

**CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO GRAU DE  
DANO DE FISSURAS EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS COM  
APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO**

**PATRÍCIA MOTA MILHOMEM**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO 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 PARA IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO GRAU DE  
DANO DE FISSURAS EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS COM  
APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO**

**PATRÍCIA MOTA MILHOMEM**

**ORIENTADOR: ELTON BAUER**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.DM – 008A/19  
BRASÍLIA/DF: ABRIL- 2019**

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

**CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO GRAU DE  
DANO DE FISSURAS EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS COM  
APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO**

**ENG.<sup>a</sup> PATRÍCIA MOTA MILHOMEM**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

---

**Prof. Elton Bauer, DSc. (PECC-UnB)**  
(Orientador)

---

**Prof. Elier Pavón de La Fé, DSc. (UFOB)**  
(Examinador Externo)

---

**Prof. Cláudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira (PECC-UnB)**  
(Examinador Interno)

**BRASÍLIA/DF, 05 DE ABRIL DE 2019.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

MILHOMEM, PATRÍCIA MOTA

Critérios para identificação e avaliação do grau de dano de fissuras em fachadas de edifícios com aplicação da termografia de infravermelho. [Distrito Federal] 2019.

xvii, 115p, 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2019).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| 1. Durabilidade           | 2. Vida útil       |
| 3. Degradação de fachadas | 4. Desempenho      |
| I. ENC/FT/UnB             | II. Título (série) |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MILHOMEM, M. P. (2019). Critérios para identificação e avaliação do grau de dano de fissuras em fachadas de edifícios com aplicação da termografia de infravermelho. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação 08A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 115p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Patrícia Mota Milhomem

TÍTULO: Critérios para identificação e avaliação do grau de dano de fissuras em fachadas de edifícios com aplicação da termografia de infravermelho.

GRAU: Mestre ANO: 2019

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

---

Patrícia Mota Milhomem

Avenida Pio XII, nº 2450, centro.

CEP: 68543 – 000 Floresta do Araguaia/PA, Brasil.

E-mail: patriciamotamilhomem@gmail.com

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Oseas Milhomem e  
Maria Lindalva, pelo apoio incondicional.*

***“Tudo posso naquele que me fortalece.”***  
(Filipenses 4.13)

## AGRADECIMENTOS

Por tantas bênçãos que recebi e recebo na minha vida, obrigada Senhor!

Aos meus pais, Oseas Milhomem e Maria Lindalva, pelo amor incondicional e por quase tudo o que sou.

As minhas irmãs Áurea, Beatriz e Mislâiny pela união e palavras de incentivo.

Ao meu amigo Ronan Cruz pelo companheirismo e por tantos momentos de alegria compartilhados nesse período do mestrado.

A minha amiga e psicóloga Zuleide Feitosa por todos os conselhos, carinho e atenção que muito me ajudou a seguir firme no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu orientador prof. Dr. Elton Bauer, pela confiança, paciência e dedicação conferida a esta pesquisa.

Aos membros participantes da minha banca de defesa, prof. Dr. Elier Pavón e Cláudio Henrique, pela honrosa presença e contribuições.

À todos os professores do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília em especial, ao professor Dr. Luciano Bezerra, pelas contribuições conceituais a esta dissertação.

Agradeço imensamente as minhas amigas Carla Bozzi e Jéssica Souza e aos meus amigos Orestes Tumbarell, Patrick Silva e Everaldo Silva, por terem dedicado um tempo para me ajudar na conclusão desta dissertação, sem palavras para agradecer-los vocês foram muito importantes.

Aos colegas do PECC que se tornaram amigos. Carla Mabel, Yuri Sotero, Fábio, Lissa Gomes, Laís, Luiza, Hiago, Augusto, Roberto obrigada pelo compartilhamento do conhecimento, solidariedade nas conversas e aos bons momentos regados com um café.

Obrigada aos técnicos do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM-UnB) Patrícia e Ivan pela ajuda na confecção das placas.

Ao secretário do PECC Ricardo, as tias da copa pelo café da tarde, ao vigia José Barros que sempre compartilhava do seu lanche, obrigada por toda atenção.

Agradeço também à Universidade de Brasília (UnB) e todo a sua estrutura, instituição que sempre admirei. Obrigada pela oportunidade!

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, na forma de bolsa de mestrado.

À todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram com a realização desta dissertação. Meu eterno muito obrigada à todos!

## **RESUMO**

### **CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO GRAU DE DANO DE FISSURAS EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS COM APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO**

**Autora: Patrícia Mota Milhomem**

**Orientador: Elton Bauer**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, Abril de 2019**

A fissuração é uma das principais patologias que acomete os revestimentos em argamassa e, por este motivo, sua investigação é imprescindível não só para a análise da vida útil da edificação, como também, para a definição de estratégias de manutenção e reabilitação. Para tanto, é necessário mapeá-la e definir sua gravidade por meio de inspeção. A termografia infravermelha é uma das técnicas que vem se difundindo com essa finalidade, por seu caráter não destrutivo, remoto e em tempo real. No entanto, ainda existem dúvidas quanto ao momento ideal para se realizar as inspeções e a forma correta de interpretar os termogramas. Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo definir critérios e padrões de comportamento para identificação de fissuras e mensuração de seu grau de dano em revestimentos, por meio da aplicação da termografia de infravermelho. Neste sentido, aplicou-se a termografia ativa para uma avaliação qualitativa preliminar dos termogramas, e quantitativa, para avaliar o grau de dano de fissuras em protótipos que simularam revestimento em argamassa fissurado. A pesquisa foi dividida no estudo de dois tipos de fissuras, as lineares e ramificadas. Para cada tipologia, foram desenvolvidos seis corpos de provas, com fissuras de diferentes aberturas e profundidades. A influência da abertura e da profundidade foram avaliadas por parâmetros termográficos, principalmente, o Delta-T. Os principais resultados encontrados foram aqueles provenientes da determinação do comportamento térmico das fissuras, que possibilitaram delimitar o período para a melhor visualização desta patologia nos termogramas, correspondentes ao início do aquecimento e arrefecimento, nos quais foram encontrados os maiores valores de contrastes. A metodologia aplicada para a medição do grau de dano, mostrou-se promissora, firmando-se como uma importante contribuição para a evolução da termografia de infravermelho na inspeção de edifícios, uma vez que foi possível classificar, com segurança, as fissuras em relação a sua gravidade, por meio da sua abertura e profundidade.

**Palavras chaves:** Termografia ativa, fissuras em fachada, degradação; contraste termográfico.



## **ABSTRACT**

### **CRITERIA FOR IDENTIFICATION AND EVALUATION OF THE DEGREE OF DAMAGE OF FISSURES IN FACADES OF BUILDINGS WITH APPLICATION OF INFRARED THERMOGRAPHY**

**Author: Patrícia Mota Milhomem**

**Supervisor: Elton Bauer**

**Postgraduate in Structural and Civil Construction**

**Brasília, April of 2019**

Crack is of the main pathologies that affect mortar rendering systems and, for this reason, its investigation is essential not only for the analysis of the time life of the building, but also for the definition of maintenance and rehabilitation strategies. For this purpose, it is necessary to map and define its severity by inspection. Infrared thermography is one of the techniques that has been diffuse for this purpose, due to its non-destructive, remote and real-time character. However, there are doubts about the ideal time to perform the inspections and the correct way to interpret the thermograms. In this context, the present work aims to define criteria and behavior patterns to identify cracks and measure their damage degree in coatings, through the application of infrared thermography. In this regard, the active thermography was applied for a preliminary qualitative evaluation of thermograms, and quantitative to evaluate the degree of crack damage in prototypes that simulate coating in cracked mortar. The research was divided in the study of two types of fissures, linear and ramified. For each typology, six specimens were developed, with cracks of different openings and depths. The influence of the openings and depth was evaluated by thermographic parameters especially Delta-T. The main results were those obtained from the determination of the thermal behavior of the cracks, which enabled the delimitation of the period for the best visualization of this pathology in thermograms, corresponding to the beginning of heating and cooling, in which the highest values of contrasts were found. The methodology applied for the measurement of the degree of damage was shown to be promising, establishing itself as an important contribution to the evolution of infrared thermography in the inspection of buildings, once it was possible to safely classify cracks in relation to its gravity, through its opening and depth.

**Keywords:** active thermography; cracks in facades; damage; thermographic contrast

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	3
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	4
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
<b>2</b>	<b>TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO NA INVESTIGAÇÃO DE PATOLOGIAS EM FACHADAS</b>	<b>6</b>
2.1	PRINCÍPIOS BÁSICOS	6
2.1.1	<i>Fluxo de calor por condução – <math>q_{cd}</math> [W/m<sup>2</sup>]</i>	7
2.1.2	<i>Fluxo de calor por convecção - <math>q_{cv}</math> [W/m<sup>2</sup>]</i>	8
2.1.3	<i>Fluxo de calor por radiação - <math>q_{rad}</math> [W/m<sup>2</sup>]</i>	10
2.1.4	<i>Fluxo de calor na envoltória dos edifícios</i>	11
2.2	VARIÁVEIS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO	13
2.2.1	<i>Variáveis da termografia relacionada com o equipamento</i>	13
2.2.2	<i>Variáveis da termografia relacionada com o alvo</i>	15
2.3	CLASSIFICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO	16
2.3.1	<i>Termografia qualitativa, quantitativa e quasi-quantitativa</i>	16
2.3.2	<i>Termografia passiva e ativa</i>	18
2.4	TERMOGRAFIA QUANTITATIVA EM ESTUDO DE FACHADAS	19
2.4.1	<i>Funções de Contrastes</i>	20
2.4.2	<i>Representações Gráficas</i>	25
2.4.3	<i>Análise de Componentes Principais</i>	29
2.5	INVESTIGAÇÃO DE ANOMALIAS NA ENVOLTÓRIA DOS EDIFÍCIOS COM A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO	30
2.5.1	<i>Aplicações da termografia na investigação de fissuras</i>	33
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>43</b>
3.1	ETAPA 1: DESENVOLVIMENTO DOS CORPOS DE PROVA E MÉTODO DE ENSAIO	46
3.1.1	<i>Desenvolvimento dos corpos de prova</i>	46
3.1.2	<i>Desenvolvimento do Método de Ensaio - Estudo Piloto</i>	52

3.1.3	<i>Equipamentos utilizados</i> .....	55
3.2	<b>ETAPA 2: OBTENÇÃO DOS TERMOGRAMAS E DAS VARIÁVEIS DEPENDENTES</b> .....	56
3.2.1	<i>Obtenção dos termogramas</i> .....	56
3.2.2	<i>Obtenção das variáveis dependentes</i> .....	58
3.3	<b>ETAPA 3: ANÁLISES QUALITATIVA E QUANTITATIVA</b> .....	64
4	<b>RESULTADOS</b> .....	66
4.1	<b>RESULTADOS DAS PLACAS COM FISSURAS LINEARES</b> .....	66
4.1.1	<i>Análises Qualitativas</i> .....	66
4.1.2	<i>Análises Quantitativas</i> .....	72
4.1.3	<i>Mensuração da Largura do dano</i> .....	85
4.2	<b>RESULTADO DAS PLACAS COM FISSURAS RAMIFICADAS</b> .....	87
4.2.1	<i>Análises Qualitativas</i> .....	87
4.2.2	<i>Análises Quantitativas</i> .....	91
5	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	94
5.1	<b>ANÁLISES QUALITATIVAS</b> .....	94
5.2	<b>ANÁLISES QUANTITATIVAS</b> .....	97
5.2.1	<i>Análises da influência das aberturas das fissuras</i> .....	97
5.2.2	<i>Análises da influência das profundidades das fissuras</i> .....	99
5.2.3	<i>Estudo da mensuração da Largura do Dano</i> .....	101
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	102
6.1	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	104
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	106
	<b>APÊNDICE A – DADOS DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR</b> .....	116
	<b>APÊNDICE B- TERMOGRAMAS DAS PLACAS COM FISSURAS LINEARES</b> .....	117
	<b>APÊNDICE C – VELOCIDADE DE AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO DO DELTA - T</b> .....	120
	<b>APÊNDICE D – TERMOGRAMAS DAS PLACAS COM FISSURAS RAMIFICADAS</b> .....	122

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transferência de calor unidimensional por condução .....	7
Figura 2 - Fluxo de calor por convecção.....	9
Figura 3 – Taxa de radiação emitida pelas superfícies.....	10
Figura 4 - Trocas de calor através de paredes opacas .....	11
Figura 5 – Temperatura das fachadas no dia 05/07/2017– Fachadas Norte, Sul, Leste e Oeste.	12
Figura 6 - Faixa de temperatura, amplitude e nível de uma câmera termográfica.....	14
Figura 7 - Classificação e critérios de medição da termografia de infravermelho para análise da envoltória dos edifícios .....	16
Figura 8 – Exemplo de aplicação da termografia em edifícios. (a) Imagem digital de uma fachada (b) Termograma de uma fachada com presença de fissuras e descolamentos no revestimento cerâmico.....	17
Figura 9 - Análise do Delta-T em descolamento de gesso, no ciclo de aquecimento e arrefecimento.....	23
Figura 10 – Descolamento (a) Determinação das temperaturas nas placas cerâmicas (b) Comportamento padrão do Delta-T no ciclo direto no estudo de placas .....	24
Figura 11 - Perfis horizontais de temperatura .....	26
Figura 12 – Representação gráfica do comportamento da linha de temperatura que atravessa o descolamento no revestimento .....	27
Figura 13 - Mapa da temperatura da superfície em pequena parede de alvenaria (a) obtida experimentalmente nos termogramas (b) obtida no modelo de elementos finitos.....	27
Figura 14 - Perfis de temperatura das linhas investigadas (a) ao longo da linha 1 e (b) da linha 2 .....	28
Figura 15 - Contorno da superfície frontal do modelo FEM para duas diferentes amostras de alvenaria de concreto escalonado (a) pequena parede de alvenaria (b) grande parede de alvenaria .....	28
Figura 16 – ACP. (a) Vista da parede destacando a localização dos suportes estruturais (b) Termograma (c) Termograma melhorado com base no ACP .....	30
Figura 17 - Exemplo de protótipo de fachada com defeito monitorado com fluxo no sentido direto.....	31
Figura 18 – Análise de defeito em diferentes sentidos do fluxo de calor (a) Defeito com temperatura maior no sentido direto (b) Defeito com temperatura menor no sentido reverso. ...	32
Figura 19 - Resultados da simulação das temperaturas no WUFI .....	33

Figura 20 - Configuração das fissuras nos revestimentos (a) Retração de produtos à base de cimentos (b) Movimentações higroscópicas (c) Movimentação térmica (d) Atuação de sobrecargas (e) Recalques (f) Alterações Químicas.....	35
Figura 21 - Fachada fissurada (a) Regiões e pontos analisados (b) Termograma obtido para um determinado tempo de inspeção. ....	36
Figura 22 - Região A: Evolução dos Deltas - T .....	37
Figura 23 - Placa fissurada com seus respectivos termogramas nos dois ciclos ensaiados .....	38
Figura 24 - Distribuição da temperatura da face ao longo do aquecimento da placa .....	39
Figura 25 – Fissuras investigadas (a) Termograma destacando as três fissuras investigadas (b) Deltas – T das fissuras.....	40
Figura 26 - (a) Configuração experimental (b) Termografia de uma amostra com deflexão central de 2 mm .....	41
Figura 27 - Fluxograma do programa experimental.....	45
Figura 28 – Detalhe da estrutura de uma placa com fissuras linear .....	46
Figura 29 - Perfis com diferentes espessuras utilizados na confecção das placas .....	47
Figura 30– Moldagem da placa fissurada (a) Preenchimento (b) Placa totalmente moldada na forma (c) Acabamento da placa após a cura .....	47
Figura 31 – Aplicação da carga pontual para fissuração das placas .....	48
Figura 32 – Peças previamente montadas antes da colagem.....	48
Figura 33 - Sequência de passos para a assentamento das peças .....	49
Figura 34 – Distribuição das placas conforme suas características de abertura e profundidade	49
Figura 35 - Imagens digital das placas lineares.....	50
Figura 36 - Imagens digital das placas ramificadas .....	51
Figura 37 - Aferição da abertura das fissuras com auxílio de um fissurômetro (a) Placa FISS R1 (b) Placa FISS R4.....	52
Figura 38 – Regiões de análises da placa sem fissura.....	53
Figura 39 – Evolução das temperaturas do último teste realizado .....	54
Figura 40- Ciclo direto (a) Esquema ilustrativo da distribuição dos equipamentos (b) Imagem digital do ensaio .....	55
Figura 41 - Equipamentos que foram utilizados (a) Psicrômetro de umidade, modelo MO297 (b) Aquisitor de dados Pico USBTC-08 (c) Câmera termográfica FLIR T400 (d) Dispositivo de aquecimento com lâmpadas infravermelhas .....	56
Figura 42 – Janela do <i>software</i> QuickReport v1.2 (a) Valor de temperatura da fita (b) Valor de temperatura da placa e emissividade.....	58

Figura 43 - Disposição das linhas analisadas .....	59
Figura 44 - Linha de temperatura transversal à fissura (a) Valores de temperatura dos <i>pixels</i> no aquecimento (b) Valores de temperatura dos <i>pixels</i> no arrefecimento .....	60
Figura 45 - Método para aquisição de temperatura global.....	61
Figura 46 - Velocidade de aquecimento da placa FISS L5 .....	63
Figura 47 - Cenário de transferência térmica para placas com fissuras lineares no regime de aquecimento .....	66
Figura 48 - Cenário de transferência térmica para placas com fissuras lineares no regime de arrefecimento.....	68
Figura 49 - Placa FISS L1 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento.....	70
Figura 50 - Placa FISS L6 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento.....	70
Figura 51 - (a) Placa FISS L2. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (b) Placa FISS L3. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (c) Placa FISS L5. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (d) Deltas – T (e) GInt L2, L3 e L5. ....	73
Figura 52 - Inversão do Gint. (a) Ilustração dos fenômenos (b) Temperatura dos termopares. .	76
Figura 53 – (a) placa FISS L1. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (b) Placa FISS L4. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (c) Deltas – T (d) GInt FISS L1 e L4 .....	78
Figura 54 - (a) placa FISS L4. Delta – T, temperatura com e sem defeito (b) Placa FISS L5. Delta – T, temperatura com e sem defeito (c) Placa FISS L6. Delta – T, temperatura com e sem defeito. (d) Deltas – T (e) GInt L4, L5 e L6.....	80
Figura 55 - (a) placa FISS L1. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (b) Placa FISS L2. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (c) Deltas – T (e) GInt FISS L1 e L2.....	83
Figura 56 - Cenário de transferência térmica para placas com fissuras ramificadas no regime de aquecimento .....	87
Figura 57 - Temperatura média das placas ramificadas e lineares. (a) L1 e R1 (b) L2 e R2 (c) L3 e R3 (d) L4 e R4 (e) L5 e R5 (f) L6 e R6 .....	88
Figura 58 - Placa FISS R1 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do	

arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento.....	90
Figura 59 - Figura 62 - Placa FISS R6. (a) 12 min de aquecimento. (b) 36 min de aquecimento. (c) 60 min de aquecimento. (d) 84 min de aquecimento. (e) 12 min do arrefecimento. (f) 36 min do arrefecimento. (g) 60 min de arrefecimento(h) 84 min do arrefecimento. (i) 108 min do arrefecimento.....	90
Figura 60 - Placas ramificadas. (a) Estudo 1 (b) Estudo 2 (c) Estudo 3 (d) Estudo 4.....	92
Figura 61 - Deltas - T (a) Delta - T FISS L1 (b) Delta - T FISS L2 (c) Delta - T FISS L3 (d) Delta - T FISS L4 (e) Delta - T FISS L5 (f) Delta - T FISS L6.....	95
Figura 62 – Fluxograma de hierarquização dos parâmetro analisados para as placas lineares - Estudo 1.....	98
Figura 63 - Fluxograma de hierarquização dos parâmetro analisados para as placas lineares - Estudo 2.....	98
Figura 64 - Fluxograma de hierarquização dos parâmetro analisados para as placas lineares - Estudo 3.....	99
Figura 65 - Fluxograma de hierarquização dos parâmetro analisados para as placas lineares – Estudo 4.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da análise qualitativa e quantitativa.....	17
Tabela 2 - Variáveis de estudo independentes e dependentes.....	43
Tabela 3 - Características das placas lineares e ramificadas .....	52
Tabela 4 - Propriedade da Câmera de Infravermelhos .....	56
Tabela 5 - Síntese da ordem de apresentação dos resultados .....	64
Tabela 6 - Síntese da ordem de apresentação dos resultados para placas lineares.....	72
Tabela 7 - Dados numéricos referentes aos parâmetros termográficos e fluxo de calor placa FISS L2, L3 e L5 .....	77
Tabela 8 - Dados numéricos referentes aos parâmetros termográficos e fluxo de calor placa FISS L1 e FISS L4 .....	79
Tabela 9 - Dados numéricos referentes aos parâmetros termográficos e fluxo de calor placa FISS L4, L5 e L6.....	82
Tabela 10- Dados numéricos referentes aos parâmetros termográficos e fluxo de calor placa FISS L1 e L2 .....	84
Tabela 11 - Resultados médios da contagem de pixels e a largura do dano calculada .....	86
Tabela 12 - Resultados obtidos em relação à contagem de pixels e as variações da quantidade de <i>pixels</i> .....	87
Tabela 13 - Síntese da ordem de apresentação dos resultados para ramificadas .....	91
Tabela 14 - Período de inversão do Delta - T - Placas lineares .....	94
Tabela 15 - Valores do Delta – T mínimo e máximo para o regime do aquecimento e arrefecimento.....	96
Tabela 16 - Dados de temperatura e umidade medidos em cada ensaio .....	116



## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

$\alpha$	Radiação incidente absorvida pelo corpo
$\rho$	Radiação incidente refletida
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$\varepsilon$	Emissividade
$\tau$	Radiação incidente transmitida para fora do meio
$k$	Condutividade térmica
$A$	Área da superfície
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
$C^a(t)$	Contraste absoluto
$C^r(t)$	Contraste corrido
$C^n(t)$	Contraste normalizado
$C^s(t)$	Contraste padrão
$E_b$	Poder emissivo
FISS	Fissura
$G_{int}$	Gradiente interface (diferença entre a temperatura do termopar da interface e a temperatura do termopar da superfície)
$hc$	Coeficiente de convecção
$h_e$	Coficiente de condutância térmica superficial externa
IFOV	Campo de visão instantâneo = <i>Instantaneous field of view</i>
$I_g$	Intensidade de radiação solar incidente global
ITC	Infrared Training Center
MO297	Termohigrômetro Meterlink
$T$	Temperatura absoluta da superfície
$t$	Tempo
$T(m)$	Temperatura no instante $m$ ( $t_m$ )
$t_0$	Tempo inicial
$T_d(t)$	Temperatura da área com defeito no tempo $t$
$T_{def}(t)$	Temperatura do defeito no tempo ( $t$ )
$T_{def}(t_0)$	Temperatura do defeito no tempo ( $t_0$ )
$t_i$	Temperatura do ar interno
$T_{nd}(t)$	Temperatura da área sem defeito no tempo $t$

$T_s(t_0)$	Temperatura superfície no tempo ( $t_0$ )
$T_s(t)$	Temperatura da superfície de referência no tempo ( $t$ )
$T_s(t)$	Temperatura da superfície no tempo ( $t$ )
$T_s(t)$	Temperatura superfície no tempo ( $t$ )
$T_s(t_0)$	Temperatura superfície no tempo ( $t_0$ )
$T_1$	Temperatura da superfície externa
$T_2$	Temperatura da superfície interna
$T_{ext}$	Temperatura externa
$T_{ext}$	Temperatura externa
$T_{sup}$	Temperatura da superfície
$T_{sup}$	Temperatura da superfície
$q_{cd}$	Fluxo de Calor por condução
$q_{cv}$	Fluxo de Calor por convecção
$q_{rad}$	Fluxo de calor por radiação
WUFI	Transporte transiente de calor e umidade = <i>Wärme und feuchte instationär</i>

## 1 INTRODUÇÃO

Os revestimentos exteriores, sejam cerâmicos ou em argamassa, têm um papel elementar no desempenho geral dos edifícios, pois contribuem para a estanqueidade à água, para o comportamento térmico e protegem a alvenaria e a estrutura. Para tanto, devem manter ao máximo a integridade dos revestimentos durante toda a sua vida útil, sendo necessárias as devidas manutenções, uma vez que os revestimentos estão diretamente expostos aos agentes de degradação como: radiação solar, temperatura, chuva dirigida, vento, agentes químicos e biológicos, que degradam naturalmente as fachadas (HAAGENRUD, 2004; DIAS *et al.*, 2014; SOUZA, 2016).

A degradação das fachadas podem ser intensificadas de acordo com as condições de exposição, nível de projeto, manutenções, características do edifício, principalmente, os materiais que o compõe e os detalhes arquitetônicos. Atualmente, várias técnicas têm sido utilizadas para estudo da degradação das fachadas, dentre elas as inspeções por imagens visuais que podem ser obtidas com o emprego de drones e registros fotográficos, como também os testes a percussão, nos quais identifica-se anomalias por meio do som cavo das placas. No entanto, os testes a percussão necessitam do contato direto de operários nas diversas regiões das fachadas, algumas inacessíveis conforme a geometria do edifício, tornando o processo lento e pouco preciso. Diante disso, técnicas de inspeção não destrutivas vem se consolidando para práticas de inspeção em fachadas, com grande desenvolvimento nas últimas décadas devido à sua eficiência como ferramenta de controle de qualidade (MADRUGA *et al.*, 2010).

A termografia por infravermelho se classifica como técnica de inspeção não destrutiva, pois possibilita realizar inspeção à distância, em tempo real, obtendo imagens dispostas em um plano, chamados de termogramas, valiosa para a detecção e caracterização de defeitos (MALDAGUE, 2001). Os termogramas exibem uma escala de cores para cada nível de temperatura a partir da radiação emitida pela superfície dos materiais (MADRUGA *et al.*, 2010; USAMENTIAGA *et al.*, 2014). As diferenças de tonalidades nos termogramas são estudadas e analisadas em diversas áreas da engenharia para o estudo de defeitos em equipamentos (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013), monitoramento das condições e segurança de sistemas elétricos e mecânicos (VALIORGUE *et al.*, 2013; HUDA, 2013; SINGH, G.; NAIKAN, VNA, 2017; LEKSIR *et al.*, 2018) como também, são utilizados em

pesquisas científicas na avaliação de materiais (LE CAM *et al.*, 2013; BOCCARDI *et al.*, 2018).

No estudo de patologias em fachadas destaca-se a capacidade da termografia infravermelha na detecção precoce de regiões com defeitos em sistema de revestimentos, como destacamento (LOURENÇO, 2016; BAUER & PAVÓN, 2016a; EDIS *et al.*, 2015a), presença de umidade (REBELO, 2017; BARREIRA *et al.*, 2016; BAUER & PAVÓN, 2015a) identificação de fissuras (BAUER *et al.*, 2016a; PAOLETTI *et al.*, 2013) e falhas de aderência com elementos de concreto (LAI *et al.*, 2010).

Pesquisadores também analisaram a funcionalidade da termografia para avaliação das características térmicas da envolvente do edifício (MARTÍN OCAÑA *et al.*, 2004; MONTEIRO, 2013), para os problemas em materiais de isolamento da envolvente (BAETENS *et al.*, 2011), para detectar problemas de corrosão em estrutura de concreto armado (KOBAYASHI e BANTHIA, 2011), como técnica de monitorização de fachadas históricas (SCIARRETTA *et al.*, 2018), entre outras peculiaridades da construção civil.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Com a vigência da norma de desempenho ABNT NBR 15575:2013 foram estabelecidos padrões de desempenho para os sistemas das edificações. O controle de qualidade e planejamento das manutenções para esses sistemas exigem métodos adequados de testes para inspeção, de preferência não destrutivos, rápidos, precisos e com custo menor, com essas características, destaca-se a termografia de infravermelho, uma vez que agiliza a inspeção, resposta em tempo real, mapeia a degradação e indica seu grau de dano (MADRUGA *et al.*, 2010).

No âmbito da construção civil, a termografia de infravermelho distingue-se por ser um método pouco padronizado influenciado por diversas variáveis, despertando dúvidas quanto ao melhor ângulo, à distância, às condições climáticas para realizar inspeção, assim como, a forma correta de interpretar os termogramas.

Por tais motivos, é necessário desenvolver pesquisas que permitam identificar padrões e definir critérios das patologias nos termogramas. Para tanto, é fundamental realizar

estudos controlados em laboratório mediante investigações em corpos de provas, para posterior criação de um conjunto experimental de dados termográficos que permitam extrair quantitativamente propriedades das patologias tais como profundidade, resistividade térmica e tamanho.

Dentro da linha de pesquisa Desempenho, Vida útil, Degradação e Patologia do Ambiente Construído do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, destaca-se diversos trabalhos que foram publicados com a aplicação da termografia de infravermelho. Dentre eles o estudo do grau de danos de fissuras em fachadas (BAUER *et al.*, 2016a; BAUER *et al.*, 2018;), investigações das variáveis que afetam os termogramas (AIDAR *et al.*, 2018; MILHOMEM *et al.*, 2018), definição de critérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos em termogramas (PAVÓN, 2017; BAUER *et al.*, 2016b), aplicação da simulação como ferramenta de apoio para inspeção termográfica (BAUER *et al.*, 2018a; BAUER *et al.*, 2018b), aplicação da termografia para investigação de patologias em pintura (MOREIRA, 2018).

Nas edificações destaca-se como principais patologias estudadas com a termografia de infravermelho os descolamentos e a umidade, possibilitando uma amplitude de estudos das variáveis envolvidas em cada uma dessas patologias. As fissuras ainda necessitam de mais estudos, uma vez que o seu mapeamento e difinição do grau de dano é de grande importância nos estudos de degradação e reabilitação dos edifícios, principalmente, por ser uma das patologias mais recorrentes em revestimento em argamassa na cidade de Brasília (SOUZA, 2016; SANTOS, 2018).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral desta dissertação é propor critérios e padrões de comportamento, para identificação das fissuras e mensuração do seu grau de dano em revestimentos de fachada por meio da termografia de infravermelho. Este estudo termográfico simula em laboratório, processos de aquecimento e resfriamento do edifício.

## **1.2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Determinar em laboratório o comportamento térmico das fissuras lineares e ramificadas com diferentes profundidades e aberturas;
- Avaliar os comportamentos dos parâmetros termográficos (Delta T, evolução das temperaturas e velocidade de aquecimento e arrefecimento do Delta – T.), para estudo do padrão de comportamento das fissuras;
- Avaliar a possibilidade de mensuração da largura do dano por meio dos termogramas;
- Propor critérios quanto a melhor condição para detecção de fissuras e mensuração do seu grau de dano.

## **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O presente trabalho está dividido em capítulos descritivos nos parágrafos seguintes.

O primeiro capítulo refere-se à introdução do trabalho, na qual se apresenta de modo geral as aplicações da termografia de infravermelho para inspeção e mensuração da degradação, realçando seus princípios e vantagens para execução dessa atividade. Ainda nesse capítulo, têm-se os itens justificativa (motivações), objetivo geral e específicos.

O segundo capítulo, corresponde à revisão bibliográfica vinculadas ao tema de degradação das fachadas, com ênfase na aplicação da termografia de infravermelho para investigação das fissuras nesse sistema. Realiza-se também, uma abordagem sobre seus princípios básicos, variáveis, classificações, assim como sobre os mecanismos de transporte de calor que a envolve.

O terceiro capítulo descreve o processo de desenvolvimento dos corpos de prova, definição da disposição dos equipamentos utilizados nos ensaios, assim como, a metodologia e as ferramentas para aquisição e tratamento dos dados.

O quarto capítulo apresenta os principais resultados do estudo em placas com fissuras lineares e ramificadas, correlacionando os resultados das variáveis, como profundidade, abertura e tipologia e como essas podem ser identificadas nas inspeções das fachadas.

No quinto capítulo são discutidos os resultados propostos, referentes aos critérios e padrões de comportamento encontrados, relativos ao estudo sobre fissuras em revestimento argamassado, correlacionando com outras pesquisas encontradas.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO NA INVESTIGAÇÃO DE PATOLOGIAS EM FACHADAS

### 2.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS

A termografia é uma técnica de inspeção, atualmente, utilizada no âmbito industrial e da construção civil por meio de diversos equipamentos que mensuram a radiação infravermelha emitida pelas superfícies e transforma em imagens térmicas visíveis (termogramas).

De acordo com Maldague (2001) a termografia de infravermelho (*Infrared Thermography*) é uma ciência responsável pela aquisição e processamento de dados térmicos obtidos por dispositivos de medição sem contato. A termografia de infravermelho, tem seu princípio baseado na radiação térmica emitida pela superfície dos objetos, ou seja, a radiação emitida como resultado da temperatura do objeto. Todos os corpos irradiam calor constantemente, perdendo energia. Os corpos sem energia térmica própria precisam, então, absorver energia para depois emití-la. Portanto, aquele que mais absorve é também o que mais pode emitir (ÇENGEL & GHAJAR, 2009).

O corpo hipotético, que é um absorvedor ideal e, logicamente, um emissor ideal, é denominado corpo negro. Define-se poder emissivo (E) como a potência irradiada por unidade de área (W/m<sup>2</sup>). No corpo negro a radiação térmica pode ser quantificada por meio da lei de Stefan – Boltzmann. O poder emissivo (E) de um corpo negro (cn) é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta (T) (ITC, 2008; BERGMAN *et al.*, 2011). Matematicamente, pode-se expressar (Equação 1):

$$E_{cn} = \sigma.T^4 \tag{1}$$

Onde  $\sigma$  (sigma) é a constante de proporcionalidade, cujo valor, no SI, é:  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup> e o T é a temperatura absoluta.

Corpos reais em geral não são corpos negros, uma vez que uma parcela da radiação incidente é absorvida ( $\alpha$ ) e o restante é refletida ( $\rho$ ) ou transmitida ( $\tau$ ). Essas parcelas são dependentes do comprimento de onda e a soma, para um dado comprimento de onda, é sempre igual a um



(KYLILI *et al.*, 2014; BARREIRA *et al.*, 2010). Dessa forma, a energia que atinge o sensor térmico é constituída pela energia emitida do alvo, pela energia refletida do ambiente e interceptada pela superfície do objeto. Por isso, essa energia deve ser tratada com auxílio de *softwares*, a fim de se corrigir erros referentes às considerações de emissividade e temperatura refletida (KYLILI *et al.*, 2014, FOKAIDES & KALOGIROU, 2011; ITC, 2008).

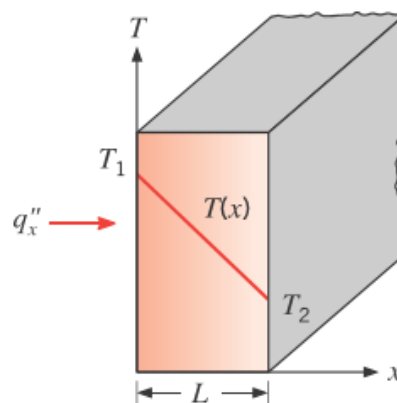
Como visto, a termografia tem seus princípios baseados na radiação infravermelha, portanto torna-se necessário conhecer alguns conceitos fundamentais relacionados à transferência de calor e como eles estão associados a uma fachada.

### 2.1.1 Fluxo de calor por condução – $q_{cd}$ [ $W/m^2$ ]

A condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para partículas vizinhas adjacentes menos energéticas, como resultado da interação entre elas. A condução pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases.

Em líquidos a condução deve-se às colisões e difusões das moléculas em seus movimentos aleatórios. Nos sólidos a transferência de calor acontece por causa das vibrações das moléculas em rede (BERGMAN *et al.*, 2011). A Figura 1 ilustra a transferência de calor unidirecional por condução em uma parede plana.

Figura 1 – Transferência de calor unidimensional por condução



Fonte: Bergman *et al.* (2011)

Os processo de transferência de calor podem ser quantificados com equações apropriadas. Essas equações podem ser usadas para calcular a quantidade de energia

sendo transferida por unidade de tempo. Para a condução de calor, o fluxo de calor em uma superfície pode ser expresso pela Lei de Fourier (Equação 2).

$$q_{cd} = k \cdot A \frac{T_1 - T_2}{L} = k \cdot A \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

Onde,

$q_{cd}$ : Fluxo de calor por condução (W/m<sup>2</sup>);

k: Condutividade térmica (W/m.K);

$T_1$ : Temperatura da superfície externa (°C);

$T_2$ : Temperatura da superfície interna (°C);

L: Comprimento (m);

A: Área da superfície (m<sup>2</sup>).

O coeficiente de condutibilidade térmica do material ( $k$ ) é definido como sendo “o fluxo de calor que passa, na unidade de tempo, através da unidade de área de uma parede com espessura unitária e dimensões suficientemente grandes para que fique eliminada a influência de contorno, quando se estabelece, entre os parâmetros dessa parede, uma diferença de temperatura unitária” (FROTA & SCHIFFER, 1995).

Este coeficiente depende de:

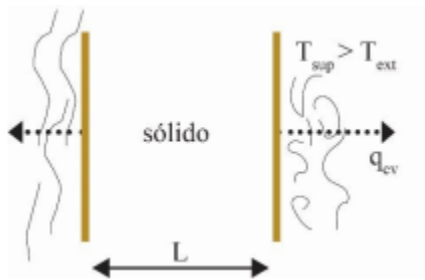
- (a) Densidade do material – a matéria é sempre muito mais condutora que o ar contido em seus poros;
- (b) Natureza química do material – os materiais amorfos são geralmente menos condutores que os cristalinos;
- (c) A umidade do material – a água é mais condutora que o ar.

### **2.1.2 Fluxo de calor por convecção - $q_{cv}$ [W/m<sup>2</sup>]**

A convecção é o modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a líquida ou gás adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e o movimento de um fluido. Quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a

transferência de calor por convecção. Na ausência de qualquer movimento da massa de fluido, a transferência de calor entre a superfície sólida e o fluido adjacente se dá por pura condução (ÇENGEL & GHAJAR, 2009; BERGMAN *et al.*, 2011). A Figura 2 ilustra o processo de convecção em uma superfície e a Equação 3 é conhecida como lei do resfriamento de Newton e expressa o fluxo de calor por convecção.

Figura 2 - Fluxo de calor por convecção



Fonte: Incropera & Dewitt (2003)

$$q_{cv} = hc \cdot A \cdot (T_{sup} - T_{ext}) \quad (3)$$

Onde,

$q_{cv}$ : Fluxo de calor por convecção (W/m<sup>2</sup>);

$hc$ : Coeficiente de convecção (W/m<sup>2</sup>.K);

$T_{ext}$ : Temperatura externa (°C);

$T_{sup}$ : Temperatura da superfície (°C);

A: Área da superfície (m<sup>2</sup>).

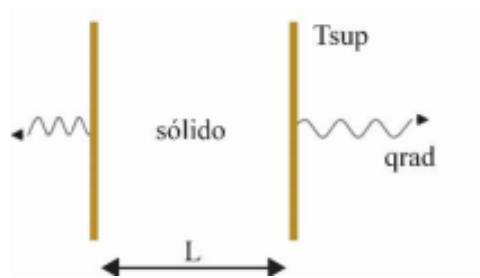
A transferência de calor por convecção se classifica em livre (natural) ou forçada de acordo com a condição de escoamento do fluido. A convecção forçada ocorre quando o escoamento do fluido é causado por meio externo, tais como um ventilador, uma bomba ou os ventos atmosféricos. Em contrapartida, a convecção é chamada de convecção natural (ou livre) se o movimento do fluido é causado por forças de flutuação induzidas por diferenças de densidade, decorrentes da variação de temperatura no fluido (INCROPERA & DEWITT, 2003).

### 2.1.3 Fluxo de calor por radiação - $q_{rad}$ [W/m<sup>2</sup>]

A radiação é a transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas, que ocorre através do espaço vazio, ou seja, o calor é transmitido de um corpo de alta temperatura para um de menor temperatura quando tais corpos estão separados no espaço. Desta forma, não há necessidade de um meio condutor entre os corpos para que a energia (na forma de calor) seja transmitida entre eles (KREITH, 1977).

Todos os corpos emitem e absorvem radiação eletromagnética, sendo que a intensidade com que se dá esta emissão de energia depende da temperatura absoluta do corpo e do estado da sua superfície. A Equação 4 expressa a taxa de calor emitida por uma superfície real que é menor do que aquele emitido por um corpo negro à mesma temperatura e a Figura 3 mostra a troca de calor por radiação em uma superfície.

Figura 3 – Taxa de radiação emitida pelas superfícies



Fonte: Incropera & Dewitt (2003)

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{sup}^4 \quad (4)$$

Onde,

$q_{rad}$ : Fluxo de calor por radiação;

$\varepsilon$ : Emissividade [-];

$\sigma$ : Constante de Steffan – Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ );

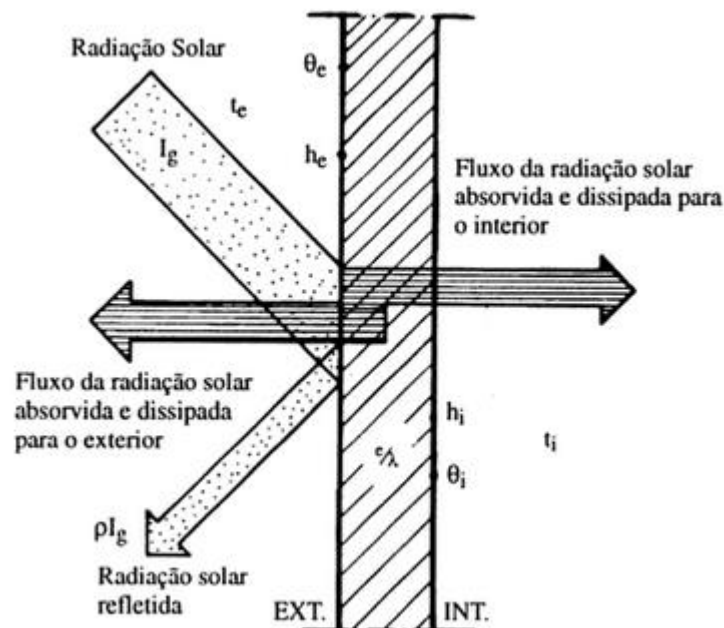
$T_{sup}$ : Temperatura da superfície (°K);

#### 2.1.4 Fluxo de calor na envoltória dos edifícios

O sol é uma importante fonte de calor que incide sobre o edifício conferindo-lhe ganho térmico, que será proporcional a intensidade da radiação incidente e as características térmicas dos elementos do edifício (FROTA & SCHIFFER, 1995).

A radiação solar global horizontal que incide na superfície terrestres é constituída pelas componentes direta e difusa. Os elementos da edificação que atingidos pela radiação solar, podem ser classificados como: opacos, transparentes ou translúcidos. A alvenaria é a parte opaca das paredes, dessa forma, são discriminados os mecanismos de transferência de calor através de parede opacas, as quais quando expostas a radiação solar estão sujeitas a uma determinada diferença de temperatura entre os ambientes que separa. A Figura 4 ilustra os mecanismos de transporte de calor nesse tipo de parede, explicitando o sentido e perdas.

Figura 4 - Trocas de calor através de paredes opacas



Fonte: Fronta & Schiffer (1995)

A intensidade do fluxo térmico ( $q$ ) que atravessa essa parede, por efeito da radiação solar incidente e da diferença de temperatura do ar, é dada pela Equação 5.

$$q = \frac{K\alpha I_g}{h_e} + K(t_e - t_i) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (5)$$

Onde:

$q$ : Intensidade do fluxo térmico ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$K$ : Condutividade térmica ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$t_e$ : Temperatura do ar externo ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\alpha$ : Coeficiente de absorção da radiação solar;

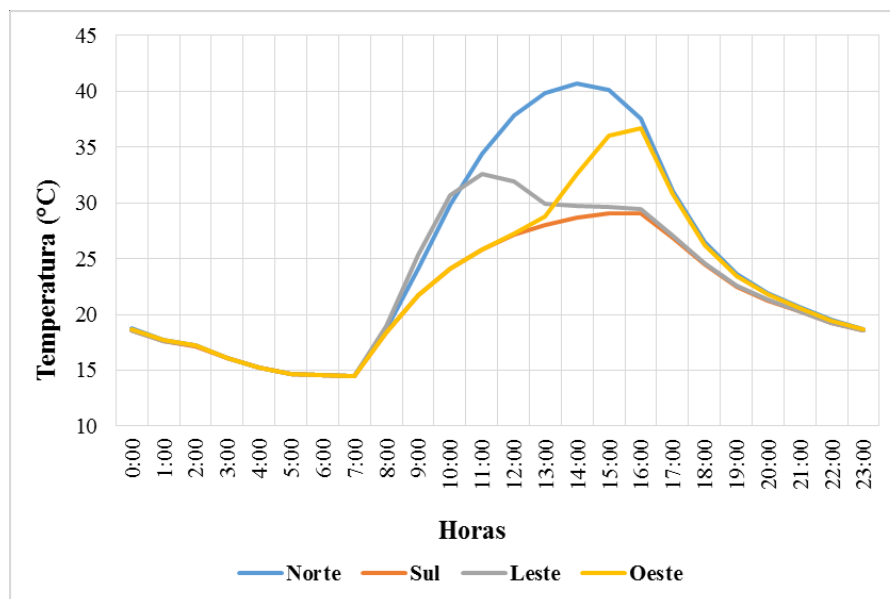
$I_g$ : Intensidade de radiação solar incidente global ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$h_e$ : Coeficiente de condutância térmica superficial externa ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ );

$t_i$ : Temperatura do ar interno ( $^{\circ}\text{C}$ ).

