecting Moisture Anomalies in Building Envelopes. **Tedford & Pond**, p. 1–11, 2007.

KORDATOS, E. Z.; EXARCHOS, D. A.; STAVRAKOS, C.; MOROPOULOU, A.; MATIKAS, T. E. Infrared thermographic inspection of murals and characterization of

degradation in historic monuments. **Construction and Building Materials**, v. 48, n. 0, p. 1261–1265, nov. 2013.

KYLILI, A.; FOKAIDES, P. A.; CHRISTOU, P.; KALOGIROU, S. A. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. **Applied Energy**, v. 134, p. 531–549, dez. 2014.

LAGÜELA, S.; DÍAZ-VILARIÑO, L.; ARMESTO, J.; ARIAS, P. Non-destructive approach for the generation and thermal characterization of an as-built BIM. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 55–61, jan. 2014.

LAHIRI, B. B.; BAGAVATHIAPPAN, S.; RESHMI, P. R.; PHILIP, J.; JAYAKUMAR, T.; RAJ, B. Quantification of defects in composites and rubber materials using active thermography. **Infrared Physics & Technology**, v. 55, n. 2–3, p. 191–199, mar. 2012.

LAI, W. L.; KOU, S. C.; POON, C. S.; TSANG, W. F.; LAI, C. C. Characterization of the deterioration of externally bonded CFRP-concrete composites using quantitative infrared thermography. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 9, p. 740–746, out. 2010.

LAI, W. L.; KOU, S. C.; POON, C. S.; TSANG, W. F.; LEE, K. K. A durability study of externally bonded FRP-concrete beams via full-field infrared thermography (IRT) and quasi-static shear test. **Construction and Building Materials**, v. 40, n. 0, p. 481–491, mar. 2013.

LAI, W. L.; LEE, K. K.; KOU, S. C.; POON, C. S.; TSANG, W. F. A study of full-field debond behaviour and durability of CFRP-concrete composite beams by pulsed infrared thermography (IRT). **NDT & E International**, v. 52, p. 112–121, nov. 2012.

LAI, W. W.-L.; LEE, K.-K.; POON, C.-S. Validation of size estimation of debonds in external wall's composite finishes via passive Infrared thermography and a gradient algorithm. **Construction and Building Materials**, v. 87, p. 113–124, jul. 2015.

LARSEN, S. F.; HONGN, M. Termografía infrarroja en la edificación: aplicaciones cualitativas. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 16, p. 25–32, 2012.

LERMA, J. L.; CABRELLES, M.; PORTALÉS, C. Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2190–2197, maio 2011.

LIETO VOLLARO, R. DE; GUATTARI, C.; EVANGELISTI, L.; BATTISTA, G.; CARNIELO, E.; GORI, P. Building energy performance analysis: A case study. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 87–94, jan. 2015.

LOURENÇO, T.; MATIAS, L.; FARIA, P. Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography. **Construction and Building Materials**, v. 148, n. September, p. 419–428, 2017.

MADRUGA, F. J.; IBARRA-CASTANEDO, C.; CONDE, O. M.; LÓPEZ-HIGUERA, J. M.; MALDAGUE, X. Infrared thermography processing based on higher-order statistics. **NDT & E International**, v. 43, n. 8, p. 661–666, nov. 2010.

MALDAGUE, X. **Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation**. Quebec, Canada. 2001.

MALDAGUE, X. **Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing**. Wiley ed. NY, USA. 2001.

MANOHAR, A.; SCALEA, F. L. DI. Modeling 3D heat flow interaction with defects in composite materials for infrared thermography. **NDT & E International**, abr. 2014.

MARIO, M. **Uso da termografia como ferramenta não destrutiva para avaliação de manifestações patológicas ocultas**. Trabalho de Diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

MARTÍN OCAÑA, S.; CAÑAS GUERRERO, I.; GONZÁLEZ REQUENA, I. Thermographic survey of two rural buildings in Spain. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 6, p. 515–523, jun. 2004.

MARTÍNEZ, E.; CASTILLO, A.; MARTÍNEZ, I.; CASTELLOTE, M. Metodología para la intervención en elementos históricos: el caso de la espadaña del convento de Nuestra Señora de la Consolación (Alcalá de Henares-Madrid-España). **Informes de la Construcción**, v. 65, n. 531, p. 359–366, 4 set. 2013.

MARTÍNEZ, I.; CASTILLO, A.; MARTÍNEZ, E.; CASTELLOTE, M. Physico-chemical material characterization of historic unreinforced masonry buildings: The first step for a suitable intervention. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 352–360, mar. 2013.

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

MILOVANOVIC, B.; PECUR, I. B. **The Role of Infrared Thermography in Nondestructive testing of Civil Engineering Structures**. Croacia: [s.n.].

MONTEIRO, J. R. V. **Influências da envoltória vertical opaca de edificações nas temperaturas internas do ar**. Universidade Federal de Paraíba, 2013.

MORESCO, J.; VERONEZ, M. R.; BORDIN, F.; KULAKOWSKI, M. P. **Termografia Infravermelha na detecção de manifestações patológicas em fachadas com revestimento argamassado** 11º Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas. **Anais...**São Leopoldo: 2015

NASCIMENTO, M. **Aplicação da simulação higrótérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios**. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, 2016.

NOWAK, H.; KUCYPERA, M. **Application of Active Thermography for Detecting Material Defects in the Building Envelope** Inframtion Proceedings. **Anais...**2010

NUNES TAVARES, R. **Estudo da termografia por infravermelho: aplicações na engenharia e determinação de parâmetros termofísicos e geométricos de materiais**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2007

PAOLETTI, D.; AMBROSINI, D.; SFARRA, S.; BISEGNA, F. Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation. **Journal of Cultural Heritage**, v. 14, n. 2, p. 116–121, mar. 2013.

PEDRA, S. A. **Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao design do conforto térmico de alvenaria estrutural**. Dissertação de mestrado. Universidade de Minas Gerais, 2011.

RAJIC, N. Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures. **Composite Structures**, v. 58, n. 4, p. 521–528, 2002.

REBELO, D. **Avaliação quantitativa dos resultados da termografia de infravermelho**

- aplicada ao estudo da humidade.** Dissertação de mestrado. Universidade do Porto, 2017.
- ROCHA, J.; SILVA, M.; PÓVOAS, Y.; MONTEIRO, E. Análise da Profundidade de Fissuras em Concreto com Termografia Infravermelha. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 3, p. 58–65, 2017.
- ROSINA, E.; LUDWIG, N. **Optimal thermographic procedures for moisture analysis in buildings materials** Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications. **Anais...Munich, Alemanha: SPIE, 1999** Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=907226>>
- SANTOS, L. M. A. A. **Análise in-situ do comportamento mecânico de argamassas de revestimento de fachadas.** [s.l.] Universidad Tecnica de Lisboa, 2012.
- SANTOS, M. **Catálogo de patologias de revestimento de fachadas de edifícios do Distrito Federal.** Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, 2017.
- SAYGILI, A.; BAYKAL, G. A new method for improving the thermal insulation properties of fly ash. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 11, p. 3236–3242, nov. 2011.
- SFARRA, S.; IBARRA-CASTANEDO, C.; THEODORAKEAS, P.; AVDELIDIS, N. P.; PERILLI, S.; ZHANG, H.; NARDI, I.; KOUJ, M.; MALDAGUE, X. P. V. Evaluation of the state of conservation of mosaics: Simulations and thermographic signal processing. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 117, p. 287–315, 2017.
- SHAM, F. C.; CHEN, N.; LONG, L. Surface crack detection by flash thermography on concrete surface. **Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, v. 50, n. 5, p. 240–243, 2008.
- SHI, Y.; CHEN, H.; XU, Q.; LI, D.; WANG, Z.; FANG, X. Application of Infrared Thermography in Building Energy Efficiency Institute of Technology. **Building Commissioning for Energy Efficiency and Comfort**, v. VI, p. 5–9, 2006.
- SILVA, D. D. S. **Diagnóstico de patologias em fachadas utilizando termografia.** Mestrado. Engenharia Civil. Universidade do Porto, 2012.
- SILVA, M. N. B. **Avaliação Quantitativa da Degradação e Vida útil de Revestimentos de Fachada - Aplicação ao Caso de Brasília.** Tese de Doutorado em Estruturas e

Construção Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SOARES, A.; FLORES-COLEN, I.; GOMES, M. DA G.; BRITO, J. DE. **A influência do teor de humidade na condutibilidade térmica** I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento. **Anais...**Coimbra: 2014

SOLLA, M.; LAGÜELA, S.; RIVEIRO, B.; LORENZO, H. Non-destructive testing for the analysis of moisture in the masonry arch bridge of Lubians (Spain). **Structural Control and Health Monitoring**, v. 20, n. 11, p. 1366–1376, 2013.

SOUSA, L.F. **Aplicação de Termografia no Estudo do Isolamento Térmico de Edifícios**. Universidade de Aveiro, 2010.

SOUZA, G. T. DE. **Utilização de imagens em infravermelho para análise térmica de componentes construtivos**: PIBIC/CNPq. Santa Catarina: [s.n.]. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_ic/IC_gabriela.pdf>.

SOUZA, J. S. DE. **Evolução da degradação de fachadas - efeito dos agentes de degradação e dos elementos constituintes**. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, 2016.

