

**AVALIAÇÃO DE FISSURAS EM FACHADAS DE ARGAMASSA COM O
EMPREGO DE TERMOGRAFIA**

MATHEUS DE SOUZA SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
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

**AVALIAÇÃO DE FISSURAS EM FACHADAS DE ARGAMASSA COM O
EMPREGO DE TERMOGRAFIA**

MATHEUS DE SOUZA SILVA

ORIENTADOR: ELTON BAUER, Dsc.

BRASÍLIA/DF – JULHO/2023

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

**AVALIAÇÃO DE FISSURAS EM FACHADAS DE ARGAMASSA COM O
EMPREGO DE TERMOGRAFIA**

MATHEUS DE SOUZA SILVA

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 do programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Elton Bauer (ENC-UnB)
(Orientador)

Prof. Dr. Elier Pavon de Lá Fé (UFOB)
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (UFC)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, JULHO DE 2023

DEDICATÓRIA

Dedico os resultados desse trabalho aos futuros pesquisadores da área, que possam aprimorar os métodos de pesquisa de termografia a partir das condições aqui estabelecidas.

“Engenheiros são solucionadores de problemas. Engenheiros possuem boa compreensão da física, matemática e química para projetar, desenvolver, testar, supervisionar e resolver produtos e serviços referentes a sua área de formação. Engenheiros comunicam as informações de maneira clara e aplicável, estando dedicados ao aprendizado ao longo da vida e ao serviço aos outros”

(Saeed Moaveni)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me proporcionado a possibilidade de realizar o curso de mestrado e por ter sido misericordioso comigo durante essa jornada, onde tenho por certeza que sua misericórdia dura para sempre. Agradeço por todos os acontecimentos, que culminaram na finalização do mestrado, ocorrerem segundo a sua vontade.

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais, Raimundo Varela da Silva e Jane de Souza da Silva, que me ajudaram durante o período do curso, conversando ou de forma financeira, onde o apoio deles foi fundamental. Agradeço a minha avó, Maria Pequena de Souza Almeida, que sempre lembra de me ligar e perguntar como estou.

Agradeço ao professor Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita, por ter me abraçado junto ao seu grupo de pesquisa, duramente minha graduação, onde pude me desenvolver academicamente com sua ajuda. Acredito que sem o apoio que o professor Esequiel me possibilitou, no início da minha jornada na engenharia, talvez, eu não estaria realizando esse trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Elton Bauer, pelos ensinamentos e visão de engenharia que tenho hoje. Por ter orientado o trabalho que me intitula como mestre e por todo o polimento acadêmico quanto a forma de investigação, forma de escrita e expressão científica.

Agradeço a Universidade de Brasília, em especial ao Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil, que possibilitou a realização das disciplinas do curso de mestrado e realização dos ensaios da dissertação.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da pesquisa junto a Universidade de Brasília.

RESUMO

AVALIAÇÃO DE FISSURAS EM FACHADAS DE ARGAMASSA COM O EMPREGO DE TERMOGRAFIA

Autor: Matheus de Souza Silva

Orientador: Elton Bauer

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Julho de 2023

A fissuração é a anomalia de maior ocorrência nos revestimentos de argamassa, pois está associada à uma maior quantidade de causas possíveis. As fissuras podem ser investigadas por termografia de infravermelho, pois defeitos em uma superfície apresentam temperaturas diferentes em relação a região sem defeito. A temperatura das fissuras observadas por termografia é dependente da dimensão, indicando que para cada dimensão de fissura há uma temperatura diferente observada no termograma. Devido as fissuras possuírem características referentes a dimensão e forma, avalia-se a possibilidade de classificação do dano das fissuras em função de diferentes largura e profundidades, para diferentes formas de fissura, linear e ramificada, por termografia, durante o aquecimento e resfriamento. Propõe-se a observação da evolução de temperatura, no aquecimento e resfriamento de placas de argamassa com fissuras lineares e ramificadas com diferentes larguras e profundidades, objetivando, identificar, por meio do contraste termográfico ΔT , as tendências de evolução de ΔT em função da forma da fissura. As variações de temperatura das placas com fissuras lineares e ramificadas são monitoradas, no aquecimento e resfriamento, por termogramas, onde é estabelecido as tendências de evolução de temperatura e os métodos de investigação para fissuras em revestimentos de argamassa. As condições de investigação e tendências de evolução de ΔT estabelecidas em laboratório, são comparadas com uma investigação de termografia em campo, identificando se as tendências de ΔT e método investigativo são observados e possíveis de aplicação. A investigação de termografia, pela aplicação de ΔT , indica que as fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência de evolução, onde o ΔT das fissuras ramificadas é inferior, em módulo, ao ΔT das fissuras lineares. O ΔT , para as fissuras lineares e ramificadas, é máximo, em módulo, no início do aquecimento e resfriamento. Os maiores valores de ΔT estão associados com maiores dimensões de fissura, onde a largura da fissura possui maior influência nos valores de ΔT , comparado com a influência da profundidade. As tendências de evolução de ΔT das fissuras lineares e ramificadas observadas em laboratório, possuem as mesmas tendências de ΔT das fissuras obtidas na análise de campo, possibilitando empregar a termografia na inspeção de fissuras em argamassa.

Palavras Chave: Fissura; Argamassa; Fachada; Termografia; ΔT ; Dano

ABSTRACT

EVALUATION OF CRACKS IN MORTAR FACADES USING THERMOGRAPHY

Author: Matheus de Souza Silva

Supervisor: Elton Bauer

Postgraduate in Structural and Civil Construction

Brasília, July of 2023

Cracking is the most frequent anomaly in mortar coatings, as it is associated with a greater number of possible causes. Cracks can be investigated by infrared thermography, as defects on a surface have different temperatures compared to the region without a defect. The temperature of the defects observed by thermography is dependent on the crack dimension, indicating that for each crack dimension there is a different temperature observed in the thermogram. Because the cracks have characteristics related to size and shape, the possibility of classifying the damage of the cracks according to different widths and depths, for different forms of cracks, linear and branched, by thermography, during heating and cooling, is evaluated. It is proposed to observe the evolution of temperature, in the heating and cooling of mortar plates with linear and branched cracks with different widths and depths, aiming to identify, through the thermographic contrast ΔT , the evolution trends of ΔT depending on the shape of the crack. The temperature variations of the plates with linear and branched cracks are monitored, during heating and cooling, by means of thermograms, where trends in temperature evolution and investigation methods for cracks in mortar coatings are established. The investigation conditions and evolution trends of ΔT established in the laboratory, are compared with a thermography investigation in the field, identifying if the trends of ΔT and investigative method are observed and possible application. Thermography investigation, through the application of ΔT , indicates that the linear and branched cracks have the same trend of evolution, where the ΔT of the branched cracks is inferior, in module, to the ΔT of the linear cracks. ΔT , for linear and branched cracks, is maximum, in modulus, at the beginning of heating and cooling. Higher ΔT values are associated with larger crack dimensions, where crack width has a greater influence on ΔT values, compared to the influence of depth. The evolution trends of ΔT of the linear and branched cracks observed in the laboratory, have the same trends of ΔT of the cracks obtained in the field analysis, making it possible to use thermography in the inspection of cracks in mortar.