No caso de existir diferença de temperatura, o fluxo de calor será sempre da superfície mais quente para a superfície mais fria. A intensidade do fluxo térmico pode ser potencializada ou atenuada em função das propriedades térmicas dos revestimentos, assim como da orientação da fachada (FROTA & SCHIFFER, 1995). A Figura 5 apresenta os valores de temperatura para quatro fachadas ao longo do mesmo dia de um edifício revestido com cerâmica escura localizado em Brasília - Brasil. Esses valores foram gerados por meio da simulação no *software* WUFI PRO 5.3 (*Wärme Und Feuchte Instationär*) de simulação higratérmica que se baseia em dados meteorológicos e nas características e propriedades físicas e mecânicas dos materiais que constituem o sistema investigado.

Figura 5 – Temperatura das fachadas no dia 05/07/2017– Fachadas Norte, Sul, Leste e Oeste



Para o período estudado a preponderância de incidência solar está para a orientação Norte. A fachada Leste, nesse período do ano, recebe a radiação solar a partir das primeiras horas do dia e se estende até o meio dia. A fachada Oeste por sua vez, inicia seu aquecimento após esse período e começa seu arrefecimento após as 17h. A fachada Sul, não recebe incidência solar diretamente no período em questão, sendo seu aquecimento realizado indiretamente. Enfatiza-se que a radiação solar varia de acordo com a latitude, horário do dia, estação do ano, altitude e nebulosidade (FREITAS, 2012). Por isso, é fundamental importância o estudo da trajetória do sol para determinar quais fachadas receberão maior influência dessa variável em diferentes períodos do ano. Este estudo pode ser realizado por meio da carta solar.

## **2.2 VARIÁVEIS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO**

A aplicação da termografia de infravermelhos está sujeita a intervenientes de variáveis que podem afetar em maior ou em menor medida a precisão dos termogramas, conseqüentemente, a interpretação dos resultados. Essas variáveis se dividem em dois grupos: as que dependem do equipamento e as relacionadas ao alvo. Nos itens abaixo são discutidos como essas variáveis podem afetar a qualidade dos termogramas.

### **2.2.1 Variáveis da termografia relacionada com o equipamento**

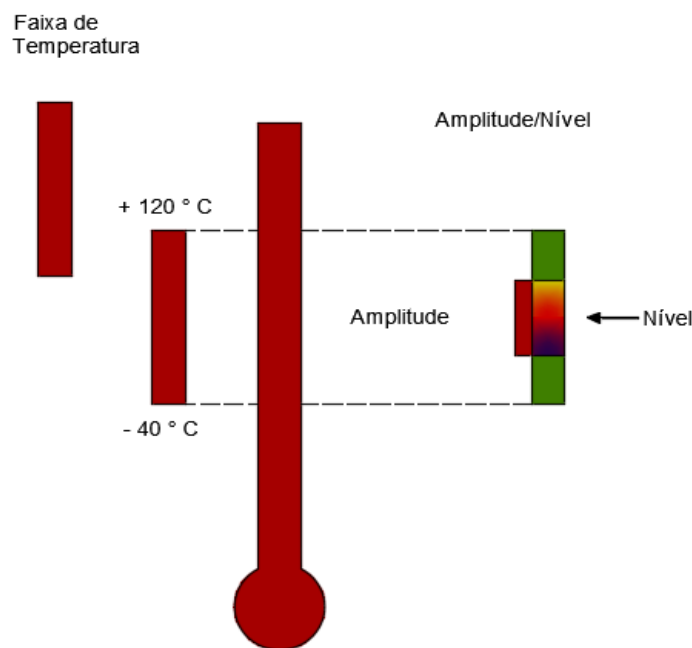
As variáveis vinculadas ao equipamento são a resolução, IFOV, e o ângulo de visão. A resolução corresponde a quantidade de pixels que há na área da imagem (ITC, 2008). O IFOV do inglês quer dizer *Instantaneous Field Of View* (Campo de Visão) é definido como o tamanho do detector projetado no alvo através das lentes, ou seja, delimita o menor objeto que se pode representar na imagem do visualizador. O IFOV é uma medida de ângulo em miliradianos (mrad), que também pode ser expresso como a razão entre a distância e o tamanho do ponto.

O ângulo de visão depende diretamente da lente. Um ângulo de lente menor significa um ponto de medição menor no alvo, isto é diretamente proporcional. Uma lente de 24 para uma lente de 12 graus, modifica o ponto de medição na mesma distância pela metade do tamanho (ITC, 2008).

O foco e o ângulo de visão, assim como o IFOV, são parâmetros que dependem da lente. O foco não se enquadra como uma variável do equipamento sendo, portanto, um parâmetro de carácter operacional que deve ser ajustado para otimizar o contraste de uma anomalia. Se o foco da câmera não estiver acertado, tanto a temperatura mais alta como a mais baixa, se combinam na sua diferença de temperatura e serão medidas de maneira errada (ITC, 2008).

Outros parâmetros de carácter operacional que devem ser ajustados antes de capturar o termograma, são a seleção da faixa de temperatura, amplitude e nível. A faixa é o ajuste acima e abaixo da qual a temperatura não pode ser medida. Quanto mais largas as faixas, mais fácil será operar o instrumento e usá-lo. A faixa é importante para limitar a radiação que chega ao detector. A amplitude é a parte dentro da faixa de temperaturas que se usa na imagem. Nível é o ponto intermediário da amplitude. A Figura 6 exemplifica melhor a ordem desses parâmetros (ITC, 2008).

Figura 6 - Faixa de temperatura, amplitude e nível de uma câmera termográfica



Fonte: Adaptado do ITC (2008)

No estudo em fachadas, o ângulo e o IFOV podem limitar a investigação. Quanto maiores, menor será a resolução dos termogramas e a precisão do estudo, pois cada *pixel* analisado na imagem vai corresponder a uma área maior. De acordo com Maldague (2001), Barreira *et al.* (2014), Azenha *et al.* (2011) e Milhomem *et al.* (2018) ângulos de incidência entre a posição da câmera termográfica e o edifício, maiores que 60°, modificam o valor da emissividade e



reduzem a temperatura dos termogramas, podendo levar a erros na análise destes, principalmente, quando se emprega a termografia quantitativa.

Ao comparar as câmeras T420; T640 e SC5600 fabricadas pela FLIR Systems, Inc. com detectores de diferentes sensibilidades, resolução e IFOV. As câmeras SC5600 e T640 tem aproximadamente a mesma resolução de imagem, que por sua vez é quatro vezes maior que a T420. Hiasa *et al.* (2016) concluíram que de acordo com o tamanho do objeto que se deseja investigar, o valor do IFOV é imprescindível para obtenção de resultados precisos.

### **2.2.2 Variáveis da termografia relacionada com o alvo**

Com relação às variáveis referentes ao alvo, as principais que devem ser consideradas são a emissividade, distância e reflexão. São propriedades mais difíceis de mensurar e controlar, requerendo cuidado e percepção do termografista.

A emissividade fornece uma medida da capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a um corpo negro e depende fortemente do comprimento de onda, da distância, do ângulo de observação, temperatura e textura da superfície. Alvos com alta emissividade trazem mais segurança, pois a sua temperatura aparente será mais próxima da sua temperatura real, enquanto para alvos com baixa emissividade a sua temperatura será mais próxima da sua temperatura aparente, se distanciando da temperatura real (INCROPERA & DEWITT, 2003; ITC, 2008).

A reflexão é uma das principais limitações do termografista em campo, uma vez que todo corpo reflete em maior ou menor intensidade a depender do seu acabamento, provocando perturbações e distorções nas imagens termográficas. A reflexão é um fenômeno frequente nas avaliações em fachadas, principalmente, em dias ensolarados (BAUER & PAVÓN, 2015b). Por esse motivo a temperatura ambiente refletida é um parâmetro utilizado para compensar a radiação refletida no objeto e a radiação emitida pela atmosfera entre a câmera e o objeto (ITC, 2008).

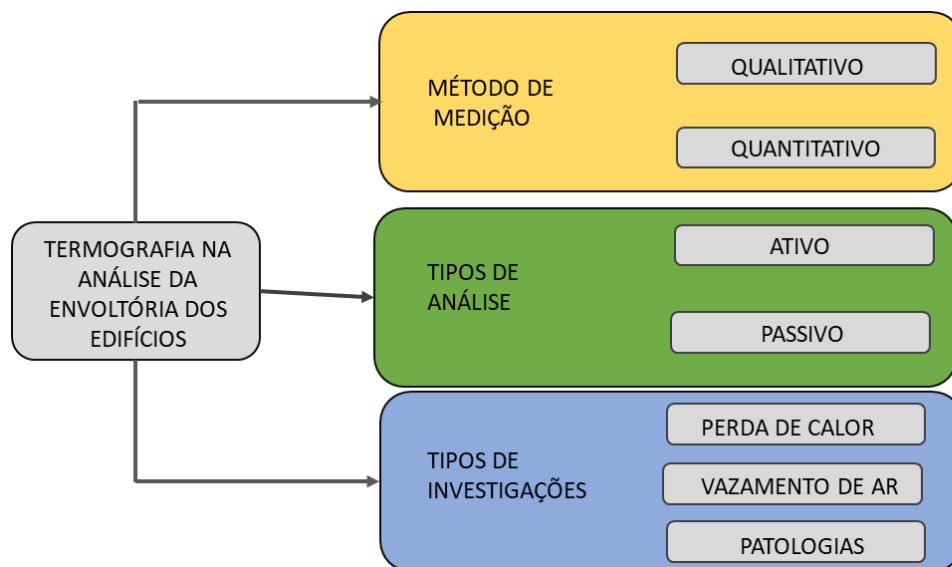
Em relação à distância, quanto maior, menor será a resolução espacial e menos preciso será a temperatura obtida nos termogramas (VENKATARAMAN & RAJ, 2003).

As variáveis que influenciam na qualidade dos termogramas, dentre elas, destacam-se que superfície com alta emissividade e baixa refletância apresentam menores distorções. Grande distância e o ângulo de visão afetam a nitidez dos termogramas, uma vez que a imagem vai ter menos pixels para o ponto de análise (Barreira *et al.*, 2004).

## 2.3 CLASSIFICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO

A termografia se classifica em quantitativa, qualitativa e quasi-quantitativa conforme o tipo de análise realizada e passiva e ativa segundo a estimulação utilizada. A Figura 7 abaixo apresenta os métodos de medição e análise da termografia de infravermelho na inspeção da envoltória dos edifícios. Os tópicos que se seguem descrevem detalhadamente os métodos de medição e tipo de análise.

Figura 7 - Classificação e critérios de medição da termografia de infravermelho para análise da envoltória dos edifícios



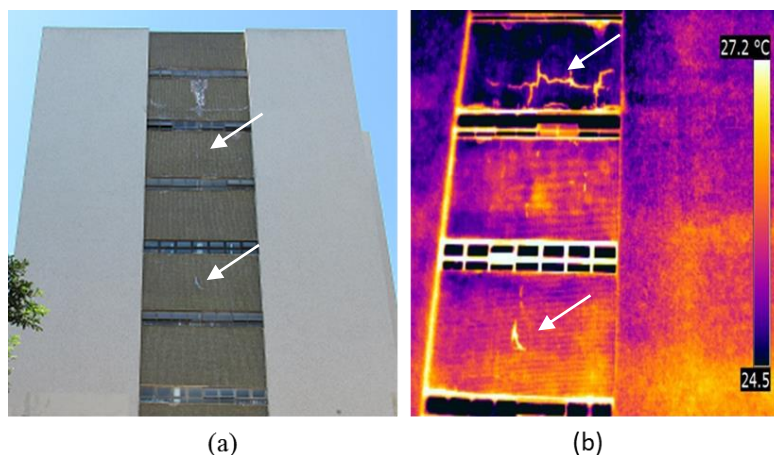
Fonte: Adaptado de Kirimtut & Krejcar (2018)

### 2.3.1 Termografia qualitativa, quantitativa e quasi-quantitativa

A termografia qualitativa consiste na análise dos padrões térmicos para revelar a existência e localizar a posição das anomalias nos termogramas (REBELO, 2017; ITC, 2008). Essa análise é feita por comparação com uma situação padrão, levando em consideração a diferença local da temperatura superficial, com base na variação de cores no termograma, indicando assim, a existência ou não de uma patologia (ALAM *et al.*, 2016). A Figura 8(a) mostra a imagem digital de uma fachada e a Figura 8(b) seu respectivo termograma, destacando uma região

mais aquecida no termograma do edifício, onde foi identificada a presença de fissuras na parte superior indicada pela seta e descolamento na parte inferior.

Figura 8 – Exemplo de aplicação da termografia em edifícios. (a) Imagem digital de uma fachada (b) Termograma de uma fachada com presença de fissuras e descolamentos no revestimento cerâmico



Fonte: Adaptado de Bauer, Milhomem & Aidar (2018)

Os termogramas revelam defeitos superficiais mediante a comparação entre a diferença de temperatura da região anômala e a íntegra. Tais como problemas de umidade nas fachadas dos edifícios, vazamentos de ar nas paredes ou ao redor das janelas, presença de fissuras e descolamento nos revestimentos, dentre outras patologias (LOURENÇO, 2016; BAUER & PAVÓN, 2016a; BARREIRA *et al.*, 2015).

A análise quantitativa usa medições de temperatura como um critério para determinar a severidade de uma anomalia e, desta forma, estabelecer prioridades de reparo. A Tabela 1 realiza uma comparação das características principais desses dois princípios de acordo com o ITC (2008).

Tabela 1 - Características da análise qualitativa e quantitativa

Qualitativo	Quantitativo
Análise de padrões na imagem	Usada para ajudar a classificar a severidade de uma anomalia
Descobre se há alguma anomalia	Medição de temperatura envolvida
Descobre onde ela está localizada	É feita compensação
Temperatura aparente apenas	Nem sempre é relevante
Geralmente é feita primeiro	

Fonte: ITC (2008)

Outro método de medição utilizado para investigação de defeitos nos termogramas é o quasi-quantitativo, utilizado para melhorar a visibilidade dos defeitos nos termogramas com o uso de ferramentas de subtração de imagem (SIS), fatoração não-negativa de matriz (NMF) e análise de componentes principais (PCA). Estudos de Edis *et al.* (2015) aplicaram esse método para detectar umidade em fachada e concluíram que a análise PCA obteve melhor desempenho. A PCA é uma correlação entre variáveis inter-relacionadas (qualidade dos termogramas e *pixels*) em uma matriz, podendo ser investigada ao longo do tempo e com potencial para eliminar falsas indicações oriunda de reflexão e sombra (SFARRA *et al.*, 2019; YOUSEFI *et al.*, 2017).

### **2.3.2 Termografia passiva e ativa**

Existem duas técnicas empregadas no uso da termografia: a técnica passiva e a ativa. Na termografia passiva os materiais contêm armazenamento interno de energia térmica ou são estimulados por uma fonte natural de calor (energia solar). A técnica ativa envolve o aquecimento ou resfriamento dos materiais para provocar um fluxo de calor e o gradiente térmico necessário (MALDAGUE, 2001)

A termografia passiva é geralmente utilizada para análise qualitativa em inspeções de fachadas, componentes elétricos, maquinários industriais, monitoramento em tempo real de deformações durante carregamento, aplicações médicas entre outras finalidades. Por meio desta técnica, a diferença de temperatura na região em estudo pode indicar a presença de anomalias, sendo um método apropriado para a identificação de defeitos antes da realização de análises com métodos mais avançados (BAUER *et al.*, 2014).

Na inspeção de fachadas, a termografia passiva pode estar sujeita a vários intervenientes, classificados por Maldague (2001) da seguinte forma: (i) Condições padrões: emissividade, refletividade, rugosidade ou desnível, manchas, cor da superfície da parede; (ii) Condições climáticas: radiação solar, cobertura de nuvens, luz solar direta, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, umidade superficial e os gradientes de temperatura do ar exterior; (iii) Condições ambientais: ângulo de visão, distância, orientação da construção e existência de fontes geradoras de calor.

A abordagem ativa, ao contrário da passiva, requer uma fonte externa de calor para induzir um gradiente de temperatura nos materiais a serem inspecionados. Geralmente é estimulada

por fontes: pulsadas, de pulso longo, modulado, vibrado e dinâmica e, constantemente, aplicada em pesquisas que desejam resultados quantitativos (BARREIRA *et al.*, 2015).

As fontes pulsadas são uma das mais comuns para estimulação térmica. Uma das razões é que para materiais de alta condutibilidade as estimulações podem ser realizadas com pulsos baixos e duradouros ou pulsos altos e breves (MALDAGUE, 2001).

Na estimulação por pulso longo, o incremento de temperatura na superfície pode ser monitorado a cada estímulo de temperatura. Essa técnica é a mais aplicada para estudos nos materiais de construção, tais como avaliação de espessura de revestimento, aderência do substrato ou avaliação de estruturas compostas (MALDAGUE, 2001). A termografia de pulso longo e contínuo também pode ser empregada com o intuito de observar ao longo de um período prolongado de aquecimento e arrefecimento as alterações na superfície do material derivado de defeitos preexistentes (BAUER *et al.*, 2014).

Na termografia modulada (*lock-in thermography*) ondas térmicas são geradas dentro de um espécime e detectadas remotamente. As ondas geradas e refletidas sofrem interferência com as ondas da superfície, resultando em um campo de temperatura oscilante em regime estacionário, monitorado remotamente por câmeras térmicas infravermelhas. Esta modalidade de fonte funciona por indução de vibrações mecânicas externamente, para a avaliação das mudanças de temperatura em regiões defeituosas (MALDAGUE, 2001).

A termografia dinâmica ativa é uma técnica que examina a resposta térmica de um material para um estímulo aplicado. A técnica é baseada no princípio de que as regiões de um objeto com diferentes propriedades térmicas atenuam a transmissão de energia diferentemente de seus arredores, que pode ser relacionado ao tamanho e posição de uma área de defeitos. O estímulo aplicado pode tomar a forma de radiação IR, ultra-som aquecimento ou resfriamento com CO<sub>2</sub>, com grandes proporções de estudos nas áreas médicas, aviação e detecção de falhas em materiais (SAXENA *et al.*, 2018; PRINDEZE *et al.*, 2018).

## **2.4 TERMOGRAFIA QUANTITATIVA EM ESTUDO DE FACHADAS**

Neste capítulo será dado ênfase em alguns trabalhos encontrados nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, que utilizaram análises quantitativas de anomalias em elementos

construtivos e em fachadas de edifícios. Destaca-se entre os recursos necessários para as análises quantitativas as representações gráficas, funções de contrastes ou análise dos componentes principais.

### 2.4.1 Funções de Contrastes

As funções de contrastes são ferramentas auxiliares na identificação de defeitos. Nos estudos de materiais e elementos de construção são aplicadas na determinação do melhor momento para a identificação dos defeitos. Maldague (2001) em seu livro destaca quatro tipos de contraste, sendo eles: *Absolute contrast*  $C^a(t)$ ; *Running contrast*  $C^r(t)$ ; *Normalized contrast*  $C^n(t)$  e *Standard contrast*  $C^s$ .

O contraste absoluto (*Absolute contrast*  $C^a(t)$ ) também conhecido por Delta – T é um parâmetro aplicado em praticamente todas as análises quantitativas para identificação de defeitos. O valor do contraste absoluto consiste no cálculo da diferença de temperatura da área com defeito e da temperatura da área sem defeito ou normal em um determinado instante (Equação 6).

$$C(t) = T_{\text{def}}(t) - T_s(t) \quad (6)$$

Onde:

Delta-T: diferença de temperatura

$T_{\text{def}}(t)$ : Temperatura do defeito no instante (t);

$T_s(t)$ : Temperatura da superfície de referência no tempo (t);

O contraste corrido (*Running contrast*  $C^r(t)$ ), é o menos afetado pelas propriedades óticas superficiais, porque os pontos suspeitos e não defeituosos são localizados em áreas da mesma emissividade/absortividade, também depende menos da energia absorvida. Este contraste é calculado da seguinte forma (Equação 7):

$$C^r(t) = \frac{C^a(t)}{T_s(t)} = \frac{\Delta T(t)}{T_s(t)} \quad (7)$$

Onde:

$C^r(t)$ : Contraste corrido;

$C^a(t)$ : Contraste absoluto;

$\Delta T$ : Delta- T, diferença de temperatura;

$T_s(t)$ : Temperatura da superfície de referência no tempo (t);

O contraste normalizado (*Normalized contrast*  $C^n(t)$ ) é calculado com relação aos valores de temperatura em determinado instante ( $t_m$ ) quando a temperatura máxima é excedida (este parâmetro depende do estímulo de aquecimento). A normalização pode ser calculada com valores no final do processo térmico (Equação 8).

$$C^n(t) = \frac{T_{def}(t) - T_s(t)}{T_{def}(t_m) - T_s(t_m)} \quad (8)$$

Onde:

$C^n(t)$ : Contraste normalizado;

$T_{def}(t)$ : Temperatura do defeito no instante (t);

$T_{def}(t_m)$ : Temperatura do defeito no instante ( $t_m$ );

$T_s(t)$ : Temperatura da superfície de referência no tempo (t);

$T_s(t_m)$ : Temperatura da superfície de referência no instante ( $t_m$ );

O contraste padrão (*Standard contrast*  $C^s$ ) é calculado antes da distribuição da temperatura de aquecimento no tempo  $t_0$  (para suprimir as contribuições adversas do ambiente no entorno) e regularizada pelo comportamento de uma área sólida. Um valor unitário é obtido sobre uma área não defeituosa, calculado da seguinte forma Equação 9:

$$C^s(t) = \frac{T_{def}(t) - T_{def}(t_0)}{T_s(t) - T_s(t_0)} \quad (9)$$

Onde:

$C^s(t)$ : Contraste padrão;

$T_{def}(t)$ : Temperatura do defeito no tempo (t);

$T_{def}(t_0)$ : Temperatura do defeito no tempo ( $t_0$ );

$T_s(t)$ : Temperatura superfície no tempo (t);

$T_s(t_0)$ : Temperatura superfície no tempo ( $t_0$ ).

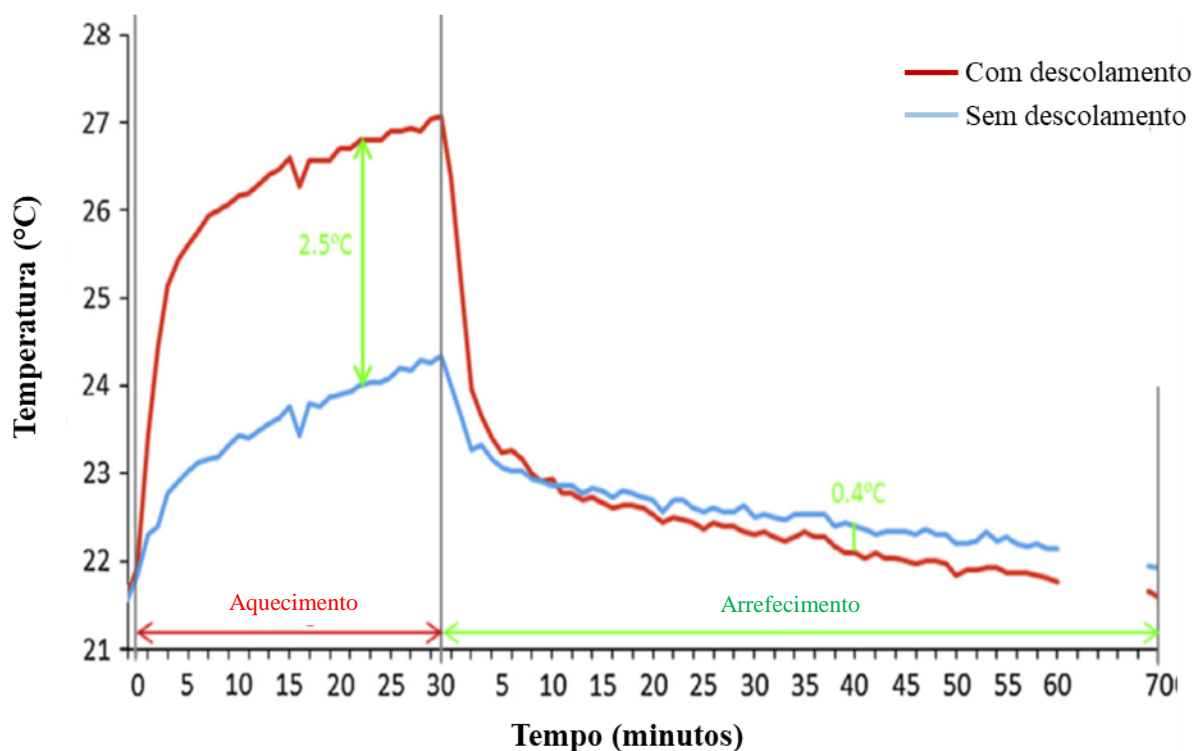
A função de contraste Delta-T (contraste absoluto) é a mais empregada para investigar defeitos e permite acompanhar a evolução da temperatura da anomalia em relação a uma região de referência ao longo do tempo. Nessa perspectiva, o Delta - T tem sido aplicado nas análises de defeitos por meio da termografia passiva (BAUER *et al.*, 2015), parâmetro para investigação de fissuras em fachadas (FREITAS *et al.*, 2014; BAUER *et al.*, 2018), para detecção de umidade em fachadas de revestimentos cerâmicos (EDIS *et al.*, 2014, BARREIRA *et al.*, 2014), para detecção de vazios e descolamentos no interior de placas de concreto (COTIČ *et al.*, 2015; CHENG *et al.*, 2008) e detecção dos melhores momentos para inspeção de descolamento cerâmico (PÁVON, 2017; LOURENÇO, 2017).

Ao avaliar o comportamento do Delta - T para detectar precocemente descolamento e presença de umidade em revestimento, Lourenço *et al.* (2017) utilizaram placas de duas cores e acompanharam a evolução do Delta - T durante o dia e o começo da noite. Mediante os resultados obtidos com o Delta - T, concluíram que os melhores períodos para detecção de descolamento são no início da incidência solar na fachada, ou no início do período de arrefecimento. Em relação a umidade, comentaram que esta pode ser inspecionada durante o dia, sendo identificada geralmente nos termogramas como áreas com temperatura mais baixa devido o processo de evaporação. Os pesquisadores também perceberam que o Delta - T foi sempre maior para as placas de coloração preta por possui maior absorvidade.

Na simulação de descolamento é comum o emprego do Delta - T, também para essa finalidade, Freitas *et al.* (2014) provocaram um vazio entre a camada de revestimento e a alvenaria. Os autores constataram que a presença de ar entre as camadas introduz resistência térmica e modifica a temperatura, tornando fácil a identificação da patologia. A Figura 9 mostra o comportamento da temperatura da região com e sem descolamento em aquecimento no ciclo direto.



Figura 9 - Análise do Delta-T em descolamento de gesso, no ciclo de aquecimento e arrefecimento



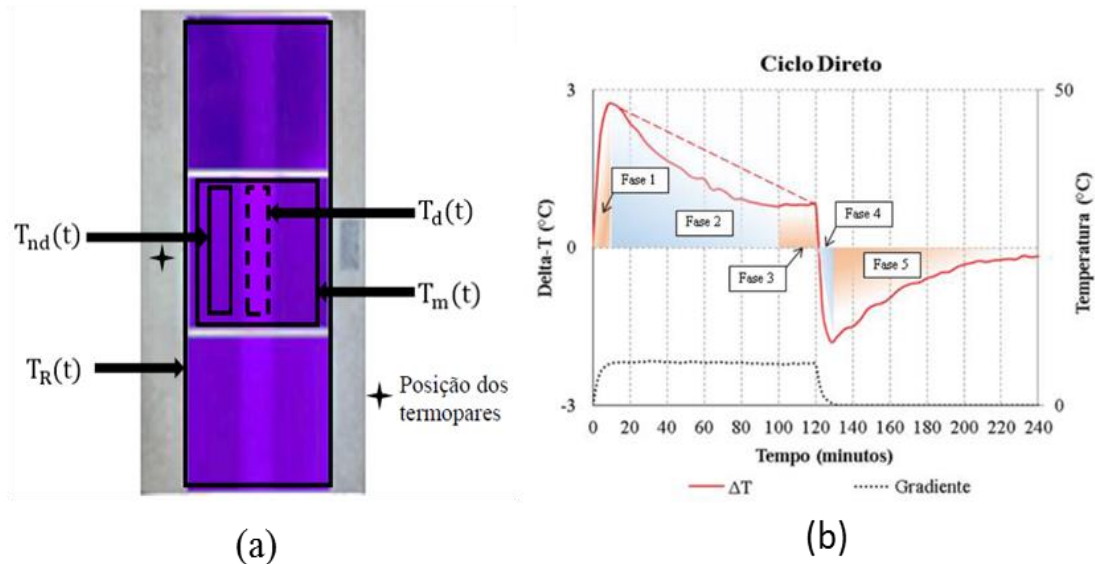
Fonte: Modificada Freitas *et al.* (2014)

A Figura 9 mostra a comparação entre áreas com defeito e sem defeito, percebe-se graficamente que a temperatura da área destacada alterou com muita intensidade comparada com a área sem defeito, atingindo um Delta – T no aquecimento mais de 2,5 °C. No arrefecimento, houve uma queda acentuada de temperatura no descolamento que se tornou igual à área sem descolamento após 10 minutos. Depois dos 40 minutos, o Delta – T foi de 0,4 °C menor do que na área sem defeito. De modo geral, os autores concluíram que o uso de técnicas não destrutivas é essencial para detectar patologias e analisar o comportamento das fachadas. Os testes laboratoriais provaram que os descolamentos são fáceis de detectar, a camada de ar entre o gesso e alvenaria introduzem uma resistência térmica e altera a distribuição de temperatura, provocando diferenças significativas em termos de comportamento, facilitando a detecção precoce de anomalia.

Para determinar o Delta – T em placas simuladas em laboratório com presença de descolamento cerâmico, Pavón (2017) utilizou a termografia ativa para aquecimento dos corpos de prova, por meio de um sistema de lâmpadas de aquecimento. O aquecimento contínuo possibilitou a investigação de descolamento cerâmico, mediante cálculo da diferença

da temperatura média da área marcada como região sem defeito ( $T_{nd}$ ) e com defeito ( $T_d$ ) em termogramas obtidos a cada 4 minutos. A Figura 10(a) mostra as áreas  $T_{nd}$  e  $T_d$  nos termogramas e a Figura 10(b) apresenta o comportamento do Delta – T.

Figura 10 – Descolamento (a) Determinação das temperaturas nas placas cerâmicas (b) Comportamento padrão do Delta-T no ciclo direto no estudo de placas



Fonte: Pavón (2017)

Pavón (2017) dividiu o comportamento do Delta – T em cinco Fases:

- Fase 1: Referente ao rápido crescimento do Delta, juntamente com o rápido crescimento do gradiente. Nessa fase, foi obtido o máximo valor do Delta – T quando o gradiente de temperatura no período inicial chega ao valor máximo (Fase 1).
- Fase 2: Corresponde a fase de decréscimos do Delta – T, de acordo com o autor nessa fase ocorre a movimentação do calor para as laterais do defeito.
- Fase 3: Está relacionada à condição estacionária, no qual o Delta – T tende a ser constante.
- Fase 4: Período onde aparece as maiores diferenças de temperatura entre a superfície revestida e o ambiente e no qual são obtidos então os máximos valores de Delta-T.
- Fase 5: Final do arrefecimento, na qual 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.

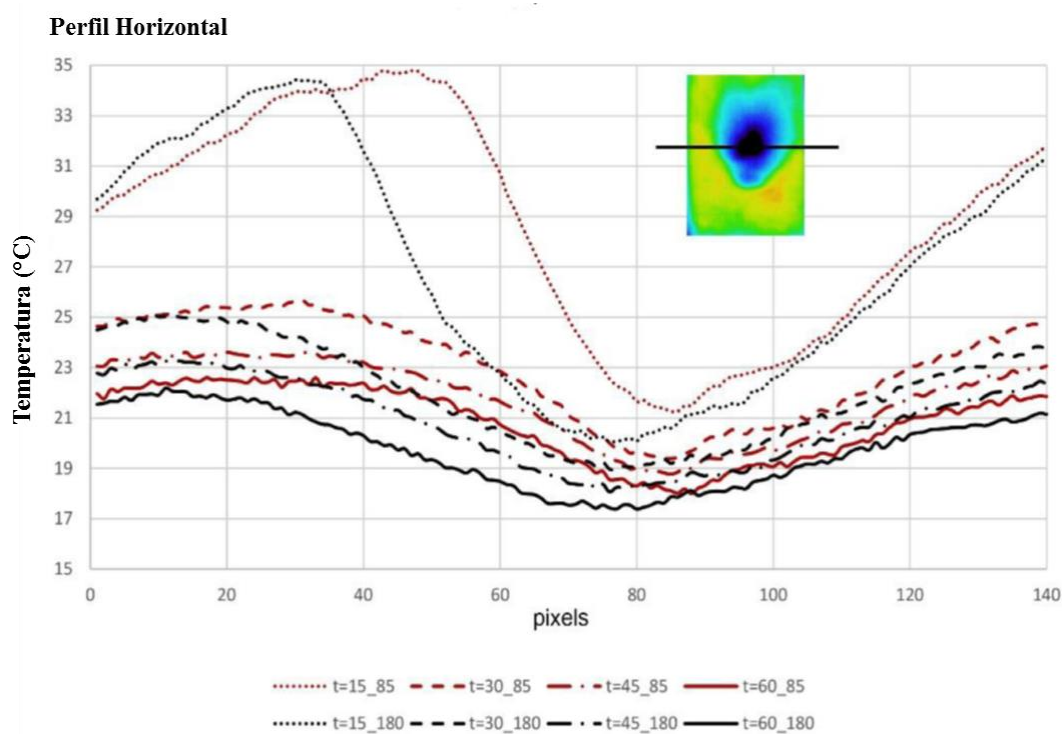
As investigações das fases concluíram que os máximos valores do Delta – T são obtidos no início do aquecimento e arrefecimento. No aquecimento, o fenômeno ocorre devido ao rápido crescimento da temperatura das áreas com e sem defeito, junto ao crescimento do gradiente de calor que atravessa a placa. Estes valores começam a diminuir quando o gradiente de temperatura fica constante e as temperaturas das superfícies têm um crescimento mais lento. Na etapa de arrefecimento, decorre da queda brusca de temperaturas da superfície pelo desligamento das lâmpadas.

#### **2.4.2 Representações Gráficas**

As representações gráficas dispõem os valores de temperatura de linhas e áreas em eixos X, Y e em alguns casos eixo Z dos *pixels*, para posteriormente, construir gráficos em 2D ou 3D. Os gráficos podem ser utilizados como ferramenta para mensurar defeitos, como também para auxiliar na determinação do Delta – T.

O método gráfico foi utilizado por Lerma *et al.* (2018) para apresentar o comportamento dos perfis de linha de temperatura ao estudar o potencial da termografia ativa para detectar pontos de vazamento de ar. A metodologia foi baseada no aquecimento de uma folha de cartolina, através de um calor artificial e no registro da evolução da temperatura em diferente pressão (85 Pa e 180 Pa), controladas pelo algoritmo *Blower Door*. Os resultados dos perfis de temperatura são mostrados em Figura 11.

Figura 11 - Perfis horizontais de temperatura

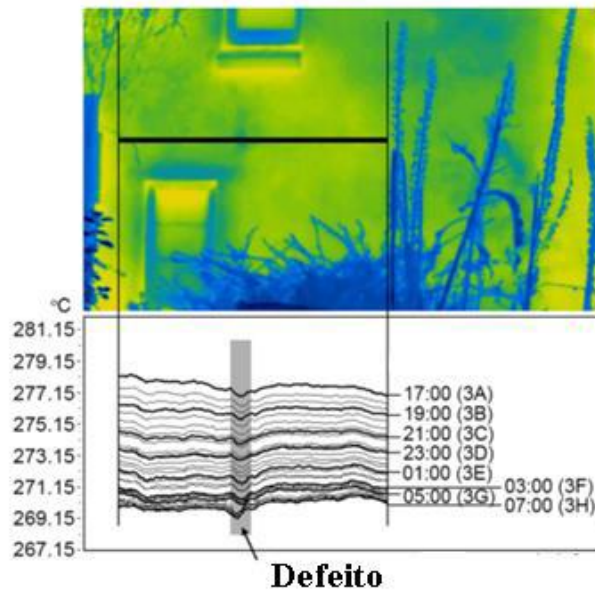


Fonte: Lerma *et al.* (2018)

Perfis de temperatura também podem ser usados para analisar numericamente os termogramas. A Figura 11 mostra os perfis de temperatura horizontal e, mais uma vez, é evidente como a diminuição da temperatura é mais notável nos primeiros instantes. O efeito da pressão mais alta também pode ser identificado pela queda de temperatura mais pronunciada (formato V) que se torna menos evidente ao longo do tempo, à medida que o equilíbrio térmico está sendo alcançado. De modo geral, o método apresentado permitiu detectar a posição exata da infiltração de ar na folha de cartolina. Os resultados permitiram concluir que o IRT ativo aumenta o contraste térmico e a área afetada, provando que o IRT ativo combinado com as diferenças de pressão é uma metodologia eficaz para detectar infiltrações de ar.

No estudo de descolamento cerâmico, Fox *et al.* (2015) utilizaram o método gráfico para representar os valores de temperatura dos *pixels* da linha que atravessa o defeito em uma análise multi-temporal. A inspeção foi realizada durante o período de 17h até às 5h, horário em que o fluxo de calor está saindo da fachada para o exterior. O comportamento das linhas em forma de “onda”, observados na Figura 12, indicaram a presença de um descolamento no revestimento em argamassa com valores negativos (Fox *et al.*,2015).

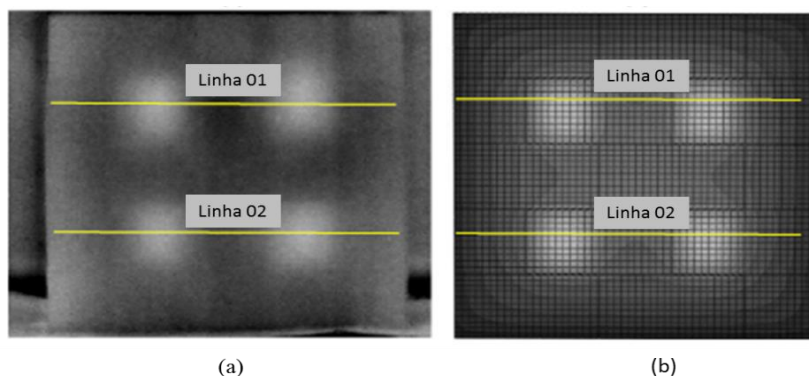
Figura 12 – Representação gráfica do comportamento da linha de temperatura que atravessa o descolamento no revestimento



Fonte: Fox *et al.* (2015)

Khan *et al.* (2015) combinaram os dois métodos, experimental e numérico, para prever a transferência de calor em modelos de alvenaria de diferentes dimensões. Foram construídas uma pequena parede de alvenaria e uma grande parede de alvenaria com dimensões de 1,01 m x 1,02 m x 0,20 m e 3,64 m x 3,68 m x 0,20 m, respectivamente. A pequena parede foi parcialmente rebocada e havia quatro regiões dentro da parede com presença de vazios induzidos, não grauteada com dimensões de 0,2 x 0,2 m cada. De maneira semelhante a grande parede contou com regiões não grauteadas de 1,42 x 1,42 m. Inicialmente aplicou o método da linha em um dos termogramas obtidos, o método experimental - EXP (Figura 13a) e no modelo de elementos finitos - FEM (Figura 13b).

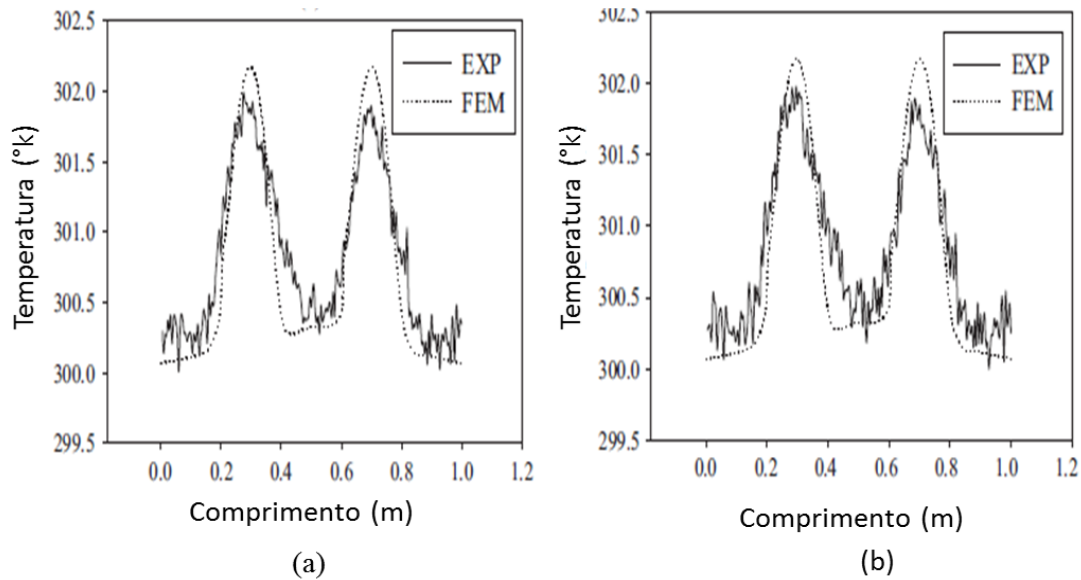
Figura 13 - Mapa da temperatura da superfície em pequena parede de alvenaria (a) obtida experimentalmente nos termogramas (b) obtida no modelo de elementos finitos



Fonte: Adaptado de Khan *et al.* (2015)

Os resultados expressos em perfis de temperatura das linhas investigadas, referente ao método experimental (EXP) e ao modelo de elementos finitos (FEM), estão expostos na Figura 14.

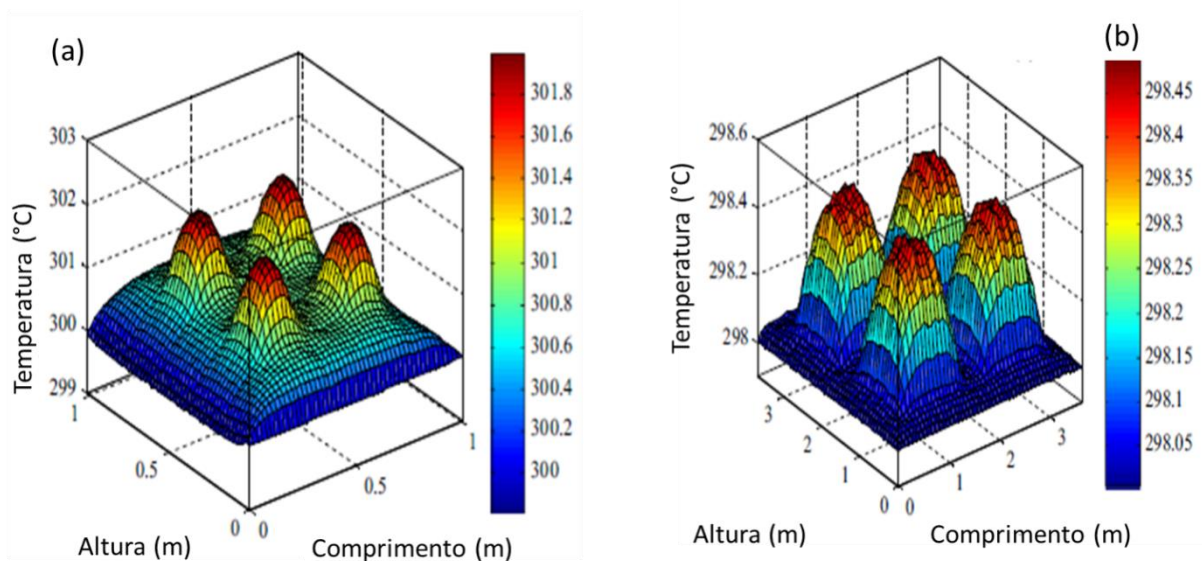
Figura 14 - Perfis de temperatura das linhas investigadas (a) ao longo da linha 1 e (b) da linha 2



Fonte: Adaptado de Khan *et al.* (2015)

Os dados obtidos na varredura por meio da termografia foram utilizados para obter as temperaturas de contorno da superfície. Dessa forma, foi possível realizar a análise numérica como mostra a Figura 15, nas quais é exposta a temperatura da superfície de contorno para uma pequena parede (a) e uma grande parede (b) de alvenaria.