TAVARES, S.; CUNHA, A.; ANDRADE, R. **Metodologia experimental para a aplicação da termografia em ensaios térmicos não destrutivos** 10th Brazilian Congress of thermal Sciences and Engineering. **Anais...**Rio de Janeiro, Brazil: ENTIC, 2004

TAVARES, S. G. *et al.* Utilização da termografia infravermelha na determinação de propriedades térmicas de materiais produzidos a partir de fibra de bananeira. **e-xacta**, v. 4, n. 3, p. 67–80, 2011.

TAVUKÇUOĞLU, A.; DÜZGÜNEŞ, A.; CANER-SALTIK, E. N.; DEMIRCI, Ş. Use of IR thermography for the assessment of surface-water drainage problems in a historical building, Ağzıkarahan (Aksaray), Turkey. **NDT & E International**, v. 38, n. 5, p. 402–410, jul. 2005.

TAYLOR, T.; COUNSELL, J.; GILL, S. Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography. **Energy and Buildings**, v. 66, n. 0, p. 222–231, nov. 2013.

TITMAN, D. J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. **NDT & E International**, v. 34, n. 2, p. 149–154, mar. 2001.

TODOROVIĆ, M. S.; EĆIM-ĐURIĆ, O.; NIKOLIĆ, S.; RISTIĆ, S.; POLIĆ-RADOVANOVIĆ, S. Historic building's holistic and sustainable deep energy refurbishment via BPS, energy efficiency and renewable energy—A case study. **Energy and Buildings**, nov. 2014.

USAMENTIAGA, R.; VENEGAS, P.; GUEREDIAGA, J.; VEGA, L.; MOLLEDA, J.; BULNES, F. G. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 14, n. 7, p. 12305–48, 10 jan. 2014.

VALIORGUE, F.; BROSSE, A.; NAISSON, P.; RECH, J.; HAMDI, H.; BERGHEAU, J. M. Emissivity calibration for temperatures measurement using thermography in the context of machining. **Applied Thermal Engineering**, v. 58, n. 1–2, p. 321–326, set. 2013.

VAVILOV, V. **Noise-limited thermal/infrared nondestructive testing** NDT & E International. **Anais...**jan. 2014Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869513001187>>. Acesso em: 9 maio. 2014

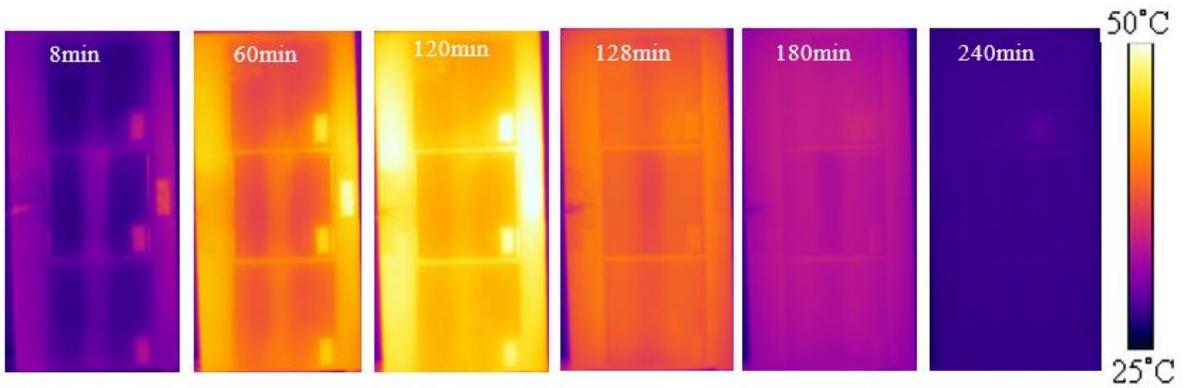
VICINI, L. **Análise Multivariada Da Teoria À Prática**. Monografia. Especialização. Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

WERITZ, F.; ARNDT, R.; RÖLLIG, M.; MAIERHOFER, C.; WIGGENHAUSER, H. Investigation of concrete structures with pulse phase thermography. **Materials and Structures**, v. 38, n. 283, p. 843–849, 9 mar. 2005.

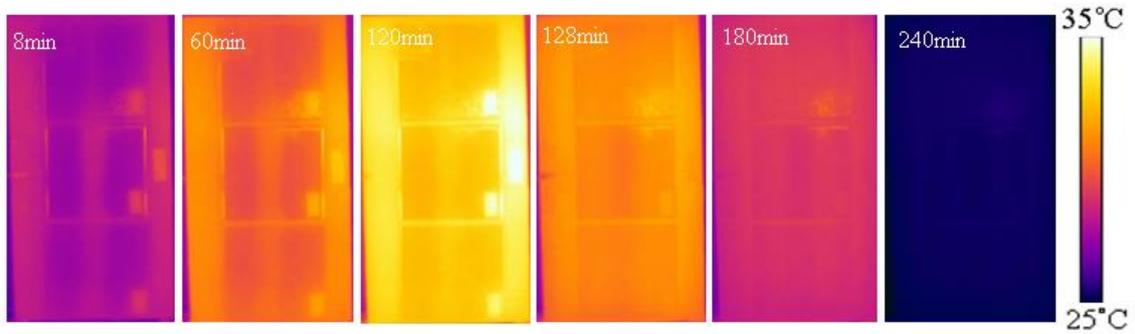
APÊNDICE A- TERMOGRAMAS DAS PLACAS

Apêndice A1- Termogramas Placa 10

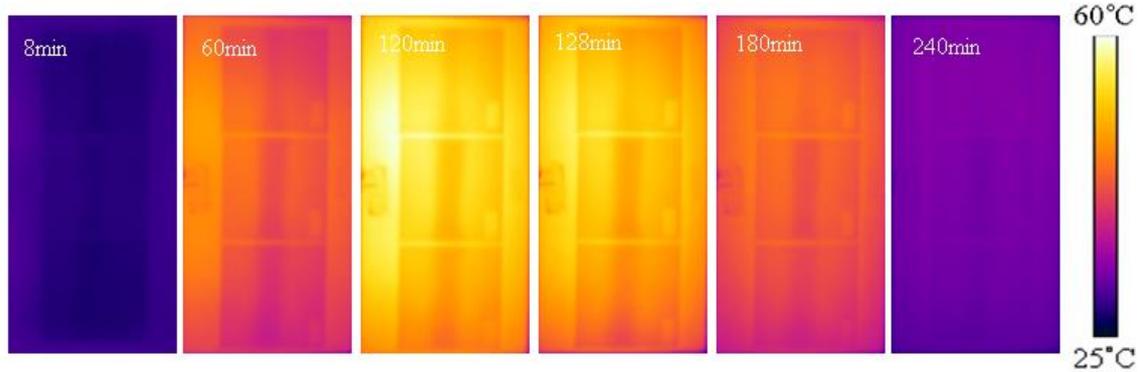
Ciclo Direto- Fluxo Alto.