Keywords: Crack; Mortar; Facade; Thermography; ΔT ; Damage

Índice de Figuras

Figura 1 - Ocorrência de anomalias nas fachadas de argamassa da cidade de Brasília, Brasil (BAUER; SOUZA; MOTA, 2021)	5
Figura 2 - Fissura linear em revestimento de argamassa (DIEHL, 1960)	6
Figura 3 - Fissura ramificada em revestimento de argamassa (CSTB, 2017)	7
Figura 4 - Fissura de contração térmica e retração por secagem: (a) causada por movimentação da laje; (b) causada por retração da alvenaria (THOMAZ, 2020)	8
Figura 5 - Fissura de retração por secagem no revestimento: (a) com orientação predominante horizontal; (b) sem orientação definida (JOISEL, 1981)	8
Figura 6 - Fissura por sobrecarga: (a) linear inclinada; (b) formada por fissuras verticais e horizontais (ALCUDIA, 1998)	9
Figura 7 - Fissuras de movimentação de estruturas: (a) na interface pilar/alvenaria; (b) na interface viga/alvenaria (CSTB, 2017)	9
Figura 8 - Fissuras nos cantos de abertura: (a) no canto inferior da abertura de janela; (b) no canto superior da abertura de porta (CSTB, 2017)	10
Figura 9 - Fissuras de recalque de fundações: (a) vertical na alvenaria; (b) nos cantos de abertura de janelas (CSTB, 2017, 2021)	10
Figura 10 - Fluxo de calor por condução (ÇENGEL, 2012)	12
Figura 11 - Fluxo de calor por convecção (ÇENGEL, 2012)	13
Figura 12 - Fluxo de calor por radiação (ÇENGEL, 2012)	14
Figura 13 - Fluxo de radiação: (a) em materiais opacos, parede; (b) em materiais transparentes, janela de vidro (FROTA; SCHIFFER, 2001)	15
Figura 14 - Fluxo de calor combinado presente nas edificações (ÇENGEL, 2012)	16
Figura 15 - Esquema de fluxo por condução usando transmitância (ÇENGEL, 2012) ..	17
Figura 16 - Diferença de temperatura em diferentes alturas (AIDAR, 2019)	18
Figura 17 - Identificação de umidade: (a) imagem sem detecção; (b) umidade detectada no termograma (MENEZES; GOMES, 2015)	19
Figura 18 - Inspeção de fachada de revestimento cerâmico: (a) área de investigação; (b) termograma de descolamento no aquecimento; (c) termograma de descolamento no resfriamento (BAUER et al., 2016c)	20
Figura 19 - Inspeção em fachada de argamassa: (a) Região de investigação; (b) termograma no resfriamento (BAUER et al., 2016a)	20
Figura 20 - Identificação de diferentes materiais por termografia: (a) fundo da placa em argamassa e identificação dos materiais; (b) termograma frontal da placa no	

aquecimento; (c) termograma frontal da placa no resfriamento (LUCENAS; BAUER; PAVÓN, 2021).....	21
Figura 21 - Variações de emissividade em função do ângulo de observação; (ITC, 2008)	23
Figura 22 - Termograma para identificação de defeito em placa de resina epóxi reforçada com fibra de vidro: (a) 4 metros de distância; (b) 7 metros de distância; (c) 10 metros de distância (TU et al., 2022)	24
Figura 23 - Variação de temperatura detectada no termograma em função da mudança de ângulo (MILHOMEM; AIDAR; BAUER, 2018)	24
Figura 24 - Campo de visão termográfico: (a) para uma lente de abertura de 12° e distância de 1000 mm; (b) método de cálculo para obtenção do campo de visão. Adaptado de (MALDAGUE, 2001).....	26
Figura 25 - Formas de aquecimento ativo: (a) Aquecimento pontual; (b) Aquecimento de linha; (c) Aquecimento de superfície (MALDAGUE, 2001)	28
Figura 26 - Termografia quantitativa em conectores de um transformador: (a) regiões de observação; (b) conector a; (c) conector b (ITC, 2008)	29
Figura 27 - Esquema de investigação quantitativa (HART, 1992).....	29
Figura 28 - Fissuração em fachada de revestimento cerâmico: (a) termograma; (b) avaliação quantitativa (BAUER; MILHOMEM; AIDAR, 2018)	30
Figura 29 - Inspeção em fachada de revestimento cerâmico: (a) imagem digital; (b) termograma observado em variação de temperatura alta na superfície; (c) termograma observado em variação de temperatura baixa na superfície (PAVÓN, 2017).....	31
Figura 30 - (a) termograma de descolamento cerâmico no início do aquecimento; (b) termograma de fissura em revestimento de argamassa no início do aquecimento (BAUER et al., 2016c)	33
Figura 31 - Determinação da dimensão do descolamento: (a) linha de investigação; (b) identificação dos pontos de inclinação mínima e máxima e intervalo de pixels que representam o defeito (PAVÓN, 2017)	34
Figura 32 - Temperatura da fissura no resfriamento em função da profundidade (OSWALD-TRANTA, 2018).....	35
Figura 33 - Contraste térmico de defeitos em placa de aço submetidos ao aquecimento (CHUNG et al., 2020)	35
Figura 34 - Comportamento da evolução do Delta-T durante o aquecimento (BAUER et al., 2016b).....	37

Figura 35 - Fluxograma das etapas do desenvolvimento metodológico	39
Figura 36 - Placas com fissura linear, onde L é a largura e P a profundidade da fissura (MILHOMEM, 2019).....	42
Figura 37 - Placas com fissura ramificada, onde L é a largura e P a profundidade da fissura (MILHOMEM, 2019).....	43
Figura 38 - Fonte de aquecimento	46
Figura 39 - Aparato de investigação termográfica: (a) Layout de termografia ativa em planta baixa; (b) observação do conjunto experimental submetido a aquecimento; (c) observação lateral da placa e fonte de calor no aquecimento.....	46
Figura 40 - Delimitação da zona central de análise de um termograma a ser investigada	48
Figura 41 - Área delimitada de investigação das fissuras lineares	48
Figura 42 - Área delimitada de investigação das fissuras ramificadas.....	48
Figura 43 - Exemplo de matriz pixel/tempo.....	49
Figura 44 - Identificação da região sem defeito e da fissura.....	50
Figura 45 - Delta-T formado por uma mesma fissura e duas regiões sem defeito: (a) descrição da fissura e das regiões sem defeito; (b) Delta-T da região 1; (c) Delta-T da região 2	51
Figura 46 – Características de evolução no aquecimento e resfriamento do Delta-T de comportamento esperado.....	52
Figura 47 – Seleção por desvio padrão dos valores médios de Delta-T: (a) Aquecimento; (b) resfriamento, onde (MD) é a média de Delta-T.....	53
Figura 48 - Esquema de identificação da largura da fissura.....	55
Figura 49 - Fachada de argamassa inspecionada por termografia.....	56
Figura 50 - Fachada de argamassa inspecionada por termografia: (a) imagem digital com a delimitação das regiões investigadas; (b) termograma da fachada.....	56
Figura 51 - Evolução da temperatura da superfície da fachada e da temperatura ambiente pelo software WUFI (BAUER et al., 2016a).....	57
Figura 52 – identificação da posição das fissuras e regiões sem fissura da placa L1	60
Figura 53 - Evolução de Td e Tnd no aquecimento da placa L1: (a) 0 a 120 minutos; (b) 20 minutos a 40 minutos; (c) 40 a 80 minutos; (d) 80 a 120 minutos.....	61
Figura 54 - Evolução de Td e Tnd no resfriamento da placa L1: (a) 120 a 240 minutos; (b) 120 minutos a 160 minutos; (c) 160 a 200 minutos; (d) 200 a 240 minutos	62
Figura 55 – Identificação da posição das fissuras e regiões sem fissura da placa R1	63