Figura 15 - Contorno da superfície frontal do modelo FEM para duas diferentes amostras de alvenaria de concreto escalonado (a) pequena parede de alvenaria (b) grande parede de alvenaria



Fonte: Adaptada de Khan *et al.* (2015)

Os autores concluíram que as ferramentas de análise possibilitaram observar a intensidade da diferença de temperatura entre as regiões com e sem revestimento. Tanto para a análise experimental como numérica. Evidenciou-se a transferência de calor em paredes de alvenaria de concreto parcialmente rebocadas por meio da termografia ativa no concreto.

### **2.4.3 Análise de Componentes Principais**

Existe também na literatura técnicas utilizadas no pós-processamento das imagens termográficas. Como exemplo, a termografia dos elementos principais definidas por Rajic (2002), como técnica para extrair os recursos das imagens termográficas, reduzindo sinais indesejáveis e ruídos. A técnica compacta a dimensão dos dados de uma matriz, mas mantém a sua estrutura original por meio de funções ortogonais (EOF). A EOF constrói um conjunto de modos estatísticos ortogonais em uma matriz de dados que fornece projeção mais forte dos resultados.

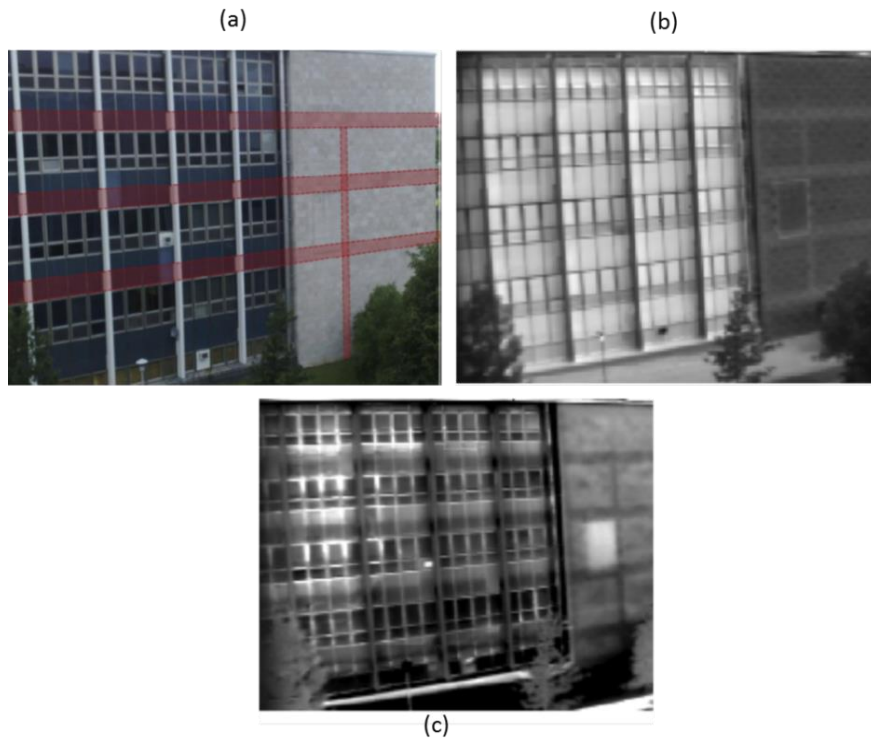
A termografia do componente principal tem sido utilizada na avaliação de falhas estruturais em materiais compósitos, problemas de umidade (GRINZATO *et al.*, 2010), avaliação de descolamento (EDIS *et al.*, 2015a), detecção de áreas reparada (IBARRA-CASTANEDO *et al.*, 2017a) e inspeção de patrimônio histórico (IBARRA-CASTANEDO *et al.*, 2017b).

A termografia de componente principal pode ser utilizada para produzir altos níveis de contraste térmico para falhas estruturais em materiais compósitos. Os resultados dessa técnica para essa finalidade devem resultar em melhor detectabilidade de falhas em comparação com procedimentos termográficos. Além disso, a técnica também fornece uma base para caracterizar a profundidade da falha quando usado em conjunto com uma expressão analítica simples (Rajic, 2002).

As técnicas avançadas de processamento de sinal podem ser aplicadas na investigação de estruturas internas de patrimônio histórico, com o intuito de aumentar a relação sinal-ruído. Para isso fim, Ibarra-Castanedo *et al.* (2017b) inspecionou um edifício histórico, no qual a aquisição dos dados foi realizada em uma configuração estática mediante gravação direta, acompanhando as variações na incidência solar durante vários dias. Nessa investigação, para melhorar o contraste térmico, foram aplicadas técnicas de processamento de sinal avançando como ACP para a sequência de termogramas, apresentando nitidamente os elementos sub-

superficiais. A Figura 16(a) destaca as áreas onde os elementos de interesse estão localizados. A Figura 16(b) mostra um termograma da região investigada e a Figura 16(c) revela um termograma melhorado por componentes principais.

Figura 16 – ACP. (a) Vista da parede destacando a localização dos suportes estruturais (b) Termograma (c) Termograma melhorado com base no ACP



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

As quatro linhas escuras observadas na Figura 16(c), indo de um lado para o outro do prédio, provavelmente correspondente à assinatura térmica das lajes de concreto de cada andar do edifício. De modo geral, os autores concluíram que o contraste térmico melhorou após a aplicação do processamento de sinal avançado (ACP) para a sequência de termogramas aplicados. No entanto, ressaltaram a necessidade de mais investigações na aplicação dessa técnica para levantamento não invasivo de elementos estruturais mais profundos.

## 2.5 INVESTIGAÇÃO DE ANOMALIAS NA ENVOLTÓRIA DOS EDIFÍCIOS COM A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO

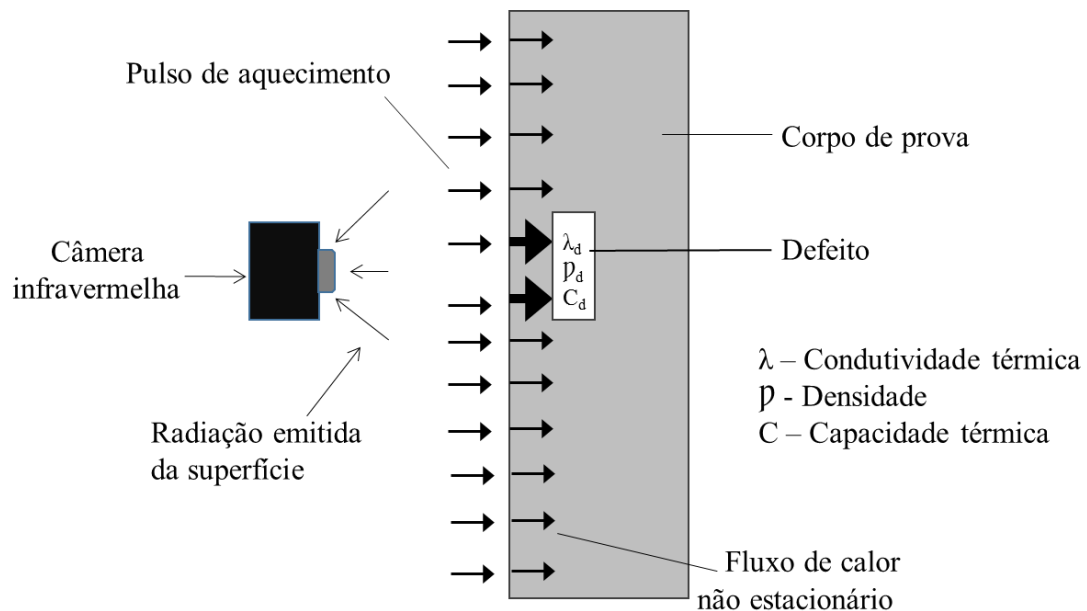
As fachadas estão diretamente expostas aos raios solares e aos mecanismos de transporte de calor, que em conjunto alteram a temperatura da superfície. A termografia de infravermelho, na análise de campo da temperatura, é capaz de identificar anomalias internas e superficiais



porque é sensível aos vazios provocados pelos defeitos, à presença de água e elementos ocultos. Esses defeitos reduzem a taxa de difusão devido às suas características térmicas distintas e, provocam uma alteração na propagação da temperatura superficial da estrutura em comparação com a temperatura difundida em uma estrutura íntegra (MALDAGUE, 2001; TAVARES, 2012).

Por meio da perturbação que a anomalia causa ao fluxo de calor é possível identificá-la e quantificá-la nos termogramas, tendo em vista que o defeito possui condutividade térmica, densidade e capacidade térmica distinta (MALDAGUE, 2001; PAVON, 2017; DUFOUR *et al*, 2009). A Figura 17 exemplifica um corpo de prova com presença de defeito, submetida ao fluxo direto e sendo monitorada.

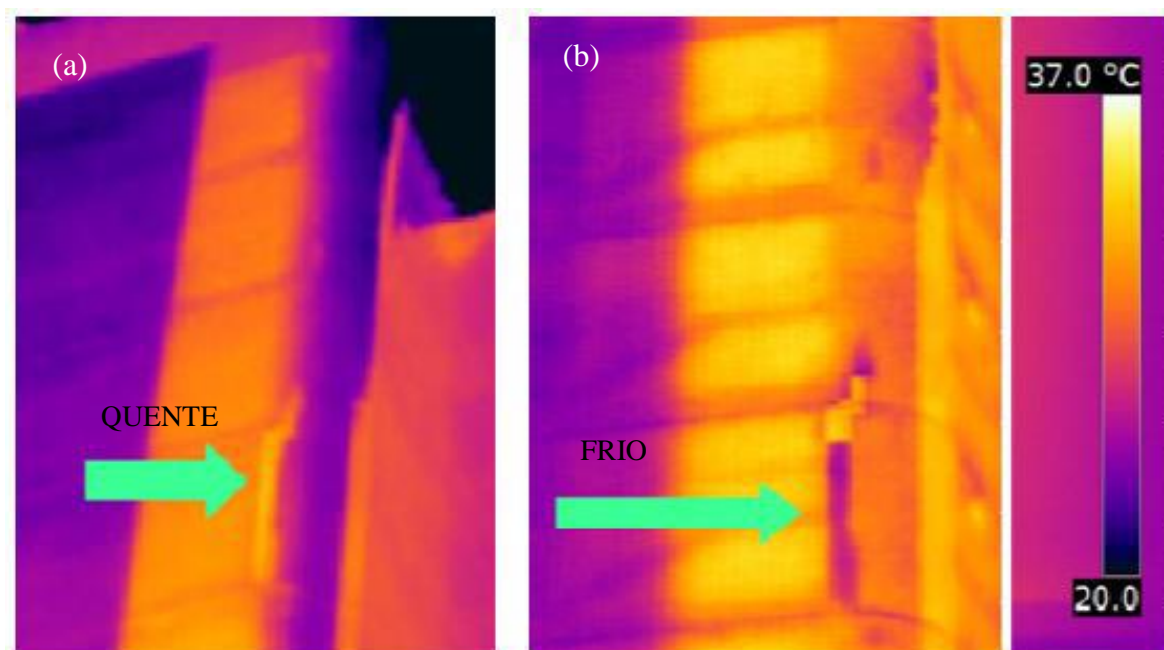
Figura 17 - Exemplo de protótipo de fachada com defeito monitorado com fluxo no sentido direto



Fonte: Adaptado de Maldague (2001)

A identificação de anomalias superficiais e subsuperficiais se torna possível, por que a temperatura do material onde localiza-se o defeito é modificada diferentemente da região íntegra após a difusão térmica. As patologias encontradas nas fachadas podem aparecer de forma diferente nos termogramas, a depender do seu tamanho, profundidade, intensidade e sentido do fluxo de calor, exibindo-se como zona mais fria ou mais quente. Este comportamento pode ser observado na Figura 18, na qual o defeito aparece como temperatura maior no sentido direto e menor no sentido reverso, respectivamente.

Figura 18 – Análise de defeito em diferentes sentidos do fluxo de calor (a) Defeito com temperatura maior no sentido direto (b) Defeito com temperatura menor no sentido reverso.



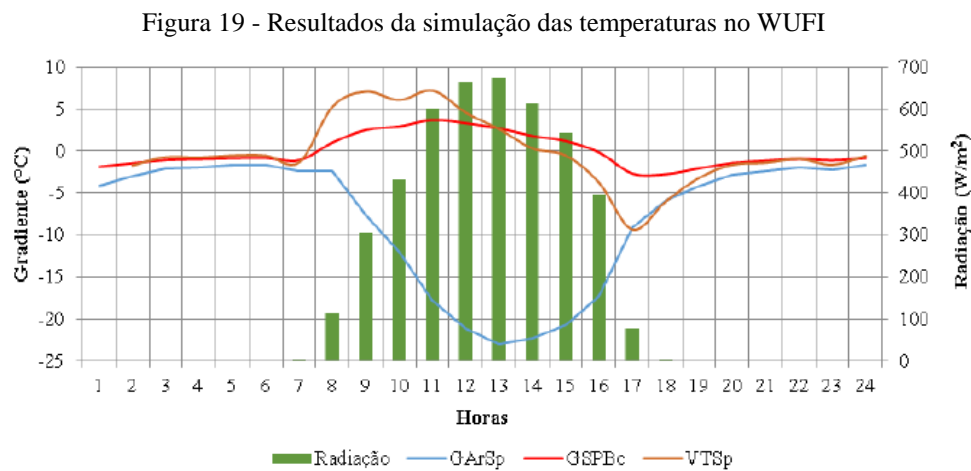
Fonte: Bauer *et al.* (2015a)

O monitoramento da temperatura ao longo do tempo permite avaliar o fluxo de calor o qual pode ter o sentido para dentro da fachada, quando a sua superfície está mais quente que o interior, e para fora da fachada, na situação inversa. Para tanto, encontrar o momento em que é possível obter os maiores contrastes é primordial nas inspeções, uma vez que devido à tendência de homogeneidade do sistema, há momentos nos quais não é possível detectar anomalias nos termogramas, principalmente após longos períodos de aquecimento e arrefecimento (MALDAGUE, 2001; IBARRA-CASTANEDO *et al.*, 2017; PAVÓN, 2017).

Nestas circunstâncias, as simulações higrótérmicas vêm sendo empregadas com a finalidade de auxiliar na determinação do melhor momento para a análise da fachada, mediante o entendimento do seu respectivo fluxo de calor antes da inspeção. Com esse objetivo, Pavón (2017) utilizou o software WUFI PRO 5.3 de simulação higrótérmica para determinar o comportamento dos gradientes de temperatura nas fachadas em estudo. O *software* foi utilizado nas condições climáticas de Brasília, para auxiliá-lo na escolha dos melhores momentos de inspeção, com a posterior avaliação da presença de defeitos em fachadas revestidas com placas cerâmicas. Por meio desse *software* o fluxo de calor pela fachada pode ser quantificado, permitindo monitorar os gradientes de temperatura oriundos do fluxo desde o momento inicial de aquecimento, onde a fachada é aquecida pela radiação solar direta ou

indiretamente, até seu total resfriamento, quando não está sob a influência desse agente (FREITAS *et al.*, 2014).

A Figura 19 apresenta os resultados da simulação higrótérmica para uma fachada investigada por Pavón (2017). A fachada em questão refere-se a um edifício localizado na cidade de Brasília, tem orientação leste e recebe calor principalmente no horário da tarde.



Fonte: Pavón (2017)

Uma análise direta dos resultados fornecidos pelo WUFI permitiu concluir que a fachada recebe radiação direta das 8h às 17h, com o valor máximo de radiação registrado às 13h. A Figura 19 também mostra os valores de radiação para a fachada ao longo do dia, bem como a Variação de Temperatura da Superfície (VTSp), os gradientes entre o ar e a superfície (GArSp) e entre a superfície e o bloco (GSpBc). Com base em investigações preliminares em laboratório, o melhor momento para a avaliação do defeito, coincidiu com o momento de maior crescimento do VTSp média da superfície dentro do intervalo positivo do gradiente entre a superfície frontal e o bloco (GSpBc). Partindo dessa premissa, o autor definiu às 9h e às 11h como os momentos ótimos para a avaliação do defeito e determinação do seu respectivo tamanho.

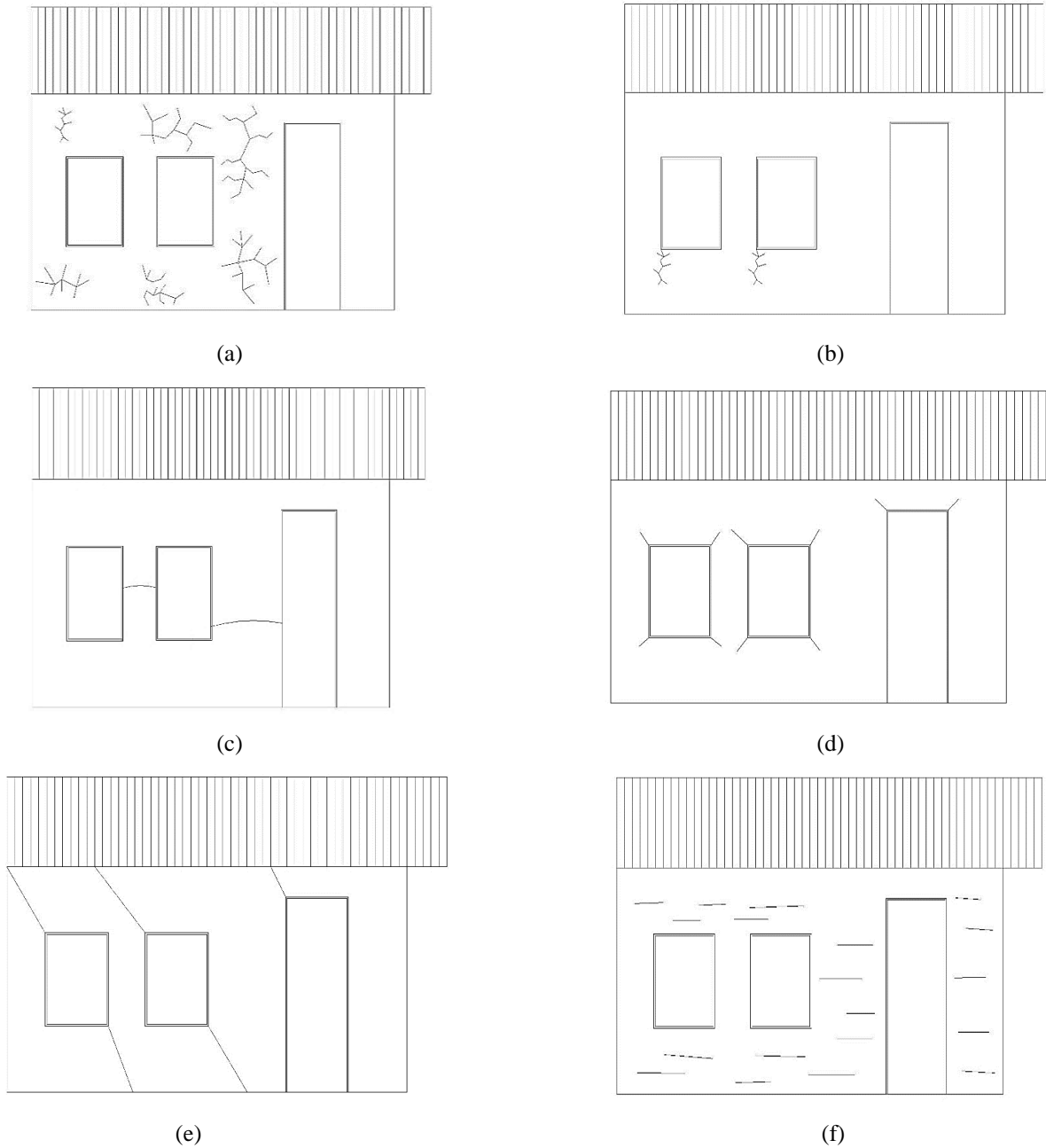
### 2.5.1 Aplicações da termografia na investigação de fissuras

As fissuras são caminhos propícios para a penetração de agentes agressivos externos, especialmente a água, fato que pode induzir ao surgimento de novas manifestações patológicas, como eflorescências, manchas de umidade, bolor ou mofo, corrosão de armaduras e descolamento de placas cerâmicas, prejudicial ao desempenho, à durabilidade e à

qualidade estética dos revestimentos. Além de indicar sérios problemas estruturais, permitir a infiltração de ar, perda de calor e perda de isolamento acústico, reduzindo a eficiência do edifício (SILVA, 2014; ANTUNES, 2010).

As fissuras podem ser classificadas como ativas, caso há variação da abertura em função de movimentações higroscópicas, por exemplo, ou passivas quando a abertura é constante. A fissuração nos revestimentos pode ter inúmeras causas tornando seu diagnóstico complexo. Podem originar-se por erros em projetos, falhas na execução, na seleção dos materiais constituintes e até mesmo no proporcionamento dos materiais (CARASEK, 2010; BAUER, 1997). Thomaz (1989) destacou em seu livro os seguintes fatores: movimentações térmicas, movimentações higroscópicas, atuação de sobrecargas, deformabilidade excessiva de estruturas de concreto armado, recalque de fundações, retração de produtos à base de cimento e alterações químicas dos materiais. A Figura 20 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) mostram a tipologia das fissuras para cada mecanismo mencionado.

Figura 20 - Configuração das fissuras nos revestimentos (a) Retração de produtos à base de cimentos (b) Movimentações higroscópicas (c) Movimentação térmica (d) Atuação de sobrecargas (e) Recalques (f) Alterações Químicas.



Fonte: Adaptado de Thomaz (1989)

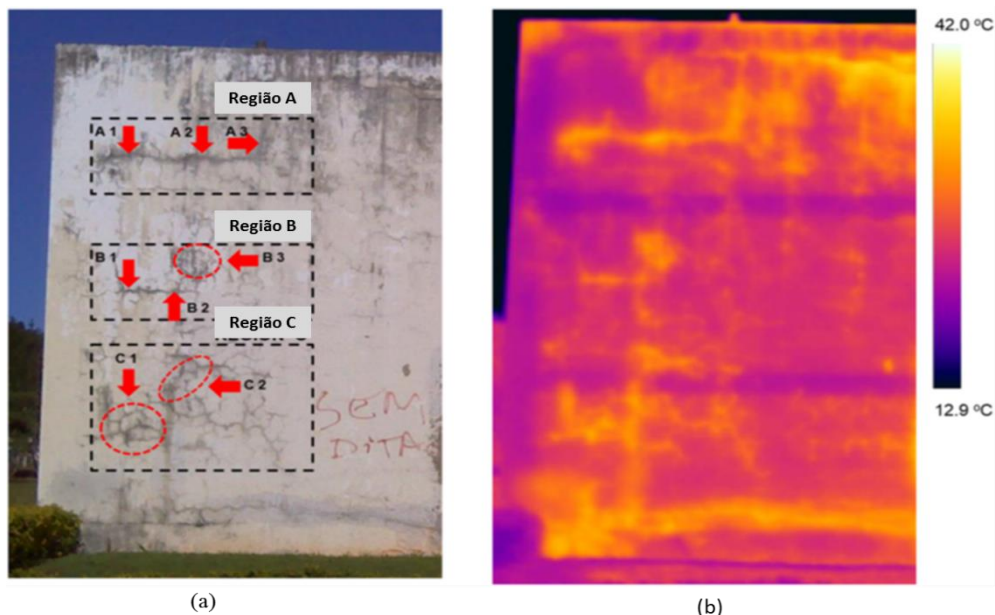
A termografia infravermelha pode ser utilizada na avaliação de fissuras, uma vez que a camada de ar dentro da fissura e sua geometria estreita, são dois dos fatores que facilitam sua detecção nos termogramas. Maldague (2001) enfatiza que para detecção de fissuras superficiais, precisa ocorrer uma propagação de temperatura ao longo da superfície que está sendo aquecida. O aquecimento pode ser realizado por meio da colocação da amostra sobre uma fonte de calor,

ou com o uso de lâmpadas. Nessa situação, caso exista fissuras na superfície, está irá apresentar uma resistência maior ao fluxo de calor conduzindo a um diferencial de temperatura detectável pela câmera termográfica.

Um dos procedimentos destacado por Maldague (2001) para detectar fissuras chama-se “*Lateral heating*” (aquecimento lateral). Neste procedimento um projetor é utilizado como fonte de calor para aquecer determinadas zonas da superfície gerando fluxo de calor. A presença de fissuras atua como resistência térmica, diminuindo a propagação lateral e concentra calor na zona da fratura. Novamente, a câmera termográfica detecta a diferença de temperatura. O autor destaca que a estimulação térmica também pode ser realizada por lâmpadas.

Na aplicação da termografia infravermelha para investigação de fissuras em fachadas, Bauer *et al.* (2016a) inspecionou um edifício na cidade de Brasília – Brasil revestido com argamassa e, como resultado, foram encontradas altas concentrações de fissuras, em sua maioria ramificadas. A Figura 21 mostra os pontos escolhidos para o estudo termográfico e um dos termogramas obtidos.

Figura 21 - Fachada fissurada (a) Regiões e pontos analisados (b) Termograma obtido para um determinado tempo de inspeção.

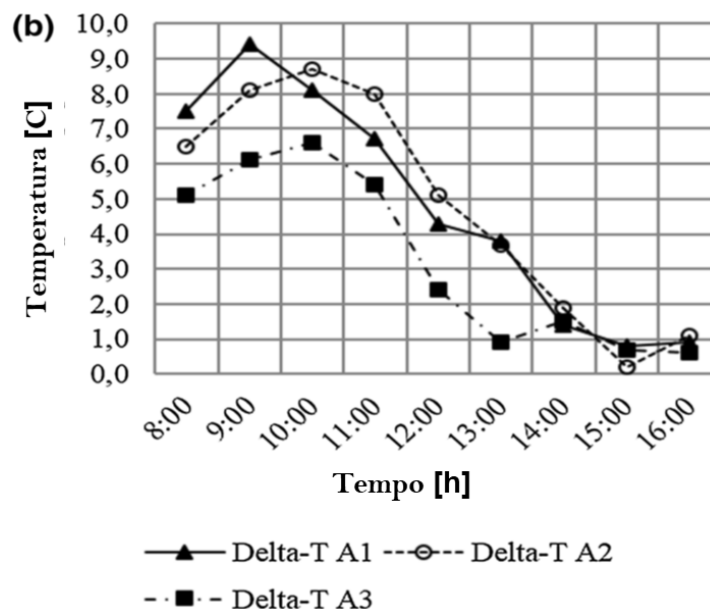


Fonte: Bauer *et al.* (2016b)

Nesse estudo, os resultados de  $\Delta T$  permaneceram positivos durante todo o dia e o período da manhã mostrou-se melhor para a inspeção termográfica, quando os maiores valores

de Delta-T foram registrados, como mostra a Figura 22 Os autores afirmam que as fissuras ramificadas são difíceis de analisar quantitativamente, contudo, podem ser identificadas visualmente em regiões com maiores valores de Delta-T.

Figura 22 - Região A: Evolução dos Deltas - T

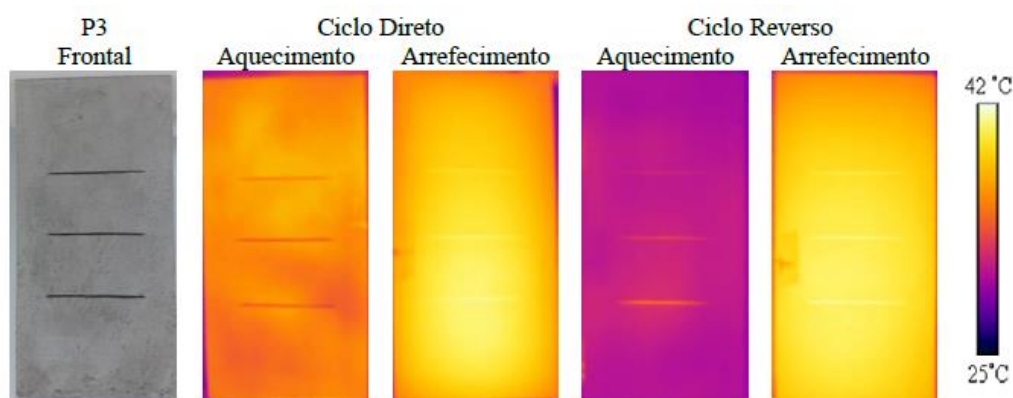


Fonte: Bauer *et al.* (2016b)

Ao explorar em laboratório o potencial da termografia infravermelha na detecção de microfissuras em condições de molhagem e secagem do revestimento argamassado Barreira *et al.* (2014) constataram que os testes em laboratório e *in situ* foram limitados na investigação dessa patologia, pois são altamente dependentes das condições climáticas que levam a molhagem e secagem da superfície, necessitando de mais estudos que explorem essa técnica.

Pavón (2017) também avaliou o alcance da termografia com relação a profundidade e a separação da superfície em revestimento argamassado com fissuras visíveis e ocultas, em ciclos de aquecimento direto e reverso. Não foi possível observar fissuras ocultas, as visíveis, em contrapartida, se diferenciaram quanto a profundidade, mais profunda mais frias elas apareceram no termograma na condição direta de aquecimento e mais quente no arrefecimento (Figura 23). O autor afirma que esse fenômeno ocorre porque na condição direta o calor demora mais para chegar à área com defeito, aparecendo então como uma temperatura inferior no termograma.

Figura 23 - Placa fissurada com seus respectivos termogramas nos dois ciclos ensaiados



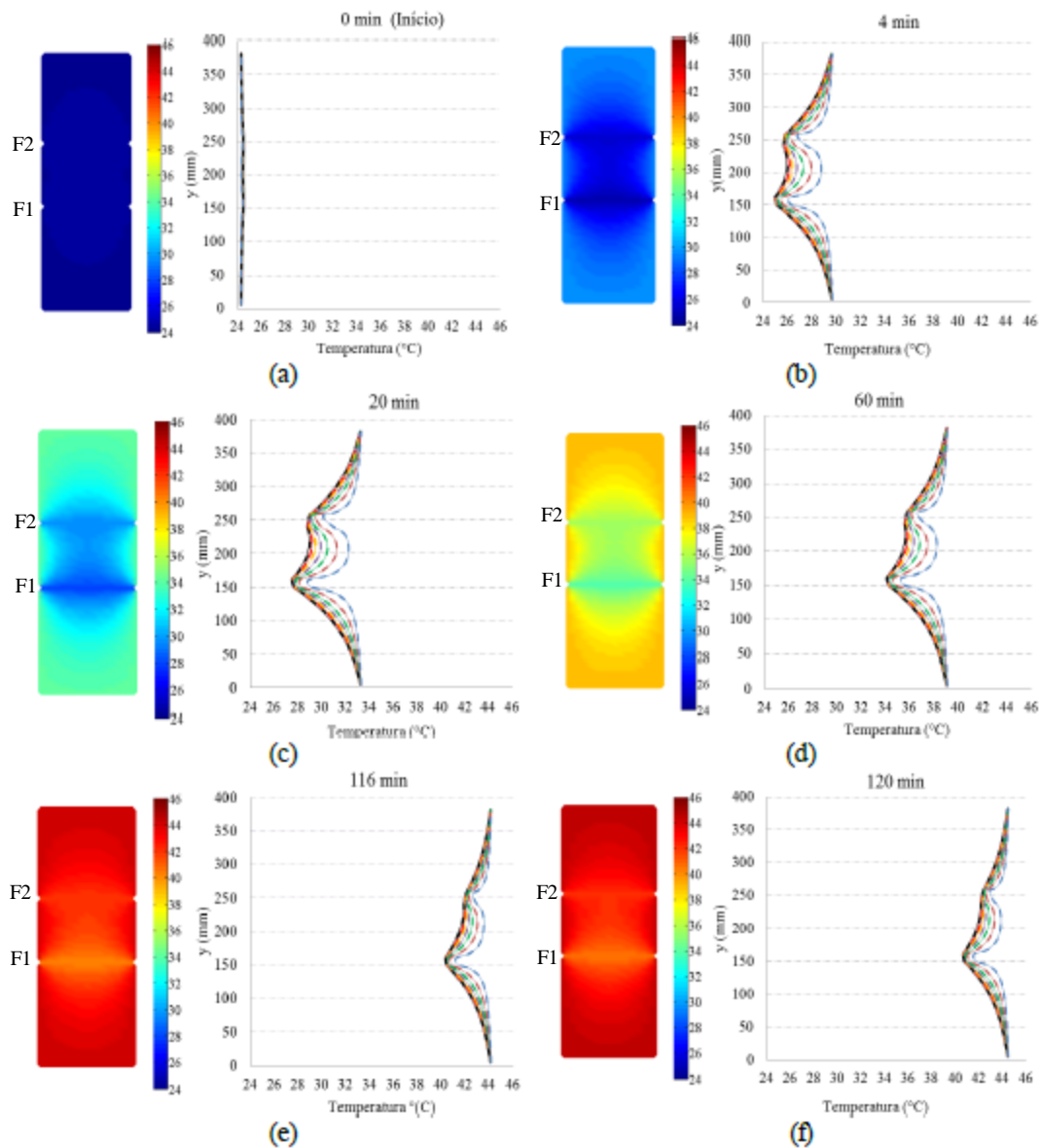
Fonte: Pavón (2017)

Como mencionado, observa-se que no ciclo direto, as fissuras aparecem com uma tonalidade mais escura indicando que possuem temperatura menor que a região íntegra da placa. O contrário é observado no ciclo reverso. Em ambas as situações, os termogramas do término do aquecimento e arrefecimento não permitiram visualizar com nitidez a anomalia, decorrente da tendência de equilíbrio do sistema, sendo esse o período que deve ser evitado nas inspeções (PÁVON, 2017).

As simulações numérica podem reproduzir virtualmente os fenômenos ocorridos em experimentos nos laboratórios. Nesse cenário, Guimarães (2017) investigou o comportamento do fluxo de calor em uma placa de argamassa contendo duas fissuras submetida a um ciclo de aquecimento direto em laboratório. Os dados obtidos foram utilizados para a realização de uma modelagem numérica utilizando o método dos elementos de contorno e sub-regiões. O objetivo da pesquisa era mostrar o comportamento térmico do aquecimento para as diferentes profundidades de fissuras. Comparando os dados obtidos na modelação numérica com os resultados experimentais constatou-se que é possível detectar diferenças no comportamento do fluxo de calor devido à profundidade das fissuras (Figura 24).



Figura 24 - Distribuição da temperatura da face ao longo do aquecimento da placa



Fonte: Guimarães (2017)

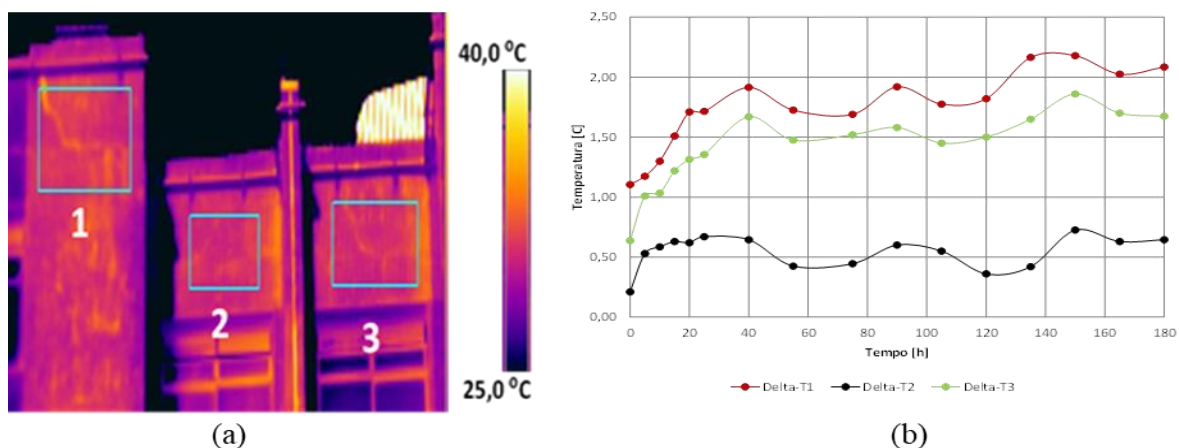
Na Figura 24 pode-se observar essas diferenças de temperatura das linhas (LI's) do modelo no decorrer do tempo. No tempo 0 min não há uma diferença perceptível entre a temperatura da face e das fissuras, pois a placa encontra-se em equilíbrio térmico. A partir do instante 4 (Figura 24b), percebe-se que a placa teve uma grande variação de temperatura quando comparado ao instante inicial e o comportamento das LI's é simétrico, ou seja, as LI's que estão equidistantes das bordas possuem a mesma intensidade de temperatura. Em 20 min (Figura 24c) a fissura mais rasa (F2) está mais quente que a mais profunda (F1), uma vez que está mais próxima da superfície e nesse instante a F1 e F2 variaram aproximadamente  $0,5^{\circ}\text{C}$  e  $1,2^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Nos instantes 60 min (Figura 24d) e 116 min (Figura 24e) que

correspondem à metade e um pouco mais da metade do regime de aquecimento, respectivamente, as fissuras estão menos visíveis quando comparadas ao instante 20 (Figura 24c), demonstrando que a diferença de temperatura com a face está diminuindo. Em 120 min (Figura 24f), momento em que a fonte de calor é desligada, as fissuras atingiram o pico de temperatura. Com o desligamento do conjunto de aquecimento, a face perde temperatura mais rapidamente que as fissuras, por possui maior área de contato com o ambiente, deste modo as fissuras ficam mais quentes que a face, por este motivo o Delta - T torna-se negativo.

Portanto, acerca do comportamento do Delta - T de ambas as fissuras, percebeu-se que a maior intensidade de Delta - T ocorre nos primeiros instantes de aquecimento. Por este motivo, no processo de monitoramento de uma fachada, a visualização das fissuras será melhor no período da manhã, também a depender da sua orientação, uma vez que nem todas as orientações recebem incidência direta no período matutino (GUIMARÃES, 2017).

A termografia passiva quantitativa pode ser utilizada para mensurar o grau de dano em fissuras de um edifício (Figura 25a). À vista disso, Bauer *et al.* (2018) aplicaram inicialmente a simulação higratérmica para o entendimento do fluxo de calor na fachada a fim de auxiliar na monitorização termográfica durante o aquecimento das regiões em estudo. A profundidade da fissuração foi avaliada pelos valores de Delta-T investigados nas 3 regiões fissuradas (25b), e a largura de dano das fissuras foi quantificada a partir dos termogramas.

Figura 25 – Fissuras investigadas (a) Termograma destacando as três fissuras investigadas (b) Deltas – T das fissuras.



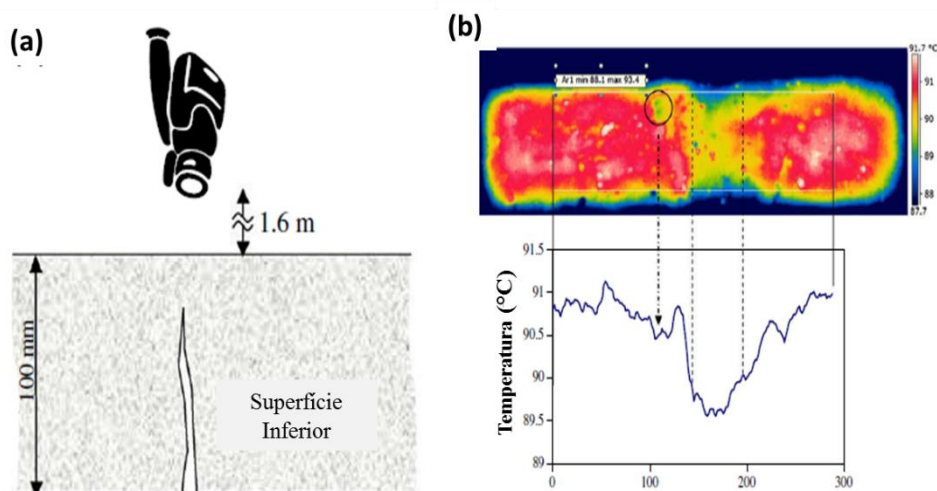
Fonte: Bauer *et al.* (2018)

Os resultados permitiram classificar o grau de dano das fissuras associado à profundidade e largura, e também mostraram a importância da simulação higratérmica como técnica de pré-

análise da termografia, para delimitar o período de investigação, com foco nos fenômenos de interesse. Pelas análises realizadas da largura do defeito e Deltas-T, constatou-se que a profundidade de fissuração é maior na fissura 1 que é maior que a fissura 3 que é maior que a fissura 2 (BAUER, MILHOMEM & AIDAR, 2018)

O estudo de fissuras pode-se associar outras técnicas com a termografia. Nesse contexto, Aggelis *et al.* (2010) aplicaram a termografia, juntamente com ensaio de ondas ultrassônicas, para localizar danos subsuperficiais e fazer uma avaliação mais detalhada da profundidade. A Figura 26(a), mostra um esquema do ensaio e a Figura 26(b) a aplicação real do mesmo. Identifica-se uma temperatura mais baixa próximo ao centro da amostra, sendo está a área problemática examinada por meio do ultra-som.

Figura 26 - (a) Configuração experimental (b) Termografia de uma amostra com deflexão central de 2 mm



Fonte: Adaptado de Aggelis *et al.* (2010)

Como resultados do estudo, os autores concluíram que os casos de grandes fissuras são facilmente detectável nos termogramas, para fissuras menores, no entanto, o mesmo efeito não é alcançado. Em relação ao ultrassom, os resultados são mais robustos, pois a fissura é vertical à propagação da onda aplicada. Uma possível complicação é que, em casos de danos graves, as ondas Rayleigh podem não ser claramente caracterizadas e, assim, suas velocidades não serão medidas. De modo geral, os pesquisadores afirmam que a combinação das duas técnicas parece promissora para avaliação de estruturas reais. No entanto, estudos complementares são necessários a fim de estabelecer correlações entre os parâmetros de ondas e a profundidade do defeito.

Martínez et al. (2013) investigaram a presença de fissuras em um prédio histórico da cidade de Madri. Neste estudo foi possível perceber visualmente no termograma a fissura como uma região mais fria, ao comparar com a área integra próxima ao defeito, afirmando o uso da termografia infravermelha como uma técnica de inspeção complementar à inspeção visual, fornecendo informações precisas e confiáveis para o levantamento de danos.

Freitas, *et al.* (2014) verificaram a presença de fissuras detectadas previamente na inspeção visual, utilizando a termografia em um prédio com revestimento em argamassa. Os autores identificaram, também a presença de outras fissuras não mapeadas na inspeção visual. As fissuras detectadas tinham valor de temperatura inferior aos valores de temperatura no revestimento em argamassa sem defeito. A aquisição dos termogramas foi feita em três horários diferentes (no meio da manhã, da tarde e da noite).

## **Resumo do Capítulo 2**

As fissuras é uma das principais patologias que incidem nos revestimentos, o conhecimento da sua gravidade por meio das técnicas de inspeção não destrutiva vem despertando interesse dos pesquisadores. No entanto, na literatura ainda dispõem de poucos estudos dessa patologia nos revestimentos, principalmente, com a utilização da termografia de infravermelho. Os que existem não definem com clareza o seu comportamento térmico, em virtude da sua aparição nos termogramas ser dependente da sua profundidade.

Com o intuito de facilitar a sua identificação, pesquisadores associaram ao processo de molhagem e secagem, mas sem êxito e relataram que a interpretação dos termogramas com esta patologia é complexa e acentua-se quando aumenta a concentração das fissuras. Outros pesquisadores buscaram empregar a técnica de componentes principais, contudo, ressalta-se sua ineficiência para essa finalidade, devido ao aspecto dinâmico do edifício não permitindo a obtenção de uma imagem estática por um longo período de análise.

De modo geral, o que se tem em consenso é que as fissuras aparecem como áreas mais frias na condição direta e mais quentes na condição reversa, requerendo estudos mais profundos que possam associá-la a profundidade e abertura para definição do seu grau de dano e, conseqüentemente, a ordem de priorização de reparos, sendo este o principal objetivo desta pesquisa.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do programa experimental compreende o desenvolvimento dos corpos de prova, revestido em argamassa com fissuras de diferentes profundidade e abertura em escala reduzida, submetidos a ciclo de aquecimento e arrefecimento. Compreende também a obtenção dos termogramas para investigações qualitativas e quantitativas com o objetivo de determinar os momentos detectáveis das fissuras nos termogramas, bem como seu grau de dano. Para tanto, o programa experimental pode ser dividido em três etapas que abordam o estudo do comportamento das fissuras qualitativa e quantitativamente.

A definição das variáveis de estudo (Tabela 2), do método de ensaio e das ferramentas de análises que guiaram o desenvolvimento dessa metodologia para atingir o objetivo geral proposto, ou seja, a definição de critérios para identificação e mensuração do grau de dano de fissuras em fachadas de edifícios foi embasada principalmente em metodologias definidas nas pesquisas de Maldague (2001), Dufour *et al* (2009), Pávon (2017) e de Bauer *et al.* (2018).