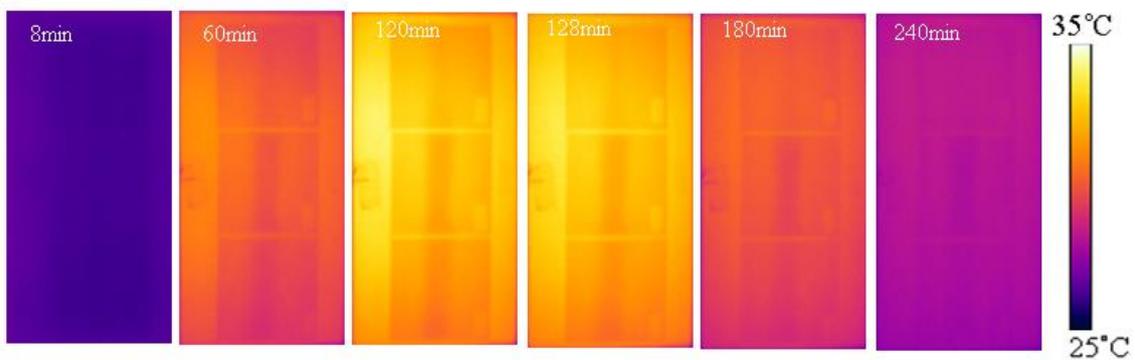
Ciclo Direto- Fluxo Baixo



Ciclo Reverso- Fluxo Alto

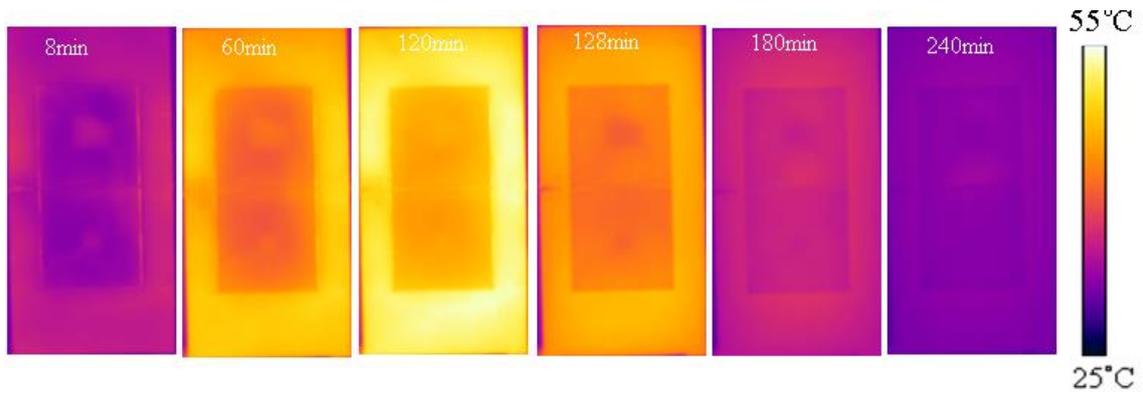


Ciclo Reverso- Fluxo Baixo

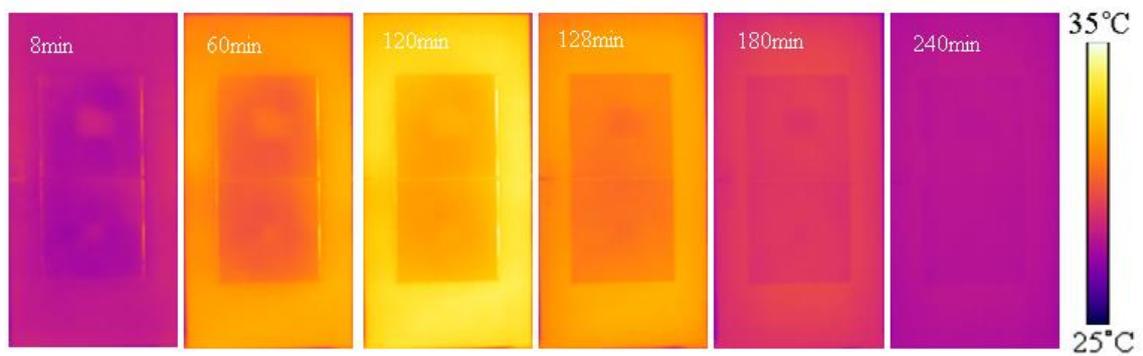


Apêndice A2-Termogramas Placa 11

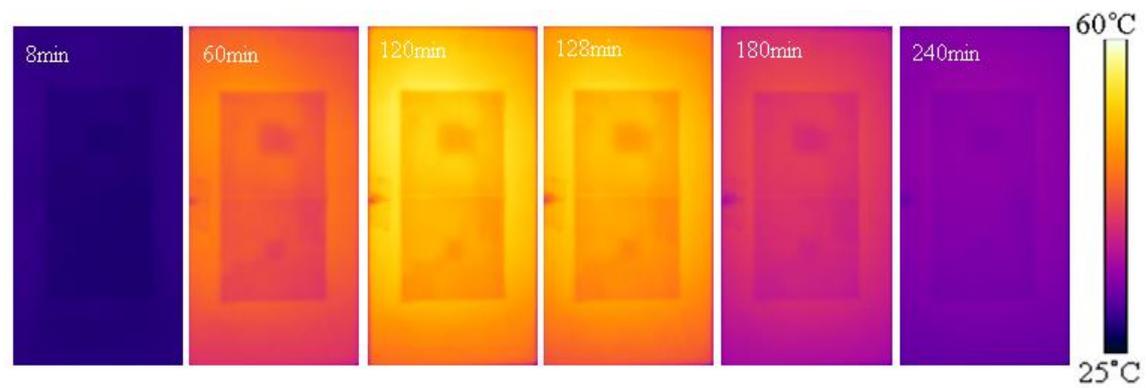
Ciclo direto fluxo alto



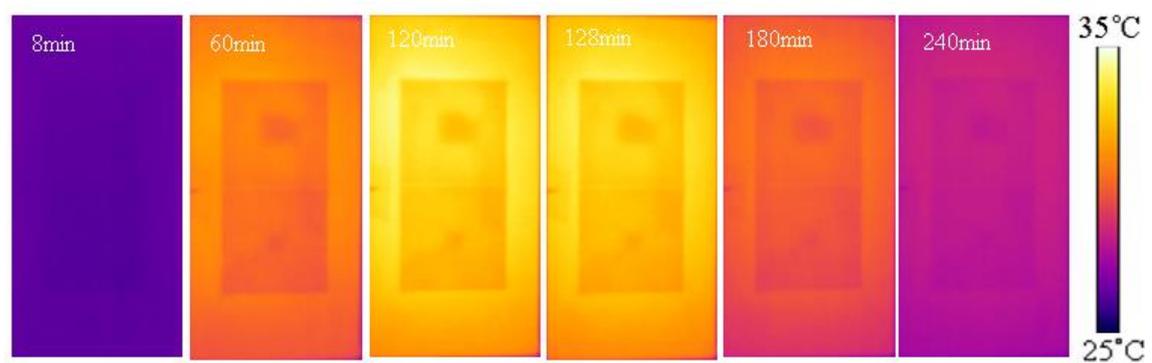
Ciclo direto fluxo baixo



Ciclo Reverso- Fluxo Alto

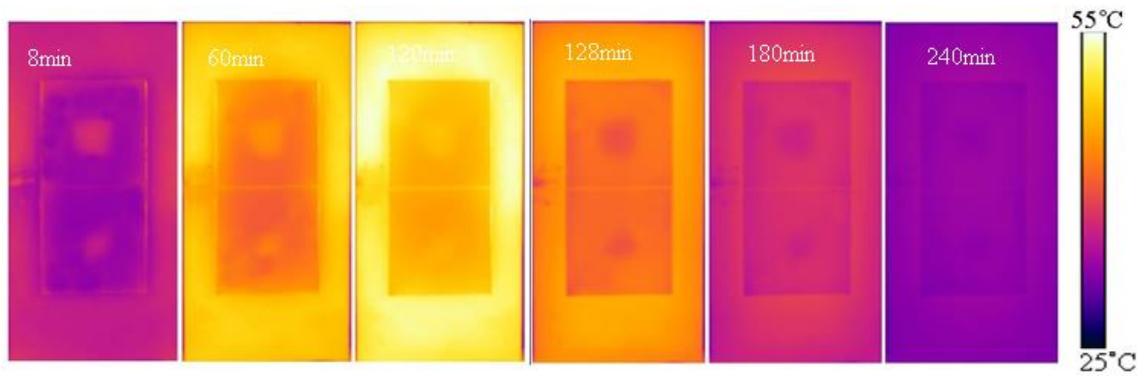


Ciclo Reverso - Fluxo Baixo.