Figura 56 - Evolução de Td e Tnd no aquecimento da placa R1: (a) 0 a 120 minutos; (b) 00 minutos a 40 minutos; (c) 40 a 80 minutos; (d) 80 a 120 minutos	64
Figura 57 - Evolução de temperatura Td e Tnd no resfriamento da placa R1: (a) 120 a 240 minutos; (b) 120 minutos a 160 minutos; (c) 160 a 200 minutos; (d) 200 a 240	65
Figura 58 - Identificação das fissuras da placa L1	66
Figura 59 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L1	67
Figura 60 - Identificação das fissuras da placa L2	67
Figura 61 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L2	68
Figura 62 - Identificação das fissuras da placa L3	68
Figura 63 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L3	69
Figura 64 - Identificação das fissuras da placa L4	69
Figura 65 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L4	70
Figura 66 - Identificação das fissuras da placa L5	70
Figura 67 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L5	71
Figura 68 - Identificação das fissuras da placa L6	71
Figura 69 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L6	72
Figura 70 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo de todas das fissuras lineares.....	73
Figura 71 - Identificação das fissuras da placa R1	74
Figura 72 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R1	74
Figura 73 - Identificação das fissuras da placa R2	75
Figura 74 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R2	75
Figura 75 - Identificação das fissuras da placa R3	76
Figura 76 Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R3	76
Figura 77 - Identificação das fissuras da placa R4	77

Figura 78 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R4	77
Figura 79 - Identificação das fissuras da placa R5	78
Figura 80 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R5	78
Figura 81 - Identificação das fissuras da placa R6	79
Figura 82 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R6	79
Figura 83 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo de todas as fissuras ramificadas	80
Figura 84 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras lineares com profundidade de 5 mm e largura de 1 mm e 3mm.....	81
Figura 85 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras ramificadas com profundidade de 5 mm e largura de 1 mm e 3mm.....	82
Figura 86 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras lineares com profundidade de 10 mm e largura de 1 mm, 2 mm e 3 mm.....	84
Figura 87 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras ramificadas com profundidade de 10 mm e largura de 1 mm, 2 mm e 3 mm.....	86
Figura 88 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras lineares com largura de 1 mm e profundidade de 5 mm e 10 mm.....	88
Figura 89 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras ramificadas com largura de 1 mm e profundidade de 5 mm e 10 mm.....	89
Figura 90 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras lineares com largura de 3 mm e profundidade de 5 mm, 10 mm e 15 mm.....	91
Figura 91 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras ramificadas com largura de 3 mm e profundidade de 5 mm, 10 mm e 15 mm.....	92
Figura 92 - Termogramas da fachada de argamassa da avaliação de campo: (a) 8 horas; (b) 9 horas; (c) 10 horas; (d) 11 horas	99
Figura 93 - Termogramas da fachada de argamassa da avaliação de campo: (a) 12 horas; (b) 13 horas; (c) 14 horas; (d) 15 horas	99
Figura 94 - Termogramas da fachada de argamassa da avaliação de campo: (a) 16 horas; (b) 17 horas; (c) 18 horas.....	100
Figura 95 - Evolução da temperatura da superfície da fachada e da temperatura ambiente durante o aquecimento e resfriamento pelo software WUFI (BAUER et al., 2016a) ..	101

Figura 96 - Quantidade de fissuras identificadas nas regiões de investigação no termograma de 8 horas: (a) região 1; (b) região 2; (c) região 3.....	102
Figura 97 - Evolução de Delta-T representativo, no aquecimento e resfriamento, das fissuras lineares da região 1 (FL1), das fissuras lineares da região 2 (FL2) e das fissuras ramificadas da região 3 (FR)	103

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Transmitância em envoltórias (COSTA, 1991).....	17
Tabela 2 - Emissividade dos materiais de construção (BARREIRA et al., 2015)	22
Tabela 3 - Variáveis de estudo	38
Tabela 4 - Caracterização de dimensão e identificação dos corpos de prova.....	41
Tabela 5 - Identificação dos dados de entrada para termografia quantitativa	44
Tabela 6 - Dados do ambiente obtidos para as investigações das placas com fissuras lineares.....	45
Tabela 7 - Dados do ambiente obtidos para as investigações das placas com fissuras ramificadas.....	45
Tabela 8 - Esquema de investigação das variáveis independentes	54
Tabela 9 - Propriedades da evolução de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas de 5 mm de profundidade e 1 mm e 3 mm de largura, sendo (P) profundidade e (L) largura	83
Tabela 10 - Propriedades da evolução de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas de 10 mm de profundidade e 1 mm, 2 mm e 3 mm de largura, sendo (P) profundidade e (L) largura.....	87
Tabela 11 - Propriedades da evolução de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas de 1 mm de largura e 2 mm e 3 mm de profundidade, sendo (P) profundidade e (L) largura	90
Tabela 12 - Propriedades da evolução de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas de 3 mm de largura e 5 mm, 10 mm e 15 mm de profundidade, sendo (P) profundidade e (L) largura.....	94
Tabela 13 - Largura das fissuras lineares das placas L1 (1 mm de largura), L2 (1 mm de largura) e L3 (2 mm de largura)	95
Tabela 14 - Largura das fissuras lineares das placas L4 (3 mm de largura), L5 (3 mm de largura) e L6 (3 mm de largura)	96
Tabela 15 - Umidade relativa e temperatura ambiente da investigação de campo.....	98

Índice de Quadros

Quadro 1 - Síntese dos resultados	106
---	-----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	2
1.2. OBJETIVOS.....	3
<i>1.2.1. Objetivo geral.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2.2. Objetivo específico</i>	<i>3</i>
2. TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO NA INVESTIGAÇÃO DE DEFEITOS.....	4
2.1. DEGRADAÇÃO POR FISSURAÇÃO.....	4
<i>2.1.1. Conceitos e mecanismos de desenvolvimento.....</i>	<i>5</i>
<i>2.1.2. Formas de fissuras.....</i>	<i>5</i>
<i>2.1.3. Causas de fissuração nos revestimentos</i>	<i>7</i>
2.2. TRANSMISSÃO DE CALOR	11
<i>2.2.1. Fluxo de calor por condução</i>	<i>11</i>
<i>2.2.2. Fluxo de calor por convecção</i>	<i>12</i>
<i>2.2.3. Fluxo de calor por radiação</i>	<i>13</i>
<i>2.2.4. Condução de calor nas envoltórias</i>	<i>16</i>
2.3. FATORES QUE AFETAM A TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DAS FACHADAS.....	18
<i>2.3.1. Altura da região investigada</i>	<i>18</i>
<i>2.3.2. Defeitos.....</i>	<i>19</i>
<i>2.3.3. Diferentes materiais.....</i>	<i>20</i>
2.4. PARÂMETROS DE TERMOGRAFIA.....	21
<i>2.4.1. Parâmetros relacionados ao alvo</i>	<i>22</i>
<i>2.4.2. Parâmetros relacionados ao equipamento.....</i>	<i>25</i>
2.5. INVESTIGAÇÕES DE TERMOGRAFIA.....	26
<i>2.5.1. Termografia passiva e ativa.....</i>	<i>27</i>

2.5.2.	<i>Formas de aquecimento ativo</i>	27
2.5.3.	<i>Termografia qualitativa e quantitativa</i>	28
2.6.	INVESTIGAÇÃO QUANTITATIVA	31
2.6.1.	<i>Funções de contraste</i>	31
2.6.2.	<i>Aplicações de termográfica quantitativa</i>	34
2.6.3.	<i>Avaliação de fissuras por termografia</i>	36
3.	DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO	38
3.1.	INVESTIGAÇÃO EM LABORATÓRIO	40
3.1.1.	<i>ETAPA 1: Características dos corpos de prova</i>	41
3.1.2.	<i>ETAPA 2: Avaliações preliminares</i>	43
3.1.3.	<i>ETAPA 3: Aplicação de rotina</i>	46
3.1.4.	<i>ETAPA 4: Identificação das fissuras e região livre de dano</i>	49
3.1.5.	<i>ETAPA 5: Análise quantitativa</i>	50
3.1.6.	<i>ETAPA 6: Critérios de seleção</i>	51
3.1.7.	<i>ETAPA 7: Investigação das variáveis dependentes e independentes</i>	53
3.2.	INVESTIGAÇÃO EM CAMPO	55
4.	RESULTADOS	59
4.1.	EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DAS FISSURAS E REGIÃO SEM DEFEITO	59
4.1.1.	<i>Fissuras lineares</i>	59
4.1.2.	<i>Fissuras ramificadas</i>	62
4.2.	ANÁLISE DE EVOLUÇÃO DO DELTA-T	65
4.2.1.	<i>Fissuras lineares</i>	66
4.2.2.	<i>Delta-T das fissuras ramificadas</i>	73
4.3.	EVOLUÇÃO DO DELTA-T EM FUNÇÃO DA LARGURA E PROFUNDIDADE DA FISSURA	80
4.3.1.	<i>Grupo 1 - Evolução do Delta-T em função largura</i>	80
4.3.2.	<i>Grupo 2 - Evolução do Delta-T em função da profundidade</i>	87