Tabela 2 - Variáveis de estudo independentes e dependentes

Variáveis independentes	Variáveis dependentes
<b>Tipologia</b> Linear e ramificada	<b>Delta-T</b> Evolução da diferença de temperatura da região com e sem defeito
<b>Profundidade</b> 5, 10 e 15 mm	<b>Evolução do fluxo de calor</b> Gradiente na interface do defeito
<b>Abertura da fissura</b> 1, 2 e 3 mm	<b>Evolução da temperatura</b> Defeito, sem defeito e média da área
	<b>Evolução da velocidade de aquecimento e arrefecimento</b> Delta - T
	<b>Largura do dano</b> Obtidas nos termogramas

A Tabela 3 mostra as variáveis independentes: a tipologia, a profundidade e a abertura da fissura, manipuladas para correlacionar as características com o fenômeno observado. São variáveis dependentes: Delta – T, evolução das temperaturas, largura do dano, velocidade de aquecimento e arrefecimento do Delta – T e a variável relacionada ao fluxo de calor:

Gradiente Interface (GInt). Estas últimas são explicadas à medida que são afetadas pelas variáveis independentes.

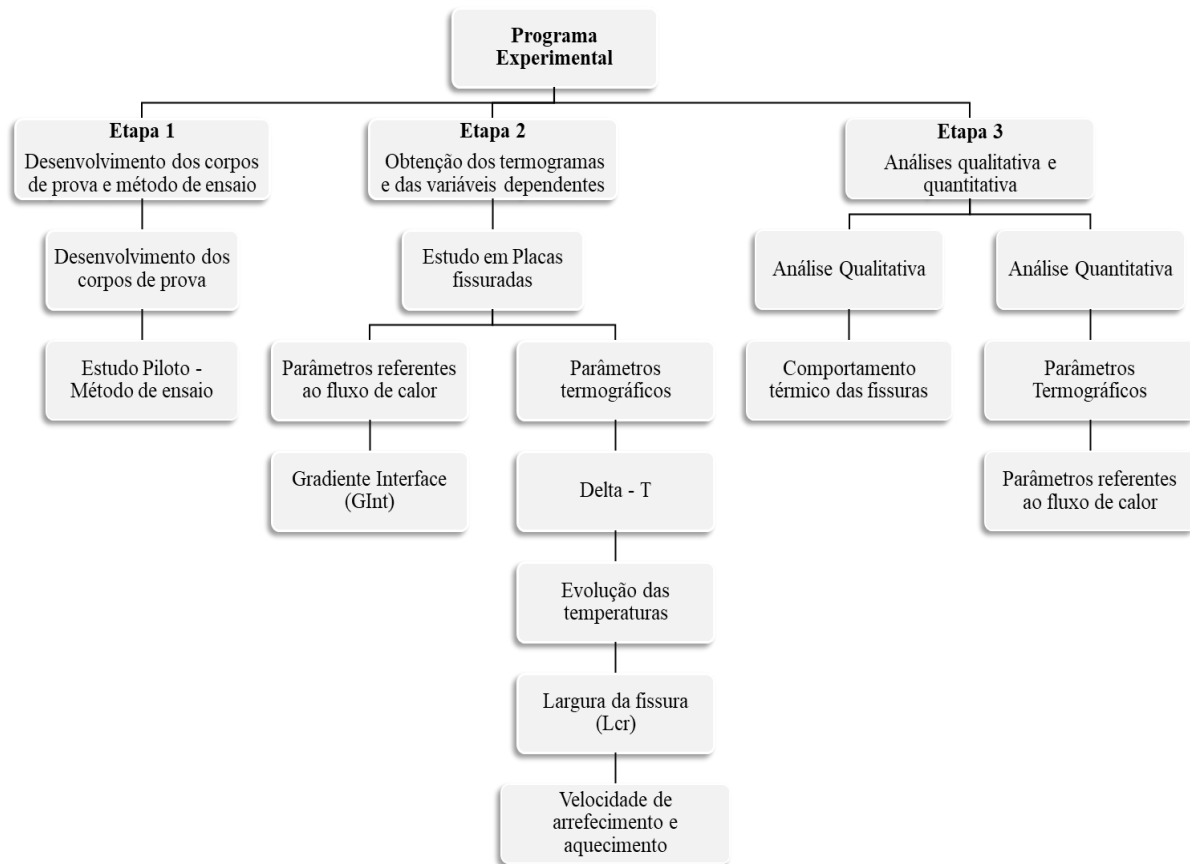
Com base nas pesquisas de Maldague (2001), Pavón (2017) e Bauer *et al.* (2018), o Delta – T foi utilizado para afirmar se existem diferenças, ou não, na profundidade das fissuras, para classificá-las em grau de dano e para definir os momentos mais propícios na detecção dessa patologia.

Os estudos da evolução das temperaturas médias, do defeito e da região sem defeito foram empregados com a finalidade de auxiliarem os resultados encontrados nos valores dos Deltas – T, para uma melhor possibilidade de definir com precisão o momento de se fazer as inspeções em campo. Uma vez que o comportamento do Delta – T está diretamente relacionado com a evolução das temperaturas. A análise dos gradientes, obtido por meio das diferenças de temperatura entre os termopares, foi realizada individualmente para caracterizar o comportamento térmico do sistema.

A abertura da fissura é outro indicador da sua gravidade. O estudo dessa variável tem como objetivo comparar a real dimensão da fissura com a largura do dano, sendo esta última calculada por meio da termografia infravermelha mediante a delimitação dos *pixels* correspondentes a largura do dano (DUFOUR *et al.*, 2009; LAI *et al.*; 2015).

Diante das variáveis apresentadas a metodologia do programa experimental pode ser dividida em três etapas: (1) Desenvolvimento dos corpos de prova e métodos de ensaio; (2) Obtenção dos termogramas e das variáveis dependentes (3) Análises qualitativas e quantitativas. Na Figura 27, apresenta-se um fluxograma do programa experimental adotado para a presente dissertação.

Figura 27 - Fluxograma do programa experimental



A primeira etapa consistiu na preparação dos corpos de prova, constituídos de uma placa base e uma placa fissurada, moldados em argamassa de cimento e areia. Posteriormente, foram realizadas simulações com os corpos de prova revestidos em argamassa com fissuras de diferentes profundidade e abertura em escala reduzida, a fim de observar as diferenças nos valores de temperatura e classificá-las em função do grau de dano. Nessa mesma etapa, também é apresentado o estudo realizado para disposição das lâmpadas de aquecimento, da câmara termográfica e do corpo de prova com o intuito de padronizar o aquecimento das placas.

A segunda etapa definiu as metodologias utilizadas para aquisição das variáveis dependentes e se dividiu em dois grupos: parâmetros termográficos e parâmetros relativos ao fluxo de calor. As variáveis que compõem o grupo dos parâmetros termográficos são: (i) Delta – T; (ii) evolução das temperaturas; (iii) largura do dano e (iv) velocidade de aquecimento e (v) arrefecimento do Delta – T. A variável referente ao fluxo de calor (vi) é o Gradiente da Interface entre a placa base e placa fissurada (GInt).

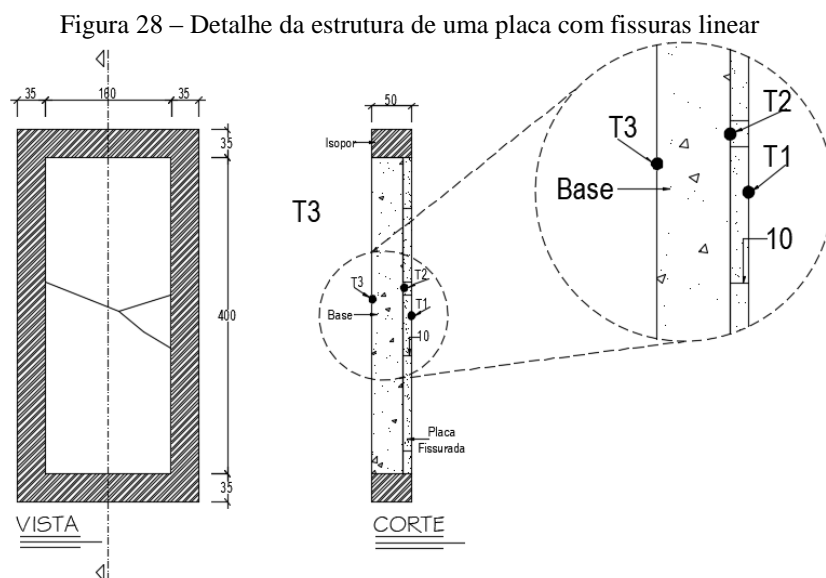
A terceira etapa refere-se a análise dos dados, inicialmente por meio de investigações qualitativas realizadas nas placas com fissuras lineares e ramificadas, observando-se o comportamento da fissura, sua localização nos termogramas e como a variação da profundidade, abertura e tipologia afetaram sua visualização na imagem térmica ao longo tempo. Nesta etapa, com o objetivo de investigar a influência das aberturas, profundidade e tipologia, realizou-se comparações quantitativas entre os grupos de placas definidos (lineares e ramificadas) em relação aos parâmetros referentes ao fluxo de calor e termográficos.

### 3.1 ETAPA 1: DESENVOLVIMENTO DOS CORPOS DE PROVA E MÉTODO DE ENSAIO

#### 3.1.1 Desenvolvimento dos corpos de prova

Os corpos de prova são uma composição de duas placas que simularam fachadas fissuradas em argamassas. A definição desta estrutura baseou-se em pesquisas que realizaram estudos de defeitos superficiais em paredes e/ ou estruturas em escala reduzida, para aplicação da termografia de infravermelho (CERDEIRA *et al.*, 2011; KHAN *et al.*, 2015; PAVÓN, 2017).

A primeira placa do corpo de prova denominou-se base e a segunda, placa fissurada, como mostra a Figura 28. Na composição das placas, foi inserido um termopar na interface da placa base com a placa fissurada (T2). Os demais termopares representados T1 (superfície frontal) e T3 (atrás da placa) foram fixados no momento do ensaio e o isopor foi utilizado para isolar as bordas e evitar as perdas de calor pelas laterais.

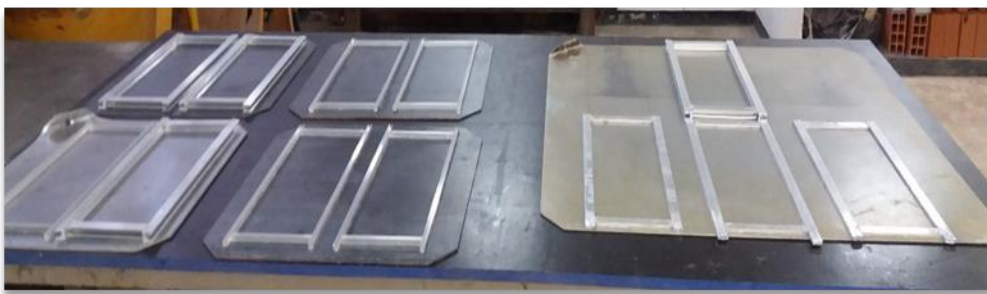




A placa base possui dimensões de 160 mm x 400 mm x 35 mm, confeccionada com traço em volume 1:4,2:0,75 (cimento, areia e relação a/c), curada por mais de 28 dias. As placas fissuradas possuem dimensões de 150 x 350 mm e espessura variável de 5 mm, 10 mm e 15 mm, constituída em argamassa autoadensável de cimento, *fíler* calcário, areia artificial e aditivo superplastificante, traço 1:0,41:1,7:0,55.

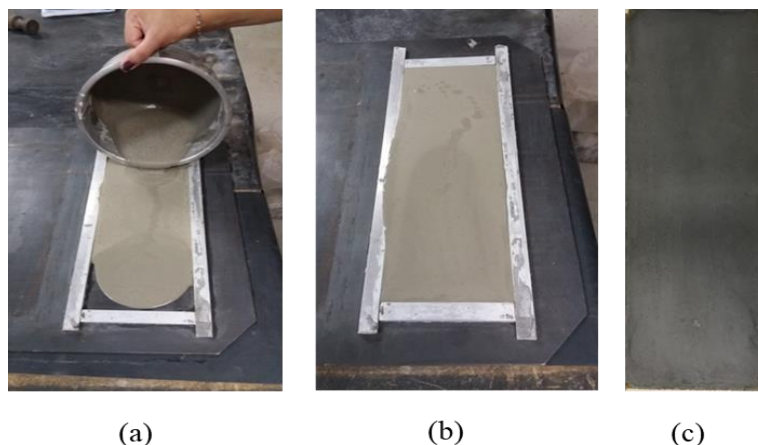
A profundidade das placas fissurada (5, 10 e 15 mm) foi controlada com o uso de formas em perfis metálicos que possuíam essas dimensões. A Figura 29 mostra os perfis colados sobre chapas metálicas.

Figura 29 - Perfis com diferentes espessuras utilizados na confecção das placas



As placas fissuradas foram moldadas sobre as chapas metálicas niveladas para obter acabamento da superfície inferior uniforme, visto que a superfície inferior foi a utilizada para as análises, como observado na Figura 30. Após dois dias da fabricação, as placas foram desmoldadas e o procedimento de cura com pano úmido continuou por mais quinze dias.

Figura 30– Moldagem da placa fissurada (a) Preenchimento (b) Placa totalmente moldada na forma (c) Acabamento da placa após a cura



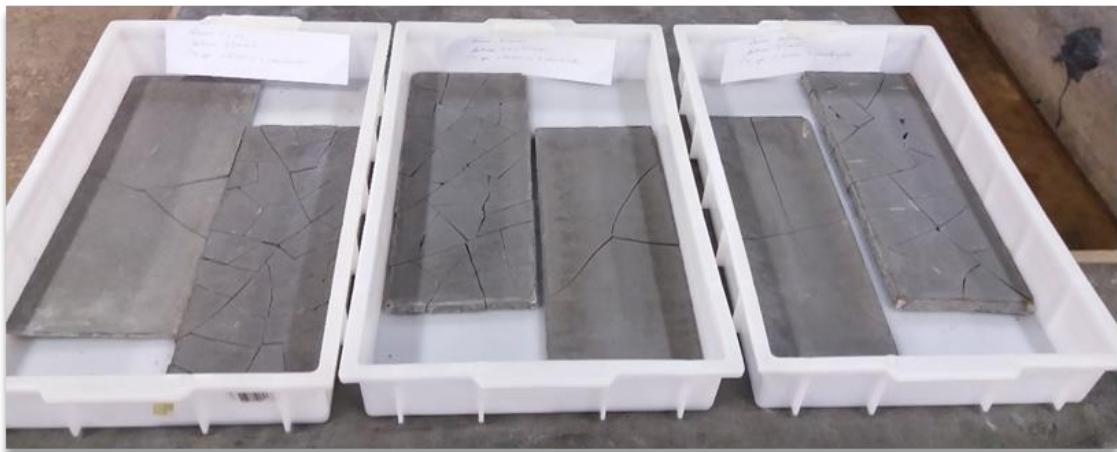
As placas em argamassa, depois de curadas, foram submetidas à aplicação de carga pontual com o auxílio de uma prensa, que provocou sua fissuração sem danificá-las, como pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 – Aplicação da carga pontual para fissuração das placas



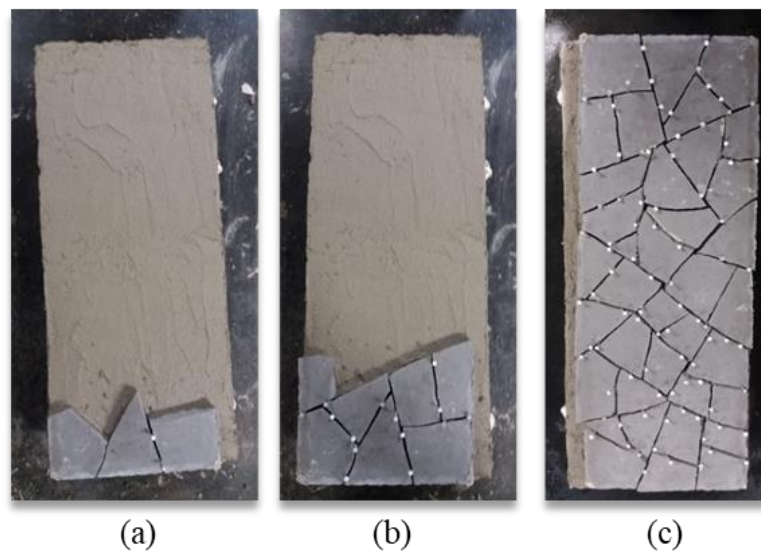
O procedimento de aplicação da carga dividia a placa em segmentos, que imediatamente eram montados para evitar desencontros das interfaces e adquirir o formato original, como mostra a Figura 32.

Figura 32 – Peças previamente montadas antes da colagem



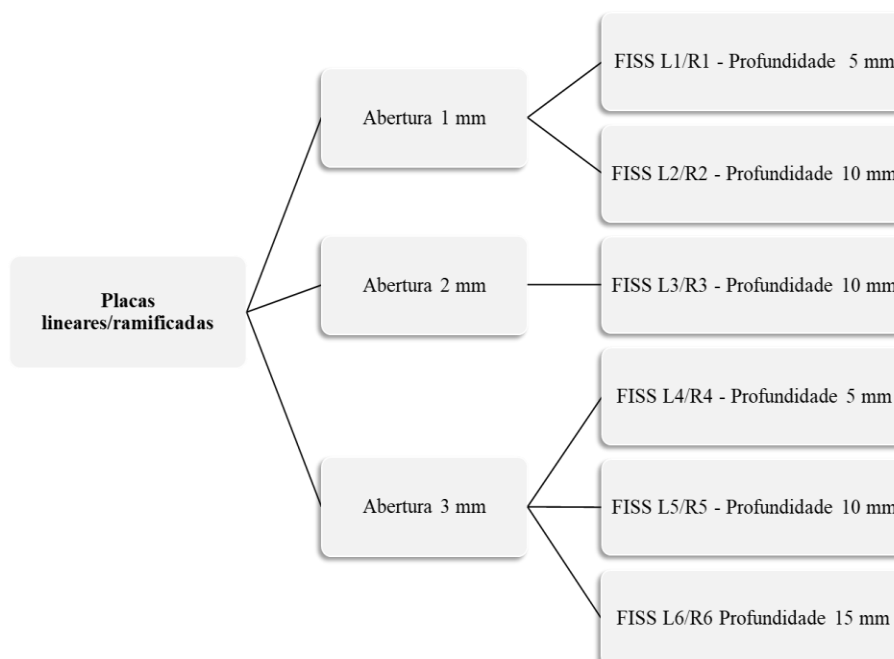
Após obtidas as peças no formato desejado (lineares e ramificadas), partiu-se para o processo de assentamento sobre a placa base de argamassa. A argamassa colante utilizada foi a ACIII com uma espessura final de aproximadamente 2 mm. A Figura 33 exemplifica a montagem de um protótipo com fissuras ramificadas.

Figura 33 - Sequência de passos para a assentamento das peças



Ressalta-se que, para cada abertura definida para análise, ou seja, 1,0 mm, 2,0 mm e 3,0 mm, utilizou-se espaçadores distintos. Após esse procedimento, as placas foram submetidas novamente a um processo de cura por 10 dias. Em seguida, realizaram-se os procedimentos finais de acabamento, como o envolvimento por uma camada de isopor para manter o fluxo de calor. Ao todo foram confeccionadas seis placas com fissuras lineares, representada pela letra (L), seis placas ramificadas com a letra (R) e uma placa sem fissuras. A Figura 34 esquematiza a distribuição das placas, conforme suas características de abertura e profundidade, para as duas tipologias.

Figura 34 – Distribuição das placas conforme suas características de abertura e profundidade



A Figura 35 mostra as fotografias das placas lineares e a Figura 36 as das placas com fissuras ramificadas.

Figura 35 - Imagens digital das placas lineares

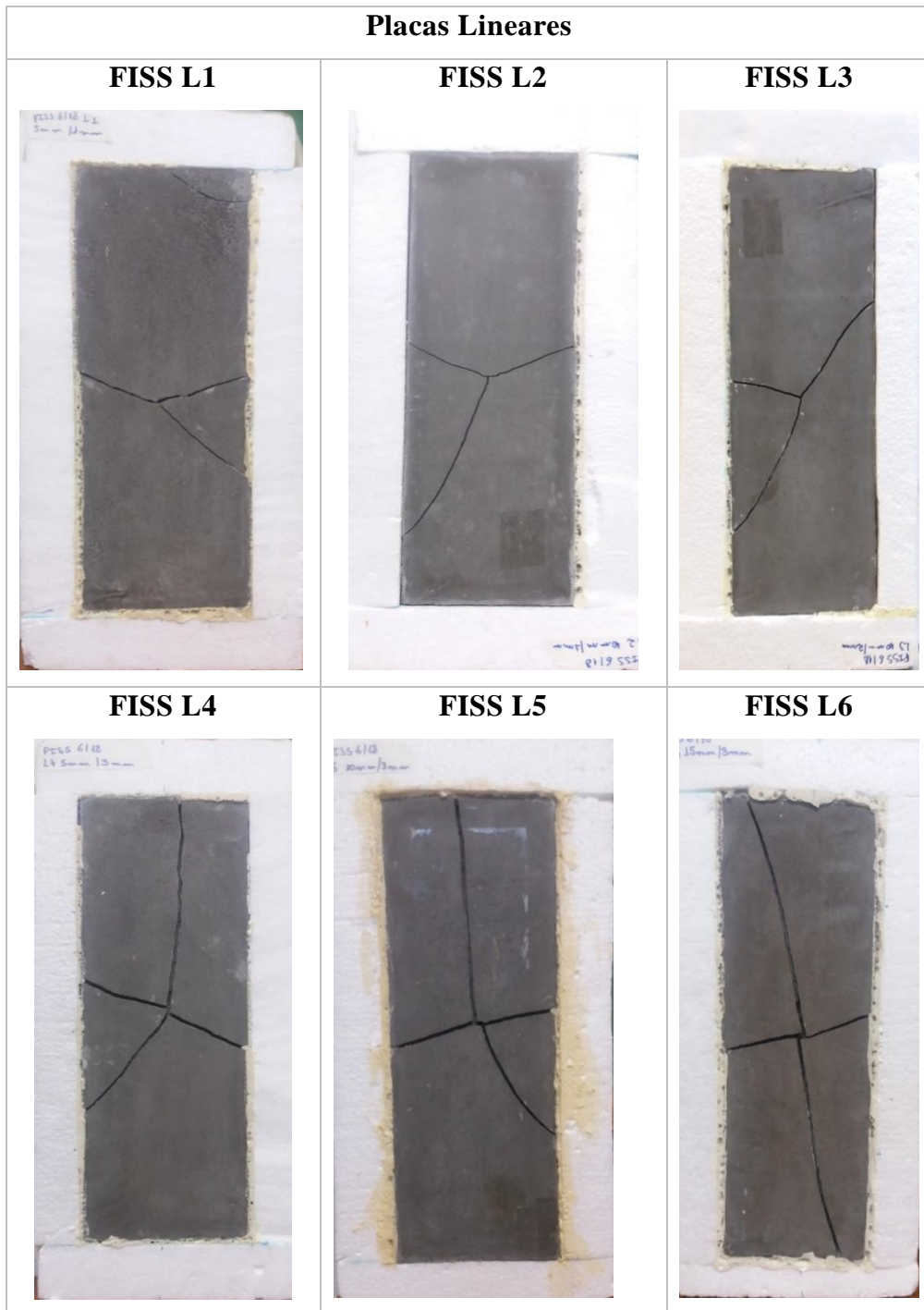
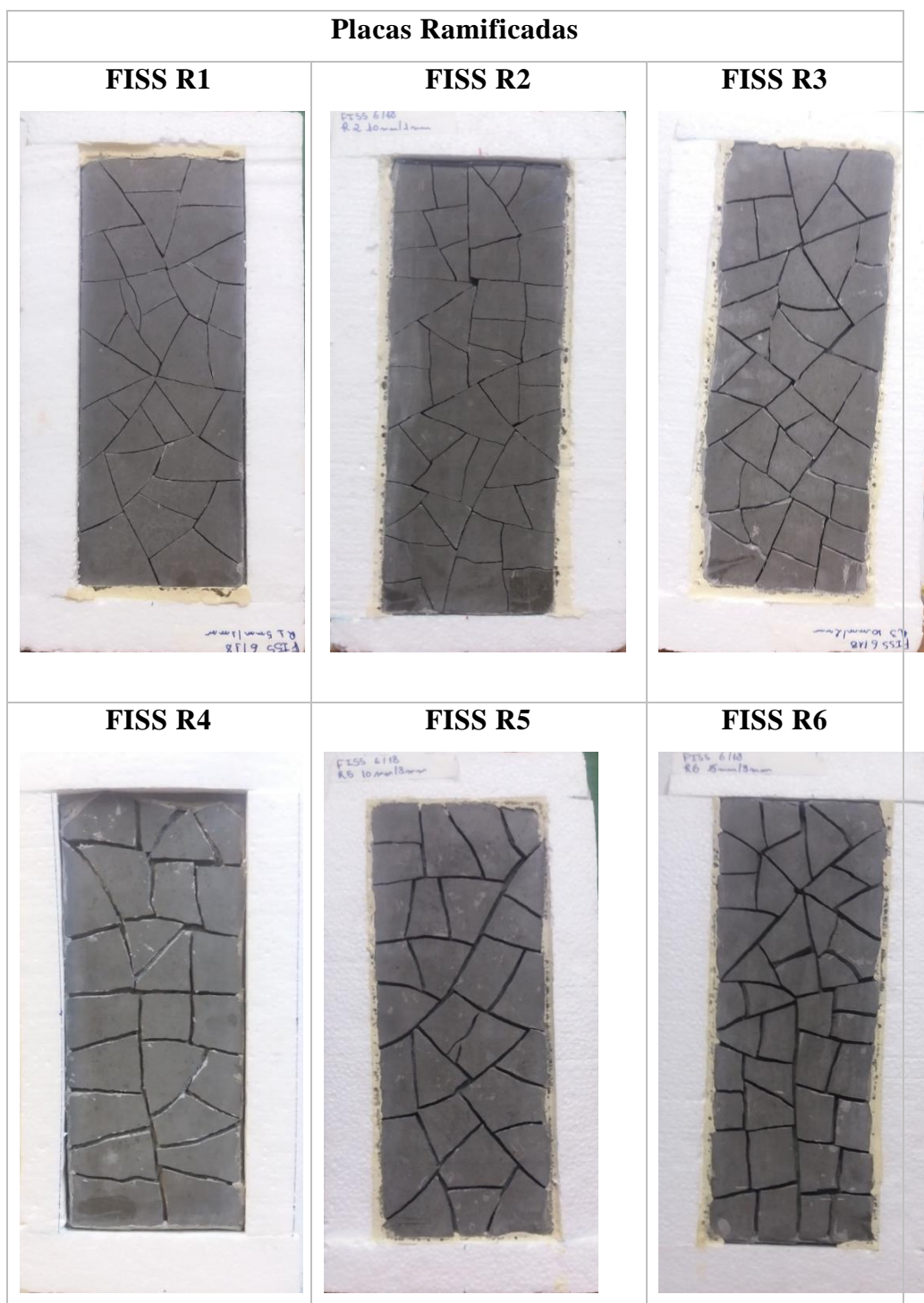


Figura 36 - Imagens digital das placas ramificadas



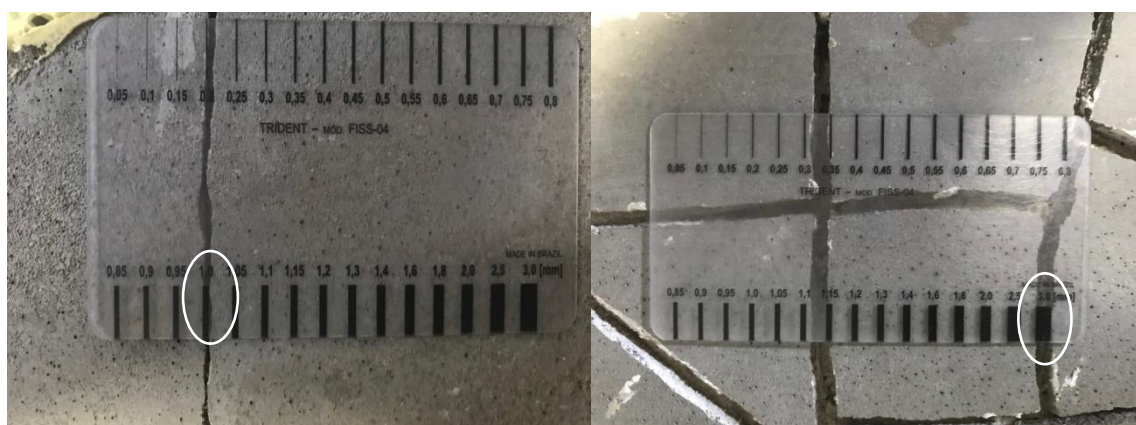
Na Tabela 3, apresentam-se informações quantitativas para cada placa, linear e ramificada, ou seja, tamanho da abertura e da profundidade, que variou entre 5 e 15 mm, e a abertura nominal média adotada para cada grupo das placas.

Tabela 3 - Características das placas lineares e ramificadas

Classificação	Tipo de fissura	Profundidade da fissura (mm)	Abertura média da fissura (mm)	Abertura nominal adotada (mm)
A = 0,0 a 1,0 mm	FISS L1	5,00	1,18	1,00
	FISS R1	5,00	0,94	
	FISS L2	10,00	1,24	
	FISS R2	10,00	0,95	
B = 1,0 a 2,0 mm	FISS L3	10,00	2,00	2,00
	FISS R3	10,00	1,95	
C = > 3,0 mm	FISS L4	5,00	3,24	3,00
	FISS R4	5,00	3,00	
	FISS L5	10,00	3,10	
	FISS R5	10,00	3,20	
	FISS L6	15,00	3,23	
	FISS R6	15,00	2,94	

Devido à variação das aberturas das fissuras, causada por pequenas distorções no momento de assentamento das peças, condizerem com o intervalo proposto, a abertura nominal foi dividida em três grupos (A: 1,00 mm, B: 2,00 mm e C: 3,00 mm). Figura 37 (a) e (b) mostram o procedimento utilizado para medir o tamanho das aberturas das placas.

Figura 37 - Aferição da abertura das fissuras com auxílio de um fissurômetro (a) Placa FISS R1 (b) Placa FISS R4



(a)

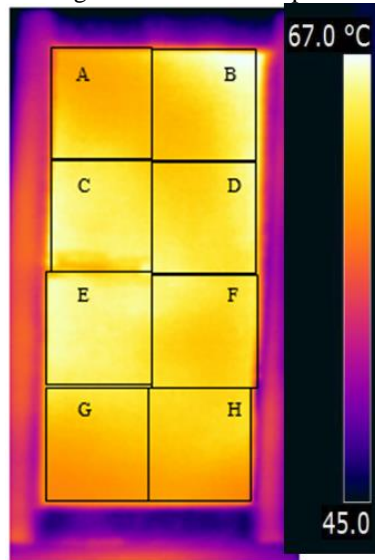
(b)

### 3.1.2 Desenvolvimento do Método de Ensaio - Estudo Piloto

Com base em estudo de Bauer & Pavón (2017) realizou-se um estudo piloto com uma placa moldada previamente em argamassa de cimento e areia sem fissuras, para balizar a

disposição das lâmpadas de aquecimento e da placa. Este estudo serviu para definição da melhor disposição dos equipamentos para o aquecimento das placas, garantindo a melhor homogeneização da superfície destas. Para esta análise, a placa em estudo foi dividida em oito regiões (A;B;C;D;E;F;G;H) (Figura 38).

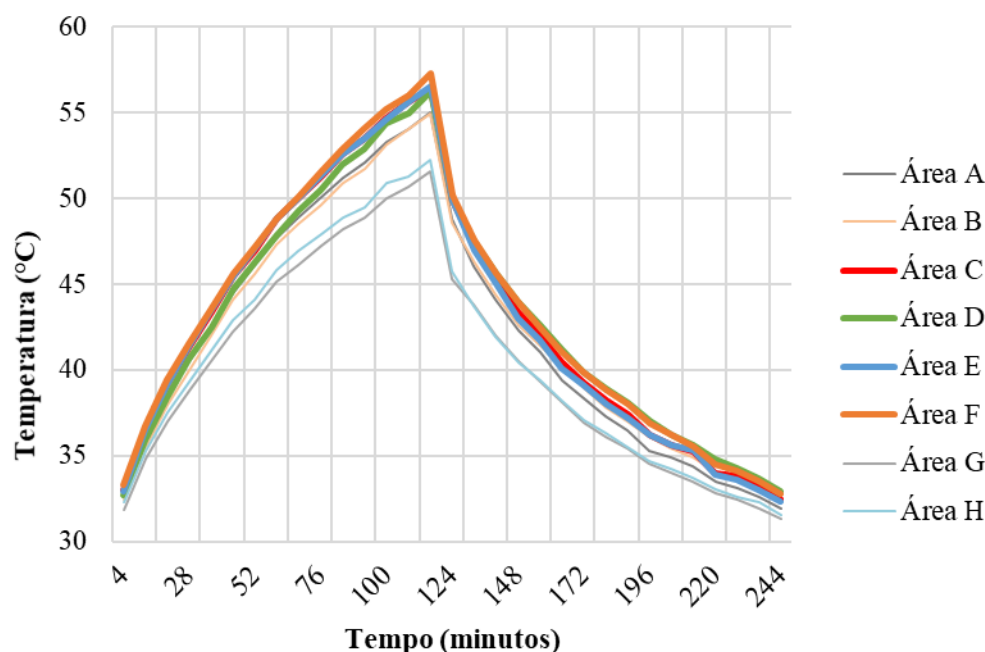
Figura 38 – Regiões de análises da placa sem fissura



A placa passou por ciclos de aquecimento direto com fluxo de intensidade alta potência total de 1500 W, fluxo médio com potência total de 700 W e fluxo baixo com potência total de 300 W, simulando a exposição de uma fachada à radiação solar. Passou, também, por vários ciclos de aquecimento, tendo sido modificadas algumas variáveis do aparato de ensaio: distância, potência das lâmpadas, inclinação, elevação das placas, ângulo dos dispositivos de aquecimento e sombreamento do fluxo de aquecimento.

A Figura 39 mostra uma evolução no aquecimento das regiões (A;B;C;D;E;F;G;H) do último teste realizado, ou seja, as placas ficaram distantes 90 cm do eixo do aparato de aquecimento ao eixo da placa e 100 cm dos eixos das caixas com as lâmpadas de aquecimento.

Figura 39 – Evolução das temperaturas do último teste realizado



Observa-se uma proximidade das curvas que representam as áreas centrais de estudo (C; D; E e F) indicando uma temperatura máxima próxima a 58 °C semelhante àquela atingida pelas fachadas de Brasília (NASCIMENTO, 2017). Com base nas análises dos termogramas, trata-se de um valor de temperatura que não permitiu detectar fissuras e realizar nenhuma constatação devido à alta perturbação do sistema. Dessa forma, tal fato influenciou diretamente na delimitação do tempo do regime de aquecimento e arrefecimento, 120 minutos cada regime, período determinado depois de realizadas às análises de gradientes e as derivadas das áreas comprovando a tendência de homogeneidade do sistema e a dificuldade de análises dos termogramas após esse período.

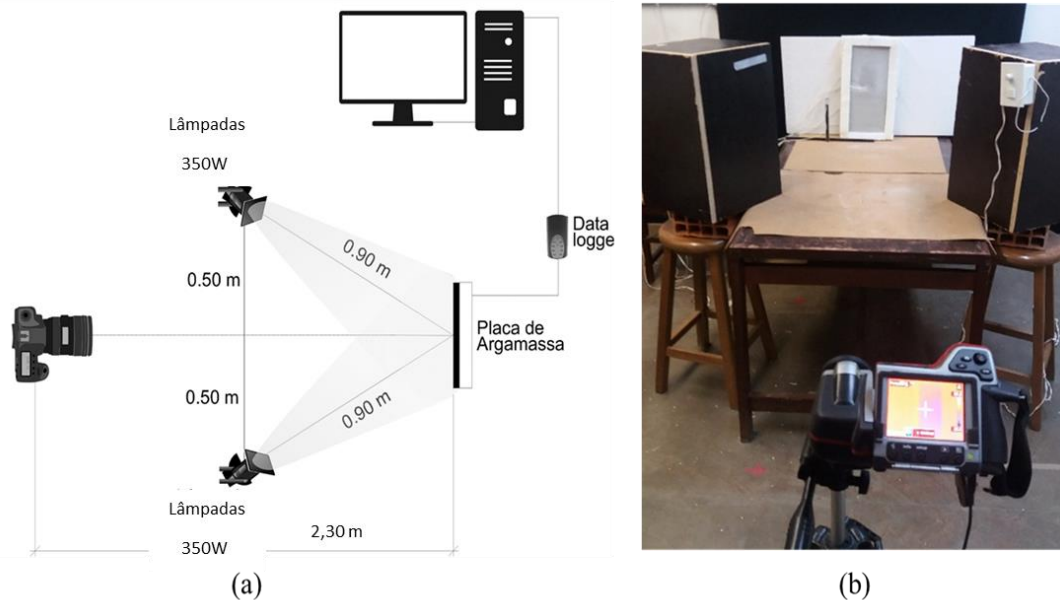
As áreas centrais (C; D; E e F) foram definidas como as áreas para análises desta pesquisa, uma vez que, ao contrário, as regiões das bordas (A; B; G e H) apresentaram temperaturas consideravelmente menores entre si, mais homogêneas. Assim, percebe-se que, apesar da incidência de calor ser em toda a face, ele espargiu-se do centro para as bordas.

Após as análises do estudo piloto, foi definido que os corpos de prova fossem ensaiados no ciclo direto, ou seja, com a superfície frontal sendo diretamente aquecida e analisada. Objetivou-se a simulação de uma inspeção em uma fachada com revestimento fissurado em argamassa, tanto no período de aquecimento como de arrefecimento. Na Figura 40(a), pode-se



observar o esquema ilustrativo da distribuição dos equipamentos em relação à placa analisada e, na Figura 40 (b), uma fotografia do ensaio.

Figura 40- Ciclo direto (a) Esquema ilustrativo da distribuição dos equipamentos (b) Imagem digital do ensaio



As lâmpadas para o aquecimento ficaram separadas por uma distância de 0,90 m da superfície central da placa e 1,00 m entre seus eixos, regulados para o fluxo médio com uma potência de 700 W (dois dispositivos de aquecimento de 350 W). A câmera foi posicionada a uma distância de 2,30 m do eixo das placas, o mais retilíneo possível, para reduzir eventual problema de reflexões geradas a partir do dispositivo de aquecimento. Essas medidas permitiram uma melhor homogeneidade do aquecimento da superfície e enquadramento da imagem na câmera termográfica. Ressalta-se que a posição do tripé e o ângulo da câmera foram mantidas constantes para evitar diferenças entre os termogramas.

### 3.1.3 Equipamentos utilizados

De modo geral, para realizar os ensaios foram utilizados os equipamentos a seguir (Figura 41).

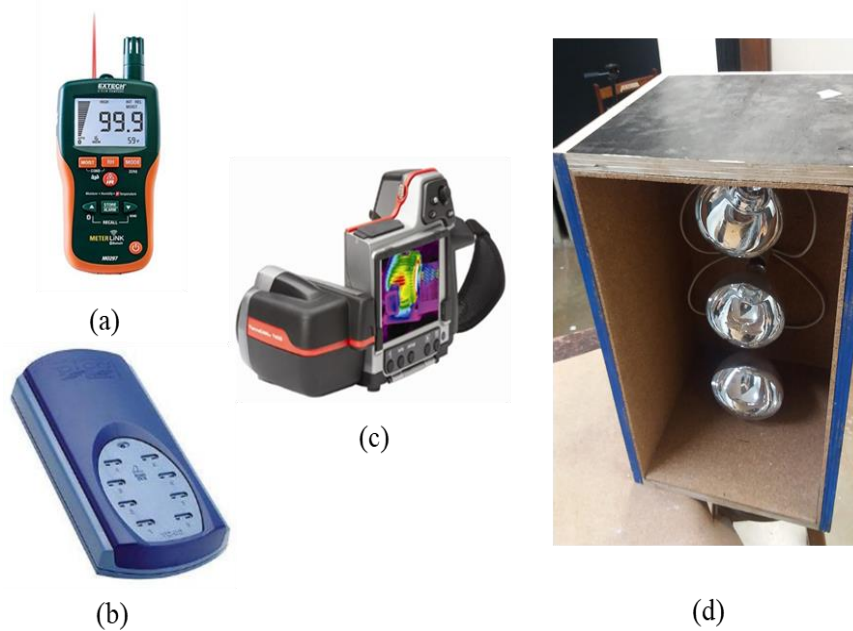
- Aquisitor de dados Pico USBTC-08;
- Psicrômetro de umidade sem fuso com termômetro, modelo MO297;
- Conjuntos de aquecimento, composto por três lâmpadas de 250W cada, no entanto, foi utilizada potência total de 700 W correspondente ao fluxo médio;

- Termopar Tipo K;
- Trena laser BOSCH modelo GLM80;
- Computador;
- Câmera termográfica e suas propriedades (detalhadas na Tabela 4).

Tabela 4 - Propriedade da Câmera de Infravermelhos

<b>Câmera termográfica - Flir T-400</b>	<b>Propriedades</b>
Faixa de temperatura	-20 a 120°C
Faixa espectral	7,5 a 13,0 $\mu\text{m}$
Resolução	320 x 240 <i>pixels</i>
Lente telescópica	15°
IFOV	0,820 mrad

Figura 41 - Equipamentos que foram utilizados (a) Psicrômetro de umidade, modelo MO297 (b) Aquisitor de dados Pico USBTC-08 (c) Câmera termográfica FLIR T400 (d) Dispositivo de aquecimento com lâmpadas infravermelhas



## 3.2 ETAPA 2: OBTENÇÃO DOS TERMOGRAMAS E DAS VARIÁVEIS DEPENDENTES

### 3.2.1 Obtenção dos termogramas

Para aquisição dos termogramas, se estabeleceu uma rotina que consisti nas etapas descritas a seguir.

- Disposição correta da câmera termográfica e configuração: A câmera termográfica foi posicionada exatamente no mesmo local em todos os ensaios e programada para adquirir termogramas a cada 4 minutos, armazenados em um cartão SD;
- Configuração do aquisitor de dados modelo Pico USB TC-08 ligado a um computador durante todo ensaio, programado para fazer leitura a cada 2 minutos;
- Aferição da temperatura e umidade do ar *in loco*. Dados de entrada na câmera termográfica coletados com o medidor EXTECH MO297. No Apêndice A, apresentam-se os valores de temperatura e umidade correspondentes a cada ensaio;
- Determinação da temperatura refletida, outro dado de entrada, obtida conforme método do refletor indicado na ABNT NBR 16292 (2014) e ASTM E1862-97 (2010), a qual foi estabelecida a seguinte rotina:
  - (i) Fixar uma folha de alumínio corrugada na placa ensaiada, refletor que assume uma reflexão de 1,00 propriedades ideal;
  - (ii) Ajustar a emissividade da câmera termográfica para 1,00 e distância zero;
  - (iii) Posicionar a câmera para o refletor, do mesmo modo que ela será posicionada para medir a temperatura da superfície da placa;
  - (iv) Medir a temperatura média aparente da superfície do refletor, sendo esta a temperatura aparente refletida, com o auxílio do *software* Flir Quick Report.

Esse procedimento foi repetido três vezes para o regime de aquecimento e arrefecimento e obteve-se o valor médio de 32,7 para o aquecimento e 27,6°C para o arrefecimento. No aquecimento a radiação emitida pelas lâmpadas de aquecimento, reflete nos objetos no entorno que resulta em valores diferentes de temperatura aparente refletida em relação ao arrefecimento.