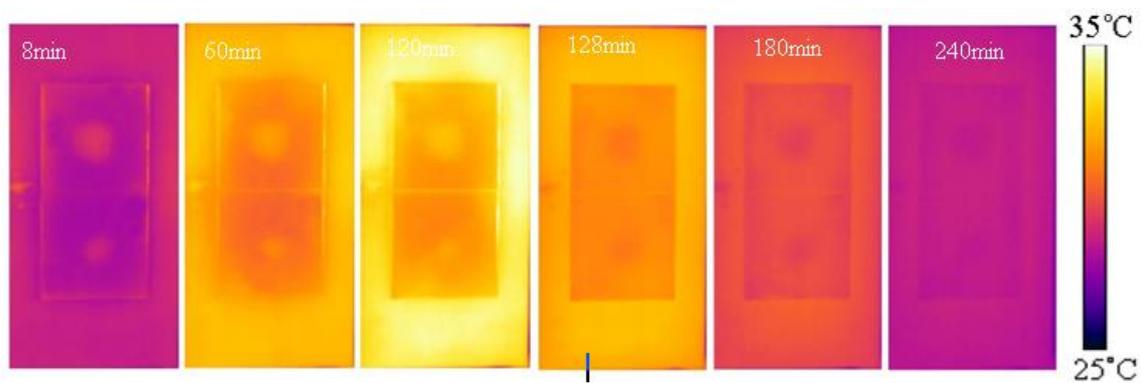


Apêndice A3-Termogramas Placa 12

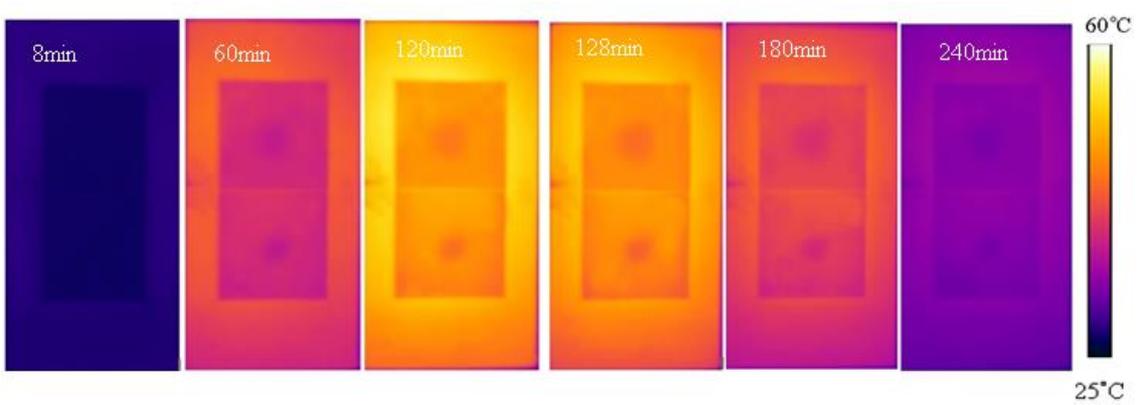
Ciclo Direto- Fluxo Alto



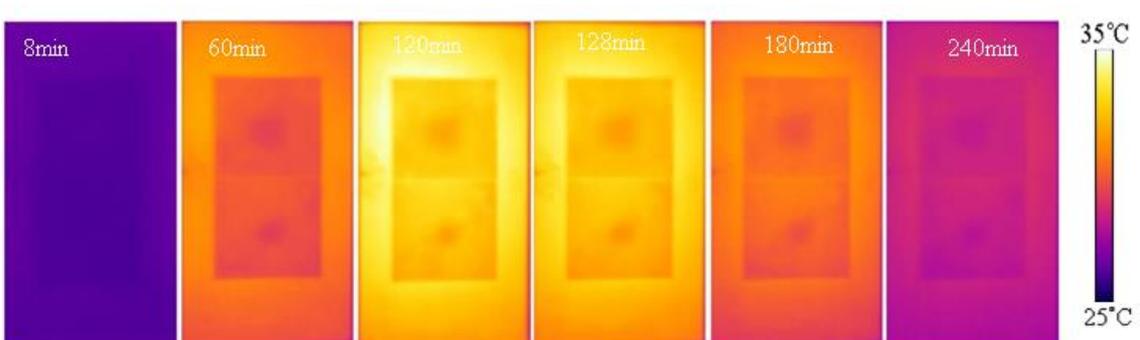
Ciclo Direto- Fluxo baixo



Ciclo Reverso – Fluxo Alto

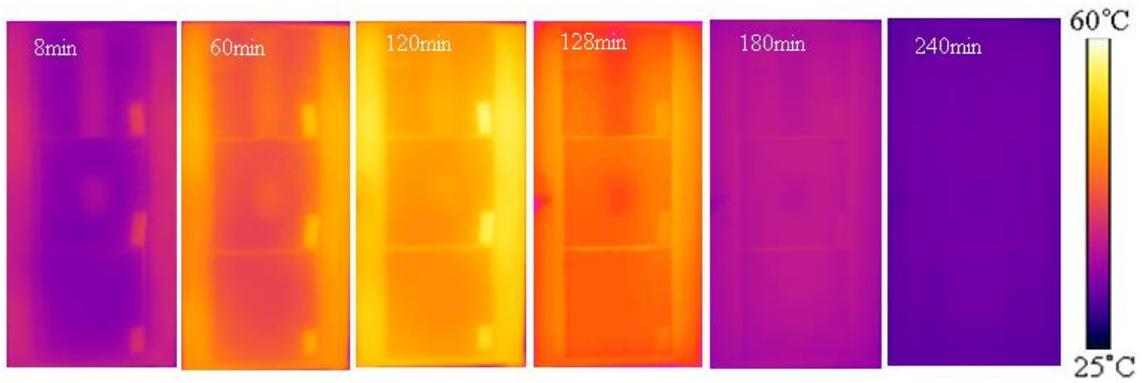


Ciclo Reverso - Fluxo Baixo

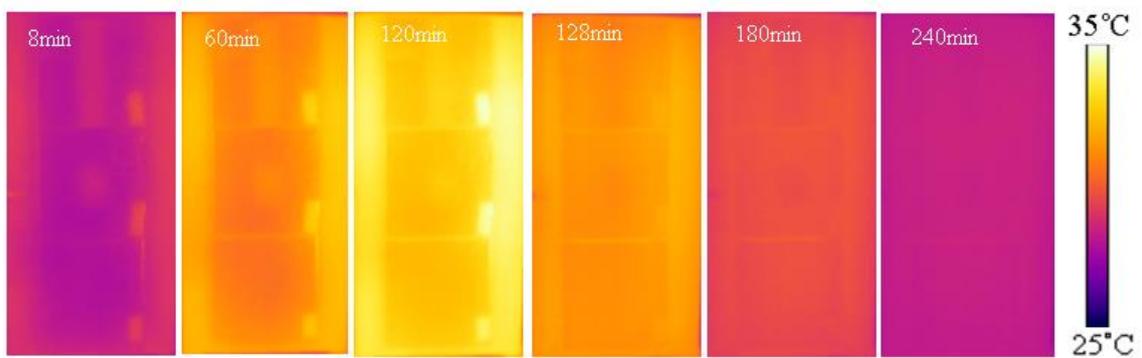


Apêndice A4-Termogramas Placa 13

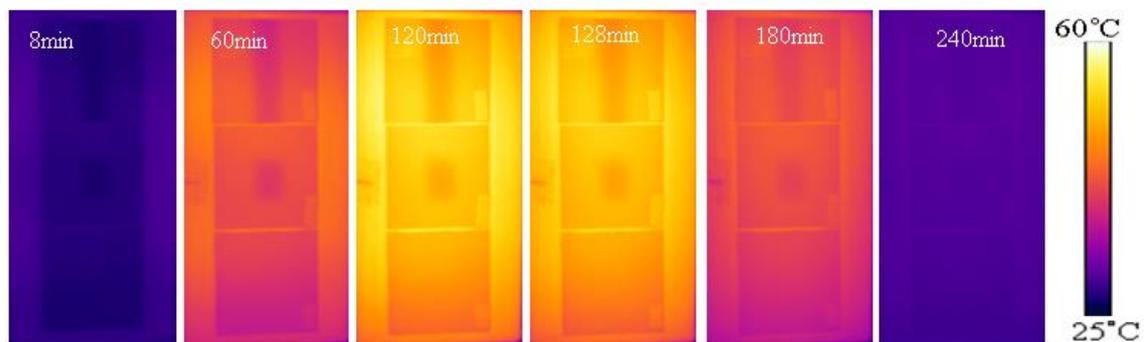
Ciclo direto- Fluxo alto



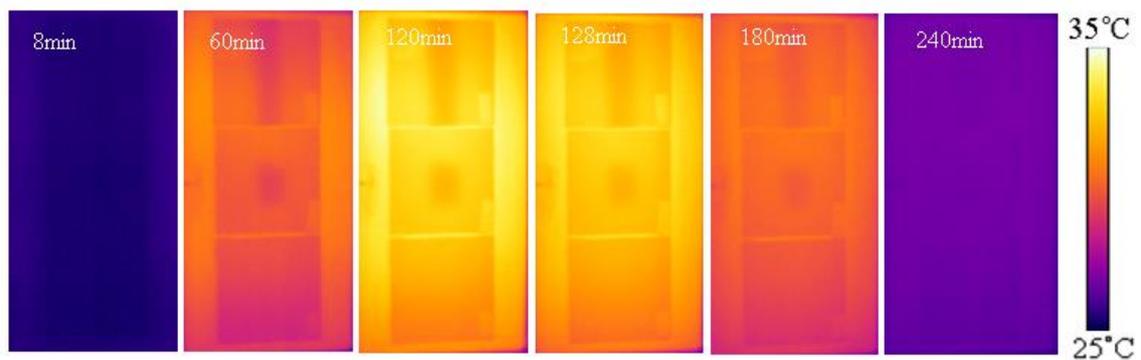
Ciclo direto- Fluxo baixo



Ciclo reverso- Fluxo alto



Ciclo reverso- Fluxo baixo



APÊNDICE B – DADOS DA PAREDE UTILIZADOS NA ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela 30 - Dados para análise estatística da parede, ciclo direto.

	Gar	GSp	GBc	GArSp	GSpBc	VTSp	ΔT- CB	TRC- CB	TC- CB
	0,44	0,62	0,04	-0,34	0,48	0,00	0,11	0,00	1,00
	8,12	3,64	0,08	4,88	3,93	3,41	2,70	0,76	1,94
	9,40	4,76	0,38	5,40	5,03	1,28	3,74	0,77	1,97
	9,83	5,36	0,84	5,62	5,32	0,72	3,87	0,70	1,86
	10,99	6,04	1,35	6,50	5,62	0,86	3,83	0,60	1,72
	8,10	6,35	1,88	2,77	5,39	0,42	3,71	0,55	1,65
	7,95	6,97	2,36	2,00	5,52	0,77	3,50	0,47	1,53
	8,52	7,40	2,83	2,12	5,48	0,58	3,39	0,42	1,47
	8,17	7,61	3,29	1,49	5,23	0,36	3,25	0,39	1,43
	8,64	8,02	3,72	1,46	5,18	0,55	3,16	0,36	1,39
	9,58	8,52	4,17	1,81	5,20	0,62	3,12	0,33	1,35
	9,41	8,71	4,56	1,48	4,97	0,35	3,11	0,32	1,34
	8,60	8,99	4,89	0,25	4,88	0,43	2,96	0,29	1,31
	8,57	9,23	5,24	-0,09	4,76	0,40	2,90	0,28	1,29
	8,97	9,60	5,53	-0,21	4,80	0,51	2,86	0,26	1,27
	9,25	9,66	5,85	0,14	4,52	0,20	2,70	0,24	1,25
	8,78	9,99	6,19	-0,80	4,47	0,44	2,57	0,22	1,23
	8,86	10,16	6,46	-1,06	4,31	0,30	2,46	0,21	1,21
	8,82	10,47	6,73	-1,40	4,33	0,43	2,41	0,20	1,20
	10,42	10,54	6,93	0,19	4,19	0,22	2,36	0,19	1,19
	8,64	10,66	7,12	-1,98	4,06	0,26	2,32	0,18	1,18
	8,96	10,86	7,30	-1,95	4,06	0,39	2,23	0,17	1,17
	9,16	10,92	7,47	-1,89	3,93	0,21	2,08	0,16	1,15
	8,75	10,99	7,63	-2,39	3,85	0,24	2,08	0,15	1,15
	9,14	11,11	7,76	-2,36	3,79	0,25	1,96	0,14	1,14
	10,04	11,31	7,93	-1,65	3,82	0,35	1,94	0,14	1,13
	12,54	11,30	8,04	0,84	3,70	0,16	1,97	0,14	1,13
	8,63	11,37	8,14	-3,50	3,61	0,20	1,77	0,12	1,12
	8,29	11,39	8,22	-3,98	3,48	0,18	1,72	0,12	1,11
	8,71	11,47	8,31	-3,85	3,46	0,22	1,73	0,12	1,11
	9,28	11,54	8,38	-3,42	3,40	0,21	1,62	0,11	1,10
	11,17	11,60	8,47	-1,49	3,35	0,21	1,64	0,11	1,10
	11,56	11,67	8,56	-1,06	3,33	0,22	1,65	0,11	1,10
	10,33	11,53	8,61	-2,35	3,16	0,04	1,55	0,10	1,09
	11,52	11,73	8,65	-1,60	3,27	0,36	1,53	0,10	1,09
	9,06	11,82	8,71	-4,27	3,25	0,20	1,46	0,09	1,09
	10,76	11,88	8,76	-2,75	3,22	0,19	1,52	0,09	1,09
	10,79	12,00	8,82	-2,92	3,27	0,29	1,54	0,09	1,09
	9,37	12,03	8,85	-4,76	3,21	0,16	1,48	0,09	1,08
	10,21	12,00	8,90	-3,79	3,10	0,10	1,49	0,09	1,08