4.4. Largura da fissura	94
4.5. Investigação de campo.....	98
4.5.1. Evolução de temperatura.....	98
4.5.2. Comportamento de Delta-T	101
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	106
6. CONCLUSÃO	110
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
ANEXO.....	122
pós processamento de imagem	122

1. INTRODUÇÃO

As fachadas são sistemas construtivos externos a edificação, desempenhando função estética e de proteção ao ambiente interno da edificação contra o intemperismo. Devido as fachadas estarem em contato direto com intempéries, como radiação solar e chuva dirigida, as mesmas estão sujeitas a degradação (BAUER et al., 2020; MORGADO et al., 2021). A degradação das fachadas é ocasionada por agentes e mecanismos de degradação que agem conjuntamente e possibilitam o desenvolvimento de anomalias que, conseqüentemente, reduzem o desempenho do revestimento (ISO, 2011; NASCIMENTO et al., 2016).

Uma das anomalias de maior predominância nas fachadas em argamassa é a fissuração. A maior ocorrência das fissuras está relacionada com o maior número de causas prováveis, no qual a fissura possui maior dano atribuído ao revestimento comparado com outras anomalias (BAUER et al., 2020; BAUER; SOUZA; MOTA, 2021; LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017).

As fissuras em revestimentos de argamassa podem ser identificadas e investigadas por termografia de infravermelho. A identificação ocorre pelo fato que os defeitos alteram localmente o fluxo de calor nas fachadas, o que gera temperaturas diferentes no defeito em relação a área livre de dano (CARRETERO-AYUSO; MORENO-CANSADO; DE BRITO, 2017).

A termografia, na investigação de fissuras em revestimentos de argamassa, pode auxiliar na atribuição de dano das fissuras, por meio da aplicação do contraste termográfico Delta-T, que é a diferença entre a temperatura da fissura e da região sem defeito. As fissuras possuem forma linear ou ramificada, e diferentes dimensões, largura e profundidade, onde podem causar maior degradação do revestimento. Conseqüentemente, a atribuição de dano das fissuras, em função a forma e dimensão, pode ser investigada por termografia, por meio da análise das diferenças de evolução de Delta-T das fissuras.

A avaliação de fissuras lineares e ramificadas por termografia, deve analisar como a investigação difere em função da forma da fissura, pela tendência da evolução de Delta-T durante o aquecimento e resfriamento. Além da forma da fissura, identifica-se como a dimensão da fissura, largura e profundidade, é responsável pelos valores de Delta-T, durante o aquecimento e resfriamento, e quais os balizadores e critérios investigativos são determinantes em uma inspeção de termografia em revestimentos de argamassa.

1.1. JUSTIFICATIVA

A NBR 15575-1 (ABNT, 2021a) e 15575-4 (ABNT, 2021b) apresentam critérios de tolerância ao desenvolvimento de fissuras, nos quais podem ser prejudiciais, ou não, ao sistema de revestimento. Os critérios normativos são qualitativos, pois são baseados na identificação das fissuras à olho nu, sem que haja uma metodologia investigativa que classifique ou atribua gravidade das fissuras ao revestimento.

A degradação atribuída ao revestimento de fachada, pode ser obtido pela aplicação do Método de Mensuração de Degradação (MMD), desenvolvido pelo pesquisados do laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade de Brasília, LEM-UnB (PIAZZAROLLO, 2019). O MMD verifica o nível de degradação das fachadas a partir do mapeamento de danos, que é um desenho esquemático da fachada, que permite analisar a degradação da fachada em área, onde a fissuração é o defeito que atribui maior dano (BAUER et al., 2020; GASPAR, 2009; SOUZA; PIAZZAROLLO; BAUER, 2019).

A investigação de degradação de fachadas por MMD leva em consideração apenas a extensão do defeito na área da fachada, sendo que as dimensões da fissura, largura e profundidade, não são quantificadas (GASPAR; BRITO, 2008). As fissuras podem ser classificadas quanto a sua dimensão, pois, por meio de contraste termográfico, há diferentes temperaturas observadas em função da dimensão da fissura (PATRÍCIA M. MILHOMEM, LUIZ A. AIDAR, 2019; PAVON, 2017). A investigação efetuada por Milhomem (2019) se restringiu a fissuras lineares, pois a classificação de dano das fissuras ramificadas não foi possível, indicando que as investigações e a atribuição de dano podem diferir em função da forma da fissura (BAUER et al., 2016a; MILHOMEM, 2019).

Para o uso da termografia na inspeção de fissuras em fachadas de argamassa é de fundamental importância investigar os padrões de temperatura na superfície das fachadas e estabelecer métodos de termográfica quantitativa para avaliação de fissuras em função da dimensão e forma, linear e ramificada. A partir das tendências de Delta-T obtidos por termografia, é possível identificar se a maneira de avaliação das fissuras difere em função da forma e quais os critérios podem ser estabelecidos para comparar o dano de fissuras lineares e ramificadas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Investigar o comportamento térmico e apresentar critérios de avaliação quantitativa de fissuras em revestimentos de argamassa por termografia a partir dos resultados de contraste térmico.

1.2.2. Objetivo específico

Os objetivos específicos são:

- Definir procedimentos de estudo de termografia em protótipos de revestimentos de argamassa em laboratório, em regime de aquecimento e resfriamento, para monitoramento das temperaturas;
- Monitorar a temperatura das fissuras e das regiões sem defeito, durante a evolução do aquecimento e resfriamento, de modo que se possa obter funções de contraste adequadas de fissuras lineares e ramificadas de diferentes dimensões, identificando suas tendências durante os ciclos.
- Associar quais as diferenças observadas entre fissuras lineares e ramificadas, a partir da evolução do contraste termográfico durante o aquecimento e resfriamento. Objetivando identificar se a forma investigativa difere em função da forma da fissura e quais critérios são determinantes em uma investigação de fissuras em revestimentos de argamassa;
- Efetuar avaliação termográfica em campo, de modo a observar o comportamento das fissuras e associa-las aos padrões observados em laboratório. Identificando se o método investigativo de fissuras lineares e ramificadas, estabelecidas em laboratório, é possível de aplicação em investigações de campo, quais os critérios determinantes na análise e quais as limitações de aplicação.

2. TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO NA INVESTIGAÇÃO DE DEFEITOS

A termografia é uma técnica de aquisição de imagem e análise de informações térmicas a partir da medição da radiação emitida e refletida de um objeto, permitindo obter sua temperatura (ITC, 2008). A técnica apresenta a temperatura da superfície do objeto alvo em um termograma, que é uma imagem em uma escala de cores (BARREIRA; ALMEIDA; PEREIRA, 2019; ITC, 2008; MALDAGUE, 2001). A termografia pode ser efetuada à distância, sem que haja necessidade de contato, e disponibiliza os resultados imediatamente, o que permite efetuar inspeções de forma rápida das fachadas dos edifícios (BAUER et al., 2016b; GARRIDO et al., 2022; TEJEDOR et al., 2017).