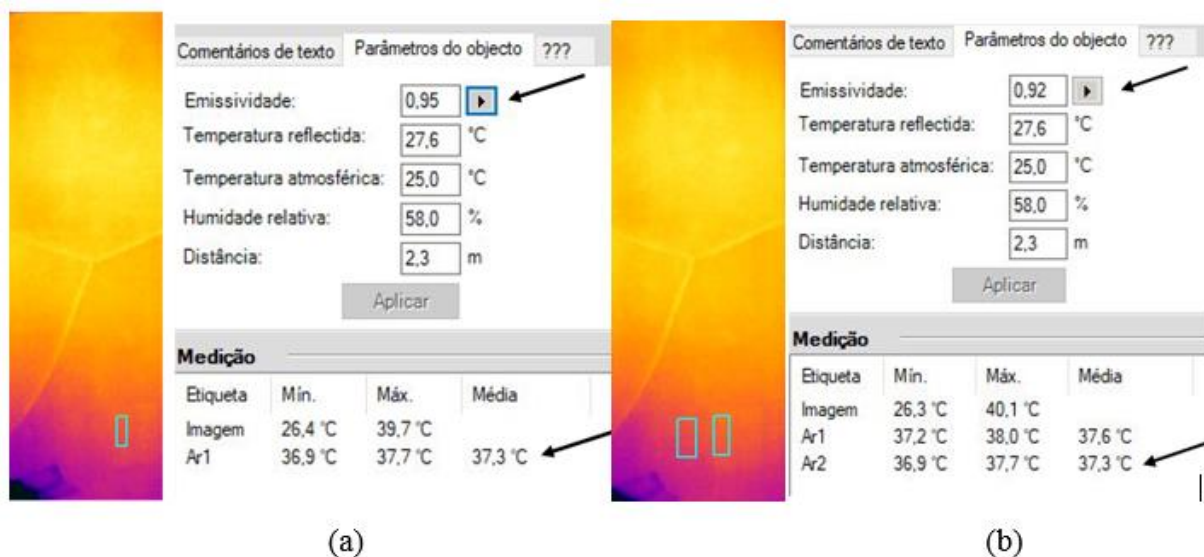
- O valor da emissividade do material pode ser obtido mediante os procedimentos da ASTM 1933-99 (1999) baseado no método da fita padrão. Os valores de emissividade foram aferidos em quatro placas para o mesmo período do arrefecimento, atestando o valor médio de 0,89.

Para mensuração do valor de emissividade da placa, segue-se também uma rotina:

- (i) Aferir a temperatura da fita com emissividade igual a 0,95;
- (ii) Realizar medida de temperatura de uma região da placa próxima à fita;
- (iii) Ajusta os valores da emissividade até encontrar o mesmo valor de temperatura da fita. O valor da emissividade encontrado nesse momento é o correspondente ao objeto em estudo.

Esse procedimento foi realizado em quatro placas encontrando um valor médio de 0,89 para a emissividade. A Figura 42(a) mostra janelas do *software* Flir QuickReport v1.2 com os dados de temperatura da fita e a Figura 42(b), com os dados da emissividade e da temperatura da placa.

Figura 42 – Janela do *software* QuickReport v1.2 (a) Valor de temperatura da fita (b) Valor de temperatura da placa e emissividade



Para a placa exemplo em questão foi atestado um valor de 0,92 para a emissividade.

### 3.2.2 Obtenção das variáveis dependentes

#### 3.2.2.1 Parâmetros termográficos: Delta – T e temperaturas

Nesta etapa utilizou-se o *software* Flir QuickReport v1.2 para o tratamento das imagens, a análise da evolução da temperatura nas regiões com e sem fissuras, e, também, para a obtenção do parâmetro termográfico: Delta T ( $\Delta T$ ) (Equação 10). Parâmetro mencionado por Maldague (2001) como contraste absoluto, discutido no item 2.4.1 da revisão da literatura.

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

Onde:

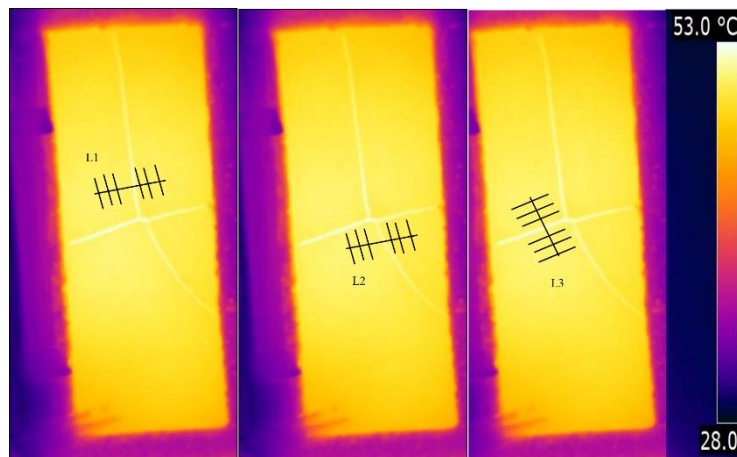
Delta-T: diferença de temperatura.

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

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

Na investigação do Delta-T, foram traçadas três linhas em fissuras distintas na mesma placa, exemplificadas na Figura 43. Os valores de temperatura dessas linhas foram utilizados para se obter o valor de temperatura da região com defeito. Para cada linha traçada, traçaram-se três linhas de cada lado para se obter, com maior precisão, o valor da temperatura média da região sem defeito. Ressalta-se que as linhas foram traçadas na mesma posição em cada termograma investigado.

Figura 43 - Disposição das linhas analisadas



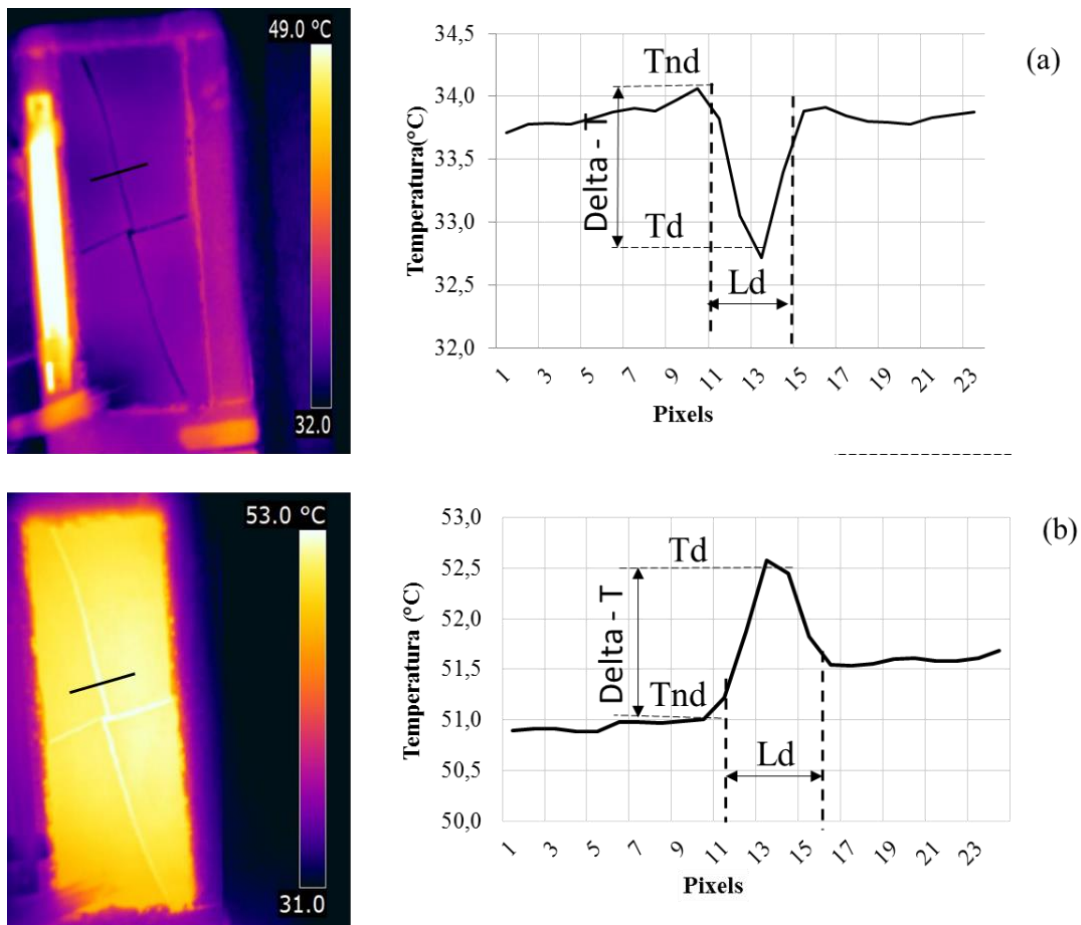
O procedimento para mensurar a temperatura do defeito, utilizando-se o método da máxima e mínima inclinação, consiste nas etapas a seguir.

- Determinação da temperatura em cada *pixel* de uma linha na parte central da placa que transpassa o defeito;
- Aplicação de cálculo de médias móveis entre cada dois pontos consecutivos de temperatura para toda a linha, com a finalidade de reduzir os ruídos;
- Diferença de temperaturas (inclinação) entre as médias consecutivas obtidas no item anterior;
- Localização dos *pixels* de mínima e máxima inclinação da curva;

- Determinação do intervalo de *pixels* que corresponde ao defeito, como mostra a Figura 44;
- Localização no intervalo correspondente ao defeito o *pixel* com menor temperatura no aquecimento e maior temperatura no arrefecimento, sendo que o seu valor corresponde à temperatura do defeito ( $T_d$ ).

A Figura 44 mostra os perfis de temperatura da linha que atravessa o defeito, no regime de aquecimento e arrefecimento, e delimita o intervalo da largura do dano ( $L_d$ ).

Figura 44 - Linha de temperatura transversal à fissura (a) Valores de temperatura dos *pixels* no aquecimento (b) Valores de temperatura dos *pixels* no arrefecimento

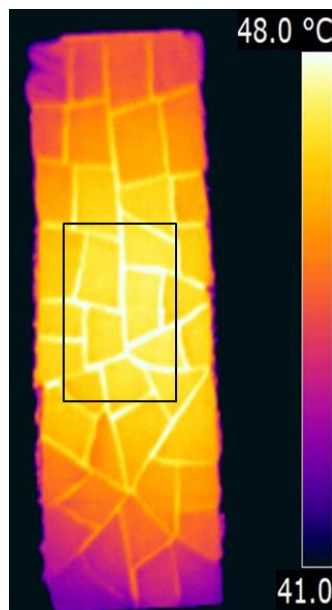


Como mostra na Figura 44, o intervalo  $L_d$  corresponde aos valores de temperatura em cada *pixel* na região do dano. A temperatura  $T_d$  utilizada no cálculo do  $\Delta - T$  foi definida pelo *pixel* com menor temperatura no aquecimento e maior temperatura no arrefecimento no intervalo de *pixels* que corresponde ao defeito

Obtido os valores de temperatura dos *pixels* que correspondem à fissura, foi realizado um estudo por meio do desvio padrão das três linhas que transpassaram o defeito. A linha que apresentou valores mais distantes da média, mais ou menos um desvio, foi desconsiderada e se calculou a média das duas linhas com desvios menores. O resultado da temperatura média correspondeu ao valor da temperatura do defeito. O mesmo procedimento foi replicado para as seis linhas traçadas na região sem defeito, descartando-se uma linha de cada lado, as que mais se afastaram da média.

As placas ramificadas foram investigadas por meio da temperatura média da área central utilizando o *software* Flir QuickReport (Figura 45). Esse parâmetro foi analisado para verificar as diferenças entre as placas lineares e a avaliação do seu grau de dano abertura e largura.

Figura 45 - Método para aquisição de temperatura global



A temperatura média foi mensurada em períodos de 12, 36, 60, 84, 108, 132, 156, 180, 204 e 228 minutos. Incorporando informações do início, meio e fim do regime de aquecimento e arrefecimento.

### 3.2.2.2 Parâmetro termográfico: Largura do dano ( $L_d$ )

A largura do dano ( $L_d$ ) foi mensurada por meio dos termogramas e comparada com a real dimensão da fissura. A determinação da largura do dano foi baseada no IFOV da câmera termográfica e na identificação dos pontos de máxima e mínima inclinação, discutidos no item anterior, e na quantidade de *pixels* entre estes pontos. A seguir, descreve-se a sequência para mensuração do defeito.

- Determinação da temperatura em cada *pixel* de uma linha na parte central da placa atravessando o defeito;
- Aplicação de cálculo de médias móveis entre cada dois pontos consecutivos de temperatura para toda a linha, com a finalidade de reduzir os ruídos;
- Diferença de temperaturas (inclinação) entre as médias consecutivas obtidas no item anterior;
- Localização dos *pixels* de mínima e máxima inclinação da curva;
- Contagem dos *pixels* dentro do intervalo correspondente ao defeito;
- Determinação da largura correspondente a cada *pixel*, multiplicando-se o IFOV pela distância da câmera ao alvo e pela quantidade de *pixels* encontrados no intervalo que corresponde ao defeito (Equação 11).

$$L_{\text{dano}} = L_d \cdot \text{IFOV} \cdot L \quad (11)$$

Onde:

$L_{\text{dano}}$  – largura do dano (mm);

$L_d$  – largura do dano no termograma (*pixel*);

IFOV – relativo à lente da câmera termográfica (mrad);

$L$  – distância da câmara termográfica ao alvo (m).

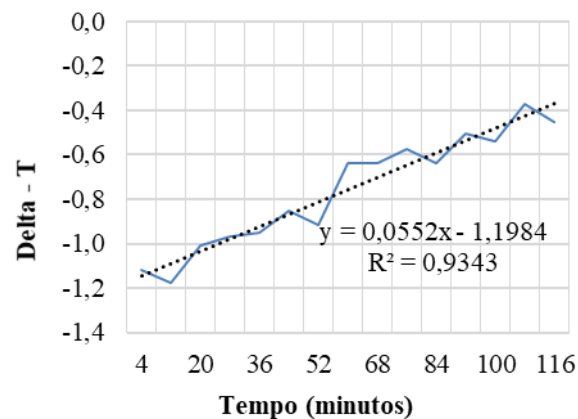
Para o cálculo da largura do dano foi definida uma das três linhas investigadas no cálculo do  $\Delta T$  que transpassaram o defeito, utilizou-se um estudo semelhante ao anterior por meio do desvio padrão para essa escolha. A linha que apresentou os melhores valores dentro do critério adotado foi considerada para o cálculo da largura do dano, nos termogramas ao longo do tempo.



### 3.2.2.3 Parâmetro Termográfico: Velocidade de aquecimento e arrefecimento

As velocidades de aquecimento (Vel. Aquec.) e arrefecimento (Vel. Arref.) foram encontradas por meio da equação reduzida da reta. O coeficiente angular traz informações sobre a inclinação e esta, por sua vez, sobre a velocidade de aquecimento da região que permeia o defeito. Isto, devido ao fato de que a linha de tendência será aplicada nos resultados do Delta – T no regime de aquecimento e arrefecimento. Então, as velocidades foram utilizadas para investigar a evolução da temperatura da fissura nos dois regimes. A Figura 46 exemplifica uma linha de tendência aplicada aos valores do Delta – T.

Figura 46 - Velocidade de aquecimento da placa FISS L5



De acordo com a metodologia apresentada e os valores observado na Figura 46 a velocidade de aquecimento para a placa FISS L5 é 0,055 °C/min.

### 3.2.2.4 Parâmetro fluxo de calor: Gradiente placa ( $G_{Int}$ )

Com a leitura dos termopares, foi determinada a temperatura na superfície, atrás da placa e na interface da região entre a placa fissurada e a placa base, uma vez que todas as placas foram confeccionadas com um termopar inserido na camada interna próxima à região central. Dessa forma, os termopares permitiram obter o gradiente de temperatura da região próxima ao defeito. Esse parâmetro é resultante da diferença entre a temperatura do termopar da interface e a temperatura do termopar da superfície da placa fissurada (Equação 12).

$$G_{Int} = T_{int} - T_{fron} \quad (12)$$

Onde:

$G_{Int}$  – gradiente interface (°C)

$T_{int}$  – temperatura interna na interface entre a placa base e a placa fissurada (°C)

$T_{fron}$  – temperatura da superfície frontal (°C)

### 3.3 ETAPA 3: ANÁLISES QUALITATIVA E QUANTITATIVA

Na etapa posterior à aquisição dos termogramas e dos dados, se apresentam as análises qualitativas e quantitativas das placas ensaiadas. De maneira a sistematizar a apresentação dos resultados, com o objetivo de facilitar a compreensão dos padrões de comportamento para cada variável independente investigada, se dividiu as análises em dois grandes grupos para cada tipo tipologia, linear ou ramificada, como discriminado a seguir.

- Grupo 1 – Corresponde às investigações qualitativas, analisando-se o comportamento da temperatura da fissura, sua localização nos termogramas, e como a variação da profundidade, abertura e tipologia afetam sua visualização na imagem térmica ao longo tempo;
- Grupo 2 – Refere-se às investigações quantitativas em relação aos parâmetros termográficos e do fluxo de calor, observando-se a influência das variáveis: aberturas, profundidade e tipologias nos parâmetros, com o intuito de classificar as fissuras em relação ao seu grau de dano. A Tabela 5 sintetiza a ordem da apresentação dos resultados para as variáveis abertura e profundidade das duas tipologias em estudo.

Tabela 5 - Síntese da ordem de apresentação dos resultados

<b>Análise da influência da abertura das fissuras</b>			
<b>Classificação</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Profundidade (mm)</b>	<b>PLACAS</b>
Estudo 1	1,0	10,0	FISS L2/R2
	2,0		FISS L3/R3
	3,0		FISS L5/R5
Estudo 2	1,0	5,0	FISS L1/R1
	3,0		FISS L4/R4
<b>Análise da influência da profundidade das fissuras</b>			
Estudo 3	3,0	5,0	FISS L4/R4
		10,0	FISS L5/R5
		15,0	FISS L6/R6
Estudo 4	1,0	5,0	FISS L1/R1
		10,0	FISS L2/R2

De modo geral, as investigações quantitativas foram divididas em dois tipos de análises, nas quais foram estudadas a influência da abertura e da profundidade. Para esse fim, no Estudo 1 e Estudo 2 foi fixada a variável profundidade e nos Estudo 3 e Estudo 4 foi fixada a variável abertura, respectivamente.

## 4 RESULTADOS

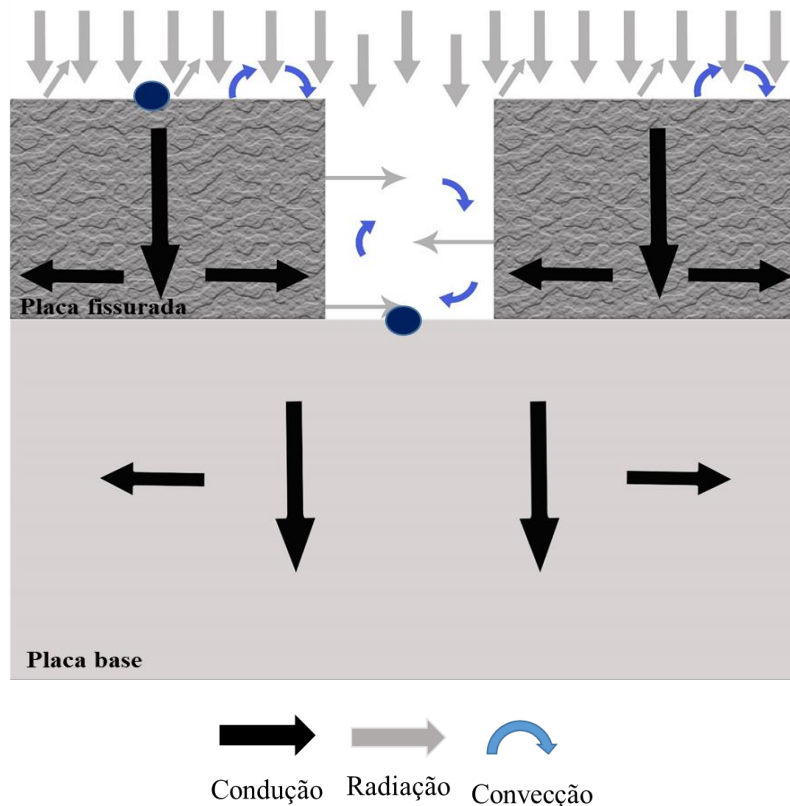
A apresentação dos resultados seguiu a sequência adotada na Etapa 3 do Programa Experimental. O objetivo deste capítulo é apresentar qualitativa e quantitativamente a influência das variáveis independentes (tipologia, profundidade e abertura) no comportamento térmico dos termogramas e na classificação do dano das fissuras.

### 4.1 RESULTADOS DAS PLACAS COM FISSURAS LINEARES

#### 4.1.1 Análises Qualitativas

Inicialmente, caracterizou-se o comportamento térmico das fissuras lineares para se compreender os fenômenos ocorridos nos resultados qualitativos e quantitativos. Dessa forma, a Figura 47 exemplifica as trocas de calor envolvidas no sistema em estudo para o regime de aquecimento.

Figura 47 - Cenário de transferência térmica para placas com fissuras lineares no regime de aquecimento



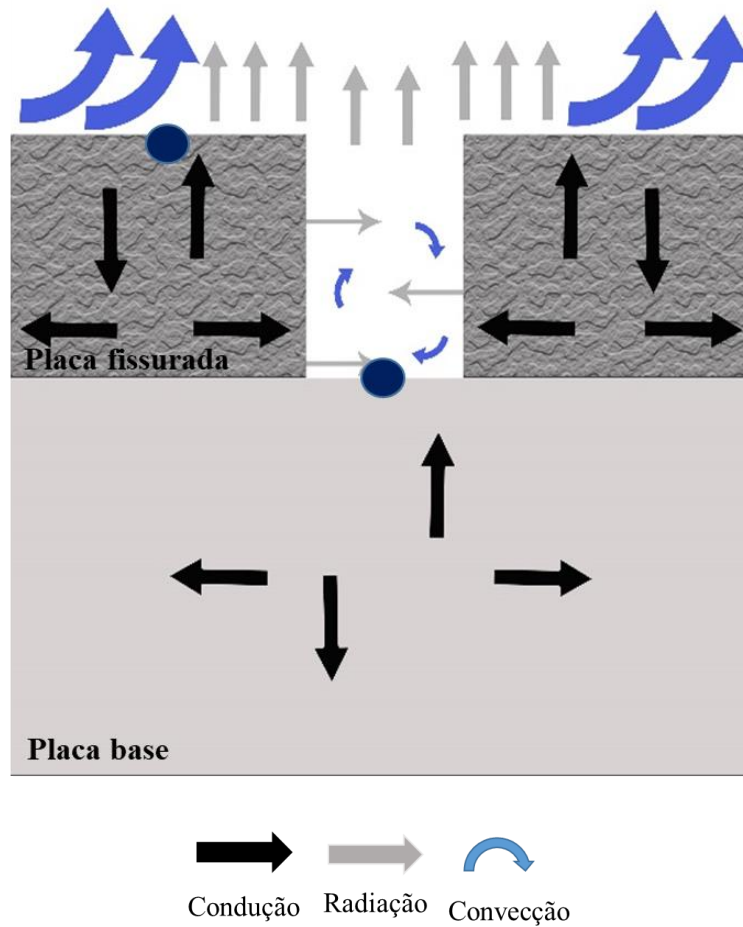
Observa-se que o aquecimento da superfície ocorre diretamente por radiação advinda da fonte de calor. Após a absorção da radiação pela placa fissurada, o fluxo de calor dentro da mesma ocorre essencialmente por condução em várias direções, porém por um caminho preferencial.

A condução prevalece nesse regime, uma vez que na fissura não há uma quantidade de fluido em movimento suficiente para que o aquecimento seja dado por convecção (ÇENGEL & GHAJAR, 2009), ainda que esse fenômeno ocorra em pequena intensidade, bem como a irradiação das paredes das fissuras no aquecimento do sistema. Com a continuidade do aquecimento, a temperatura da fissura (placa base) é incrementada, assim como todo o sistema, até atingir o ponto em que a temperatura do fundo e da superfície da placa são as mesmas (equilíbrio térmico).

De modo geral, o comportamento do fluxo de calor no aquecimento ocorre no sentido de fora para dentro, ou seja, inicialmente a placa fissurada recebe uma quantidade de calor  $Q_{PF}$ , enquanto a placa base recebe uma quantidade de calor  $Q_B$ , sendo que  $Q_B$  vai ser sempre menor que  $Q_{PF}$ , já que o calor que a placa base recebe vem da placa fissurada, mas o valor de  $Q_B$  vai aumentando com o tempo. Tal fato implica a variação de temperatura da placa base, que também vai aumentando com o tempo, até o ponto que a temperatura da placa base e temperatura da superfície são as mesmas. Nesse momento, dependendo das características da placa fissurada (espessura), pode acontecer que a mesma não vai mais absorver todo o calor, de modo que uma parte dele vai ser devolvida ao ambiente e a outra vai para a placa base. Então, nesse regime, a temperatura da placa base vai aumentar mais rapidamente que a temperatura da placa fissurada, podendo apresentar temperatura mais elevada que a da superfície da placa fissurada sem que o aquecedor tenha sido desligado.

No processo de arrefecimento, o sentido do fluxo de calor ocorre de dentro para fora da placa fissurada. Essa inversão ocorre porque a temperatura da placa base é maior do que a temperatura da placa fissurada. A Figura 48 exemplifica o cenário das trocas de calor envolvidas no sistema em estudo para o regime de arrefecimento.

Figura 48 - Cenário de transferência térmica para placas com fissuras lineares no regime de arrefecimento



Nesta etapa o fluxo de calor também não é unidirecional, ou seja, quando ocorrem diferenças de temperatura, o fluxo ocorre no sentido da profundidade e no sentido da região central para as bordas, e a superfície apresenta um resfriamento mais intenso, principalmente, pelas trocas por convecção com o ar. Deste modo, espera-se que a temperatura da superfície decresça com o passar do tempo.

De modo geral, o comportamento do fluxo de calor no arrefecimento pode ser explicado por meio da análise das trocas de calor nas superfícies em contato direto com o ar (Equações 13, 14 e 15).

$$Q_{cedB} \approx Q_{cedPF} \quad (13)$$

$$m_B c \Delta T_B \approx m_{PF} c \Delta T_{PF} \quad (14)$$

$$\Delta T_B \approx \frac{m_{PF}}{m_B} \Delta T_{PF} \quad (15)$$

Onde:

$Q_{cedB}$  = Calor cedido da placa base

$Q_{absPF}$  = Calor cedido da placa fissurada

$c$  = Calor específico da substância que constitui o corpo

$m_B$  = Massa da placa base

$m_{PF}$  = Massa da placa fissurada

$\Delta T$  = Variação da temperatura

De acordo com as equações, a quantidade de calor cedida pela placa base é aproximadamente igual à quantidade de calor cedida pela placa fissurada, uma vez que os corpos de prova possuem o mesmo calor específico e a mesma área de contato com o ar. De posse dessas informações é possível afirmar que a variação da temperatura da placa base será menor, visto que a sua massa é significativamente maior que a massa da placa fissurada. Sempre que isso ocorre, a variação da temperatura da placa base será menor. Portanto, durante o arrefecimento, a temperatura da placa base será maior que a temperatura da placa fissurada e, conseqüentemente, a temperatura da fissura será maior, porque esta é a temperatura da placa base.

Para visualizar o comportamento descrito nos esquemas anteriores, foram escolhidos os termogramas das placas FISS L1 e L6, nos períodos de 12, 36, 60 e 84 minutos (min) do aquecimento e de 12, 36, 60, 84 e 108 minutos do arrefecimento, que podem ser vistos nas Figuras 49 e 50, respectivamente. Esses períodos foram definidos por permitirem o acompanhamento da evolução da temperatura nos termogramas por um longo período do aquecimento e do arrefecimento, o que possibilitou a análise do comportamento térmico qualitativamente, a partir de um estágio inicial até uma tendência de homogeneidade da temperatura da superfície. A escolha das placas L1 e L6 estão associadas à necessidade de se analisar a diferença na perturbação do fluxo de calor, na menor e na maior abertura estudada, ressalta-se que a região delimitada se refere ao trecho investigado. Qualitativamente, o fenômeno observado não se diferenciou para as demais placas, por isso os termogramas das outras quatro placas lineares encontram-se no Apêndice B.

Figura 49 - Placa FISS L1 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento

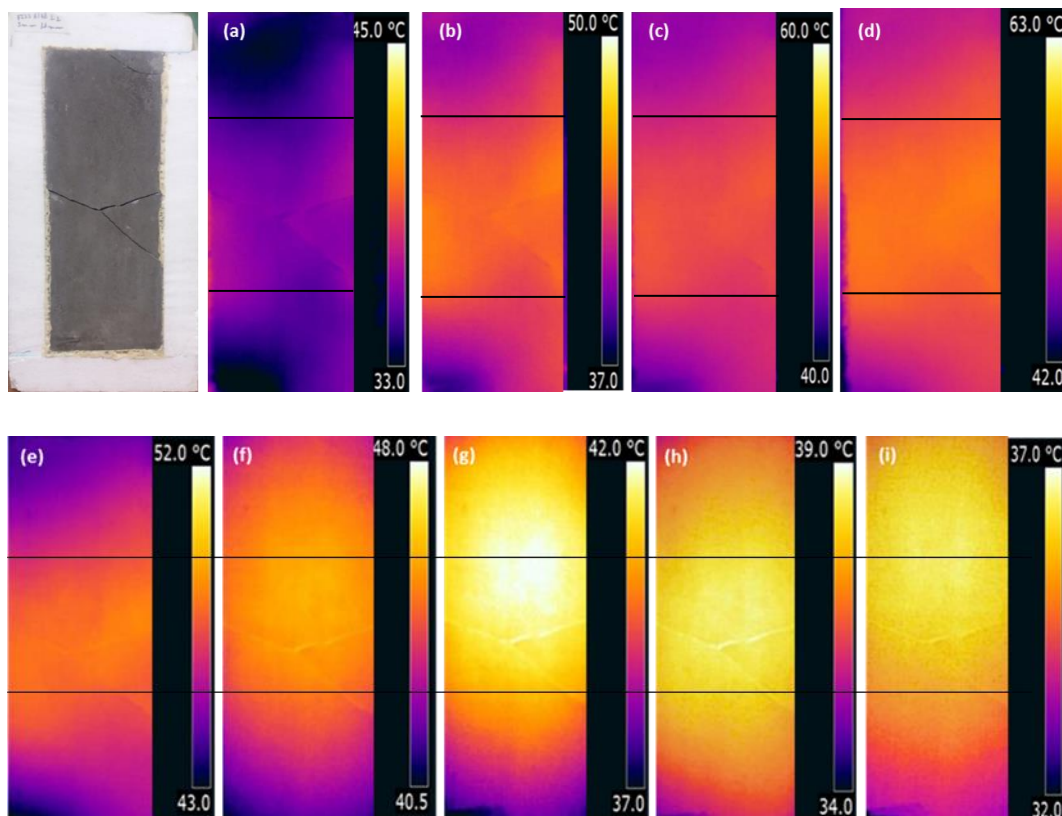
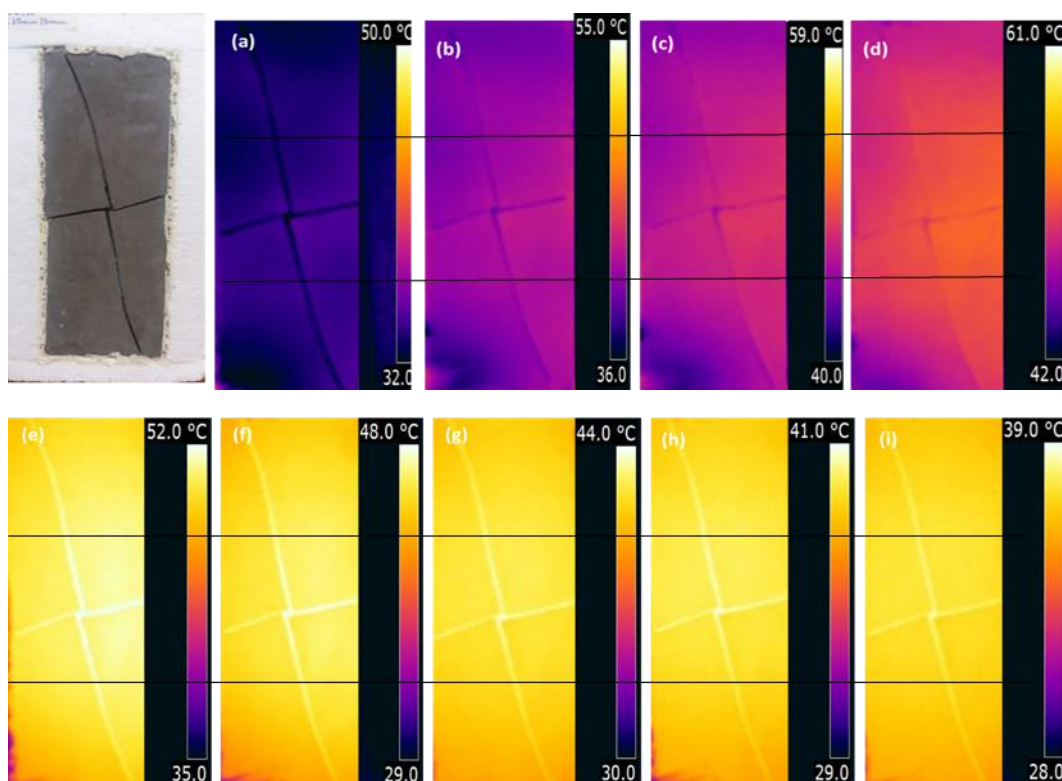


Figura 50 - Placa FISS L6 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento





Observa-se que, no início do aquecimento, as fissuras estão com a temperatura inferior à da região não fissurada, uma vez que como mencionado anteriormente no começo do aquecimento  $Q_{PF} > Q_B$ , existe menor variação de temperatura da placa base. Como inicialmente as temperaturas eram as mesmas, obtém-se, em um dado intervalo de tempo, temperatura inferior na placa base, que tende a subir ao longo do tempo, resultando na redução da diferença de temperatura entre a placa base e a placa fissurada até que ambas fiquem iguais. Enfatiza-se que a temperatura da fissura é a temperatura da placa base.

No arrefecimento, os termogramas apresentam fissuras mais nítidas, uma vez que a irradiação mais intensa é da placa base por estar mais aquecida, e ser capturada pela câmera térmica. O contato, com a placa base também justifica a elevada temperatura das fissuras nesse regime, pois mantém o seu fundo aquecido confirmado na leitura dos termopares, o que permite observar sua delimitação facilmente nos termogramas.

A visualização das fissuras vai se perdendo ao longo do tempo, tanto no regime de aquecimento quanto no de arrefecimento, dificultando a sua identificação. Esse fenômeno ocorre devido aos processos de transporte de calor que tendem a levar o sistema para um estágio, onde as temperaturas da superfície da placa e da fissura são iguais.

O fenômeno discutido anteriormente é confirmado ao se analisar as Figuras 49 e 50. Percebe-se que, tanto no aquecimento quanto no arrefecimento, o tamanho da abertura parece diminuir com o passar do tempo decorrente da mudança de cores nos termogramas, que está relacionado ao estabelecimento de igualdade de temperatura entre a fissura e a superfície da placa. Extrapolando-se essa tendência para uma situação real, infere-se que o tempo de inspeção de fissuras se reduz a períodos de tempo muito específicos do dia, bem nas primeiras horas da manhã ou após a inversão do fluxo. Atualmente, outros pesquisadores do grupoda Linha de Pesquisa de Desempenho, Vida Útil, Degradação e Patologia do Ambiente Construído do Programa de Pós Graduação da UnB realizam estudos em campo para determinar, em escala real, as etapas do dia nas quais devem ser realizadas as inspeções (AIDAR, 2019). Por fim, a visualização das fissuras nos termogramas da placa FISS L1 (Figura 49) limitou-se nos dois regimes, consequência da sua pequena abertura que, nesse caso, ficou próxima da resolução do equipamento utilizado.

### 4.1.2 Análises Quantitativas

Este item apresenta os resultados das investigações quantitativas realizadas nas placas com fissuras lineares. A finalidade dessas investigações é definir padrões de comportamento para classificar as fissuras e avaliar o seu grau de dano. Para isso, são investigadas as diferenças de temperatura entre as regiões com e sem defeito (Delta – T), a evolução das temperaturas da região do defeito e da superfície sem danos, velocidade de aquecimento e arrefecimento do Delta - T e a largura do dano. Todas essas variáveis dependentes mencionadas acima foram estudadas para determinar critérios e padrões de comportamento para classificar as fissuras em ordem de gravidade. Outra variável dependente estudada foi o gradiente na interface entre as placas ( $G_{int}$ ), utilizado para acompanhar o aquecimento e arrefecimento das placas, não sendo possível sua correlação direta com o Delta – T.

A organização dos resultados se subdividiu em estudos da variável abertura e profundidade. Para investigar a abertura, foi fixada a profundidade das fissuras e para investigar a profundidade fixou-se a abertura. A Tabela 6 sintetiza a ordem dos estudos realizados nas placas com fissuras lineares.

Tabela 6 - Síntese da ordem de apresentação dos resultados para placas lineares

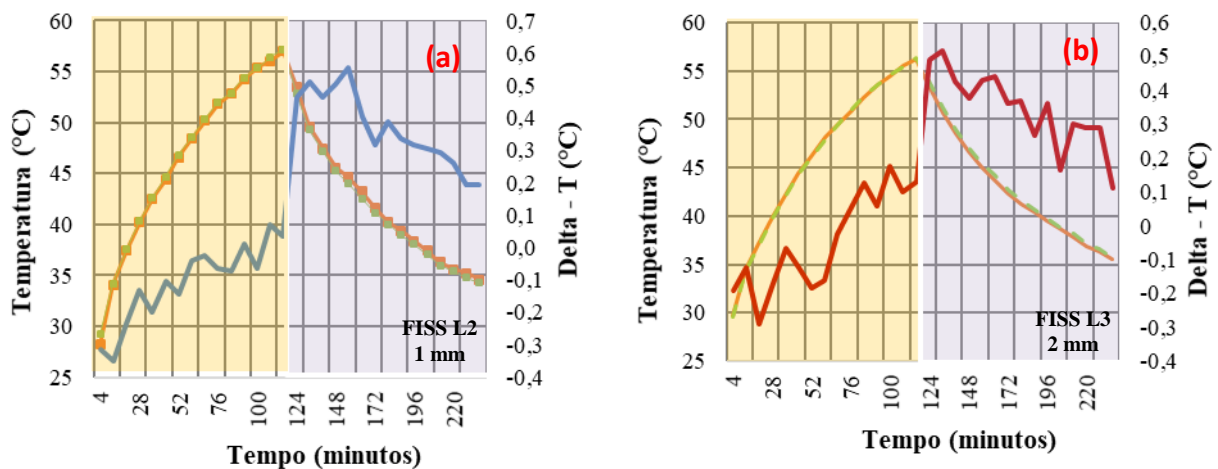
<b>Análise da influência da abertura das fissuras</b>			
<b>Classificação</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Profundidade (mm)</b>	<b>PLACAS</b>
Estudo 1	1,0	10,0	FISS L2
	2,0		FISS L3
	3,0		FISS L5
Estudo 2	1,0	5,0	FISS L1
	3,0		FISS L4
<b>Análise da influência da profundidade das fissuras</b>			
Estudo 3	3,0	5,0	FISS L4
		10,0	FISS L5
		15,0	FISS L6
Estudo 4	1,0	5,0	FISS L1
		10,0	FISS L2

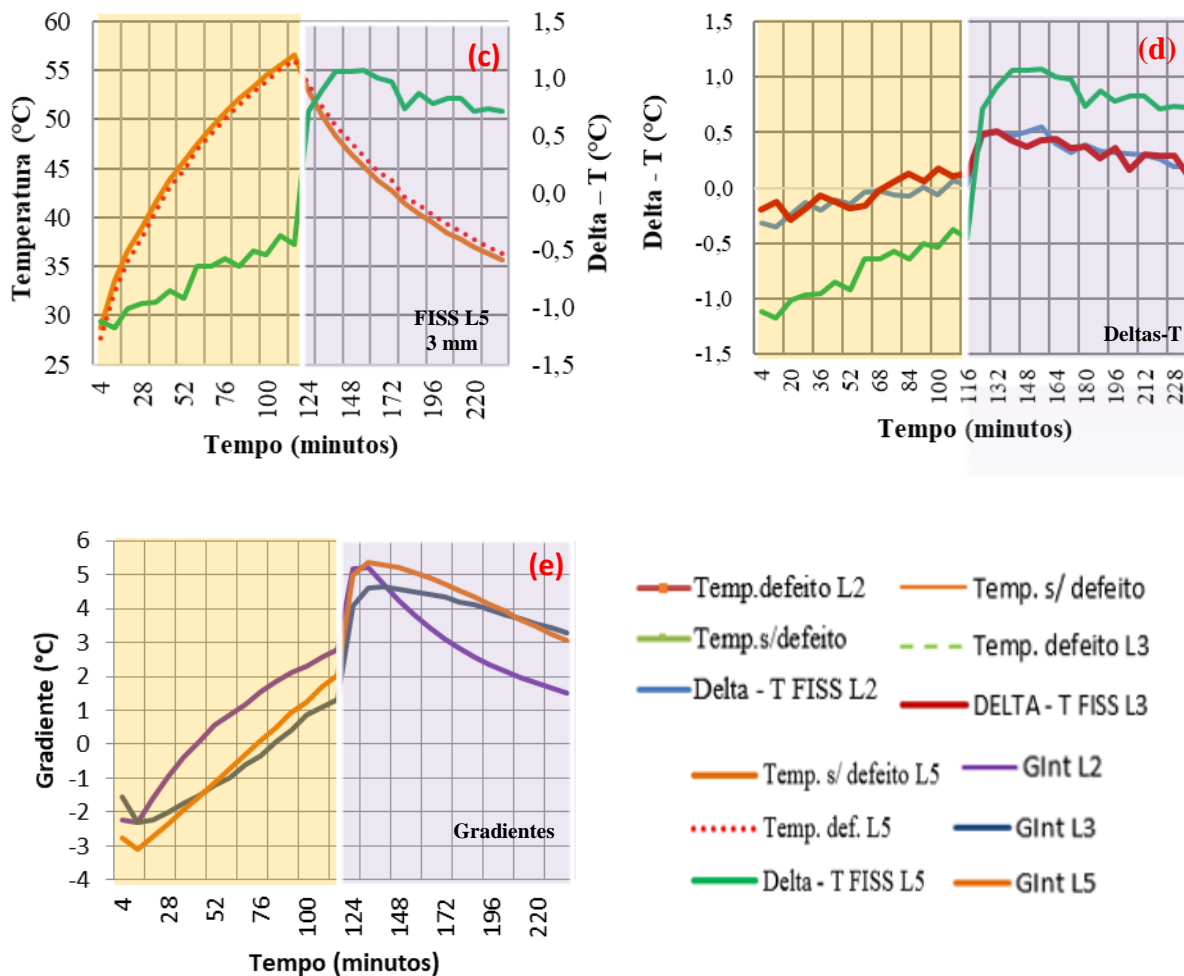
O sequenciamento das análises foi estabelecido desta forma para que, em cada estudo, fosse possível identificar o comportamento proporcionado pela variável, seja ela abertura ou profundidade. Nos itens abaixo, apresentam-se os resultados para cada grupo de estudo em relação aos parâmetros termográficos, ao fluxo de calor e à mensuração da largura do dano para as placas lineares.

#### 4.1.2.1 Estudo 1: Análise da influência das aberturas das fissuras (1,0 mm.; 2,0 mm e 3,0 mm)

Neste item são apresentados os resultados das placas FISS L2, FISS L3 e FISS L5, todas com 10 mm de profundidade e 1,0 mm.; 2,0 mm e 3,0 mm de abertura. A Figura 51 mostra o Delta – T e os valores de temperatura das regiões, com e sem defeito, da placa com fissura de 1,0 mm (a), 2,0 mm (b) e 3,0 mm (c). As Figuras 51 (d) e (e) apresentam os resultados de Deltas – T e gradientes das três placas analisadas, respectivamente.

Figura 51 - (a) Placa FISS L2. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (b) Placa FISS L3. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (c) Placa FISS L5. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (d) Deltas – T e GInt L2, L3 e L5.





As investigações foram iniciadas pelo comportamento da temperatura das regiões com e sem defeito. Todas as placas tiveram o comportamento esperado em virtude do regime de aquecimento e arrefecimento a que foram submetidas: acréscimo de temperatura até os 120 minutos e decréscimo após esse período, este resultante do desligamento do sistema de aquecimento. Outra constatação observada nas regiões com e sem defeito, refere-se à pequena diferença de temperatura entre elas. Por isso, em algumas situações foi atestado valor do Delta - T inferior a 0,6 °C (Figura 51a e b). Percebe-se também que todas as placas tiveram o valor máximo da temperatura do defeito próximo aos 56 °C, o que está em concordância com a temperatura máxima atingida pelo sistema de aquecimento em torno dos 60 °C.

Em relação ao comportamento do Delta - T visto em conjunto na Figura 51 (d), observa-se que o início do aquecimento é um dos momentos em que se encontra seu maior valor, em virtude da grande diferença entre a superfície da fissura e a superfície da placa base. Nota-se que ao longo do aquecimento ocorre uma redução do contraste, devido aos processos de transporte de calor que tendem a levar o sistema para um estágio onde as temperaturas da

superfície da placa base e da fissura são semelhantes. Com o desligamento dos sistemas de aquecimento, percebe-se uma evolução acentuada no valor do Delta – T, sendo este, também, um dos momentos de maiores contrastes. Isso acontece devido à alta irradiação de calor da placa base, que representa a temperatura da fissura. Com o arrefecimento do sistema o valor do Delta – T é reduzido ao longo do tempo.