Aquecimento

	10,43	12,14	8,97	-3,82	3,19	0,27	1,42	0,08	1,08
	10,95	11,99	9,01	-3,07	2,98	-0,01	1,39	0,08	1,08
	11,40	12,04	9,10	-2,61	2,97	0,15	1,38	0,08	1,07
	11,87	12,09	9,12	-2,42	2,99	0,18	1,26	0,07	1,07
	11,67	12,11	9,14	-2,65	2,96	0,13	1,25	0,07	1,07
	10,02	12,04	9,17	-4,41	2,79	0,06	1,23	0,07	1,06
	5,35	9,63	9,21	-7,01	-0,03	-2,63	-1,01	0,69	2,09
	1,84	8,76	9,01	-10,19	-1,16	-1,09	-2,10	0,82	2,21
	1,50	7,85	8,63	-9,98	-1,86	-0,93	-2,34	0,67	1,93
	1,42	7,23	8,19	-9,83	-2,16	-0,68	-2,37	0,58	1,75
	1,08	6,67	7,74	-9,65	-2,31	-0,58	-2,40	0,51	1,66
	1,27	6,19	7,27	-9,07	-2,36	-0,53	-2,33	0,45	1,56
	0,93	5,99	6,80	-9,20	-2,09	-0,19	-2,25	0,42	1,51
	0,82	5,56	6,36	-9,00	-2,07	-0,44	-2,21	0,39	1,46
	0,80	5,09	5,96	-8,63	-2,14	-0,49	-2,18	0,35	1,41
	0,65	4,82	5,55	-8,54	-2,03	-0,33	-2,12	0,32	1,38
	0,91	4,56	5,19	-8,11	-1,94	-0,31	-2,00	0,29	1,34
	0,85	4,14	4,87	-7,79	-2,01	-0,45	-1,96	0,27	1,31
	0,83	3,93	4,54	-7,57	-1,89	-0,25	-1,91	0,26	1,29
	0,74	3,64	4,25	-7,40	-1,87	-0,35	-1,83	0,23	1,26
	0,78	3,57	3,99	-7,34	-1,65	-0,12	-1,77	0,22	1,25
	0,82	3,30	3,71	-6,94	-1,67	-0,34	-1,74	0,21	1,23
	0,70	3,17	3,48	-6,82	-1,53	-0,18	-1,68	0,20	1,22
	0,55	2,93	3,24	-6,64	-1,51	-0,28	-1,63	0,19	1,21
	0,30	2,72	3,04	-6,61	-1,50	-0,27	-1,59	0,18	1,19
	0,53	2,53	2,84	-6,18	-1,49	-0,27	-1,55	0,17	1,18
	0,36	2,45	2,66	-6,23	-1,37	-0,15	-1,52	0,16	1,18
	0,78	2,45	2,50	-5,99	-1,21	-0,09	-1,44	0,15	1,17
	0,74	2,36	2,34	-5,75	-1,14	-0,18	-1,40	0,15	1,16
	0,48	2,17	2,21	-5,75	-1,17	-0,27	-1,36	0,14	1,15
	0,45	2,07	2,07	-5,71	-1,13	-0,20	-1,37	0,14	1,15
	0,59	1,99	1,96	-5,40	-1,07	-0,16	-1,27	0,12	1,13
	0,46	1,78	1,83	-5,13	-1,13	-0,28	-1,25	0,12	1,13
	0,44	1,71	1,74	-4,97	-1,09	-0,16	-1,18	0,11	1,12
	0,49	1,69	1,63	-4,72	-0,96	-0,07	-1,11	0,10	1,11
	0,50	1,51	1,53	-4,62	-1,03	-0,26	-1,11	0,10	1,11

Fonte: Próprio autor.

Tabela 31 - Dados para análise estatística da parede, ciclo reverso.