A termografia pode ser utilizada na investigação de fissuras em fachadas. A investigação usa as temperaturas observadas no termograma como critério para identificar e determinar a gravidade da fissura, por meio da aplicação do contraste termográfico Delta-T, que é a diferença de temperatura da fissura em relação a região livre de dano (BAUER et al., 2015; GARRIDO et al., 2022; MALDAGUE, 2001).

Na investigação de fissuras por termografia a evolução do contraste termográfico no aquecimento e resfriamento é fundamental para a classificação do dano da fissura. No aquecimento o contraste é negativo e no resfriamento assume valores positivos, onde os valores mínimos e máximos alcançados pelo contraste termográfico estão em função da dimensão da fissura, largura e profundidade (KYLILI et al., 2014; MILHOMEM, 2019).

2.1. DEGRADAÇÃO POR FISSURAÇÃO

A degradação é um processo pelo qual uma ação sobre um sistema construtivo causa deterioração de um ou mais componentes (ISO, 2011). A degradação ocorre pela ação de agentes de degradação, que são fatores externo de natureza mecânica, eletromagnética, térmica, química e biológica, e mecanismos de degradação, que são mudanças químicas ou físicas que levam a mudanças prejudiciais um componente ou materiais de construção de degradação (ASTM, 1996; ISO, 2011; PEREIRA; HAMADYK; SILVA, 2020). A ação sinérgica entre agentes e mecanismos possibilita o surgimento de falhas, anomalias ou defeitos, que são caracterizados por uma perturbação no desempenho do sistema edificado, no qual o desempenho esperado não é mais alcançado (MOTA, 2021).

Uma das anomalias de maior predominância nas fachadas em argamassa é a fissuração. A maior ocorrência das fissuras está relacionada com o maior número de causas prováveis, no

qual, investigações de degradação em revestimentos de argamassa na cidade de Brasília, Brasil, indicam que a fissuração representa mais da metade do total das anomalias presentes nas fachadas (BAUER et al., 2020; BAUER; SOUZA; MOTA, 2021). A figura 1, ilustra a ocorrência de anomalias nas fachadas de argamassa da cidade de Brasília, Brasil. Além da maior ocorrência, a fissura é uma das anomalias de maior gravidade, pois permite ação de outros agentes agressivos, como penetração de chuva, e o desenvolvimento de outros defeitos, como eflorescência, pulverulência e incrementação do descolamento (FLORES-COLEN; BRITO; FREITAS, 2009; SANTOS, 2018; SILVA; DE BRITO; GASPARGASPAR, 2016).

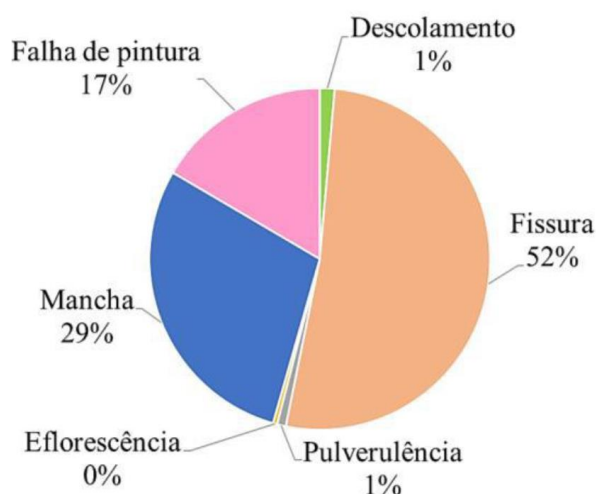


Figura 1 - Ocorrência de anomalias nas fachadas de argamassa da cidade de Brasília, Brasil (BAUER; SOUZA; MOTA, 2021)

2.1.1. Conceitos e mecanismos de desenvolvimento

A fissura é uma falha parcial, visível e mensurável através de uma superfície, sendo antecedente a fratura. A fratura é a separação de um objeto em duas ou mais partes, que ocorre, geralmente, pelo desenvolvimento de uma fissura devido a concentração e repetição de esforços (BROEK, 1989; WILLIAM D. CALLISTER; RETHWISCH, 2016). A dimensão da fissura, principalmente a profundidade, compromete a resistência mecânica de um material, onde o aumento da profundidade reduz a capacidade de carga que o material suporta antes que ocorra a fratura. Consequentemente, durante a desenvolvimento da fissura o objeto se mantém unido, mas não na fratura (BROEK, 1989).

2.1.2. Formas de fissuras

As fissuras possuem diferentes formas a depender da sua causa, sendo as formas lineares e ramificadas de fissuras as de maior ocorrência.

a) Fissuras lineares

As fissuras lineares possuem, em grande maioria, orientação definida, sendo longas e que se estendem pela superfície do revestimento. As fissuras lineares são geralmente ocasionadas por movimentações das estruturas da edificação (vigas, pilares, lajes e fundações) e não por falhas no revestimento (DIEHL, 1960). A figura 2 apresenta uma fissura linear em revestimento de argamassa, onde é observado que a fissura é definida por um único segmento, orientada de forma inclinada e que estende de uma extremidade para outra.

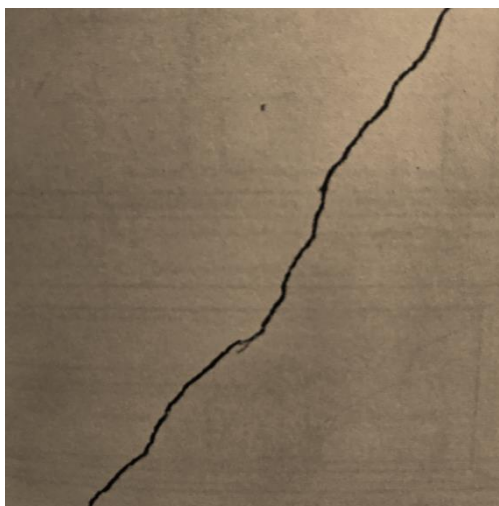


Figura 2 - Fissura linear em revestimento de argamassa (DIEHL, 1960)

b) Fissuras ramificadas

As fissuras ramificadas, também chamadas de mapeadas ou randômicas, ocorrem apenas no revestimento, sem se estenderem para a alvenaria (CSTB, 2017). As fissuras ramificadas são causadas por deficiências na composição da argamassa, especificamente à quantidade de cimento, teor de finos, excesso de água de emassamento, módulo de elasticidade e resistência a tração da argamassa (CSTB, 2017; VEIGA, 1998). As deficiências da argamassa causam falta de uniformidade na aderência entre o revestimento e a base de alvenaria que, quando submetidas a esforços de contração térmica e retração por secagem, originam as fissuras. As fissuras ramificadas são constituídas por vários seguimentos em diferentes ângulos, onde não há uma orientação de propagação definida, formando uma rede sobre a superfície do revestimento (STANDARDS, 1924). A figura 3 apresenta uma fissura ramificada em revestimento de argamassa, onde é observado que há vários seguimentos de fissura de pequena extensão, que se ligam e formam uma rede.



Figura 3 - Fissura ramificada em revestimento de argamassa (CSTB, 2017)

2.1.3. Causas de fissuração nos revestimentos

As fissuras têm várias causas e podem surgir ainda no processo de construção. As fissuras podem ocorrer também pela ação dos agentes de degradação, como é o caso das fissuras que ocorrem no topo dos edifícios, tendo como causa as temperaturas decorrentes da grande incidência de radiação solar (DIAS et al., 2021; SILVA; DE BRITO; GASPAR, 2016).