As análises referentes aos Deltas – T foram importantes para se classificar o grau de dano, para essa situação em que está associada a abertura da fissura. Percebe-se, por meio da Figura 51 (d), que a placa com 3,0 mm de abertura (FISS L5) apresentou maior Delta -T em comparação com as placas de 2,0 mm (FISS L2) e 1,0 mm (FISS L3), que tiveram Delta – T semelhantes. Dessa forma, comprova-se um dos objetivos dessa pesquisa, a caracterização do grau de dano das fissuras por meio da sua abertura, uma vez que a placa com a maior abertura de fissuras apresentou o maior Delta – T.

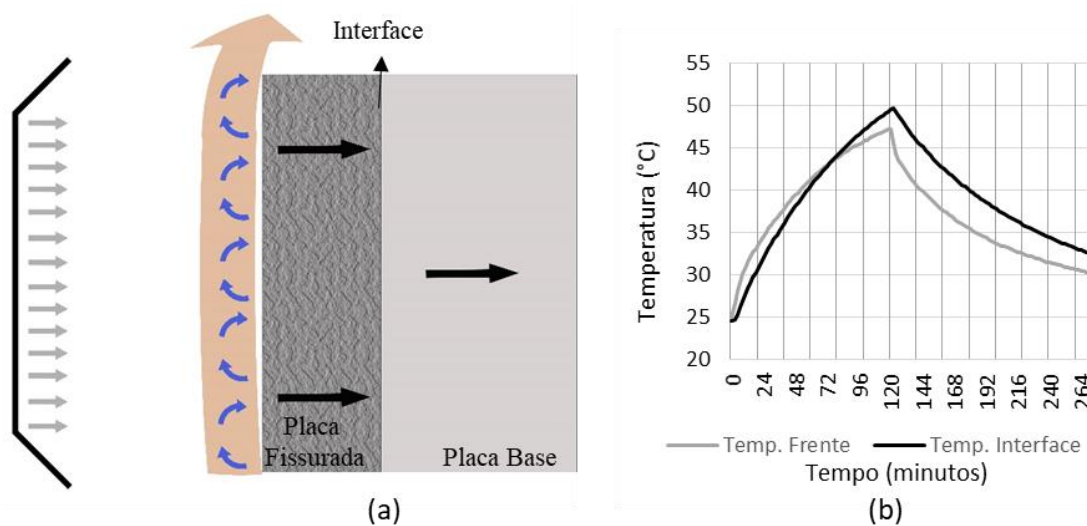
O momento da inversão do Delta – T, ou seja, quando a temperatura da fissura se torna maior que a temperatura da superfície, também se diferenciou entre as placas (Figura 51d). Para as placas FISS L2 e L3, a mudança no sentido do Delta – T ocorreu um pouco antes do desligamento das lâmpadas. A FISS L5 somente teve a inversão do Delta – T após o desligamento das lâmpadas de aquecimento, devido a maior abertura que diferenciou a intensidade dos fenômenos de transporte de calor. A FISS L5 apresentou quase todos os parâmetros superiores as placas FISS L2 e L3, alguns com diferenças relevantes, como o Delta – T. Deve-se destacar tal ocorrência, pois o grau de dano é maior para essa fissura.

O gradiente  $G_{int}$  avalia o fluxo de calor quantificado pelos termopares, uma vez que existem diferenças de temperatura entre a superfície da placa fissurada e a superfície da placa base. Observa – se, na Figura 51 (e), que todas as placas tiveram a inversão do gradiente antes do término do ciclo de aquecimento, semelhante à inversão do Delta – T, principalmente, para as placas FISS L2 e FISS L3. Contudo, o Delta – T e o gradiente não podem ser correlacionados. A forma como foi medido o Delta – T pode levar a diferenças significativas em relação aos valores do gradiente. Os gradientes são obtidos por meio de medidas diretas, ou seja, experimentalmente, enquanto o valor do Delta – T foi obtido por uma metodologia composta por um grande número de medições sobre o termograma. Por outro lado, o termopar não se localizava exatamente na fissura, de modo que a correlação entre o  $G_{int}$  e o Delta- T não é tão direta, o que justifica que as grandezas não mudam no mesmo tempo, ou não tenham em

alguns casos comportamento similar. Por isso, a análise dos gradientes será realizada individualmente para caracterizar o comportamento térmico do sistema.

Neste contexto, a inversão do gradiente (Gint) pode ser justificada como mencionado no item 4.1.1, no qual explica que dependo das características do sistema, pode acontecer que a temperatura da placa base seja maior que a temperatura da placa fissurada antes de desligar o aquecedor. A Figura 52 faz referência a esta situação, pois a perda de calor por convecção aumenta consideravelmente no decorrer do tempo em comparação com o calor absorvido pela placa fissurada. Do mesmo modo também aumenta o calor absorvido pela placa base.

Figura 52 - Inversão do Gint. (a) Ilustração dos fenômenos (b) Temperatura dos termopares.



A Figura 52(b) mostra que no início a velocidade de aquecimento da frente da placa fissurada era maior. Observa-se que com o decorrer do tempo essa velocidade reduz, ao mesmo tempo há uma redução na velocidade de aquecimento da interface, no entanto, essa redução é bem menor, resultando que a temperatura da placa base (interface) aumente mais rapidamente que a temperatura da frente da placa fissurada, acontecendo a inversão do gradiente antes de desligar o aquecedor.

A Tabela 7 sintetiza numericamente as principais informações gráficas encontradas

Tabela 7 - Dados numéricos referentes aos parâmetros termográficos e fluxo de calor placa FISS L2, L3 e L5

Placas	Inversão do GInt (min)	Inversão do Delta - T (min)	Valor máx Delta - T Aquec. (°C) Módulo	Valor máx Delta - T Arref. (°C) Módulo	Valor máx Temp. def. Aquec. (°C)	Valor máx Temp. def. Arref. (°C)	Vel. Aquec. (°C/min) Módulo	Vel. Arref. (°C/min) Módulo
Placa FISS L2	44	92	0,35	0,55	56,31	47,39	0,025	0,023
Placa FISS L3	82	84	0,29	0,52	56,41	51,12	0,028	0,023
Placa FISS L5	74	120	1,17	1,06	56,1	53,59	0,055	0,033

A Tabela 8 evidencia numericamente os fenômenos observados na Figura 51. Os valores da velocidade de aquecimento e arrefecimento foram obtidos ajustando-se os dados do Delta – T ao modelo linear. Os gráficos do Delta – T com a linha de tendência e os dados de ajuste estão no Apêndice C. As velocidades apresentaram maiores diferença no aquecimento e arrefecimento para a placa de 3,0 mm (FISS L5), influenciada pela sua abertura que facilitou as trocas térmicas nesse regime. Observa-se pela velocidade de variação do Delta-T, para a fissura de 3,0 mm, existe uma maior facilidade de perturbação do fluxo de calor. Em relação às fissuras de 1,0 mm e 2,0 mm, tal ocorrência é menor.

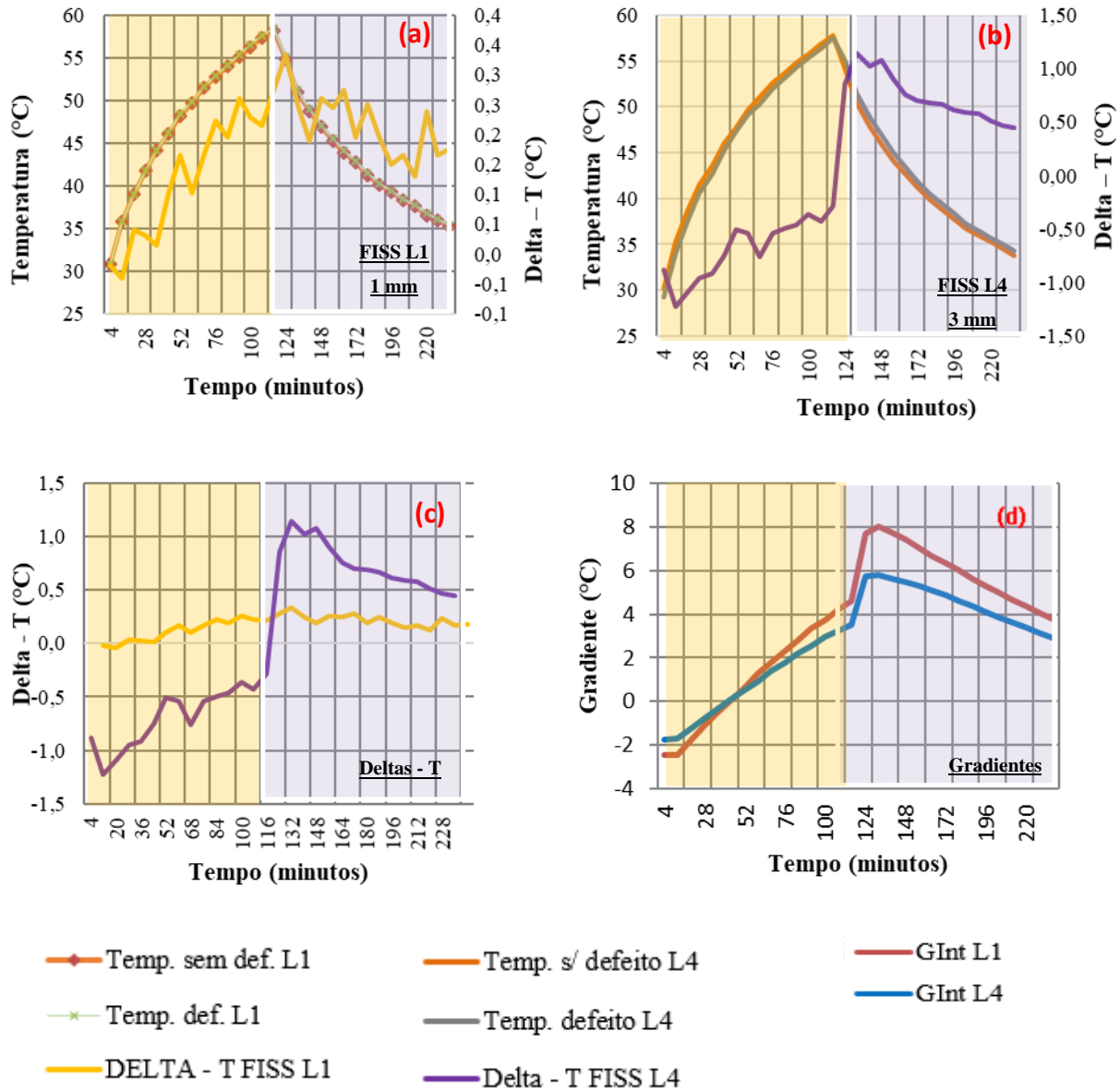
Outro dado que auxilia na interpretação do valor do Delta – T é a temperatura do defeito, nota-se que, nas placas FISS L1 e FISS L2, a temperatura do defeito no aquecimento é maior que a temperatura da placa FISS L5, o que lhes proporciona os menores Deltas – T nesse regime, uma vez que as temperaturas do defeito se assemelham com a temperatura da superfície. No arrefecimento, percebe-se que a placa FISS L5 possui a maior temperatura e, nesse regime, há uma queda brusca de temperatura na superfície, corroborando também seu maior Delta – T nessa fase, visto que a maior abertura de fissura possibilita maior área para irradiação de calor da base.

#### 4.1.2.2 Estudo 2: Análise da influência das aberturas das fissuras (1,0 mm e 3,0 mm)

Neste item são apresentados os resultados das placas FISS L1 e FISS L4, todas com 5,0 mm de profundidade e 1,0 mm e 3,0 mm de abertura. A Figura 53 mostra o Delta – T e os valores de temperatura da região com e sem defeito da placa com fissura de 1,0 mm (a) e 3,0 mm (b).

As Figuras 53 (d) e (e) apresentam os resultados de Deltas – T e os gradientes das placas analisadas.

Figura 53 – (a) placa FISS L1. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (b) Placa FISS L4. Delta – T, Temperatura com e sem defeito (c) Deltas – T (d) GInt FISS L1 e L4



O comportamento dos perfis de temperatura das regiões com e sem defeito não se altera, se comparado com o Estudo 1, visto que elas estão submetidas ao mesmo regime de aquecimento e arrefecimento. Inicialmente, ocorre um crescimento constante da temperatura até os 120 minutos, período em que os aquecedores estão ligados e queda acentuada após esse tempo, resultante do desligamento das lâmpadas. Esse fenômeno pode ser observado nos perfis de temperatura da região com e sem defeito, Figuras 53 (a) e (b).



Nota-se também a proximidade entre os valores da região com e sem defeito, principalmente, para a placa com 1,0 mm de abertura FISS L1 (Figura 53a). As configurações da placa FISS L1, proporcionam aquecimento mais intenso, reduzindo a diferença de temperatura entre a placa base e a superfície. Por essa razão apresentou valores das temperaturas maiores que a placa com 3,0 mm e, conseqüentemente, menor Delta – T. O espaço para confinamento do calor, também é menor, o que proporcionando uma perturbação térmica mais acentuada nessa região e, dificulta a distinção entre a região com e sem defeito nos termogramas.

Em relação ao estudo do Delta – T nota-se diferença expressivas entre as placas FISS L1 e FISS L4 (Figura 53c), semelhante ao constatado no Estudo 1. A placa com 3,0 mm de abertura, ou seja, com maior grau de dano apresentou maior Delta-T (FISS L4). Portanto, corrobora-se o observado no estudo anterior. O tamanho da abertura das fissuras difere os valores do Delta – T, mesmo quando as placas possuem a mesma profundidade. O comportamento do Delta – T também se assemelhou ao Estudo 1, com destaques para o maior valor desse contraste em módulo no início do aquecimento e arrefecimento.

Em relação ao estudo dos gradientes, nota-se, na Figura 53(d), comportamento semelhante entre os gradientes no aquecimento. Enquanto no arrefecimento, a placa FISS L4, com maior abertura da fissura, apresentou uma diferença entre a interface da placa base e a superfície da placa fissurada menor que a FISS L1, ou seja, o processo de perda de calor foi mais intenso na placa FISS L4. O comportamento dos gradientes também se assemelhou ao Estudo 1, com inversão nas duas situações antes dos 120 minutos. A Tabela 8 resume algumas informações quantitativas referentes aos parâmetros termográficos e ao fluxo de calor das placas FISS L1 e L4.

Tabela 8 - Dados numéricos referentes aos parâmetros termográficos e fluxo de calor placa FISS L1 e FISS L4

Placas	Inversão do GInt (min)	Inversão do Delta - T (min)	Valor máx Delta - T Aquec. (°C) Módulo	Valor máx Delta - T Arref. (°C) Módulo	Valor máx Temp. def. Aquec. (°C)	Valor máx Temp. def. Arref. (°C)	Vel. Aquec. (°C/min) Módulo	Vel. Arref. (°C/min) Módulo
Placa FISS L1	41	44	0,27	0,25	58,45	51,25	0,022	0,009
Placa FISS L4	44	120	1,10	1,03	57,51	51,51	0,064	0,045

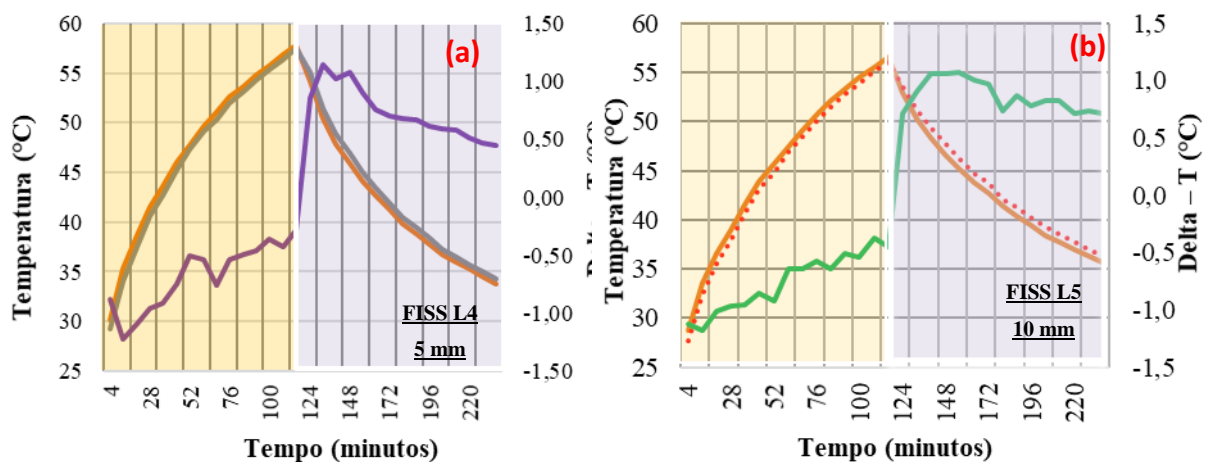
Observam-se diferenças expressivas entre os valores dos Deltas – T da placa com 3,00 mm de abertura (FISS L4). Esta apresentou Delta – T quatro vezes superior à placa com 1,00 mm no aquecimento e arrefecimento. A maior abertura possibilita maior contato com o meio, o que permite maior perturbação do fluxo resultante também em velocidades de aquecimento e arrefecimento mais acentuadas. De modo geral, nesse estudo o tamanho da abertura novamente foi decisivo para se discernir significativamente os valores de Delta – T e afirmar-se o grau de dano.

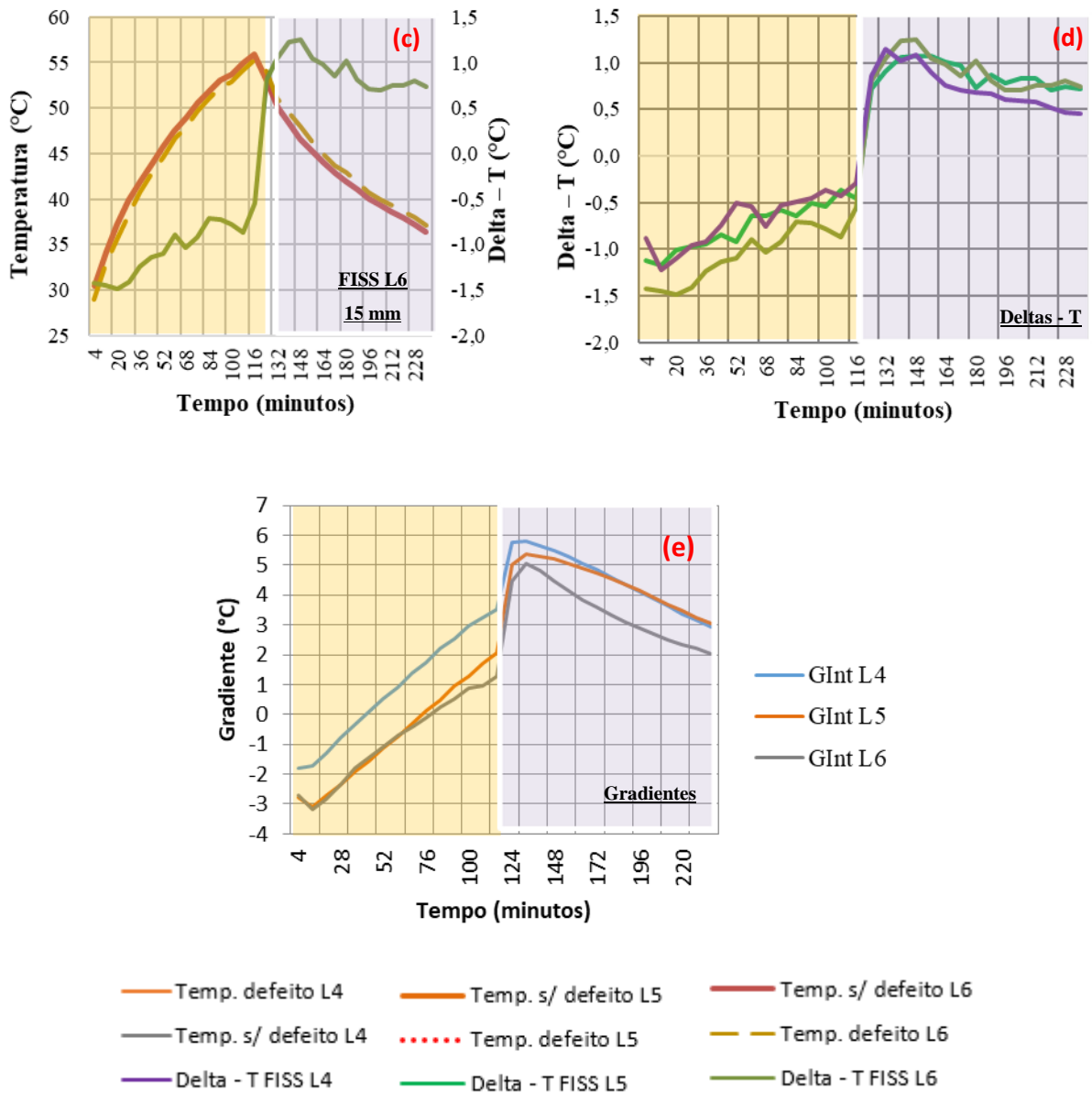
#### 4.1.2.3 Estudo 3: Análise da influência das profundidades das fissuras (5,0 mm -10,0 mm e 15,0 mm)

Diferentemente das análises anteriores em que a variável profundidade era fixa para investigação da influência da abertura nos parâmetros térmicos e do fluxo de calor, a presente situação fixou a abertura em 3,0 mm e 1,00 mm para que o comportamento das diferenças nas profundidades fosse estudado.

A Figura 54 mostra os resultados referentes à evolução da temperatura (Figura 54a,b,c), Deltas- T (Figura 54d) e gradientes ( $G_{Int}$ ) (Figura 54e), das placas com 5,0 mm.; 10,0 mm e 15,0 mm (FISS L4, FISS L5 e FISS L6) de profundidade e 3,00 mm de abertura. Essas correlações tiveram como objetivo associar ao dano das fissuras em relação à profundidade, visto que a variável abertura é fixa.

Figura 54 - (a) placa FISS L4. Delta – T, temperatura com e sem defeito (b) Placa FISS L5. Delta – T, temperatura com e sem defeito (c) Placa FISS L6. Delta – T, temperatura com e sem defeito. (d) Deltas – T (e)  $G_{Int}$  L4, L5 e L6





Analisando o comportamento das temperaturas das regiões com e sem defeito, identificam-se pequenas diferenças entre elas (Figura 54a, b e c). Diferentemente das outras placas, conforme se pode observar nas figuras anteriores, há uma visualização mais perceptível dessas duas regiões na placa FISS L6 (Figura 54c). A sua maior profundidade reduziu a variação de temperatura, o que resultou em menor condução ao longo do tempo, portanto, em maior diferencial de temperatura entre a temperatura da superfície e a temperatura da placa base.

Observa-se, no gráfico da Figura 54(d), que os maiores valores do Delta – T em módulo ocorrem no início do aquecimento e do arrefecimento para todas as placas, fenômeno observado nos Estudos 1 e 2. Em relação a esse parâmetro, percebe-se, no gráfico da Figura

54(d), que a placa de 15,0 mm (FISS L6) possui o maior Delta – T, ao longo do regime de aquecimento, seguido pelas placas de 10,0 mm (FISS L5) e de 5,0 mm (FISS L4). As placas de 5,0 mm e 10,0 mm apresentaram comportamento de Delta – T similar no aquecimento e as placas 10,0 e 15,0 mm no arrefecimento. A profundidade intermediária da placa de 10,0 mm pode ter facilitado essas ocorrências. Ressalta-se que, o Delta – T da placa com 15,0 mm apresentou-se ligeiramente maior nos dois regimes quando comparado diretamente com a placa de 5,0 mm, portanto, afirmando o seu maior grau de dano.

Analisando-se o comportamento dos gradientes  $G_{Int}$  na Figura 54(e) se observa que a placa menos espessa 5,0 mm (FISS L4) teve a inversão do fluxo antes das placas com 10,0 mm (FISS L5) e 15,0 mm (FISS L6), justificado pela diferença da profundidade, como mencionado no estudo do comportamento térmico das fissuras lineares, no capítulo das análises qualitativas. A variação da temperatura da placa fissurada será menor quanto maior for sua massa, portanto, menor será a condução da placa e mais tempo será requerido para que o calor alcance a placa base e ocorra a inversão do fluxo constatada nos gradientes. A Tabela 9 apresenta dados quantitativos dos parâmetros termográficos e os referentes ao fluxo de calor investigados nas placas de 5,0 mm, 10,0 mm e 15,0 mm de profundidade (FISS L4; FISS L5 e FISS L6).

Tabela 9 - Dados numéricos referentes aos parâmetros termográficos e fluxo de calor placa FISS L4, L5 e L6

<b>Placas</b>	<b>Inversão do <math>G_{Int}</math> (min)</b>	<b>Inversão do Delta - T (min)</b>	<b>Valor máx Delta - T Aquec. (°C) Módulo</b>	<b>Valor máx Delta - T Arref. (°C) Módulo</b>	<b>Valor máx Temp. def. Aquec. (°C)</b>	<b>Valor máx Temp. def. Arref. (°C)</b>	<b>Vel. Aquec. (°C/min) Módulo</b>	<b>Vel. Arref. (°C/min) Módulo</b>
<b>Placa FISS L4</b>	44	120	1,10	1,03	57,51	51,51	0,064	0,045
<b>Placa FISS L5</b>	74	120	1,17	1,06	56,10	53,59	0,055	0,033
<b>Placa FISS L6</b>	80	120	1,49	1,23	55,10	55,33	0,062	0,038

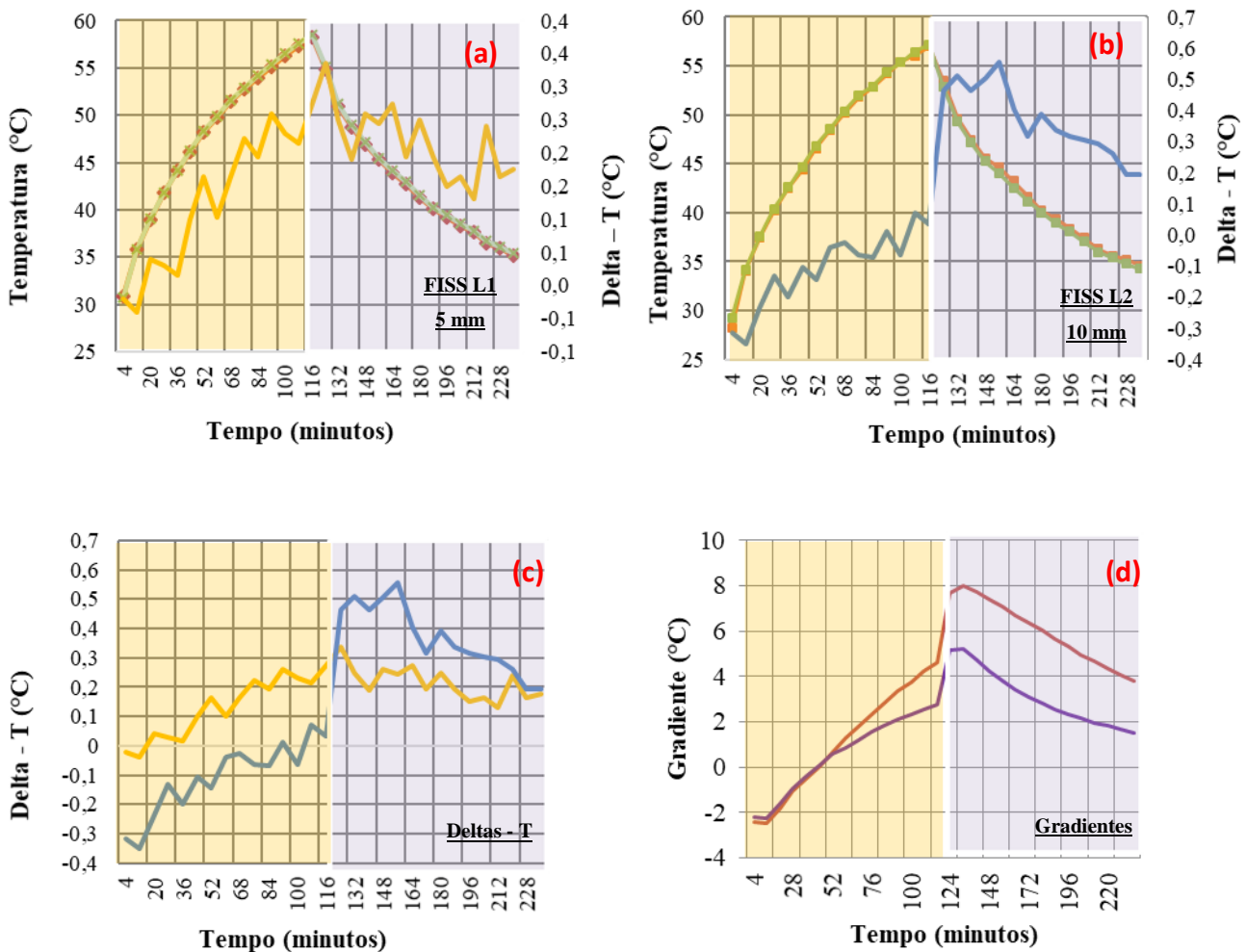
De modo geral, para esse grupo de placas estudadas, a inversão do gradiente  $G_{Int}$  ocorre inicialmente para a placa de 5,0 mm (FISS L4), em seguida para as placas de 10,0 mm (FISS L5) e 15,0 mm (FISS L6). A inversão do Delta – T para essas placas ocorreu somente após o desligamento das lâmpadas de aquecimento. O maior valor de temperatura do defeito (57,51 °C) no aquecimento foi observado na placa menos espessa (FISS L4) que teve temperatura próxima à da superfície da placa, conseqüentemente, menor Delta – T. Outra característica que justifica o valor da temperatura do defeito constatado é a maior velocidade de

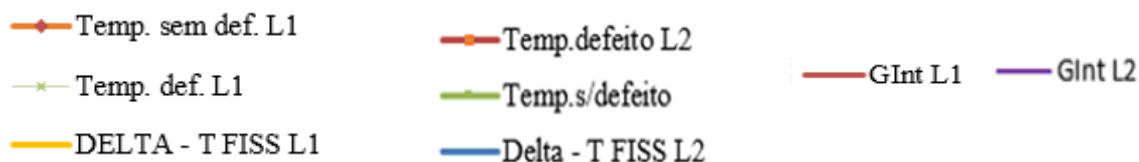
aquecimento. A placa FISS L4 também apresentou a maior velocidade de arrefecimento e, conseqüentemente, o menor valor de temperatura (51,51°C). De modo geral, é possível afirmar que de acordo com a profundidade das fissuras o tempo de detecção pode ser reduzido ou prolongado. Fissuras mais profundas possuem uma maior diferença de temperatura entre a superfície e o fundo, decorrente da menor variação de temperatura.

#### 4.1.2.4 Estudo 4: Análise da influência das profundidades das fissuras (5,0 mm e 10,0 mm)

Neste item são apresentados os resultados das placas com 1,0 mm de abertura e 5,0 e 10,0 mm de espessura FISS L1 e FISS L2, respectivamente. Os resultados referentes aos parâmetros térmicos e do fluxo de calor se encontram na Figura 55.

Figura 55 - (a) placa FISS L1. Delta - T, Temperatura com e sem defeito (b) Placa FISS L2. Delta - T, Temperatura com e sem defeito (c) Deltas - T (e) GInt FISS L1 e L2





O comportamento das regiões com e sem defeito segue a mesma tendência observada nos estudos anteriores, decorrente do sistema de aquecimento e arrefecimento. Identifica-se também proximidade de temperatura entre as regiões com e sem defeito (Figura 55a e b), constatando-se que as fissuras não precisam estar altamente aquecidas para serem identificadas nos termogramas.

A maior temperatura do defeito na FISS L1, deixou-a em condições semelhante à da superfície o que propicia menor Delta – T (Figura 55c). O Delta – T da placa FISS L1, como discutido no Estudo 2, não segue uma tendência tão definida quanto as demais, entretanto, apresentam-se inferior à placa FISS L2, devido à sua menor profundidade. Portanto, corroborando com o perfil de comportamento encontrado anteriormente, placas mais profundas possuem maior Delta – T. Dessa forma, é possível classificar as placas em grau de dano em função da profundidade, ou seja, quando se conhece a abertura das fissuras e se estas são semelhantes, aquela que indicar maior Delta – T, julga-se como sendo a mais profunda. A Tabela 10 apresenta algumas informações quantitativas importantes para entendimento dos fenômenos ocorridos na placa FISS L1 e L2.

Tabela 10- Dados numéricos referentes aos parâmetros termográficos e fluxo de calor placa FISS L1 e L2

Placas	Inversão do GInt (min)	Inversão do Delta - T (min)	Valor máx Delta - T Aquec. (°C) Módulo	Valor máx Delta - T Arref. (°C) Módulo	Valor máx Temp. def. Aquec. (°C)	Valor máx Temp. def. Arref. (°C)	Vel. Aquec. (°C/min) Módulo	Vel. Arref. (°C/min) Módulo
Placa FISS L1	41	44	0,27	0,25	58,45	51,25	0,022	0,009
Placa FISS L2	44	92	0,35	0,55	56,31	47,39	0,025	0,022

Os valores observados na Tabela 11 mostram numericamente os fenômenos observados na Figura 55. A diferença entre as placas estudadas é a profundidade. Portanto, os resultados da inversão do Delta – T foram coerentes, a placa mais espessa de 10,0 mm (FISS L2) teve a inversão após os 92 minutos de aquecimento, enquanto a placa de 5,0 mm o Delta – T inverteu aos 44 minutos.

Dessa forma, a placa fissurada de 10,0 mm também apresentou Delta – T superior, pois, uma vez que a diferença de temperatura entre a superfície e a placa base é maior, o incremento de temperatura é mais prolongado. A placa de 5,0 mm apresentou os maiores valores de temperatura da região do defeito, o que justificou, também, seu menor Delta – T. Logo, os dados quantitativos enfatizam o comportamento observado graficamente e demonstram que, em placas de mesma abertura e profundidade diferente, é possível identificar qual fissura é mais grave em função do comportamento do Delta – T.

#### **4.1.3 Mensuração da Largura do dano**

Com a termografia de infravermelhos, é possível trabalhar na resolução de problemas utilizando-se de informações termográficas, isto é, a partir de um conjunto experimental de dados termográficos, extrair quantitativamente propriedades de defeitos de subsuperfície tais como a abertura. Dessa forma, neste capítulo demonstra-se a possibilidade de se aferir a abertura da fissura a partir de um conjunto de dados termográficos.

Esta etapa consistiu na mensuração da largura do dano (tamanho da fissura no termograma) por meio da termografia infravermelha, a fim de que se possa comparar com a sua real dimensão. A largura do dano foi determinada baseada no IFOV da câmera infravermelha (0,82 mrad), na distância da câmera até à superfície da placa estudada (2,30 metros) e na determinação dos pontos de máxima e mínima inclinação das linhas que atravessam o defeito. Com essas informações foi possível converter os pixels da imagem em área e comparar com a real dimensão do defeito.

A Tabela 11 mostra os resultados médios da contagem de pixels e a largura do dano calculada da linha definida para investigação, após o estudo de priorização por meio do desvio padrão.

Tabela 11 - Resultados médios da contagem de pixels e a largura do dano calculada

PARÂMETROS			FISS L1		FISS L2	
TEMPO	IFOV (mrad)	Distância (m)	Ld (pixel)	Ld (mm)	Ld (pixel)	Ld (mm)
12	0,82	2,30	2,00	3,77	2,00	3,77
36	0,82	2,30	*	-	2,00	3,77
60	0,82	2,30	2,00	3,77	*	-
84	0,82	2,30	*	-	*	-
108	0,82	2,30	*	-	*	-
132	0,82	2,30	*	-	2,00	3,77
156	0,82	2,30	2,00	3,77	2,00	3,77
180	0,82	2,30	*	-	2,00	3,77
204	0,82	2,30	2,00	3,77	2,00	3,77
228	0,82	2,30	*	-	*	-
FISS L4		FISS L5		FISS L6		
Ld (pixel)	Ld (mm)	Ld (pixel)	Ld (mm)	Ld (pixel)	Ld (mm)	
*	-	2,00	3,77	2,00	3,77	
*	-	2,00	3,77	2,00	3,77	
2,00	3,77	2,00	3,77	2,00	3,77	
2,00	3,77	2,00	3,77	2,00	3,77	
2,00	3,77	2,00	3,77	2,00	3,77	
2,00	3,77	2,00	3,77	2,00	3,77	
2,00	3,77	2,00	3,77	2,00	3,77	
2,00	3,77	2,00	3,77	2,00	3,77	
2,00	3,77	2,00	3,77	2,00	3,77	
2,00	3,77	2,00	3,77	2,00	3,77	

A largura do dano mensurada no termograma foi determinada conforme os procedimentos da máxima e mínima inclinação descritas no item 2.2.4 da metodologia. Ressalta-se que a menor quantidade de pixel detectada no intervalo que corresponde ao defeito foi 2,0 resultando em uma largura do dano de no mínimo 3,77 mm, destaca-se que de acordo com as configurações da lente o menor pixel medido corresponde a 1,88 mm. Destaca-se que o símbolo (\*) refere-se a espúrios, ou seja, valores que distorceram de 2,00 pixels, situações em que não se conseguiu limitar as inclinações adequadamente, dificultando assim a definição de Ld. A Tabela 12 sintetiza os resultados obtidos em relação à contagem de *pixels* e às variações da área calculada com largura do dano.



Tabela 12 - Resultados obtidos em relação à contagem de pixels e as variações da quantidade de *pixels*

Placas	Pixel mínimo	Varição quant.(pixel) (%)	Ld calculada (mm)	Ld real (mm)
FISS L1	2,00	60,00	3,77	1,00
FISS L2	2,00	40,00	3,77	1,00
FISS L3	2,00	30,00	3,77	2,00
FISS L4	2,00	20,00	3,77	3,00
FISS L5	2,00	-	3,77	3,00
FISS L6	2,00	-	3,77	3,00

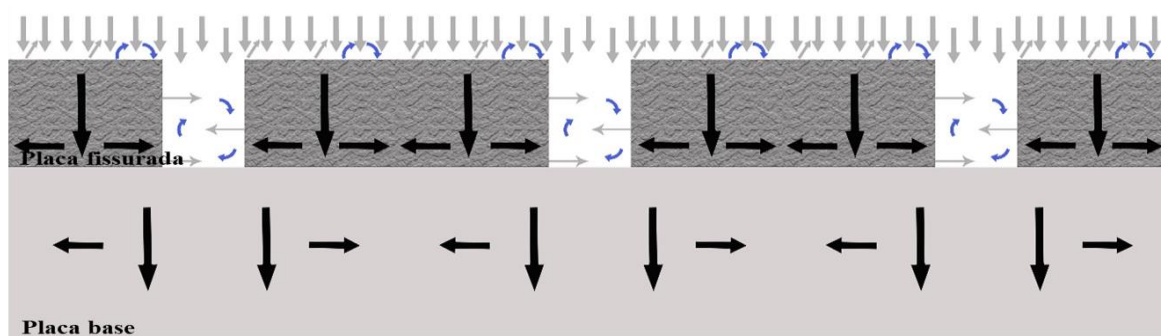
A menor distância entre pixels mensurado pela câmera infravermelha corresponde a 2,00. Dessa forma, na placa FISS L1 60% dos resultados são espúrios seguidos por 40%, na placa FISS L2; 30% para a placa FISS L3; 20% na placa FISS L4 e nenhum valor diferente de 2 *pixels* para a placa FISS L5 e FISS L6. Nota-se uma redução dos espúrios ao se aumentar o tamanho do defeito, sendo 2 o menor pixel aferido, e constante para as placas com 3mm de abertura, indicando que a metodologia utilizada no cálculo da Ld, para essa situação, se limitou a mensuração de defeitos com abertura abaixo de 2 mm.

## 4.2 RESULTADO DAS PLACAS COM FISSURAS RAMIFICADAS

### 4.2.1 Análises Qualitativas

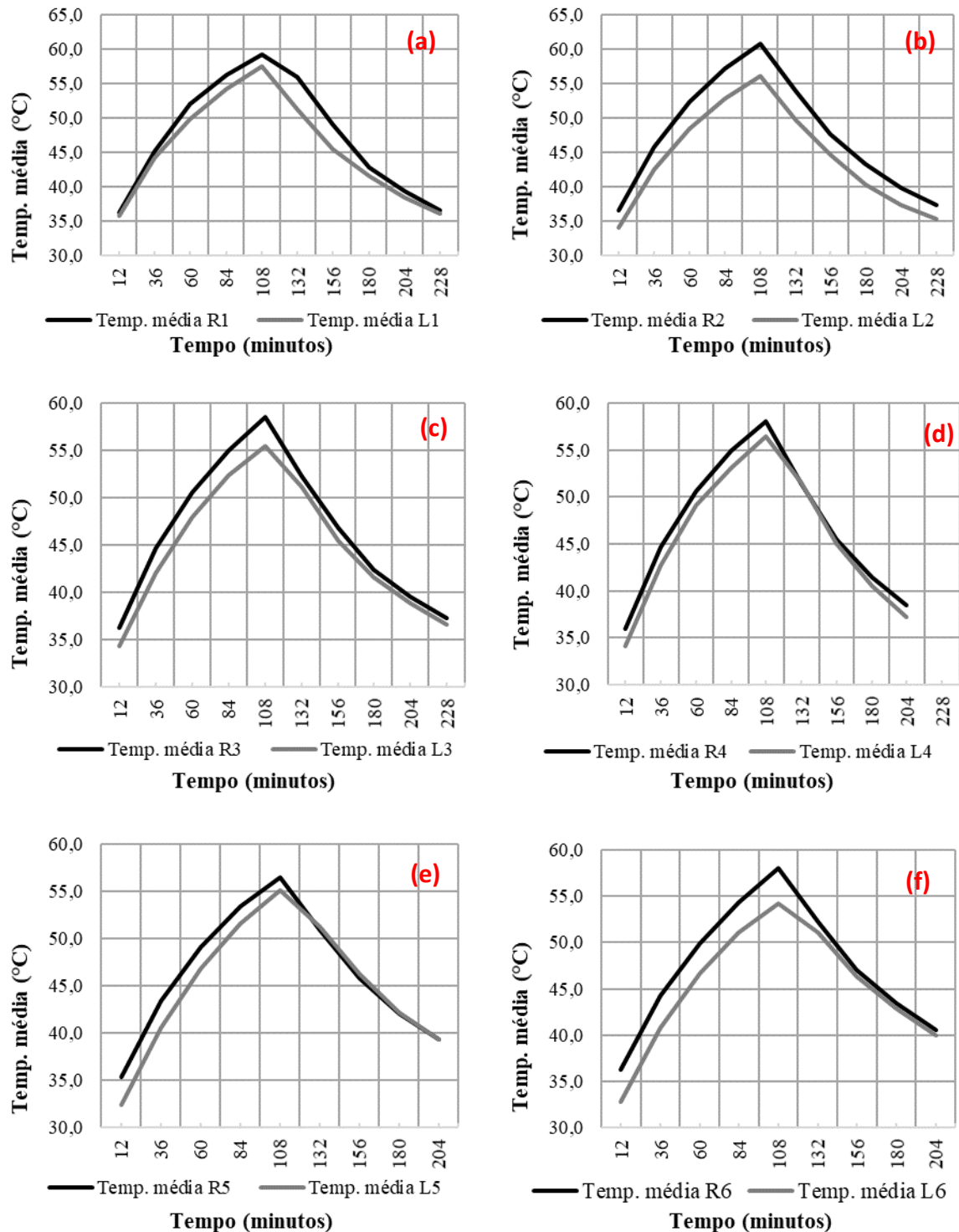
Uma estrutura ramificada é equivalente a várias lineares juntas, de modo que todo o fenômeno observado anteriormente no item 4.1.1 vai se repetir. A maior diferença entre a estrutura ramificada e a linear é o número de fissuras, como pode ser observada na ilustração da Figura 56.

Figura 56 - Cenário de transferência térmica para placas com fissuras ramificadas no regime de aquecimento



O número de fissuras vai ser a variável que vai ter mais influência sobre os processos de transferência de calor, quando comparado com a estrutura linear. Para verificar essa tendência foram plotados gráficos de temperatura média da região central da placa ramificada e da linear com abertura e profundidade similares (Figura 57).

Figura 57 - Temperatura média das placas ramificadas e lineares. (a) L1 e R1 (b) L2 e R2 (c) L3 e R3 (d) L4 e R4 (e) L5 e R5 (f) L6 e R6



De modo geral, as fissuras ramificadas apresentaram temperaturas superiores às lineares. Uma maior temperatura implica menor perda de calor pela superfície estudada das placas ramificadas, quando comparadas com as lineares. Dessa forma, pode-se concluir que o número de ramificações diminuiu o processo de perda de calor na placa, uma vez que a fissura é uma resistência à passagem do calor. Um maior número de fissuras dificulta os processos de transferência de calor no sentido transversal possibilitando sua maior concentração, conseqüentemente, elevando sua temperatura no aquecimento e reduzindo o período para inspeção.