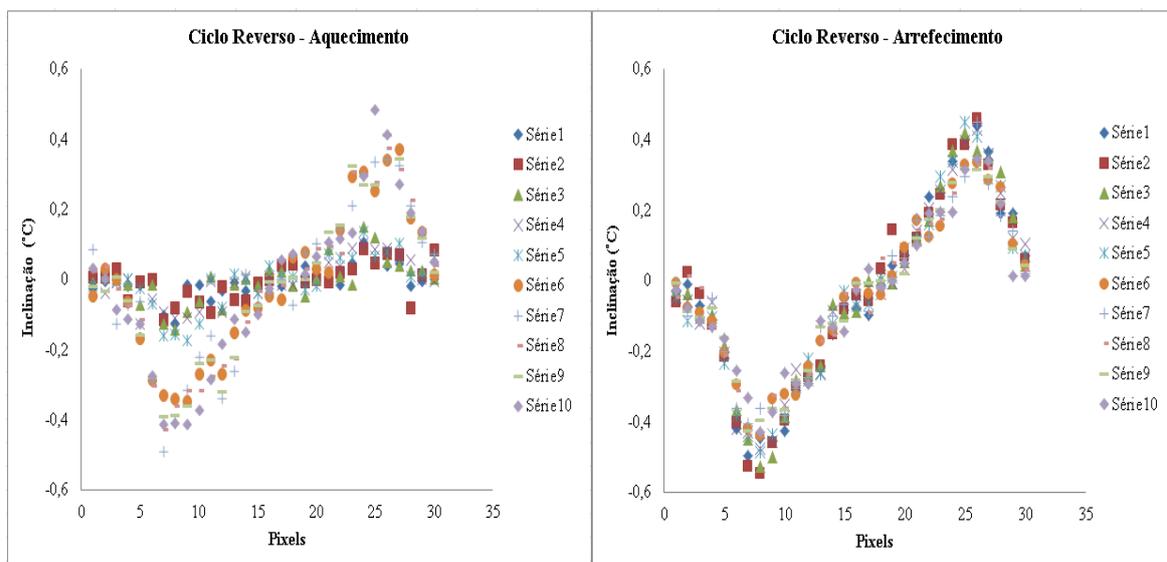
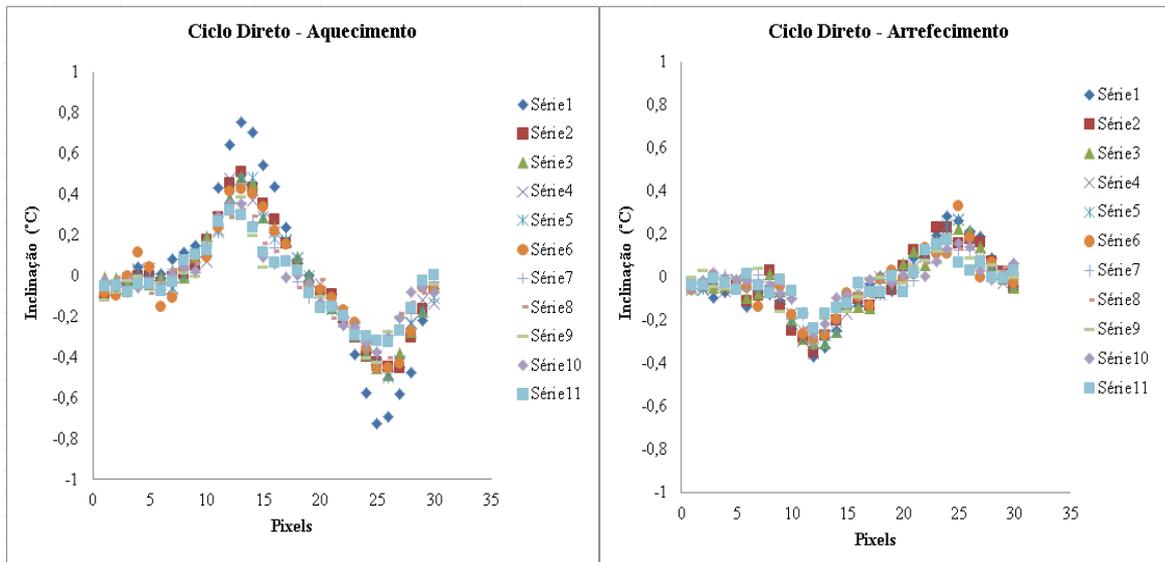
	Gar	GSp	GBc	GArSp	GSpBc	VTSp	ΔT- CB	TRC-CB	TC-CB
	0,33	1,03	-0,37	-0,25	1,29	0	0,16		
	-27,11	-15,86	-1,88	-0,18	1,26	-0,01	0,16		
	-32,62	-25,29	-7,62	-0,22	1,33	0,08	0,15		
	-33,58	-31,09	-13,56	-0,17	1,32	0	0,14		
	-34,02	-36,12	-19,02	0,03	1,33	0,03	0,15		
	-33,81	-40,34	-23,94	0,05	1,4	0,12	0,15		
	-34,63	-44,4	-28,34	0,38	1,05	-0,27	0,17		
	-34,72	-47,58	-32,22	0,16	1,22	0,31	0,19		
	-34,86	-50,61	-35,69	0,28	0,96	-0,09	0,2		
	-35,15	-53,45	-38,71	0,26	0,81	0,09	0,16		
	-35,16	-56,1	-41,4	0,14	0,71	0,18	0,12		
	-35,69	-58,82	-43,73	0,21	0,37	-0,01	0,08		
	-35,64	-61,12	-45,73	-0,07	0,31	0,33	0,04		
	-36,28	-62,9	-47,41	-0,74	0,27	0,39	0,03	0,02	0,90
	-36,12	-64,35	-48,82	-0,71	-0,13	0,07	-0,09	-0,05	0,86
	-35,72	-65,07	-50,05	-0,81	-0,21	0,41	-0,15	-0,08	0,85
	-36,14	-66,23	-51,08	-0,99	-0,44	0,3	-0,23	-0,10	0,83
	-36,05	-66,2	-52,02	-1,19	-0,72	0,29	-0,32	-0,11	0,84
	-36,18	-66,49	-52,84	-1,71	-0,71	0,6	-0,4	-0,12	0,84
	-36,33	-67,05	-53,52	-2,13	-0,81	0,51	-0,43	-0,11	0,85
	-36,18	-67,35	-54,08	-2,49	-1,01	0,42	-0,58	-0,14	0,83
	-36,15	-67,87	-54,5	-2,77	-1,29	0,35	-0,67	-0,14	0,83
	-36,01	-68,13	-54,89	-3,26	-1,36	0,57	-0,75	-0,14	0,84
	-36,02	-67,78	-55,17	-3,87	-1,3	0,71	-0,86	-0,15	0,83
	-35,93	-68,13	-55,36	-4,18	-1,57	0,38	-0,94	-0,14	0,84
	-35,53	-67,99	-55,5	-4,81	-1,51	0,7	-1,04	-0,15	0,84
	-36,15	-68,6	-55,64	-5,21	-1,67	0,48	-1,16	-0,15	0,83
	-36,39	-68,74	-55,78	-5,95	-1,69	0,62	-1,22	-0,15	0,84
	-37,11	-68,89	-55,92	-7,13	-1,74	0,57	-1,37	-0,16	0,83
	-37,46	-68,89	-56,01	-7,84	-1,77	0,59	-1,53	-0,17	0,83
	-37,12	-68,26	-56,07	-8,25	-1,82	0,54	-1,65	-0,17	0,82
	-37,14	-68,66	-56,1	-8,46	-2,02	0,38	-1,76	-0,18	0,82
	-37,41	-68,93	-56,15	-8,75	-2,3	0,3	-1,83	-0,18	0,82
	-37,83	-68,93	-56,2	-9,38	-2,4	0,46	-1,96	-0,18	0,81
	-37,38	-68,91	-56,2	-9,69	-2,53	0,42	-2,06	-0,18	0,81
	-37,7	-68,68	-56,18	-10,29	-2,54	0,54	-2,1	-0,18	0,82
	-37,81	-68,56	-56,17	-10,71	-2,39	0,68	-2,22	-0,18	0,82
	-37,73	-68,5	-56,16	-11,01	-2,59	0,31	-2,29	-0,18	0,82
	-34,4	-62,5	-56,04	-11,46	-2,54	0,54	-2,37	-0,18	0,82
	-37,76	-67,61	-55,79	-11,85	-2,71	0,32	-2,49	-0,19	0,81
	-38	-68,43	-56,12	-12,3	-2,75	0,43	-2,62	-0,19	0,81

Aquecimento

	-38,11	-68,79	-56,45	-12,64	-2,74	0,46	-2,61	-0,18	0,82
	-38,32	-66,83	-56,71	-13	-2,76	0,42	-2,68	-0,18	0,82
	-38,16	-60,92	-56,58	-13,34	-2,89	0,31	-2,78	-0,18	0,82
	-37,18	-66,09	-56,39	-13,77	-2,73	0,56	-2,87	-0,19	0,81
	-38,27	-68,58	-56,31	-14,21	-2,82	0,31	-2,94	-0,19	0,81
	-13,78	-49,7	-55,14	-14,41	-2,87	0,33	-3,06	-0,19	0,81
	-8,06	-40,38	-50,61	-14,5	-2,95	0,26	-3,08	-0,19	0,81
	-7,03	-34,88	-45,68	-15,05	-2,9	0,4	-3,26	-0,20	0,81
	-6,4	-32,52	-41,28	-15,05	-2,9	0,28	-3,32	-0,20	0,81
	-6,11	-29,02	-37,31	-15,57	-2,93	0,23	-3,42	-0,20	0,80
	-5,63	-25,92	-33,72	-15,88	-2,82	0,3	-3,47	-0,20	0,80
	-5,08	-23,26	-30,43	-15,94	-2,72	0,23	-3,4	-0,20	0,81
	-4,59	-20,67	-27,49	-16,2	-2,47	0,32	-3,46	-0,20	0,81
	-4,3	-18,51	-24,84	-16,29	-2,42	0,08	-3,57	-0,20	0,80
	-3,91	-16,38	-22,43	-16,48	-2,19	0,2	-3,6	-0,20	0,80
	-3,42	-14,29	-20,27	-16,44	-1,96	0,14	-3,67	-0,21	0,80
	-3,46	-13,78	-18,32	-15,58	-2,96	-1,11	-3,67	-0,21	0,80
	-3,05	-11,25	-16,57	-16,53	-1,73	1,07	-3,48	-0,20	0,81
	-2,84	-9,7	-14,98	-16,64	-1,47	0,06	-3,45	-0,20	0,81
	-2,63	-8,43	-13,56	-16,4	-1,43	-0,19	-3,58	-0,21	0,80
	-2,4	-7,22	-12,26	-16,44	-1,22	-0,04	-3,58	-0,21	0,79
	-2,18	-6,65	-11,1	-15,87	-1,41	-0,46	-3,54	-0,21	0,80
	-1,73	-5,44	-10,05	-15,64	-1,11	0,02	-3,55	-0,22	0,79
	-1,02	-4,96	-9,09	-15,48	-1,17	-0,36	-3,54	-0,22	0,79
	-0,63	-3,99	-8,25	-15,46	-0,84	0	-3,42	-0,21	0,80
	-0,69	-3,36	-7,49	-15,18	-0,78	-0,26	-3,47	-0,22	0,79
	-0,45	-2,85	-6,8	-14,84	-0,76	-0,3	-3,32	-0,21	0,80
	-0,27	-2,21	-6,18	-14,9	-0,6	-0,17	-3,27	-0,21	0,79
	-0,07	-1,68	-5,6	-14,71	-0,61	-0,35	-3,17	-0,21	0,80
	-0,25	-1,13	-5,1	-14,5	-0,44	-0,2	-3,14	-0,21	0,79
	-0,3	-0,85	-4,62	-14,27	-0,47	-0,38	-3,05	-0,21	0,80
	-0,28	-0,56	-4,19	-13,98	-0,41	-0,29	-3,01	-0,21	0,79
	0	-0,42	-3,8	-13,48	-0,49	-0,44	-2,98	-0,21	0,79
	0,29	0,11	-3,45	-13,43	-0,16	-0,03	-2,92	-0,21	0,79
	-0,14	0,3	-3,13	-13,1	-0,21	-0,39	-2,86	-0,21	0,79

Fonte: Próprio autor.

APÊNDICES C – VALORES DA INCLINAÇÃO DAS LINHAS DE TEMPERATURAS USADAS NO CÁLCULO DA ÁREA DO DEFEITO NA PAREDE



APÊNDICES D – DADOS CLIMÁTICOS NAS INSPEÇÕES DE FACHADAS

Tabela 32 - Dados climáticos no dia da inspeção da fachada 1 (F1).

Hora	Temperatura	Umidade	Característica do clima
8	19,8	69	Céu aberto
9	20,1	62	Céu aberto
10	21,4	61	Céu aberto
11	22,8	55	Céu aberto
12	24,3	45	Céu aberto
13	24,5	45	Céu aberto
14	24,0	47	Céu aberto
15	24,8	39	Céu aberto
16	24,4	42	Céu aberto
17	23,9	45	Céu aberto
18	23,6	49	Céu aberto

Fonte: Próprio autor.

Tabela 33 - Dados climáticos no dia da inspeção da fachada 2 (F2).