As fissuras que ocorrem no processo de construção podem ser associadas as ações de retração por secagem dos materiais cimentícios e as movimentações estruturais de pilares e vigas sob os revestimentos, sendo muito comum a presença de fissuras nos encontros de alvenaria e estrutura (DE FREITAS; DE FREITAS; BARREIRA, 2014). Já as fissuras que ocorrem por agentes de degradação, estão ligadas a incidência solar e chuva dirigida, que possibilitam ciclos de molhagem e secagem, gerando dilatações e contrações térmicas capazes de danificar o revestimento de argamassa (BAUER; MILHOMEM; AIDAR, 2018). A seguir é apresentado as principais causas de fissuras presente em revestimentos de argamassa.

a) Fissuras de contração térmica e retração por secagem

O comportamento de contração térmica e retração por secagem é causado pela variação de temperatura e umidade, no qual, as restrições de movimentação que os revestimentos possuem devido a diversos vínculos, alvenaria e estrutura, geram esforços que provocam o desenvolvimento de fissuras (SAHB, 2005). Um exemplo de fissura causada por contração térmica é apresentado na figura 4 (a), onde a dilatação da laje de concreto provoca desenvolvimento de fissura na alvenaria. Um exemplo de fissura causada por retração por

secagem é apresentado na figura 4 (b), onde a retração da alvenaria, blocos e argamassa de assentamento, gera destacamento em relação a estrutura, pilares e vigas.

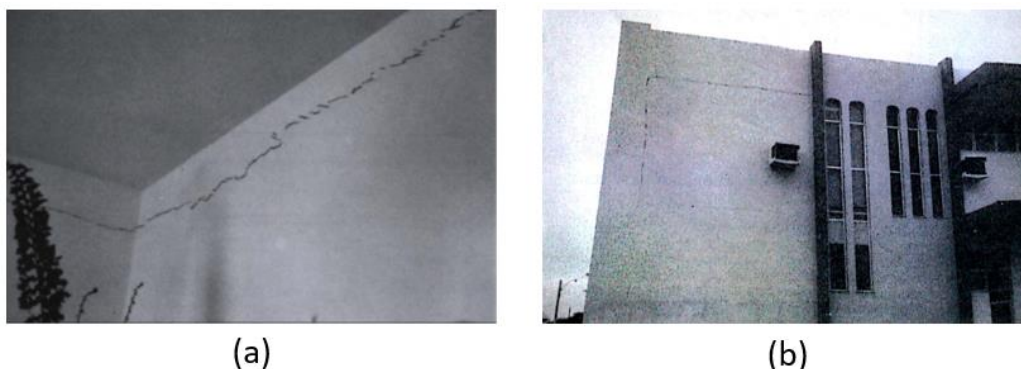


Figura 4 - Fissura de contração térmica e retração por secagem: (a) causada por movimentação da laje; (b) causada por retração da alvenaria (THOMAZ, 2020)

As fissuras nos revestimentos oriundas de contração térmica das estruturas concreto, possuem forma linear e são paralelas à estrutura (pilares, vigas e lajes) (SAHB, 2005). Outras formas de fissuração podem ocorrer, como a fissura ramificada. A fissura ramificada está associada a movimentações de retração por secagem, como, por exemplo, a perda de água por evaporação, onde o revestimento retrai em todas as direções, podendo ter uma orientação de fissura predominante ou não (PEREIRA et al., 2019; PEREIRA, 2007). A figura 5 (a) apresenta uma fissura ramificada, onde é identificado que há uma orientação de propagação predominante, já na figura 5 (b), a fissura ramificada não possui orientação definida.

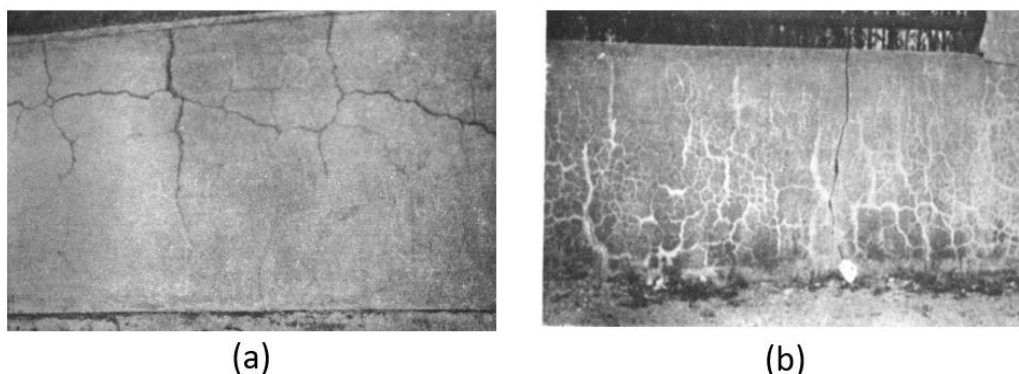


Figura 5 - Fissura de retração por secagem no revestimento: (a) com orientação predominante horizontal; (b) sem orientação definida (JOISEL, 1981)

b) Fissuras de sobrecarga

As fissuras de sobrecarga ocorrem pela deformação ou movimentação de pilares e vigas, onde as movimentações geram esforços nos revestimentos, que desenvolvem as fissuras (THOMAZ, 2020). As fissuras de sobrecarga são intensificadas pela presença de aberturas e interação em alvenaria e estrutura onde as fissuras de extremidades de portas e janelas possuem maior possibilidade de ocorrência quando comparada com fissuras que ocorrem em

regiões distantes de aberturas (PEREIRA et al., 2019). Com maior ocorrência, as fissuras de sobrecarga se propagam com orientação inclinada ao plano de revestimento, conforme apresenta a figura 6 (a), ou a fissura pode seguir as juntas de assentamento do bloco de alvenaria, em formato de escada, conforme apresenta a figura 6 (b).



Figura 6 - Fissura por sobrecarga: (a) linear inclinada; (b) formada por fissuras verticais e horizontais (ALCUDIA, 1998)

c) Fissuras de movimentação de estruturas

As fissuras de movimentação de estruturas ocorrem na interface entre alvenaria e estrutura, devido incompatibilidade de deformação, dilação e retração dos componentes estruturais e de vedação (CIB, 2014). As fissuras se propagam no contorno da estrutura devido a deformação de pilares e vigas, como é apresentado na figura 7 (a), onde a fissura no revestimento segue todo o comprimento do pilar, e figura 7 (b), onde a fissura no revestimento segue todo o comprimento da viga.



Figura 7 - Fissuras de movimentação de estruturas: (a) na interface pilar/alvenaria; (b) na interface viga/alvenaria (CSTB, 2017)

d) Fissuras nos cantos de aberturas

As fissuras ocorrem devido os cantos de abertura serem os locais de maior concentração de esforços devido a deformação da abertura. As fissuras podem aparecer devido a movimentação de fundações ou pelo encolhimento da alvenaria ou do revestimento da

fachada, quando não possuem resistência e coesão suficientes para acompanharem e absorverem as movimentações da abertura (CSTB, 2017). A figura 8 (a) apresenta uma fissura no canto inferior de abertura devido a deformação da janela. Já a figura 8 (b) apresenta uma fissura localizada na extremidade superior da abertura de uma porta



Figura 8 - Fissuras nos cantos de abertura: (a) no canto inferior da abertura de janela; (b) no canto superior da abertura de porta (CSTB, 2017)

e) Fissuras de recalque de fundações

As fissuras de recalque de fundações geralmente são inclinadas e se propagam no sentido da deformação da fundação, onde há menor rigidez. As fissuras por recalque ocorrem quando a fundação cede, não sendo capaz de suportar as cargas de alvenaria ou quando a fundação é insuficientemente armada, sofrendo tensões excessivas que geram cisalhamento (CSTB, 2017). Na figura 9 (a) é apresentado um exemplo de fissura por recalque de fundação, onde a lateral direita da edificação está sobre terreno de menor resistência (CSTB, 2017). Um exemplo de fissura por recalque diferencial é apresentado na figura 9 (b), onde a fissura ocorre quando a fundação da edificação se encontra em diferentes profundidades, gerando tensões de tração na alvenaria, sendo que essas tensões possuem maior criticidade ao redor das aberturas de janela (CSTB, 2021).