Ao mesmo tempo observa-se que o valor da diferença de temperatura entre a placa linear e ramificada vai depender do tamanho da abertura da ramificação durante o processo de arrefecimento. Assim por exemplo, as placas com maior abertura, Figura 56(d)(e)(f) tendem a ter a mesma temperatura, ou seja, o tamanho da abertura controla o valor das diferenças de temperatura entre as placas. A maior abertura, menor a diferença de temperatura entre as placas durante o arrefecimento, essa situação pode estar associada a processos mais intensos de convecção para essas placas que facilitam as perdas de calor.

Para visualizar o comportamento descrito acima das placas ramificadas, escolheram-se os termogramas das placas FISS R1 e R6 por motivos semelhantes ao mencionada nas placas com fissuras lineares, ou seja, análise dos fenômenos na menor e maior abertura estudada, nos períodos 12, 36, 60 e 84 minutos do aquecimento e 12, 36, 60, 84 e 108 minutos do arrefecimento e podem ser vistos nas Figuras 58 e 59, respectivamente. No Apêndice D se encontram termogramas das demais placas ensaiadas.

Figura 58 - Placa FISS R1 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento

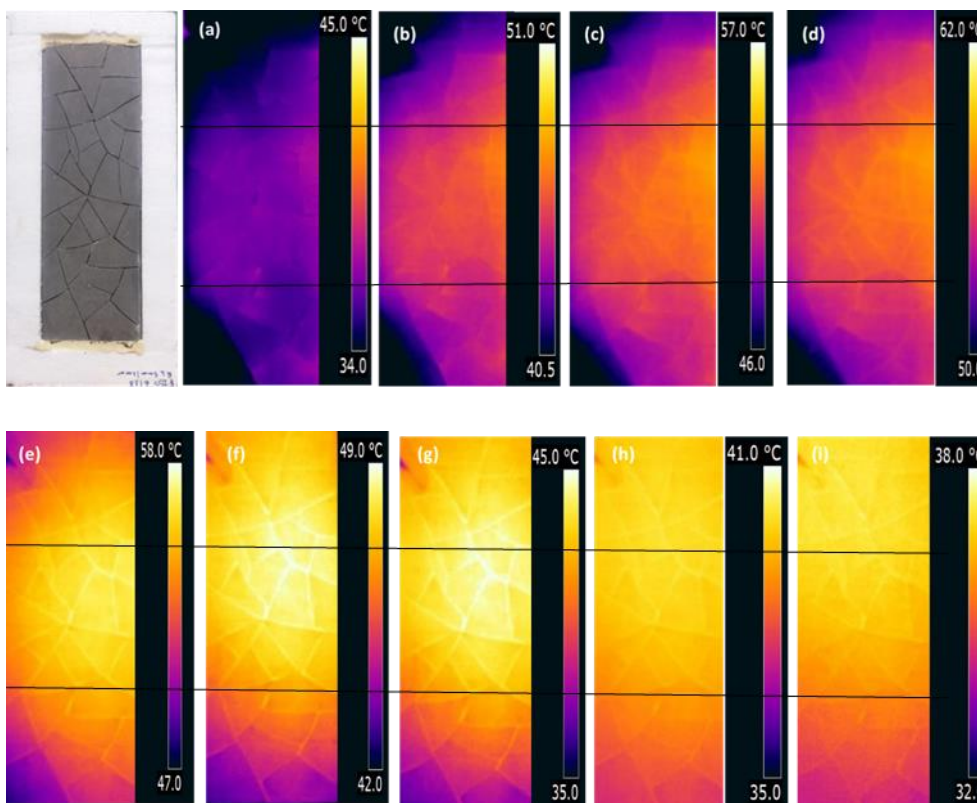
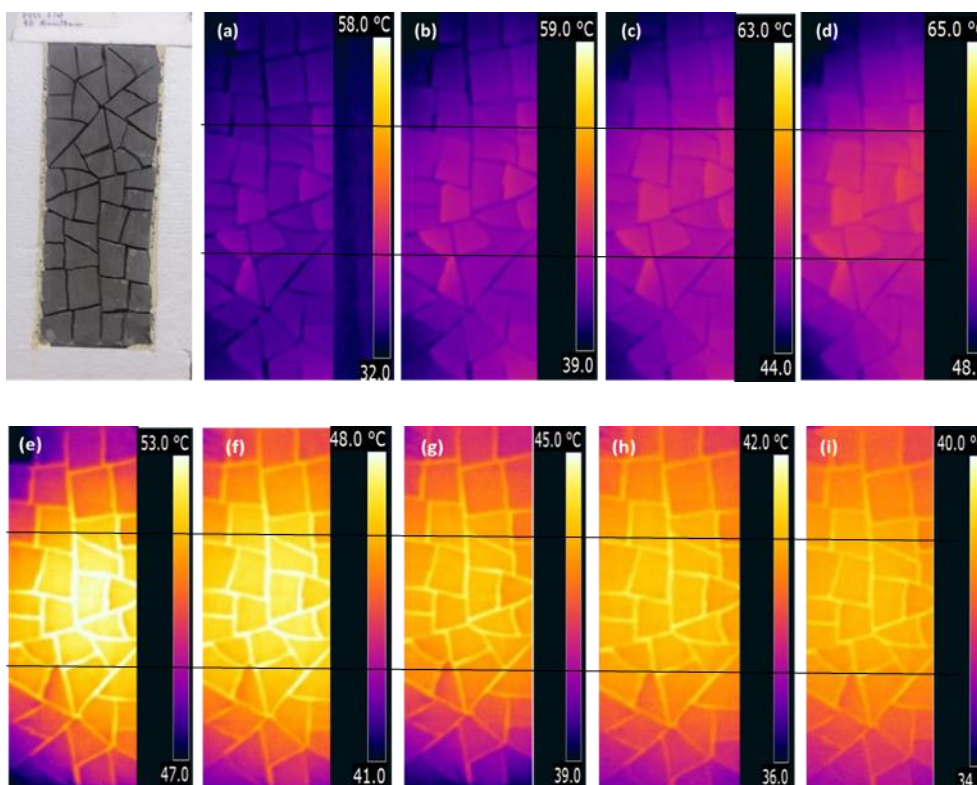


Figura 59 - Figura 62 - Placa FISS R6. (a) 12 min de aquecimento. (b) 36 min de aquecimento. (c) 60 min de aquecimento. (d) 84 min de aquecimento. (e) 12 min do arrefecimento. (f) 36 min do arrefecimento. (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento. (i) 108 min do arrefecimento



No início da fase de aquecimento as fissuras nas placas ramificadas, semelhante às lineares, também estão com temperatura inferior à da região não fissurada. Contudo, esse estágio não se mantém ao longo de todo o regime de aquecimento, principalmente, na placa FISS R1, na qual percebe-se que aos 36 minutos algumas fissuras se apresentam totalmente aquecidas em seus termogramas. Esta situação é facilitada devido ao maior grau de fissuras na mesma placa e a sua menor profundidade que concentrou calor de forma mais intensa em curto intervalo de tempo.

Nas placas com fissuras ramificadas também foi perceptível a diferença na nitidez das fissuras que possuem maior abertura. No aquecimento esse fenômeno se explica devido a diferença na profundidade que reduz a condução de calor na placa, proporcionando maior diferença de temperatura entre a superfície da placa fissurada e a superfície da placa base.

#### 4.2.2 Análises Quantitativas

Este item apresenta os resultados das investigações quantitativas realizadas nas placas com fissuras ramificadas, com o intuito de avaliar seu grau de dano. Para essa tipologia, o grau de dano referente à abertura e a profundidade foi estudado por meio da temperatura média das placas. As investigações da abertura e profundidade foram realizadas simultaneamente e a Tabela 13 sintetiza os estudos realizados e as características das placas com fissuras ramificadas.

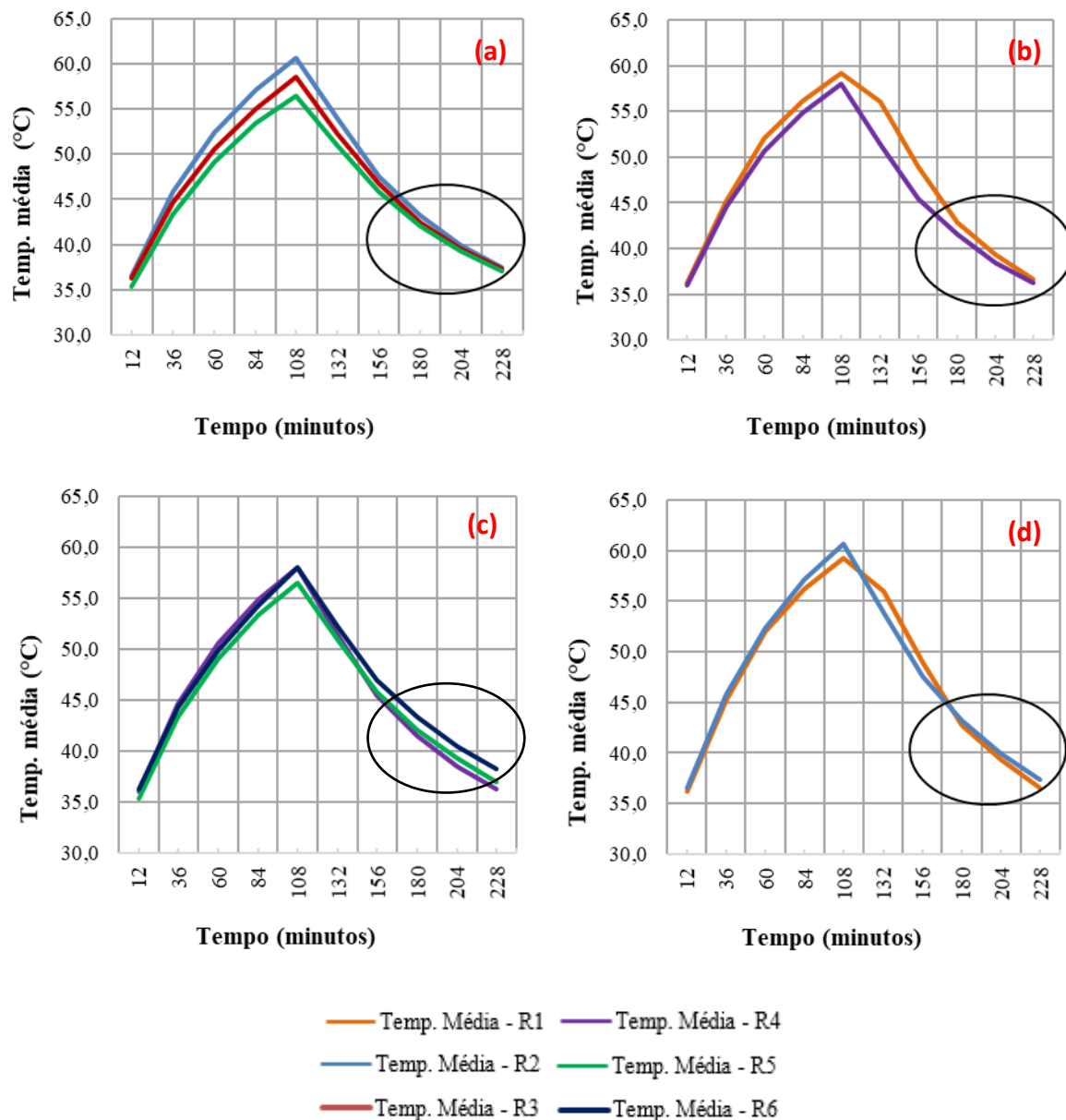
Tabela 13 - Síntese da ordem de apresentação dos resultados para ramificadas

<b>Análise da influência das aberturas das fissuras</b>			
<b>Classificação</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Profundidade (mm)</b>	<b>PLACAS</b>
Estudo 1	1,0	10,0	FISS R2
	2,0		FISS R3
	3,0		FISS R5
Estudo 2	1,0	5,0	FISS R1
	3,0		FISS R4
<b>Análise da influência das profundidades das fissuras</b>			
Estudo 3	3,0	5,0	FISS R4
		10,0	FISS R5
		15,0	FISS R6
Estudo 4	1,0	5,0	FISS R1
		10,0	FISS R2

De acordo com as investigações qualitativas realizadas previamente, constatou-se que o regime de aquecimento não resulta uma boa etapa para fazer medição, uma vez que não é possível garantir um aquecimento uniforme de toda a região estudada e os termogramas não

são tão precisos, ao contrário do arrefecimento que desde início oferece imagem mais nítida. No arrefecimento, até estabelecer o equilíbrio térmico, vai ter um intervalo de tempo onde é possível estudar em detalhes as fissuras em virtude das suas características, como observados na Figura 60(a) seguir. A Figura 60(a) e (b) correspondem ao Estudo 1 e Estudo 2. A Figura 60(c) e (d) são referentes ao Estudo 3 e 4, respectivamente.

Figura 60 - Placas ramificadas. (a) Estudo 1 (b) Estudo 2 (c) Estudo 3 (d) Estudo 4



Nos gráficos observa-se uma região onde é possível estabelecer claramente diferenças entre as placas a partir da diferença de temperaturas entre elas, especificamente entre placas ramificadas de igual abertura (Figura 60 a e b), vai ter uma temperatura média maior a placa com maior profundidade. De modo similar, placas ramificadas de igual profundidade e

diferentes aberturas tendem a ter a mesma temperatura (Figura 60 c e d). De modo geral, em uma medição real seria possível dividir o termograma em várias regiões e estudar sua temperatura média para compará-las entre si e utilizar o dito anteriormente como o primeiro critério de classificação das fissuras, uma vez que em campo um conjunto de fissuras ramificadas podem ter características distintas em uma mesma região de análise.

No arrefecimento as propriedades das placas estão mais constantes, por isso é possível retirar uma conclusão da gravidade das fissuras nesse regime, enquanto no aquecimento é mais difícil aquecer a superfície uniformemente em uma situação real, com isso não indica com boa precisão a gravidade das fissuras nesse período. No entanto, ressalta-se a importância de estudos dessa tipologia em períodos mais prolongados do arrefecimento para consolidar essa tendência. O estudo apresentado consiste em um indício desse comportamento.

De modo geral, diferente das placas com fissuras lineares, nas ramificadas, não é possível fazer uma análise pontual do  $\Delta T$ , para esse tipo de tipologia não é prático esse procedimento, ou seja, uma análise individual da fissura. Sendo viável, uma investigação do comportamento por meio da temperatura média da área, dividindo o termograma de uma área com fissuras ramificadas em várias regiões e comparando as diferenças nas temperaturas médias no regime de arrefecimento, uma vez que na mesma área de análise podem-se ter fissuras com grau de dano diferentes, seja em relação à abertura ou a profundidade. O grau de ramificações também é um indicativo da sua gravidade, um maior grau de fissuras eleva a temperatura nos termogramas, suficiente para afirmar maior grau de dano independente da profundidade e abertura.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos os resultados dos estudos realizados, cujo objetivo é estabelecer um comportamento térmico das fissuras lineares e ramificadas e definir critérios e padrões de comportamento para identificação de fissuras e mensuração do grau de dano de ambas as tipologias, a partir dos estudos em laboratório com a termografia de infravermelhos.

### 5.1 ANÁLISES QUALITATIVAS

Em ambas as configurações de placas analisadas, lineares e ramificadas, percebe-se que foi possível a visualização das fissuras nos termogramas. Constatou-se que, na fase de aquecimento, as fissuras estão com uma temperatura inferior àquela existente na região não fissurada, no entanto, essa situação não se manteve durante todo o regime de aquecimento. As placas lineares com menor abertura tiveram a inversão do Delta – T antes do aparato de aquecimento ter sido desligado como mostra a Tabela 14, na qual se apresenta o momento da inversão do Delta – T.

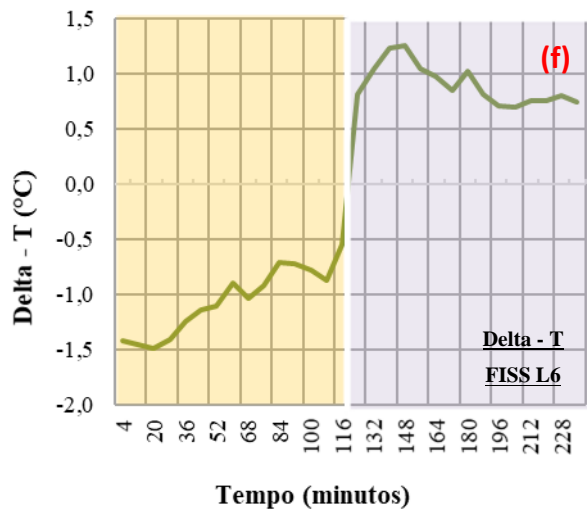
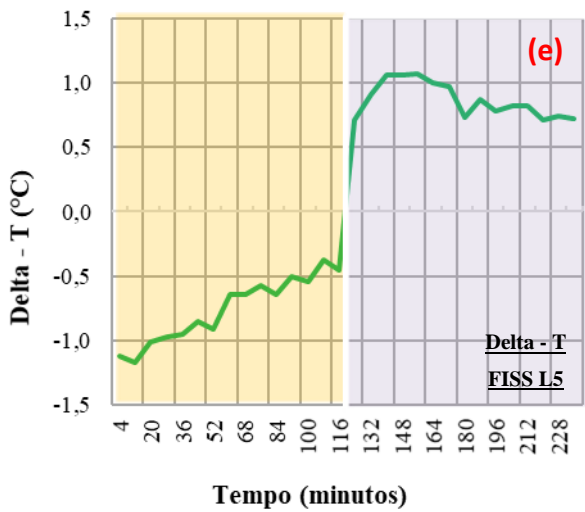
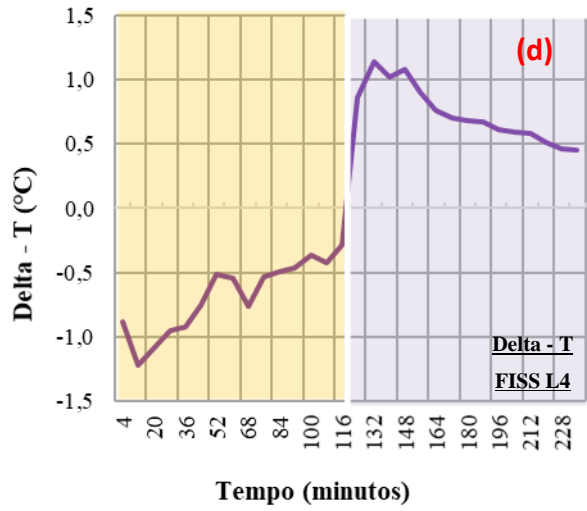
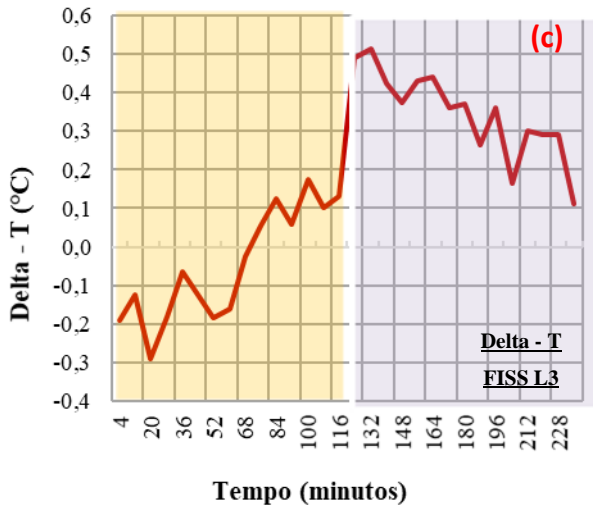
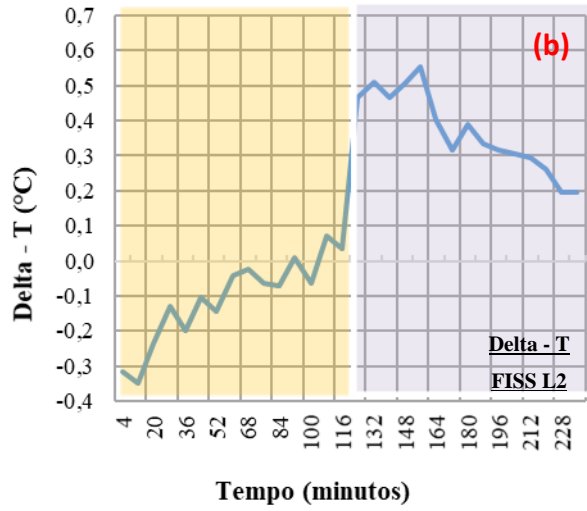
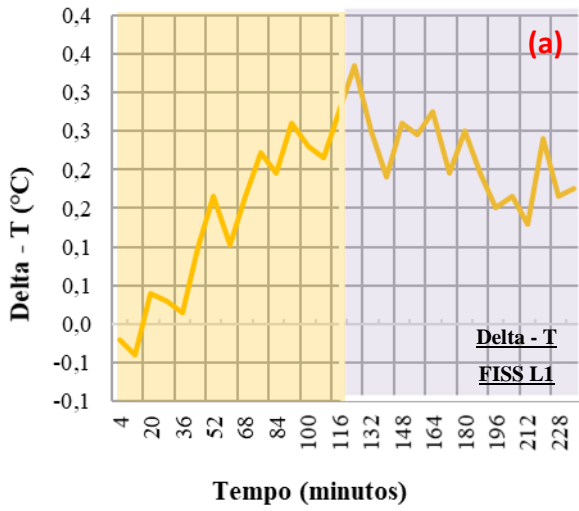
Tabela 14 - Período de inversão do Delta - T - Placas lineares

Placas	Inversão do Delta - T (min)
FISS L1	44
FISS L2	92
FISS L3	84
FISS L4	120
FISS L5	120
FISS L6	120

A situação exposta acima traz uma contribuição importante para elucidar a questão, porque nas inspeções em campo, as fissuras estão sempre com temperatura superior à temperatura da superfície sem danos, como visto no trabalho de Bauer *et al.* (2018), Aidar (2019), Bauer *et al.* (2016a). A explicação para tal fato é que, uma vez que a camada de revestimento que o fundo da fissura está em contato, possivelmente, se aquece em um curto intervalo de tempo, uma vez que os fenômenos em escala real são mais intensos. O comportamento do Delta – T de todas as placas lineares encontram-se na Figura 61 abaixo.



Figura 61 - Deltas - T (a) Delta - T FISS L1 (b) Delta - T FISS L2 (c) Delta - T FISS L3 (d) Delta - T FISS L4 (e) Delta - T FISS L5 (f) Delta - T FISS L6



Em todas as placas, no início do regime de aquecimento, o Delta – T apresentou valores elevados, contudo, com a continuidade do aquecimento ocorreu uma redução acentuada no seu crescimento e, conseqüentemente, uma redução na precisão dos termogramas. Esse fenômeno se deve ao fato de que, em curto intervalo de aquecimento, a temperatura da região do defeito e da superfície sem danos se encaminharam para o equilíbrio, que resultou em posterior inversão do fenômeno. A redução no valor do Delta – T foi observada em outros estudos, como o de Caldeira (2016), por meio da afirmação de que os valores do contraste, também chamado de Delta – T, diminuem no decorrer do tempo, em virtude da difusão térmica, que tende a uniformizar a distribuição de temperatura na superfície. Guimarães (2017) e Pavón (2017) em seus experimentos também observaram que, ao aumentar a temperatura das camadas onde as fissuras se encontram, essa provoca uma queda acentuada do Delta – T.

No momento em que as lâmpadas de aquecimento foram desligadas, percebeu-se um ganho do Delta-T, em virtude da alta queda na temperatura da superfície. A partir desse momento, houve uma redução gradual no seu valor, que se manteve positivo por todo o arrefecimento, o que garante um maior período para inspeção.

Com o intuito de estabelecer critérios quantos aos intervalos de tempo para inspeção de fissuras, analisando a Figura 61 observou-se que as fissuras não necessitam estar altamente frias ou aquecidas para serem detectadas nos termogramas, devido os pequenos valores do Delta - T, uma pequena diferença da temperatura do defeito em relação a superfície sem danos é suficiente para detectá-las. A Tabela 15 abaixo mostra os valores do Delta – T mínimo e máximo para o regime do aquecimento e arrefecimento de todas as placas investigadas.

Tabela 15 - Valores do Delta – T mínimo e máximo para o regime do aquecimento e arrefecimento

<b>AQUECIMENTO</b>						
<b>PLACAS</b>	<b>FISS L1</b>	<b>FISS L2</b>	<b>FISS L3</b>	<b>FISS L4</b>	<b>FISS L5</b>	<b>FISS L6</b>
Mínimo Delta - T	0,02	<u>0,01</u>	0,03	0,29	0,37	0,55
Máximo Delta - T	0,28	0,35	0,29	1,23	1,17	<u>1,49</u>
<b>ARREFECIMENTO</b>						
<b>PLACAS</b>	<b>FISS L1</b>	<b>FISS L2</b>	<b>FISS L3</b>	<b>FISS L4</b>	<b>FISS L5</b>	<b>FISS L6</b>
Mínimo Delta - T	0,13	0,19	0,11	0,45	0,72	0,70
Máximo Delta - T	0,27	0,55	0,52	1,14	1,07	1,25

Fissuras com as menores aberturas 1,0 mm e 2,0 mm especificamente as placas FISS L2 e FISS L3 tiveram uma boa visualização nos termogramas quando o Delta – T alcançou 0,2 °C e 0,3 °C por volta dos 20 a 40 minutos de aquecimento, após esse período houve uma redução acentuada do contraste (Figura 61b,c). No arrefecimento, o Delta – T oscilou entre 0,11 °C e 0,55 °C sendo detectável as diferenças de profundidade e abertura das fissuras em todo esse regime.

As fissuras com abertura de 3,0 mm tem Delta – T com maior módulo entre 0,29 °C e 1,49 °C no aquecimento, permitindo nítida visualização nos termogramas e percepção das diferenças entre as características das placas entre os 20 e 100 minutos de aquecimento. No arrefecimento o Delta – T variou entre 0,11 °C e 1,25 °C e permaneceram com valores significativos durante todo o regime.

De modo geral, os valores indicam que a faixa de Delta – T ficou entre 0,01 °C e 1,49 °C, não encontrando nenhum valor superior a 1,50 °C mesmo para as maiores profundidades. Os dados também mostram que os Deltas – T do regime do arrefecimento foram maiores que no regime de aquecimento. Os menores valores do arrefecimento foram todos superiores aos menores Deltas- T do aquecimento, constatando também que nesse regime as fissuras tiveram contraste mais elevado por um período maior.

## **5.2 ANÁLISES QUANTITATIVAS**

### **5.2.1 Análises da influência das aberturas das fissuras**

A análise da influência das aberturas nas placas com fissuras lineares foi realizada por meio de dois estudos. No Estudo 1, foram investigadas placas com a mesma profundidade, ou seja, 10 mm, e abertura de 1,0 mm; 2,0 mm e 3,0 mm (FISS L2, FISS L3 e FISS L5). No Estudo 2 foram analisadas placas com 5,0 mm de profundidade e 1,0 mm e 3,0 mm (FISS L1e FISS L4) de abertura. Para se encontrar o grau de dano das placas, foram realizadas investigações, principalmente, da temperatura da região, com e sem defeito, do Delta – T e da velocidade de aquecimento e arrefecimento. As Figuras 62 e 63 mostram, por meio de um fluxograma de hierarquização, as placas que tiveram o melhor comportamento em cada parâmetro mencionado.

Figura 62 – Fluxograma de hierarquização dos parâmetros analisados para as placas lineares - Estudo 1

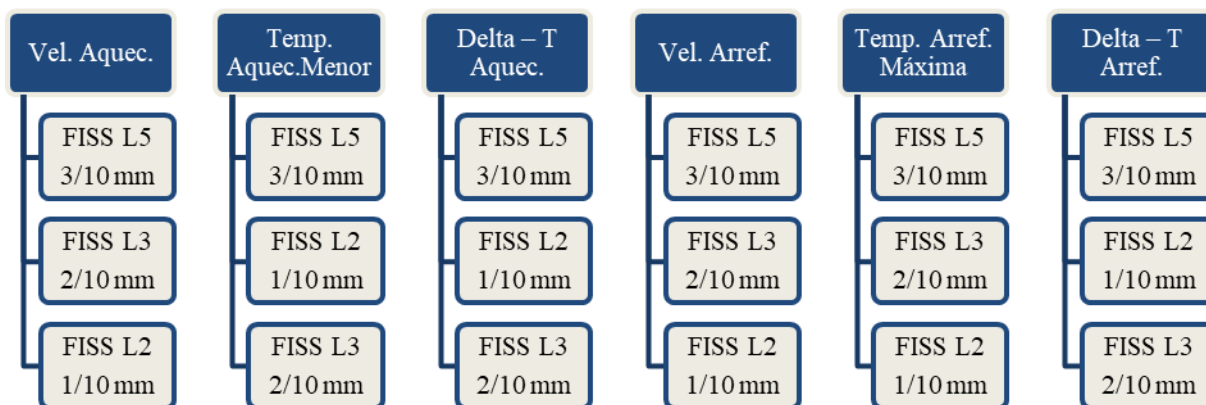


Figura 63 - Fluxograma de hierarquização dos parâmetros analisados para as placas lineares - Estudo 2



De modo geral, conforme ilustra nas figuras anteriores, percebe-se que as placas com a maior abertura tiveram comportamento superior às demais, em todos os parâmetros investigados, a começar pela velocidade de aquecimento e arrefecimento, em cuja situação o tamanho da abertura é o diferencial, uma vez que a espessura é a mesma. No arrefecimento apresentaram a maior temperatura, uma vez que a maior largura proporcionou maior área para irradiação de calor da placa. Esta, por sua vez, manteve a temperatura da placa fissurada elevada em todo o regime de arrefecimento e lhe proporcionou maior Delta - T.

Portanto, todas essas correlações foram importantes para atestar o comportamento do Delta - T, principal parâmetro termográfico que indicou a tendência da gravidade da fissura. Dessa forma, o maior Delta - T foi verificado nas placas com maior abertura para o regime de aquecimento e arrefecimento, o que foi confirmado, por meio das medições termográficas, que estas placas lineares possuem maior grau de dano.

Nas placas ramificadas, a investigação do grau de dano em relação à abertura, pode ser analisada por meio das temperaturas médias das placas efetuada em dois estudos, nos quais

foi fixada a espessura. O primeiro corresponde ao das placas com a mesma profundidade 10,0 mm e abertura de 1,00 mm; 2,00 mm e 3,0 mm (FISS L2, FISS L3 e FISS L5). O segundo ao estudo das placas com 5,00 mm de profundidade e abertura de 1,0 mm e 3,0 mm (FISS L1e FISS L4). O comportamento dos Deltas- T, em ambos os estudos, foi semelhante, sendo possível estabelecer claramente uma tendência do comportamento no final do arrefecimento, quando as placas tendem à mesma temperatura.

### 5.2.2 Análises da influência das profundidades das fissuras

Em relação às análises da influência das profundidades, também subdividiu a pesquisa em dois grupos. No Estudo 3, foi fixada a abertura de 3,0 mm para placas com espessura de 5,0 mm; 10,0 mm e 15 mm (FISS L4, FISS L5 e FISS L6). O Estudo 4 corresponde às investigações nas placas com 5,0 mm e 10,0 mm de profundidade, ambas com abertura de 1,0 mm (FISS L1 e FISS L2). Semelhante ao item anterior, as Figuras 64 e 65 abaixo, apresentam-se na forma de fluxogramas os resultados.

Figura 64 - Fluxograma de hierarquização dos parâmetros analisados para as placas lineares - Estudo 3

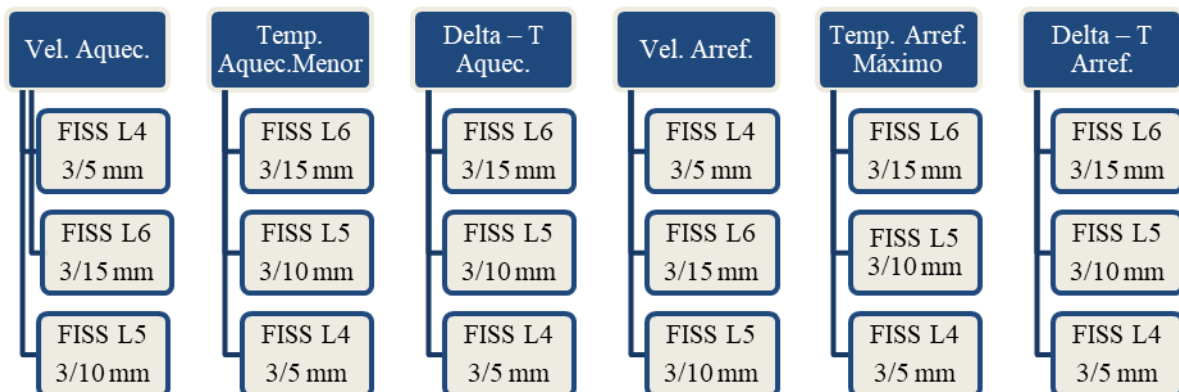


Figura 65 - Fluxograma de hierarquização dos parâmetros analisados para as placas lineares – Estudo 4



De modo geral, em ambos os estudos, foi constatada predominância dos parâmetros para as placas com maior profundidade. A temperatura do defeito foi coerente ao ser comparada com a placa com maior profundidade, pois, conforme afirmam Maldague (2001) e El - Amiri (2018), as fissuras mais profundas têm temperatura mais baixa e fissura mais próxima da face aquecida, ou seja, com menor profundidade têm a temperatura mais alta no aquecimento. Esse fenômeno foi percebido nos dois estudos.

Em relação ao Delta – T, foi perceptível o maior módulo no aquecimento e arrefecimento para as placas com maior profundidade. Portanto, a variação de temperatura entre a região com defeito e sem defeito, mostrou-se novamente viável para classificar as fissuras em grau de dano em relação a sua profundidade. Bauer *et al.* (2018) investigaram fissuras em campo e classificou grau de dano de fissuras por meio dos seus Deltas – T. Guimarães (2017) em seu estudo de fissuras também verificou maior Delta – T para placas mais profundas.

Esses resultados permitiram observar uma tendência com a termografia, a qual distinguiu as temperaturas das fissuras em relação a sua profundidade. Ressalta-se que essa afirmação somente é possível quando se investiga fissuras com aberturas iguais ou bem semelhante entre si, pois como observados nos Estudos 1 e 2 das placas lineares, variações das aberturas provocam distinção nos valores do Delta – T. De modo geral, o comportamento observado foi importantíssimo nas inspeções de fissuras, visto que em uma mesma região que está sendo inspecionada pode haver fissuras com diferentes profundidades e ser possível classificá-las.

Nas placas ramificadas, a investigação do grau de dano em relação à profundidade da fissura, também foi investigada, por meio da temperatura médias das placas em dois estudos. Em ambas as análises, no final do arrefecimento, foi perceptível uma diferença entre as placas em decorrência da profundidade. Placas com maior profundidade apresentaram temperatura média superior. Ressalta-se a importância de estudos dessa tipologia em períodos mais prolongados do arrefecimento para consolidar essa tendência. O estudo apresentado consistiu em um indício desse comportamento. Destaca-se também que o maior grau de ramificações intensifica os fenômenos de transporte de calor, reduzindo a diferença de temperatura entre a superfície e o fundo da fissura e, conseqüentemente, o período de inspeção.

### **5.2.3 Estudo da mensuração da Largura do Dano**

De modo geral, a largura do dano apresentou dados mais consistentes para as placas com maior abertura. A metodologia utilizada para definir a quantidade de *pixels* referentes à largura do dano, por meio do critério da máxima e mínima inclinação utilizados por Dufour (2009), Lai *et al.* (2010) e Pavón (2017), não se mostrou aplicável para delimitar a largura do dano de fissuras com abertura pequena, sendo recomendável para estudos de patologias com dimensões maiores.

Equipamentos com resolução maior e IFOV menor, podem contribuir para obtenção de dados mais precisos. Contudo faz-se necessário a investigação da capacidade do equipamento, do seu limite para inspeção de patologias. Uma vez que câmeras termográficas com resolução melhor são caras e se tornam inacessíveis para esse tipo de atividade.

A mensuração da largura do dano juntamente com o Delta – T são parâmetros para se avaliar o grau de dano de uma anomalia, fornecendo indicações da gravidade do dano em relação à amostra investigada, de suma importância para tomadas de decisões de reabilitações.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo definir critérios e padrões de comportamento para identificação de fissuras e mensuração de seu grau de dano em revestimentos de fachada, por meio da aplicação da termografia de infravermelho, simulando os processos de aquecimento e resfriamento do edifício em laboratório. Para a concretização desse estudo, foram preparados corpos de prova capazes de simular revestimentos em argamassa fissurados, com tipologias do tipo lineares e ramificadas. Foi efetivada uma rotina para aquisição dos termogramas que utilizou a termografia de pulso ativo longo e definida uma metodologia para quantificação dos dados. Dessa forma, obteve-se as conclusões específicas expostas a seguir.

Em relação ao comportamento térmico das fissuras lineares e ramificadas com diferentes profundidades e aberturas, observou-se inicialmente que as fissuras foram detectadas pela termografia de infravermelhos e, dependendo das suas características e do regime, aquecimento ou de arrefecimento, tiveram seu grau de nitidez variado nos termogramas. Além disso, constatou-se que, em condição direta, as fissuras lineares aparecem como áreas mais frias nos termogramas, e o contrário ocorreu na condição reversa. Ressalta-se que, dependendo de suas características, profundidade e abertura, algumas fissuras ficaram com a temperatura maior que a superfície ainda no regime de aquecimento. Por fim, verificou-se que as fissuras ramificadas também apareceram como áreas mais frias no aquecimento e mais quentes no arrefecimento. Uma vez que o grau de ramificação propiciou uma maior concentração de calor e elevou sua temperatura em comparação com a placas lineares, reduzindo também seu período de inspeção. Todas as fissuras das placas ramificadas ainda apareceram como regiões mais quentes durante o regime de aquecimento. No arrefecimento apareceram nitidamente com temperatura mais elevada.

Pode-se tecer, a respeito dos parâmetros termográficos (Delta T, evolução das temperaturas, abertura da fissura e velocidade de aquecimento e arrefecimento do Delta – T) que o comportamento e a intensidade dos parâmetros termográficos dependeram diretamente das características do ensaio, como detectados nos valores de temperatura do defeito que ficaram entre 47,39 °C e 58,45 °C. Em relação ao comportamento do Delta – T, os máximos valores foram obtidos no início do aquecimento ou no início do arrefecimento. No aquecimento, esse resultado foi decorrente do rápido crescimento da temperatura da superfície do revestimento.



No arrefecimento, ocorreu em virtude da queda brusca de temperatura da superfície. Também se observou que, no decorrer do aquecimento, o valor do Delta-T foi diminuindo e, em alguns casos, seu valor foi invertido antes do desligamento das lâmpadas de aquecimento. Tal fato foi influenciado pelas características das placas. No arrefecimento, não ocorreu inversão e os valores de contrastes permaneceram significativos nesse regime, confirmando-se como o regime com uma faixa de tempo maior para inspecionar fissuras.

Ademais, a temperatura do defeito no aquecimento foi coerente ao se comparar placas de diferentes profundidades. Fissuras mais profundas tiveram a temperatura mais baixa; e fissuras mais próximas da face aquecida, ou seja, com menor profundidade, tiveram a temperatura mais alta no aquecimento, corroborando os valores dos Deltas – T. No arrefecimento, as fissuras mais profundas apresentaram temperatura mais elevada e o contrário foi percebido em fissuras mais rasas, comparadas com a temperatura da superfície, provocaram o maior e menor Delta – T. Em relação à velocidade de aquecimento e arrefecimento, sua intensidade dependeu diretamente da abertura e da profundidade da fissura.

Em relação à mensuração da largura do dano por meio dos termogramas, pode-se concluir que a metodologia para mensuração da largura do dano, por meio do critério da máxima e mínima inclinação, mostrou-se viável somente para as fissuras com maior abertura, ou seja, para as placas com fissuras de 3,0 mm. Comprovou-se que a metodologia aplicada é altamente recomendável para estudos de patologias com dimensões maiores. O estudo da mensuração da largura do dano foi importante para investigar o limite do equipamento nas análises quantitativas de patologias.

Como conclusões gerais a respeito dos critérios quanto ao melhor momento para detecção de fissuras com a termografia e quanto à indicação da gravidade da fissura em relação a sua abertura e profundidade, pode-se afirmar de acordo com os parâmetros estudados, foi indicado que o melhor momento para detecção de fissuras, lineares e ramificadas, são as primeiras horas do dia ou quando ocorre a inversão do fluxo e o arrefecimento proporciona um período maior para inspeção. Além disso, constatou-se que o grau de dano das fissuras lineares em relação a sua abertura foi corroborado por meio do Delta – T. As maiores aberturas apresentaram os maiores Deltas – T, portanto, esse parâmetro foi definido com um dos indicadores da gravidade da fissura em relação a sua abertura. O Delta – T também se apresentou como o critério para indicar a gravidade das fissuras lineares em relação a sua

profundidade. Fissuras mais profundas apresentaram os maiores contrastes nos dois regimes. De modo geral, como a temperatura das fissuras foram se assemelhando com a temperatura da superfície no aquecimento e reduzindo a nitidez dos termogramas. Recomenda-se para todas as dimensões estudadas, que o estudo da gravidade das fissuras seja realizado no início do aquecimento da superfície e no início do arrefecimento, com uma margem melhor de tempo para inspeção no arrefecimento. A intensidade dos Deltas – T obviamente, irá variar de acordo com as características das fissuras estudadas. Para se chegar a uma tendência persuasiva ao investigar a profundidade das fissuras, deve-se analisar fissuras com aberturas igual ou bem semelhante entre si, pois como observados nos Estudos 1 e 2 as variações nas aberturas provocam diferenças nos valores do Delta – T.

O grau de dano das fissuras ramificadas foi proposto por meio da temperatura média. Placas com diferentes aberturas tiveram a temperatura média semelhante no final do arrefecimento. Placas mais profundas apresentaram a maior temperatura média no final do arrefecimento, seguida das placas com profundidade menor em ordem decrescente. O comportamento das fissuras ramificadas foi difícil de ser quantificado e classificado em relação a sua gravidade, principalmente, no aquecimento, devido à alta perturbação térmica do sistema. Dessa forma, realizou-se um estudo preliminar no arrefecimento, necessitando de investigações mais prolongadas nesse regime para validar com precisão a tendência apresentada.

Portanto, os resultados mostraram que foi possível identificar os comportamentos em relação às variáveis abertura e profundidade, fornecendo critérios capazes de identificar o grau de dano nas inspeções de fachadas, imensamente importante na priorização de reparos.

## **6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar estudos de fissuras em campo para comparar com os resultados experimentais do laboratório;
- Estudar fissuras reparadas para análise do seu comportamento térmico;
- Aplicar a metodologia utilizada, com maior variedade de abertura e profundidade de fissuras e utilizar câmera com IFOV menor, para verificar a possibilidade de medir a largura do dano de defeitos menores;

- Analisar placas com fissuras ramificadas em período maior do arrefecimento, a fim de verificar em um intervalo maior as tendências de comportamento, entre placas com diferentes profundidade e mesma abertura e placas com diferentes abertura e mesma profundidade.
- Realizar simulações numéricas dos experimentos com revestimento fissurado em *software* de simulação térmica adequado, para comparar com os resultados experimentais;
- Realizar estudos modificando a velocidade de aquecimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGELIS, D.; KORDATOS, E.; SOULIOTI, D.; MATIKAS, T. **Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete.** Construction and Building Materials 24 (2010) 1888–1897.

AIDAR, L.; MILHOMEM, P.; BAUER, E. **Análise das possíveis variações nos termogramas provocados por alterações do ângulo de obtenção das imagens.** Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CPBAT 2018. Anais. Campo Grande – MS, 2018.

ALAM, F. W. A.; PINZ, F. P.; TORRES, A. S.; PALIGA, C. M. **Potencial da Termografia Infravermelha na Detecção de Manifestações Patológicas Ocultas Ocasionalmente 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.

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.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-2** Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2013.

AZENHA, M. FARIA, R. FIGUEIRAS, H. **Thermography as a technique for monitoring early age temperatures of hardening concrete**. Construction and Building Materials, 2011, vol 25 4232–4240.

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.; 202 JAYAKUMAR, T. **Infrared thermography for condition monitoring – A review**. Infrared Physics & Technology, v. 60, p. 35–55, set. 2013.

BARREIRA *et al.* **Sensibility Analysis of the Parameters Affecting Infrared Thermal Images for the Evaluation of Building Pathologies**. Defect and Diffusion Forum Vol 353, 2014, pp 23-27 Online: 2014.

BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; DELGADO, J. M. P. Q. **Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components**. Construction and Building Materials, v. 110, p. 251–269, 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, Protugal: 2015.

BARREIRA, E.; BAUER, E.; MUSTELIER, N.; FREITAS, V.P. **Measurement of materials emissivity – Influence of the procedure**. 13th International Workshop on Advanced Infrared Technology & Applications. Anais... India: Jaipur, 2010.

BARREIRA, E.; FREITAS, S. S.; FREITAS, V.P.; DELGADO, J.M.P.Q. **Experimental Study of Micro-Cracks in Laboratory and In Situ Using Infrared Thermography**. Defect and Diffusion Forum Vol. 353 (2014) pp 17-22 Online available, 2014.