Hora	Temperatura	Umidade	Característica do clima
8	23,1	62	Céu aberto
9	23,3	62	Céu aberto
10	25,9	46	Céu aberto
11	27,1	40	Céu aberto
12	27,6	41	Céu aberto
13	28,8	38	Céu aberto
14	27,8	41	Céu aberto
15	27,2	40	Céu aberto
16	26,9	40	Céu aberto
17	26,0	45	Céu aberto
18	23,4	57	Céu aberto

Fonte: Próprio autor.

Tabela 34 - Dados climáticos no dia da inspeção da fachada 3 (F3).

Hora	Temperatura	Umidade	Característica do clima
11	23,2	46	Céu aberto
12	26,0	40	Céu aberto
13	28,8	36	Algumas nuvens
14	29,8	36	Céu aberto
15	27,8	40	Céu aberto
16	25,4	42	Céu aberto
17	24,8	44	Céu aberto
18	24,5	56	Céu aberto

Fonte: Próprio autor.

Tabela 35 - Dados climáticos no dia da inspeção da fachada 4 (F4) e 5 (F5)

Hora	Temperatura	Umidade	Característica do clima
8	20,9	58	Céu aberto
9	21,3	57	Céu aberto
10	21,5	54	Céu aberto
11	23,0	45	Céu aberto
12	26,6	40	Céu aberto
13	28,6	34	Céu aberto
14	29,8	36	Céu aberto
15	30,9	42	Céu aberto
16	25,4	42	Céu aberto
17	24,9	44	Céu aberto
18	24,3	58	Céu aberto

Fonte: Próprio autor.

ANEXO A – DADOS DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO NO WUFI (NASCIMENTO, 2016)

Figura 111 - Definição do elemento construtivo

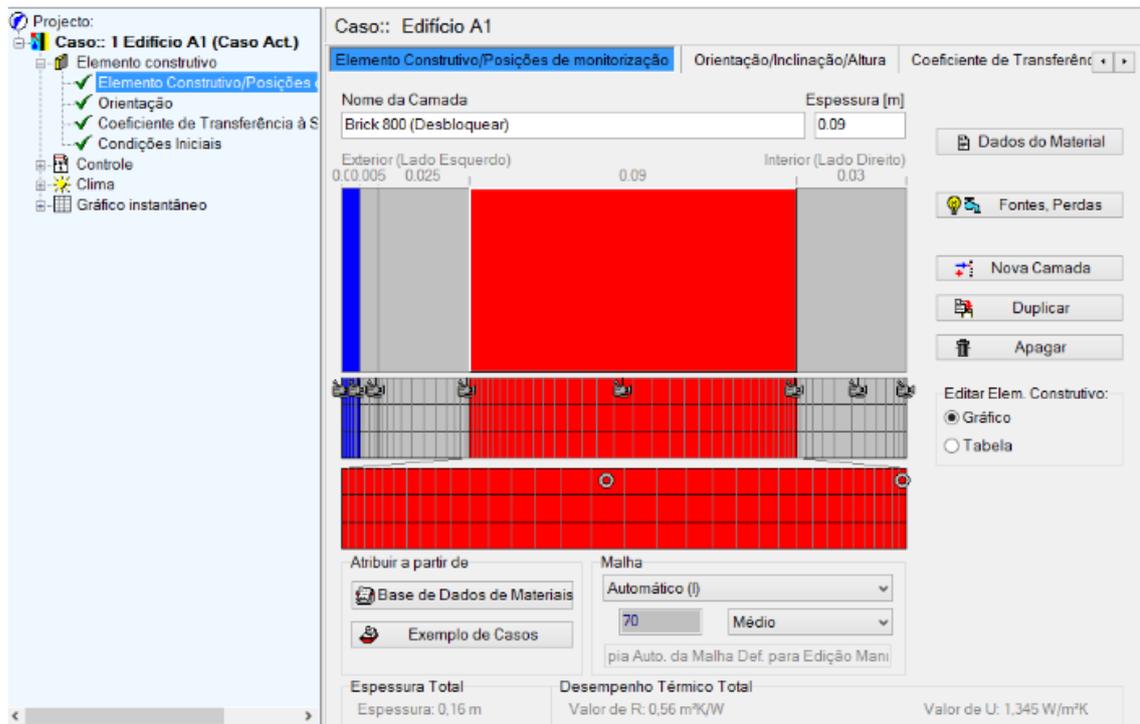


Figura 112 - Definição da orientação, inclinação, altura e chuva.

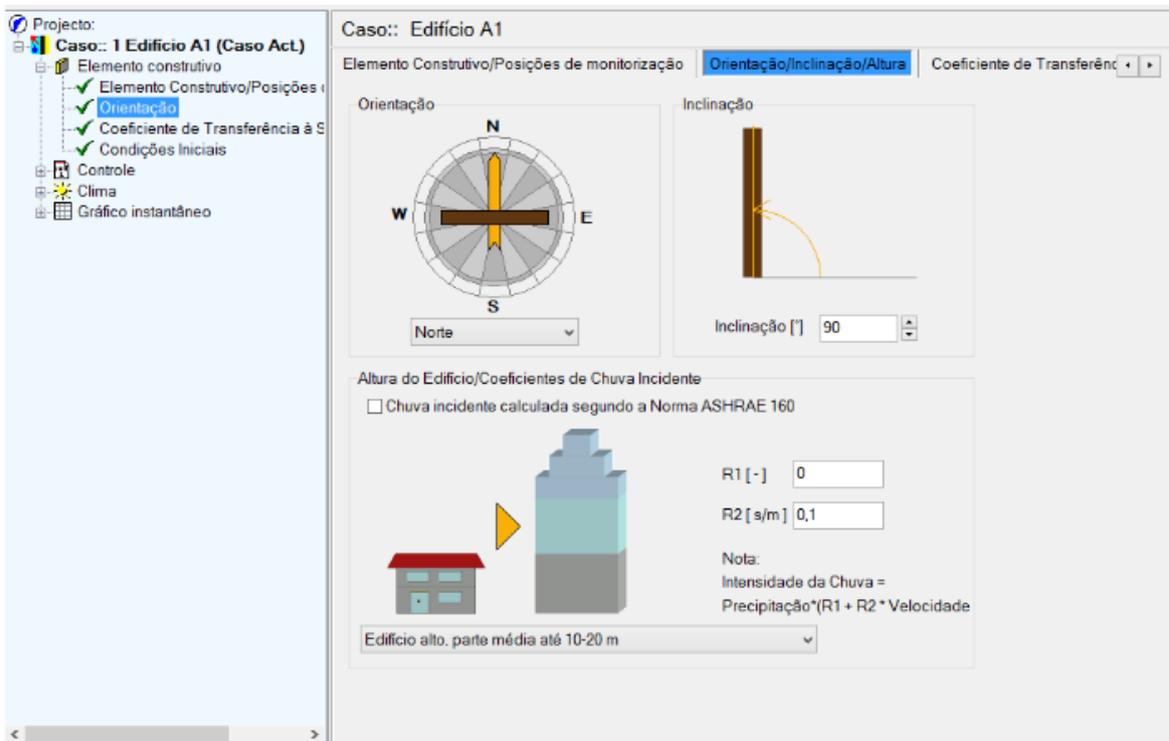


Figura 113 - Definição dos coeficientes de transferência à superfície.

The screenshot shows the 'Coeficiente de Transferência à Superfície' (Surface Transfer Coefficient) settings for 'Caso: Edifício A1'. The interface is divided into two main sections: 'Superfície Exterior (Lado Esquerdo)' and 'Superfície Interior (Lado Direito)'. Each section contains fields for thermal resistance, long-wave radiation, wind dependence, and surface roughness. The exterior section also includes settings for absorption, emissivity, radiative balance, and ground reflectivity. The interior section is simpler, focusing on thermal resistance and surface roughness. A sidebar on the left shows the project structure with 'Coeficiente de Transferência à Superfície' selected.

Superfície Exterior (Lado Esquerdo)

- Resistência Térmica [m²K/W]: 0,0588 (Parede exterior)
- Inclui Parte da Radiação de Onda Longa [W/m²K]: 6,5
- dependente do vento:
- Valor de sd [m]: ---- (Sem revestimento)
- Absorção (Radiação de Onda Curta) [-]: [] (Definido pelo utilizador)
- Emissividade (Radiação Onda Longa) [-]: ----
- Balanco Radiativo Explícito: (Nota: Esta opção considera o arrefecimento radiativo devido à emissão de onda longa. Casos específicos podem precisar de dados de radiação de onda longa mais precisos, no ficheiro climático.)
- Reflectividade do solo (Onda Curta) [-]: 0,2 (Valor padrão)
- Factor de redução da chuva incidente [-]: 0,7 (Dependente da inclinação do elemento construt)

Superfície Interior (Lado Direito)

- Resistência Térmica [m²K/W]: 0,125 (Parede exterior)
- Valor de sd [m]: ---- (Sem revestimento)

Figura 114 - Definição das condições iniciais para simulação.

The screenshot shows the 'Condições Iniciais' (Initial Conditions) settings for 'Caso: Edifício A1'. The interface is divided into two main sections: 'Humidade inicial no elemento construtivo' and 'Temperatura inicial'. Both sections have radio buttons for 'Constante através do elemento construtivo' and 'Ler do Ficheiro'. Below these are input fields for initial relative humidity (0,8) and initial temperature (20). A table titled 'Teor de Humidade Inicial nas diferentes Camadas' (Initial Humidity Content in different Layers) lists five layers with their material names, thicknesses, and humidity content.