Figura 9 - Fissuras de recalque de fundações: (a) vertical na alvenaria; (b) nos cantos de abertura de janelas (CSTB, 2017, 2021)

2.2. TRANSMISSÃO DE CALOR

A investigação por termografia é fundamentada na detecção do ganho ou perda de temperatura de um defeito em relação a região sem defeito, indicando que a transmissão de calor que ocorre no objeto alvo é determinante na investigação. A transmissão de calor é o fluxo de temperatura que ocorre do meio mais aquecido para o menos aquecido, como consequência da diferença de temperatura, no qual cessa quando os dois meios atingem a mesma temperatura (ÇENGEL, 2012). Por meio da transmissão de calor, defeitos contidos em uma superfície podem ser identificados, pois os defeitos alteram localmente a transição de calor, onde a temperatura da região com defeito e sem defeito pode ser observada por termográfica (CARRETERO-AYUSO; MORENO-CANSADO; DE BRITO, 2017).

A depender da transmissão de calor, os defeitos podem apresentar diferentes comportamentos observados por termografia. A exemplo, as fissuras em revestimentos de argamassa possuem temperatura inferior a região livre de defeito em condição de aquecimento e temperatura superior em condições de resfriamento (PATRÍCIA M. MILHOMEM, LUIZ A. AIDAR, 2019). Por consequência, o entendimento da transmissão de calor é um dos conhecimentos determinantes na investigação de termografia de fachadas, onde os tipos de fluxo são descritos a seguir.

2.2.1. Fluxo de calor por condução

O fluxo de calor por condução ocorre em meio sólido pela transferência de temperatura incidente em uma superfície para o interior do material, ou o contrário, onde o fluxo corre no sentido da região de maior temperatura em direção a região de menor temperatura. O fluxo de calor por condução é dependente da geometria, espessura e tipo do material. A temperatura da superfície que conduz calor (T_1) sempre é superior a temperatura final do sentido da condução, fundo (T_2), onde o fluxo reduz com o aumento da espessura do material (Δx), conforme descreve a figura 10 e a equação 1.

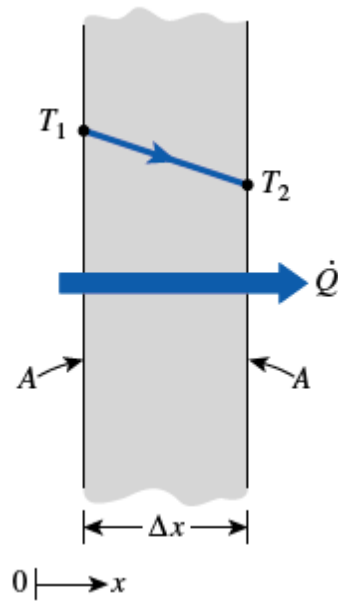


Figura 10 - Fluxo de calor por condução (ÇENGEL, 2012)

$$Q_{cond.} = -K \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (1)$$

Onde:

$Q_{cond.}$: fluxo por condução (W);

K: Condutividade térmica (W/m.K);

A: Área da superfície que conduz calor (m²);

T_1 : Temperatura da superfície que conduz calor (°C);

T_2 : Temperatura final da condução (°C);

Δx : Espessura (m).

2.2.2. Fluxo de calor por convecção

O fluxo por convecção é a transferência de calor entre uma superfície sólida e um fluido em movimento. O fluxo de convecção ocorre unicamente na superfície de um sólido, sendo dependente da densidade, viscosidade e velocidade de fluxo do fluido e área da superfície do sólido, onde quanto maior a velocidade do fluido sobre a superfície maior a transferência de calor por convecção (C. P. KOTHANDARAMAN, 2006). A figura 11 ilustra o fluxo por convecção, onde o bloco quente (T_s) transfere calor para o ambiente (T_∞) e o aumento da velocidade do ar sobre a superfície do bloco aumenta o fluxo de temperatura dissipada para o ar. O fluxo por convecção é descrito na equação 2.

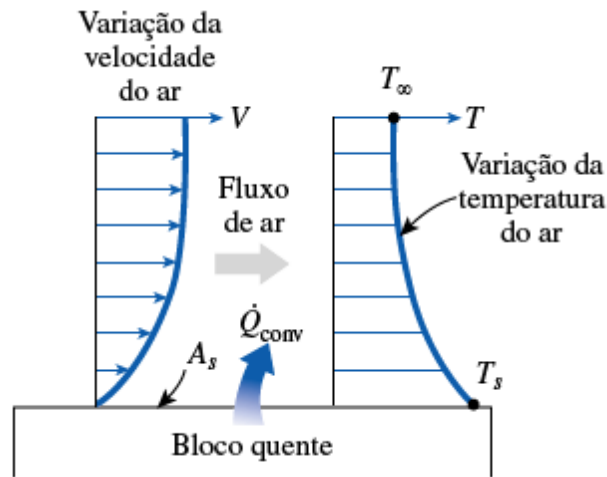


Figura 11 - Fluxo de calor por convecção (ÇENGEL, 2012)

$$Q_{conv.} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

Onde:

$Q_{conv.}$: Fluxo de calor por convecção (W);

h : Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²);

A_s : Área da superfície que ocorre convecção (m²);

T_s : Temperatura da superfície (°C);

T_{∞} : Temperatura do fluido longe da superfície (°C).

2.2.3. Fluxo de calor por radiação

O fluxo de calor por radiação ocorre de um material para outro sob a forma de onda eletromagnética, quando um dos materiais possui temperatura diferente de zero. A radiação é emitida por sólidos e líquidos sem que dependa de um meio interveniente, podendo ocorrer no vácuo. A radiação é descrita pela lei de Stefan-Boltzmann, onde possui uma constante que leva o mesmo nome do autor da lei, (σ) e da emissividade. A figura 12 ilustra o fluxo de radiação, onde a superfície aquecida possui emissão de temperatura por radiação, para a superfície vizinha, limitada pela emissividade. A equação 3 descreve o fluxo de calor por radiação.

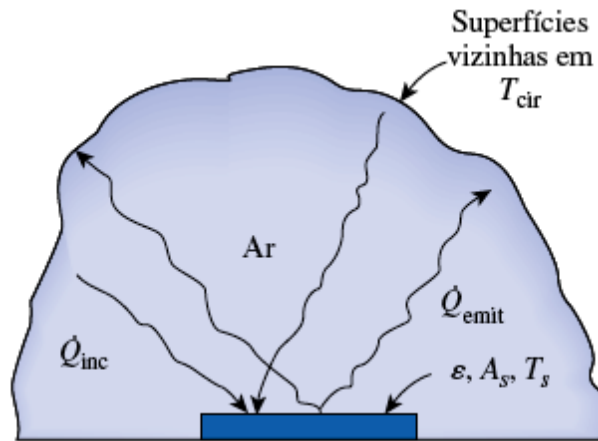


Figura 12 - Fluxo de calor por radiação (ÇENGEL, 2012)

$$Q_{rad.} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{arr}^4) \quad (3)$$

Onde:

$Q_{rad.}$: Fluxo por radiação (W);

ε : Emissividade;

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$);

A_s : Área da superfície que ocorre radiação (m^2);

T_s : Temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$);

$T_{arr.}$ Temperatura longe da superfície ($^{\circ}\text{C}$)

Os materiais de construção, quando submetidos ao fluxo de radiação, podem ser classificados como opacos ou transparentes (FROTA; SCHIFFER, 2001). Nos materiais opacos, por exemplo paredes, a radiação solar total incidente não é totalmente absorvida pelo material, onde parte da radiação é refletida (LAMBERTS, 2016), conforme a figura 13 (a). Já para os materiais transparentes, janelas de vidro, parte da radiação direta atravessa o material, onde uma menor parte da radiação é dissipada para o exterior, comparando aos materiais opacos, conforme ilustra a figura 13 (b).