BARREIRA, E • RICARDO M. S. F. ALMEIDA **Infrared Thermography for Building Moisture Inspection**. ISSN 2191-5318. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75386-7>

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

BAUER, E.; 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.; 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, 2015a.

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, 2016c.

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.; PAVÓN, E.; OLIVEIRA, A. H. S.; CASTRO, E. K. **Análisis de parâmetros quantitativos 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: 2015b.

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.; PAVÓN, E. **Criteria for Identification of Ceramic Detachments in Building Facades with Infrared Thermography.** Developments in Building Diagnosis Techniques, vol. 5, 2016b, pp. 51–68.

BAUER, E; MILHOMEM, P.; AIDAR, L. **Estudo da aplicação da termografia em fachada em condições críticas de contraste termográfico.** Construção 2018. Anais. Porto – Portugal, 2018.

BAUER, E; MILHOMEM, P.; AIDAR, L. **Utilização da simulação higrotérmica como ferramenta de apoio para inspeção termográfica de fachadas.** Construção 2018. Anais. Porto – Portugal, 2018.

BAUER, R. J. F. **Patologia em revestimentos de argamassa.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA ARGAMASSA, 2., 1997, Salvador. Anais... Salvador: ANTAC, 1997. p.321-362.

BAUER, E. MILHOMEM, M and L. AIDAR, “**Evaluating the damage degree of cracking in facades using infrared thermography,**” *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 8, no. 3, pp. 517–528, 2018.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** 7. ed. United States of America: JOHN WILEY & SONS, 2011.

BOCCARDI, S.; CARLOMAGNO, G.M.; MEOLA, C.; Russo, P.; SIMEOLI, G., **The contribution of infrared thermography in the characterization of jute based composites, Composite Structures** (2018), doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.014>.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: IBRACON. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** São Paulo: Geraldo Cechela Isaia, 2010. Cap. 28. p. 885-936.

ÇENGEL, Y. A; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa.** Editora: Mcgraw-hill do Brasil, 2012.

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.

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.

DIAS, J.L.; SILVA, A.; CHAI, C.; GASPAR, P.L.; BRITO, J. **Neural networks applied to service life prediction of exterior painted surfaces.** Building Research and Information 42(3): 371-380, 2014.

DUFOUR, M. B.; DEROME, D.; ZMEUREANU, R. **Analysis of thermograms for the estimation of dimensions of cracks in building envelope.** Infrared Phys. Technol., vol. 52, no. 2–3, pp. 70–78, 2009.

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I. BRITO, J. **Building Thermography: Detection of Delamination of Adhered Ceramic Claddings Using the Passive Approach.** *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 34, no. 1, 2015a.

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I. BRITO, J. **Quasi-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis.** Building and Environment, Vol. 94 (1), pp. 97-108, 2015.

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. DE. **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.

EL-AMIRI, Asseya; SAIFI, Abderrahim; ELHASSNAOUI, Ahmed; OBBADI, Abdellatif; ERRAMI, Youssef; SAHNOUN, Smail. **Control of solid oxide fuel cells damage using infrared thermography.** International Journal of Hydrogen Energy XXX (2018) 1 a 9.

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.; CASCUADO, 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.; FREITAS, V.; BARREIRA, E. **Detection of façade plaster detachments using infrared thermography - A nondestructive technique.** Construction and Building Materials 70 (2014) 80–87.

FREITAS, V.P. **Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos.** Porto, Portugal: OERN, 2012 (b).

FROTA, Anésia Barros. **Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo.** 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001. Bibliografia. ISBN 85-85445-39-4.

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.

GUIMARÃES, D. C. **Correlação Numérico - Experimental entre o Método dos Elementos de Contorno e Termografia Aplicados a Placas de Argamassa.** Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, 2017.

HAAGENRUD, S. **Factors Causing Degradation: Part II.** In: Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and Components. CIB Publication 295, p.1.2-104. CIB, Rotterdam, March 2004.

HIASA, S., BIRGUL, R. & CATBAS, N., 2016. **Infrared thermography for civil structural assessment: demonstrations with laboratory and field studies.** J Civil Struct Health Monit, Volume 6, p. 619–636.

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 & Technology 82 (2017) 56–74.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** 5.ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2003.

ITC. **Termografia Nivel 1. Manual do curso.** Infrared T ed. Sao Paulo: 2008.

KHAN, F.; BOLHASSANI, M.; KONTSOS, A.; HAMID, A.; BARTOLI, I. **Modeling and experimental implementation of infrared thermography on concrete masonry structures.** *Infrared Physics & Technology* 69 (2015) 228–237.

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

KOBAYASHI, K.; BANTHIA, N. **Corrosion detection in reinforced concrete using induction heating and infrared thermography.** *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 1, no. 1–2, pp. 25–35, 2011.

KREITH, F. e Bohn, MS. **Princípios de Transferência de Calor**, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1977.

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.

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. 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.** *Constr. Build. Mater.*, vol. 87, pp. 113–124, 2015.

LE, CAM.; ROBIN, J. B.; BALANDRAUD, Eric.; TOUSSAINT, X. E. **A new experimental route in thermomechanics of inorganic glasses using infrared thermography.** *Journal of Non-Crystalline Solids*. v. 366, p. 64–69, 2013.

LEKSIR, Y. L.; MANSOUR, M.; MOUSSAOUI, A. **Localization of thermal anomalies in electrical equipment using Infrared Thermography and support vector machine.** *Infrared Physics & Technology*. vol: 89 pp: 120-128, 2018.

LERMA, C.; BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. **A discussion concerning active infrared thermography in the evaluation of buildings air infiltration.** *Energy & Buildings* 168 (2018) 56–66.

LOURENÇO, T. C. **Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography.** Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção. Universidade de Nova Lisboa, 2016.

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.

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.

MILHOMEM, P.; AIDAR, L.; BAUER, E. **Estudo da evolução da temperatura nas regiões das fachadas com termografia.** 6 Conferência sobre Patologia e Reabilitação das Edificações (PATORREB, 2018). *Anais*. Rio de Janeiro, 2018.

MONTEIRO, J. R. V. **Influências da envoltória vertical opaca de edificações nas temperaturas internas do ar.** Universidade Federal de Paraíba, 2013.

MOREIRA, G. P. **Inspeção de edifícios a partir de análises termográficas em sistemas de fachada em argamassa.** Monografia de Projeto Final – 2 Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

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.

PAVÓN, E. **Critérios e padrões de comportamento para Avaliação de descolamentos cerâmicos com Termografia de infravermelho.** Universidade de Brasília (UnB), Brasília-Brasil, p. 250, 2017.

PRINDEZE *et al.* **Heat Transfer Analysis and Resolution Quantification of Active Dynamic Thermography Through Human Skin Infrared Physics and Technology** 93 (2018) 53–58

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.

SANTOS, D. G. **Estudo da vida útil e degradação de fachadas em argamassa a partir da inspeção de edifícios.** Dissertação. Universidade de Brasília (UnB), Brasília- Brasil, p. 250, 2018.

SAXENA, A.; RAMAN, V.; E.Y.K. N. **Single image reconstruction in active dynamic thermography: A novel approach.** Infrared Physics and Technology 93 (2018) 53–58.

SCIARRETTA, F.; ANTONELLI, F.; PERON, F AND CANIGLIA, S. **Final outcomes on the multi-disciplinary long-term monitoring and preservation state investigation on the medieval external Façades of Palazzo Ducale in Venice, Italy.** J. Civ. Struct. Heal. Monit., vol. 8, no. 1, pp. 111–133, 2018.

SFARRA, S.; ANTONIO, C.; BARDIA, Y.; IBARRA-CASTANEDO, C.; PERILLI, S.; MALDAGUE, X. **Improving the detection of thermal bridges in buildings via on-site**

**infrared thermography: The potentialities of innovative mathematical tools.** *Energy & Buildings* 182 (2019) 159–171.

SILVA, M. N. B. **Avaliação Quantitativa da Degradação e Vida útil de Revestimentos de Fachada - Aplicação ao Caso de Brasília.** Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2014.

SINGH, G.; NAIKAN, VNA. **Infrared thermography based diagnosis of inter-turn fault and cooling system failure in three phase induction motor.** *INFRARED PHYSICS & TECHNOLOGY*. vol: 87 pp: 134-138, 2017.

SOUZA, J. S. **Evolução da Degradação de Fachadas - Efeito dos Agentes de Degradação e dos Elementos Constituintes.** Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, 2016.

THOMAZ, Ercio. **Trincas em Edifícios - Causas, Prevenção e Recuperação.** Editora: Pini, 1989.

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), v14, 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 contexto of machining.** *Applied Thermal Engineering*, v. 58, n. 1–2, p. 321–326, set. 2013.

VENKATARAMAN, B., RAJ, B. (2003), “Performance parameters for thermal imaging systems”, *Insight*, V.45, No. 8, pp. 531-535. <https://doi.org/10.1784/insi.45.8.531.52914>

YOUSEFI B.; STEFANO, S.; IBARRA CASTANEDO, C.; MALDAGUE, X. **Comparative analysis on thermal non-destructive testing imagery applying Candid Covariance-Free Incremental Principal Component Thermography (CCIPCT).** *Infrared Physics & Technology* 85 (2017) 163–169.

## APÊNDICE A – DADOS DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR

Tabela 16 - Dados de temperatura e umidade medidos em cada ensaio

<b>Primeiro Ensaio</b>			
<b>Placas</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Umidade Relativa %</b>	<b>Emissividade</b>
FISS 6/18 L1	25,5	36,0	0,89
FISS 6/18 R1	26,8	59,0	0,89
FISS 6/18 L2	25,0	58,0	0,89
FISS 6/18 R2	27,0	60,0	0,89
FISS 6/18 L3	25,0	47,0	0,89
FISS 6/18 R3	26,9	49,0	0,89
FISS 6/18 L4	25,0	47,0	0,89
FISS 6/18 R4	27,0	62,0	0,89
FISS 6/18 L5	25,0	47,0	0,89
FISS 6/18 R5	26,3	42,0	0,89
FISS 6/18 L6	26,0	45,0	0,89
FISS 6/18 R6	26,5	53,0	0,89

<b>Segundo ensaio</b>			
<b>Placas</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Umidade Relativa %</b>	<b>Emissividade</b>
FISS 6/18 L1	26,3	38,0	0,89
FISS 6/18 R1	26,9	59,0	0,89
FISS 6/18 L2	25,0	55,0	0,89
FISS 6/18 R2	26,8	58,0	0,89
FISS 6/18 L3	26,0	54,0	0,89
FISS 6/18 R3	26,8	51,0	0,89
FISS 6/18 L4	25,0	49,0	0,89
FISS 6/18 R4	26,6	64,0	0,89
FISS 6/18 L5	25,0	47,0	0,89
FISS 6/18 R5	26,3	53,0	0,89
FISS 6/18 L6	26,0	45,0	0,89
FISS 6/18 R6	26,3	59,0	0,89

## APÊNDICE B- TERMOGRAMAS DAS PLACAS COM FISSURAS LINEARES

Figura B. 1 - Placa FISS L2 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento

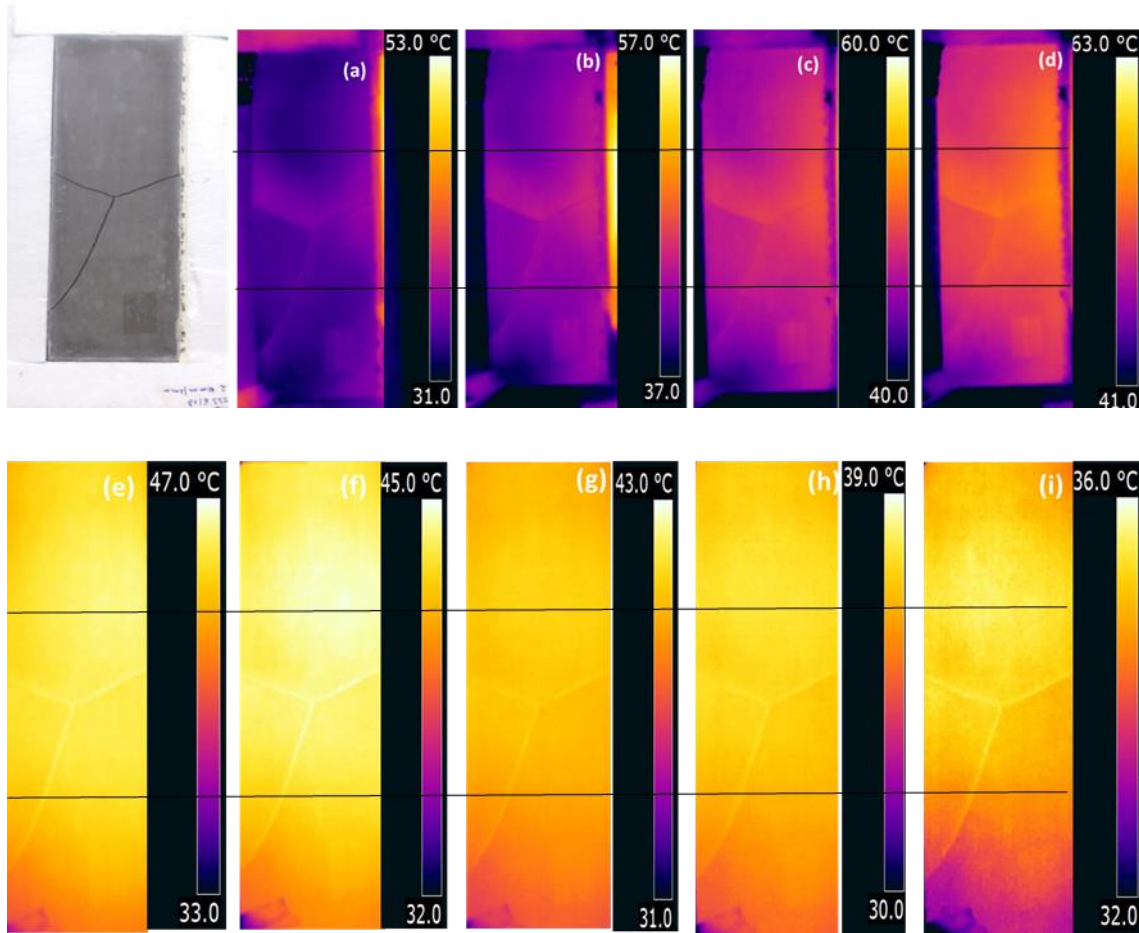
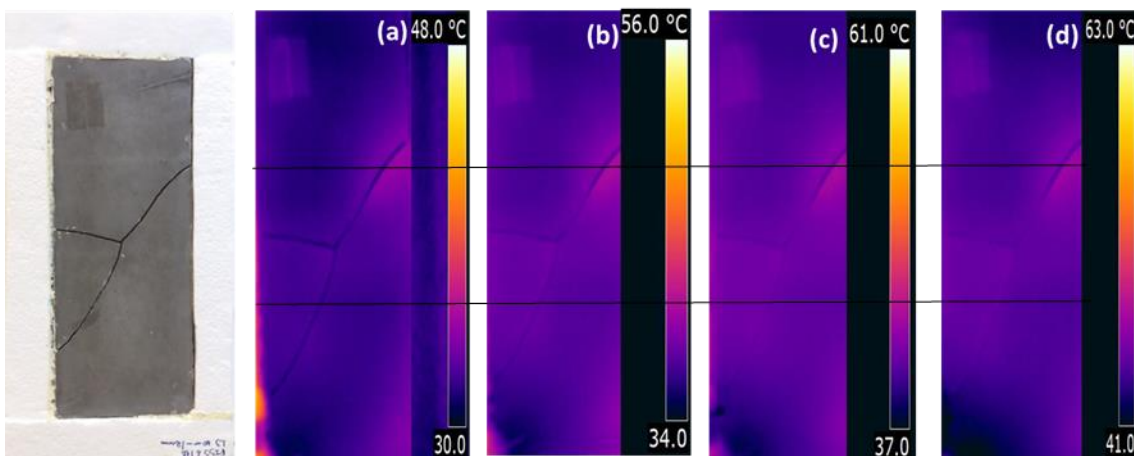


Figura B. 2 - Placa FISS L3 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento



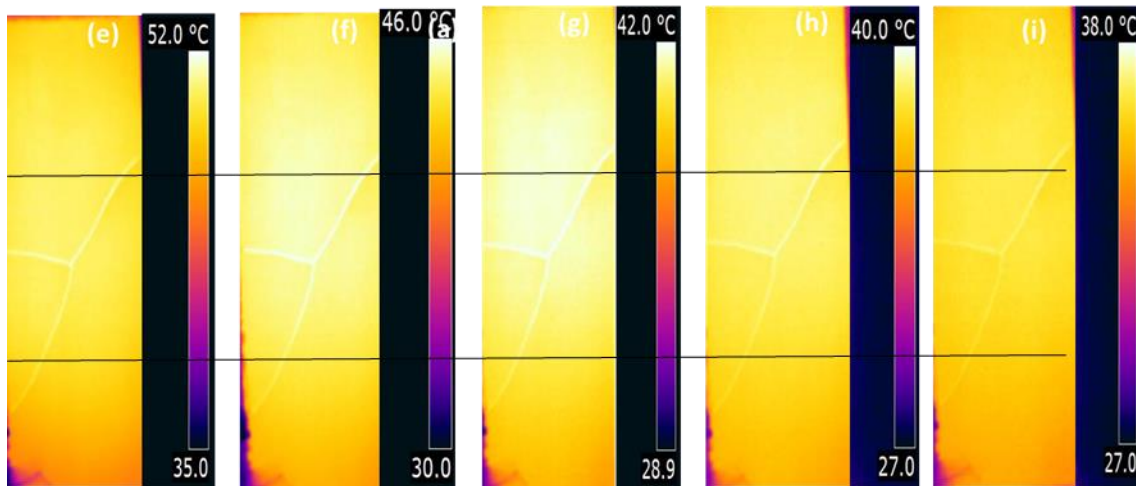


Figura B. 3 - Placa FISS L4 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento

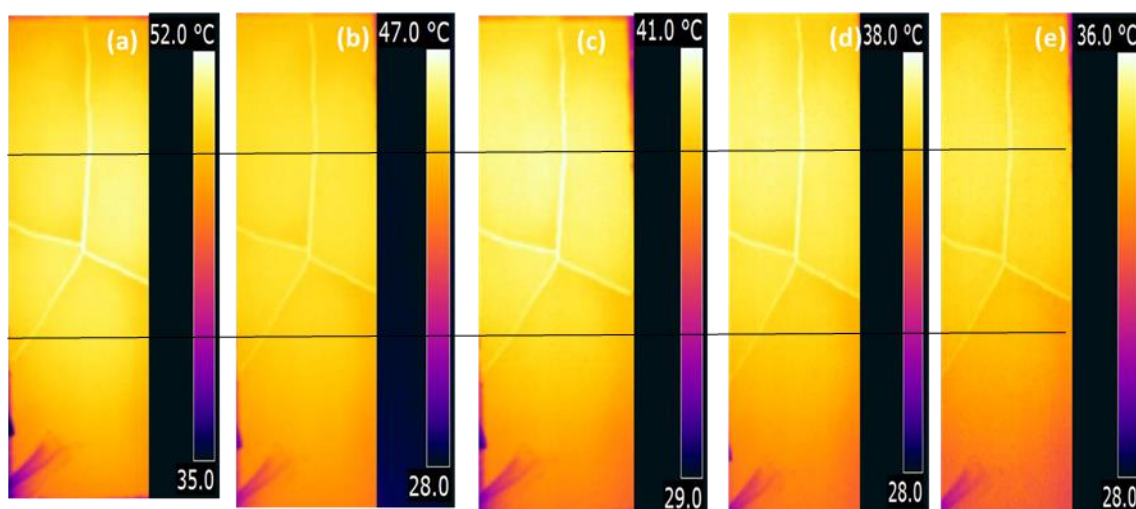
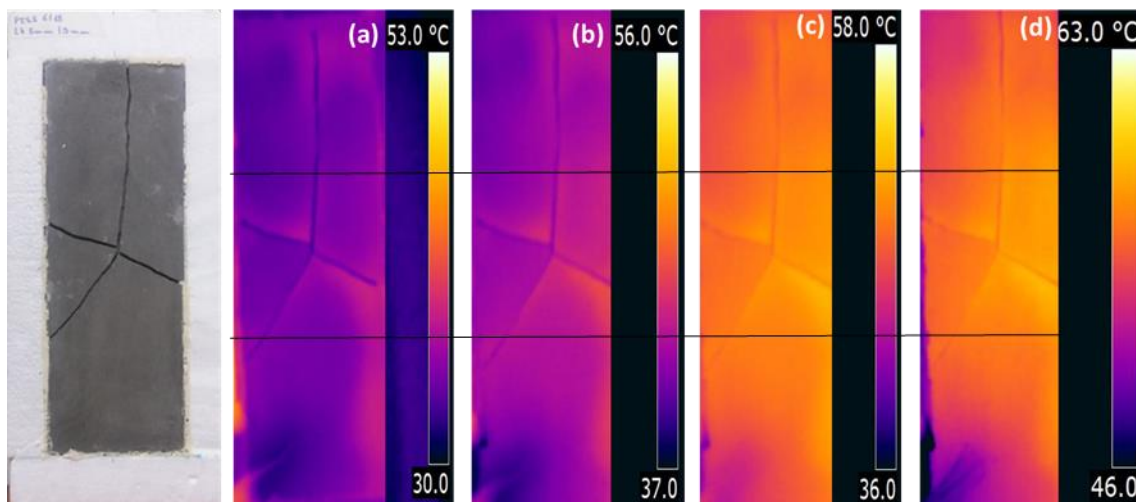
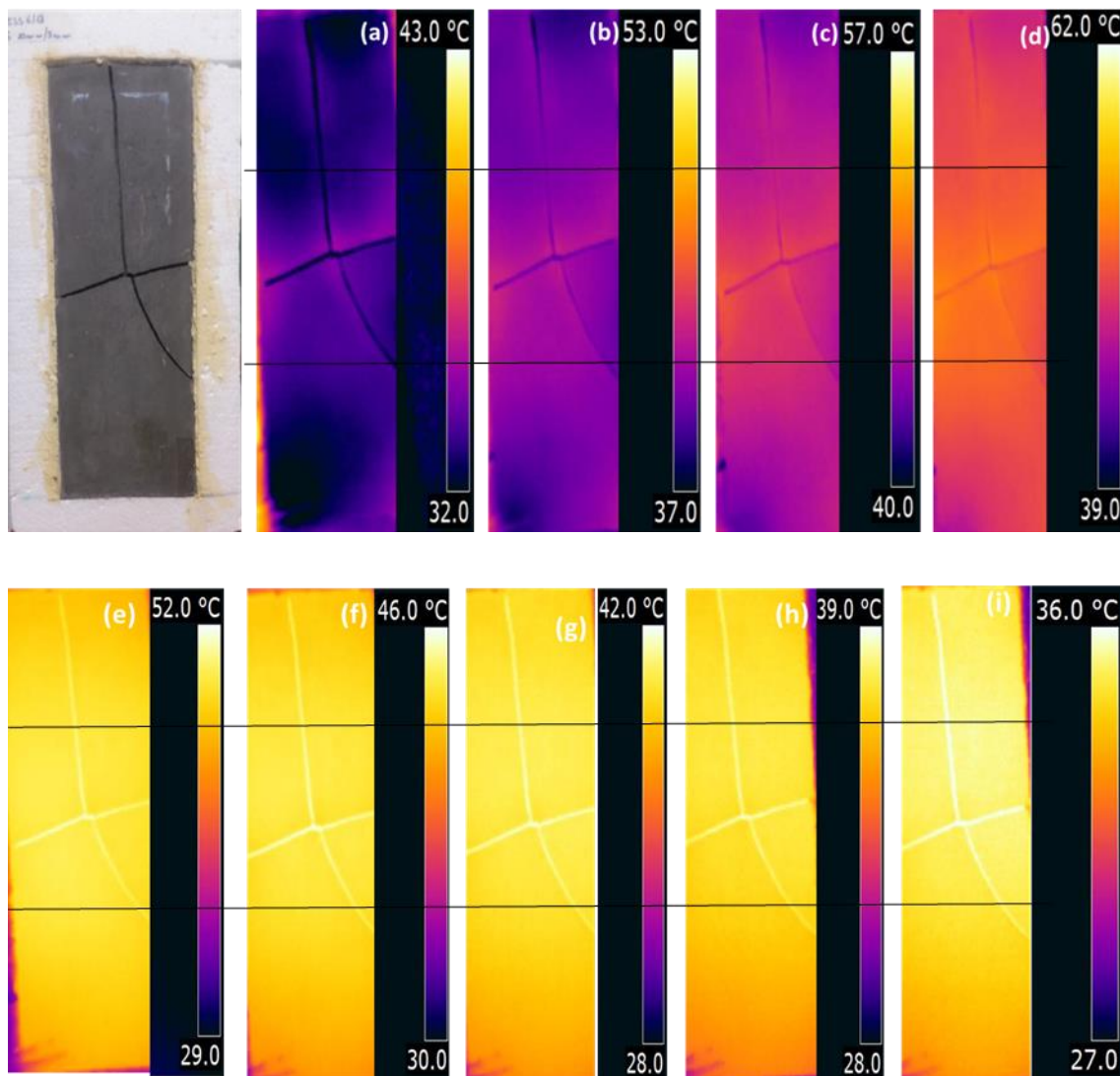


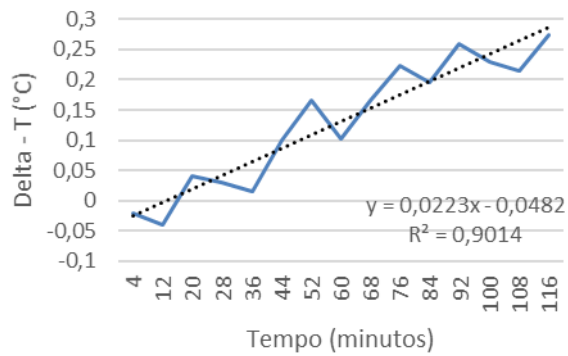


Figura B. 4 - Placa FISS L5 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento

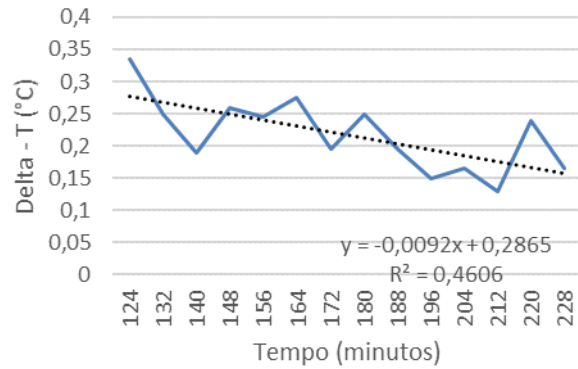


## APÊNDICE C – VELOCIDADE DE AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO DO DELTA - T

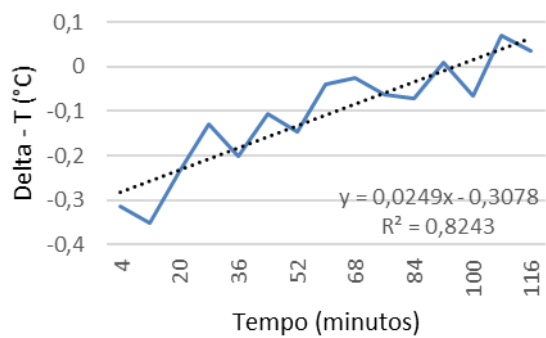
DELTA - T FISS L1 - AQUEC.



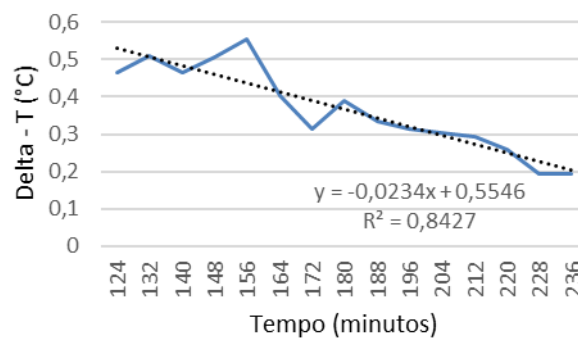
DELTA - T FISS L1 - ARREF.



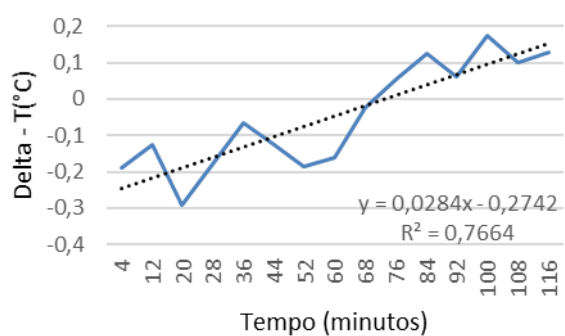
DELTA - T FISS L2 - AQUEC.



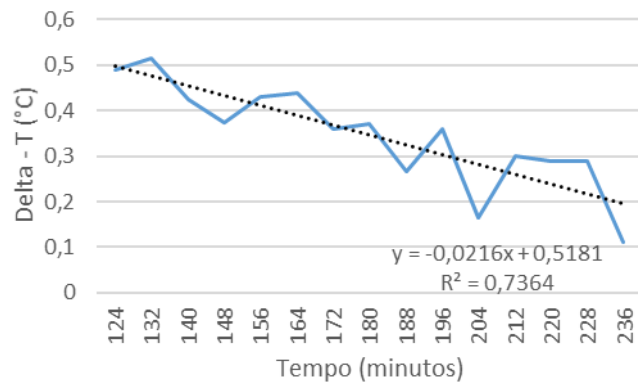
DELTA - T FISS L2 - ARREF.



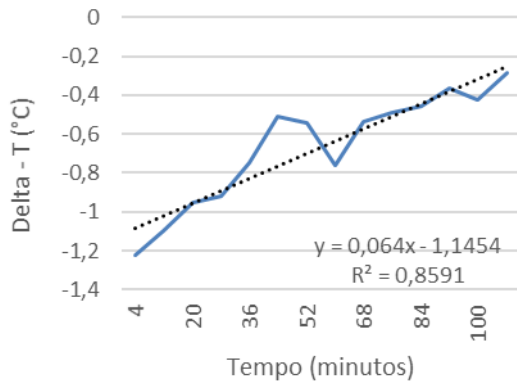
Delta - T FISS L3 - AQUEC.



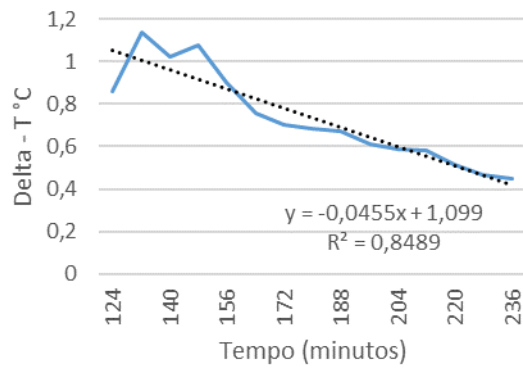
Delta - T FISS L3 - ARREF.



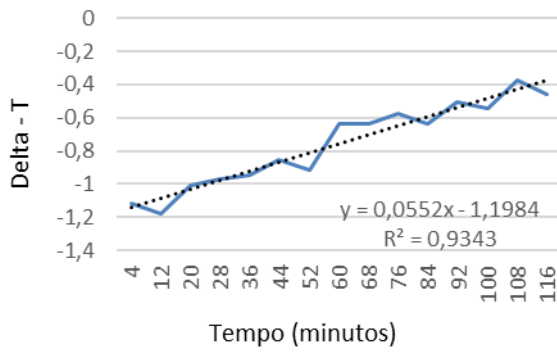
DELTA - T L4- AQUEC.



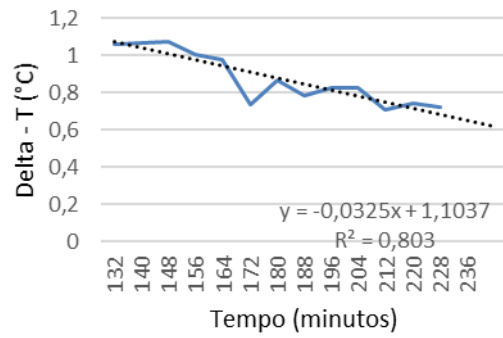
DELTA - T L4 - ARREF.



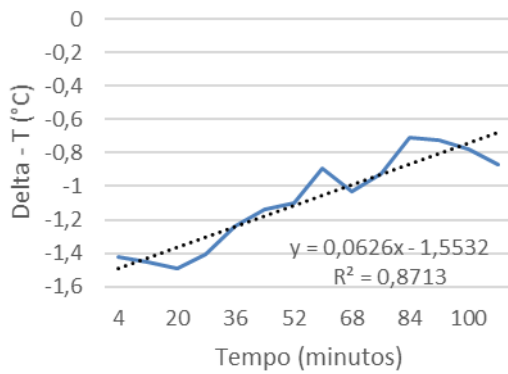
DELTA - T L5 - AQUEC.



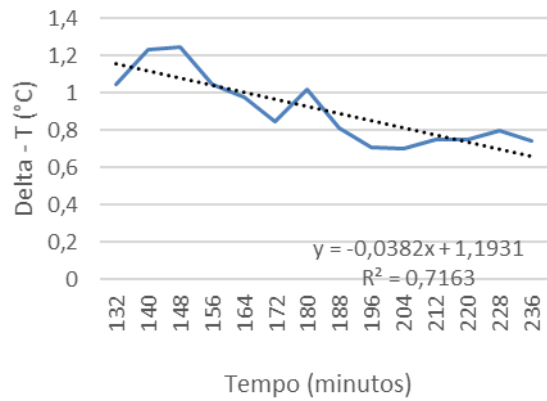
DELTA - T L5 - ARREF.



DELTA - T L6



DELTA - T L6 - ARREF.



## APÊNDICE D – TERMOGRAMAS DAS PLACAS COM FISSURAS RAMIFICADAS

Figura D 1-Placa FISS R2 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento

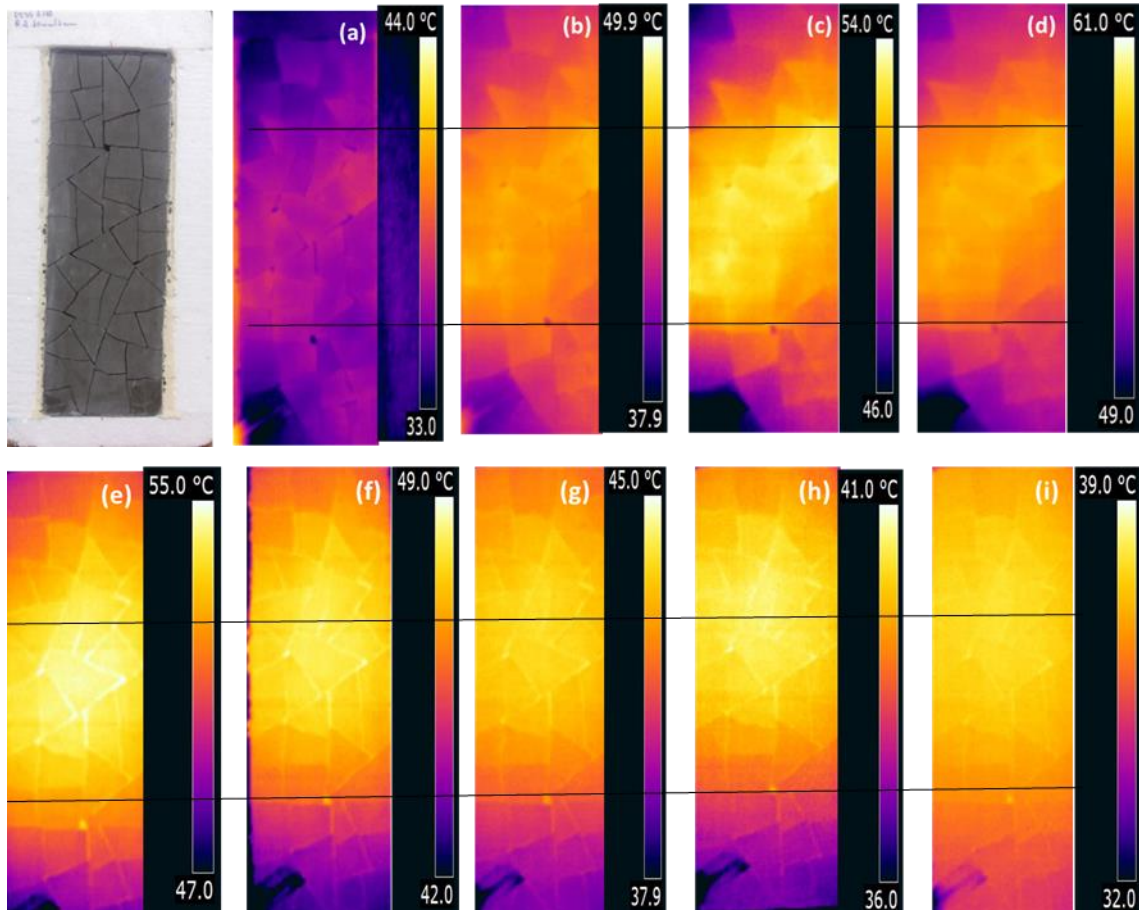


Figura D 2 - Placa FISS R3 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento

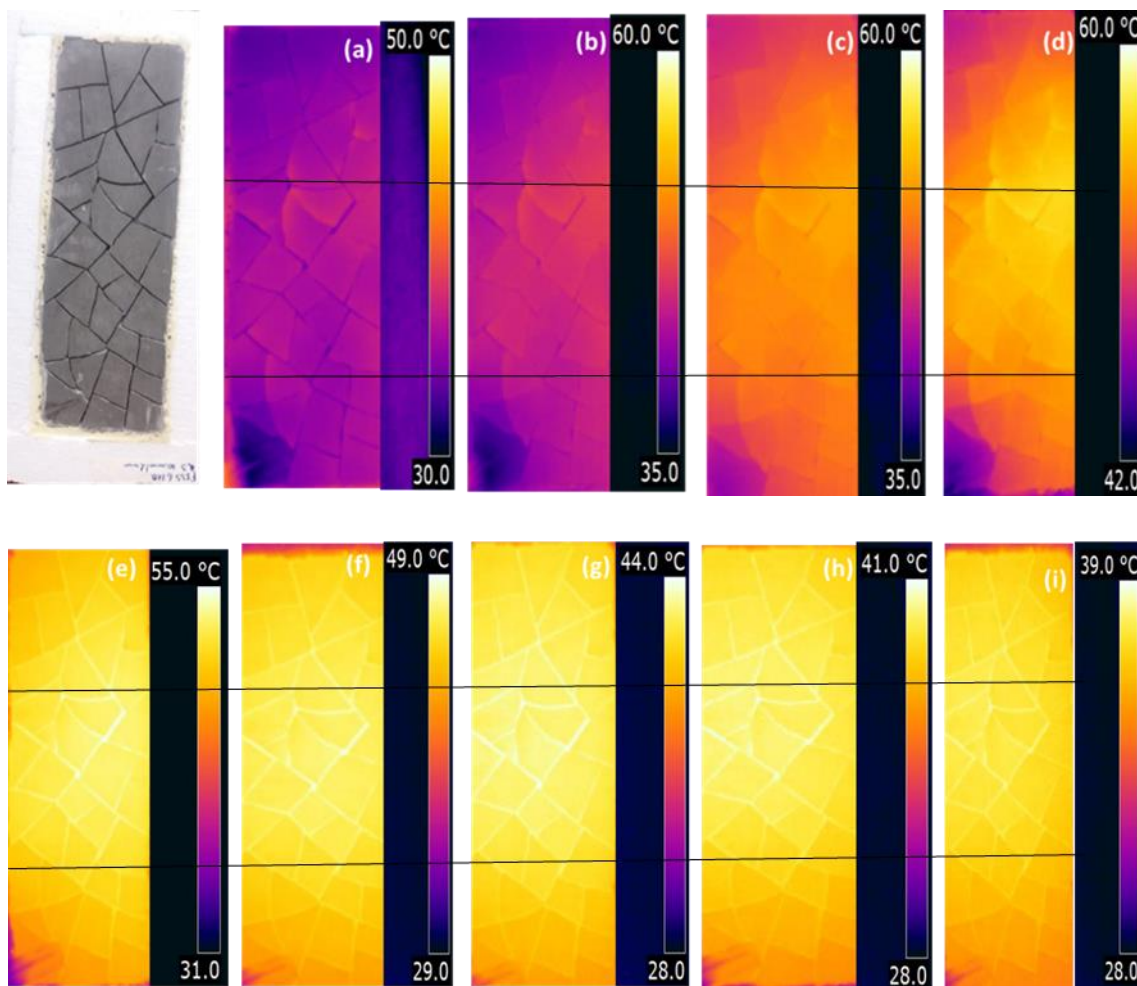
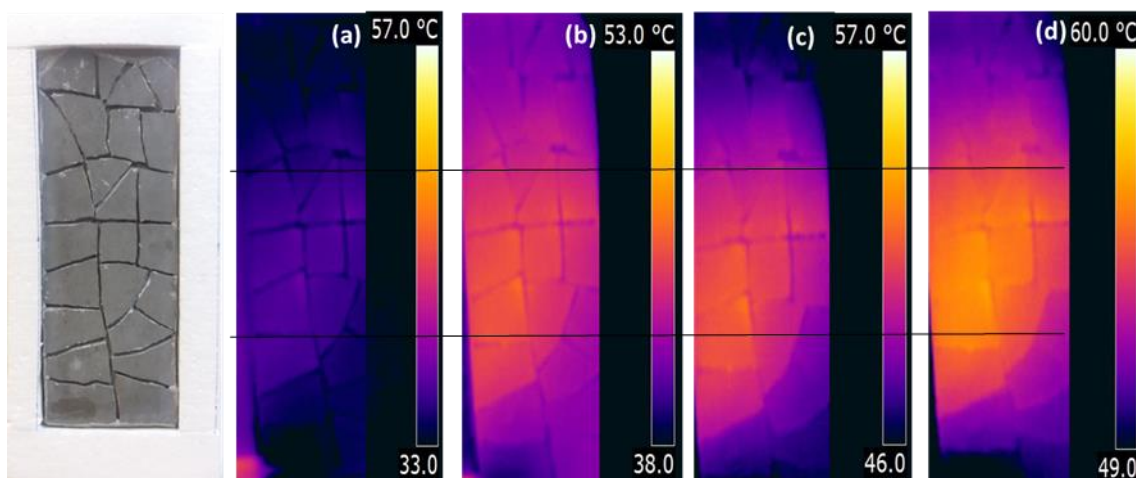


Figura D 3 - Placa FISS R4 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento



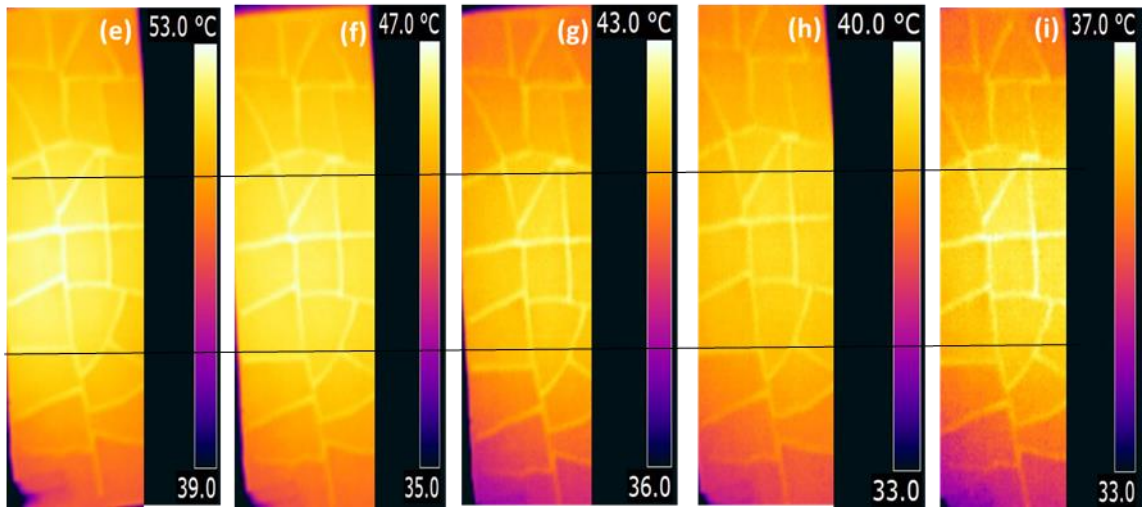


Figura D 4 - Placa FISS R5 (a) 12 min de aquecimento (b) 36 min de aquecimento (c) 60 min de aquecimento (d) 84 min de aquecimento (e) 12 min do arrefecimento (f) 36 min do arrefecimento (g) 60 min de arrefecimento (h) 84 min do arrefecimento (i) 108 min do arrefecimento