Humidade inicial no elemento construtivo

- Constante através do elemento construtivo
- Em cada Camada
- Ler do Ficheiro

Temperatura inicial

- Constante através do elemento construtivo
- Ler do Ficheiro

Humidade Relativa inicial [-]: 0,8 Temperatura inicial [°C]: 20

Teor de Humidade Inicial nas diferentes Camadas

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

Figura 115 - Definição do período de simulação.

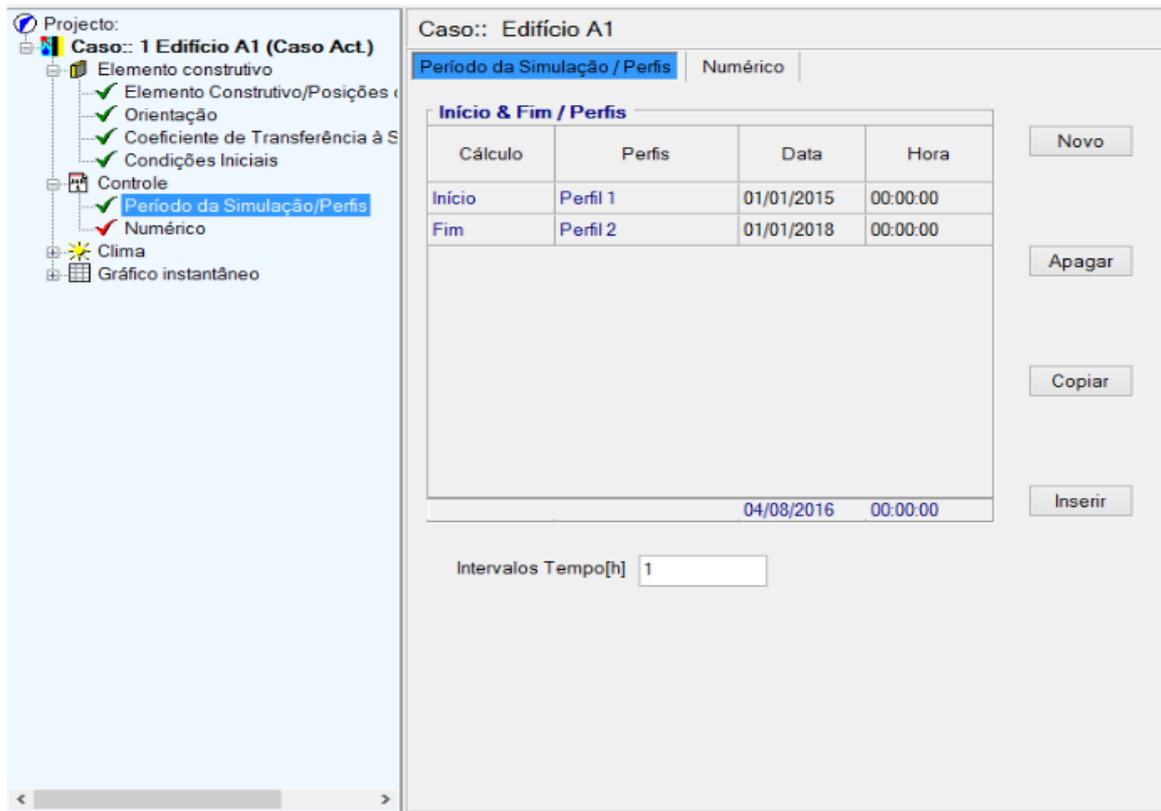


Figura 116 - Definição das condições de cálculo.

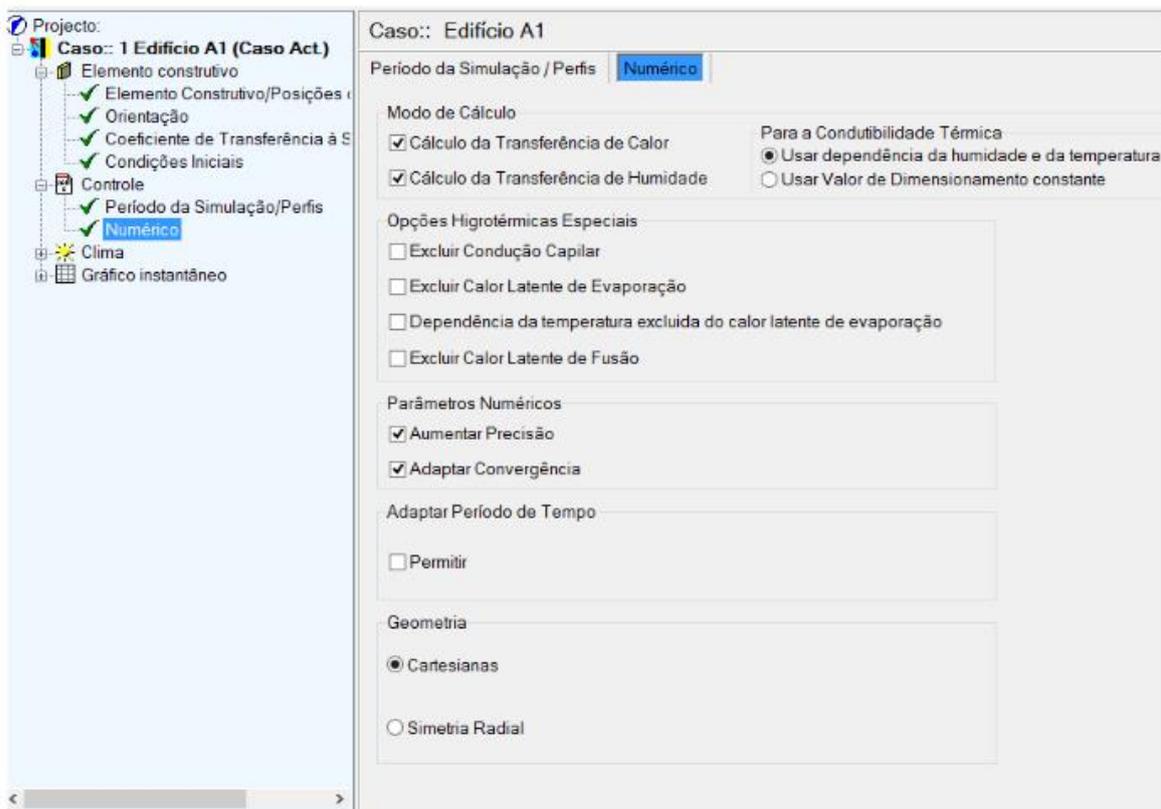


Figura 117 - Definição do clima exterior.

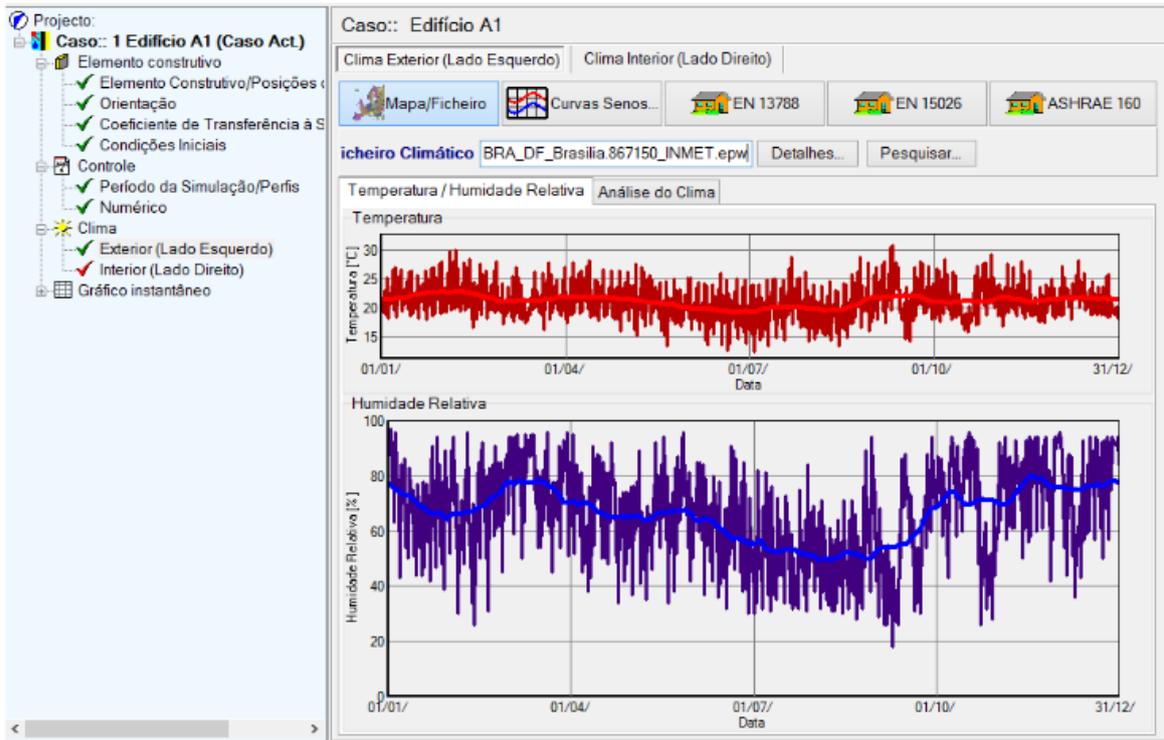


Figura 118 - Definição do clima interior.