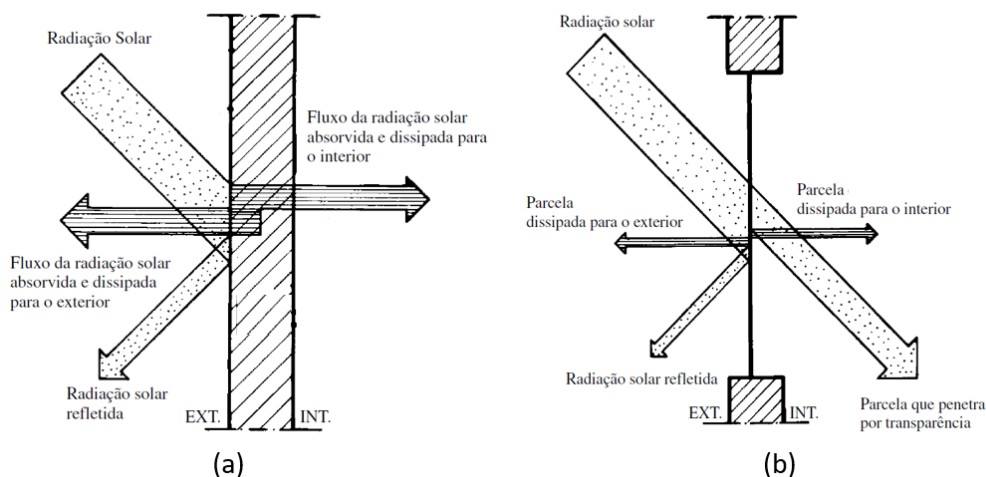


Figura 13 - Fluxo de radiação: (a) em materiais opacos, parede; (b) em materiais transparentes, janela de vidro (FROTA; SCHIFFER, 2001)

Há classificações do fluxo de calor quanto a forma de transferência de temperatura ao longo do corpo do material, sendo de regime permanente ou transiente. No regime permanente não há variação de temperatura no sentido perpendicular a superfície do material aquecido. Já no regime transiente, há variações no fluxo de calor no sentido perpendicular à superfície do material aquecido.

A transferência de calor em paredes é predominantemente transiente, pois as condições externas de temperatura, velocidade do vento, radiação solar e diferentes materiais componentes da parede (tijolo, argamassa, revestimento cerâmico), modificam o fluxo de calor por condução, radiação e convecção. A transferência de calor nas edificações acontece de forma conjunta (condução, convecção e radiação), pois o calor irradiado na superfície da parede sofre modificação pela velocidade do ar para transferir calor por condução para o interior da edificação. A figura 14 ilustra a ação conjunta dos fluxos de calor, onde a temperatura do meio interno a edificação transmite calor com convecção a superfície interna, a superfície interna transmite calor por condução ao longo da espessura da parede, até atingir a superfície externa. A temperatura que chega na superfície externa é transmitida ao meio externo por fluxo de radiação.

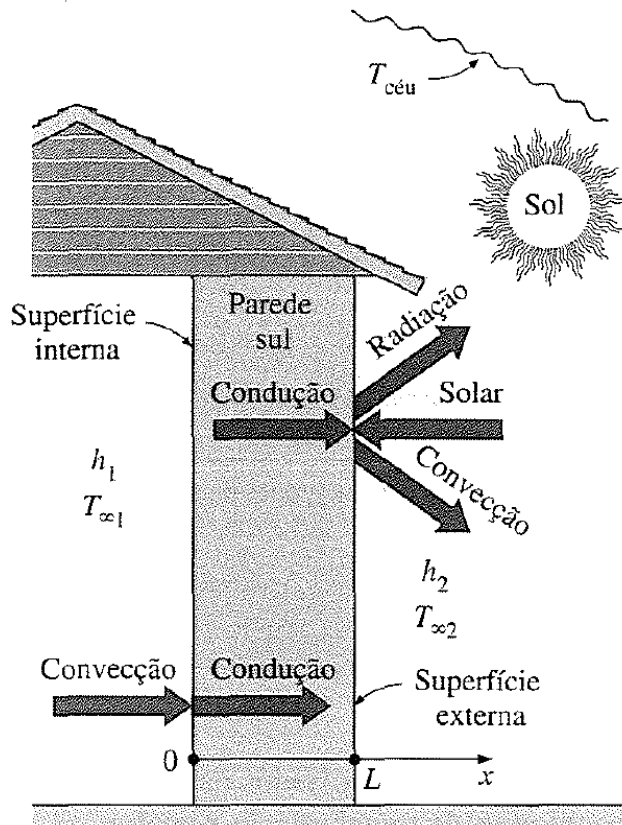


Figura 14 - Fluxo de calor combinado presente nas edificações (ÇENGEL, 2012)

2.2.4. Condução de calor nas envoltórias

A transmissão de calor nas envoltórias acontece de forma não uniforme. Devido as envoltórias serem constituídas de diferentes materiais que possuem diferentes espessuras e valores de condutividade, o fluxo de calor que ocorre tende a ser complexo. Para calcular a transmissão de calor por condução, é adotado a transmitância, que é o coeficiente de total de transmissão de calor. A transmitância é composta pelo coeficiente de transmissão de calor externo, condutividade térmica e espessura dos materiais que compõem a envoltória. Considera-se o conceito de resistência térmica aplicado a equação 1, onde a transmitância será o somatório das resistências térmicas atuantes. O fluxo por condução usando o conceito de transmitância é ilustrado na figura 15 e descrito pelas equações 4 e 5, onde para cada camada, vidro e ar, há um valor de resistência térmica que caracteriza o fluxo por condução daquela camada. A tabela 1 apresenta os valores de transmitância para os casos de maior ocorrência nas envoltórias.

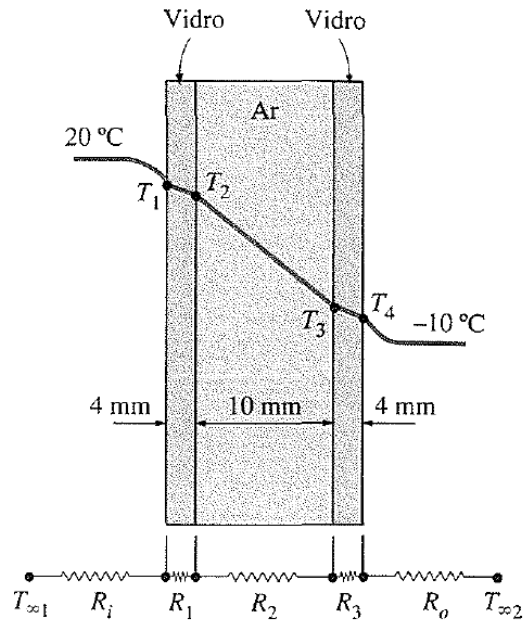


Figura 15 - Esquema de fluxo por condução usando transmitância (ÇENGEL, 2012)

$$Q_{cond.} = \frac{T_1 - T_4}{R_{total}} \quad (4)$$

$$R_{total} = \frac{L_1}{K_1 \cdot A} + \frac{L_2}{K_2 \cdot A} + \frac{L_3}{K_3 \cdot A} \quad (5)$$

Onde:

$Q_{cond.}$: Fluxo de condução (W);

T_1 : Temperatura da superfície externa (°C);

T_2 : Temperatura da superfície interna (°C);

R_{total} : Resistência térmica total (transmitância);

L_1, L_2, L_3 : espessura das camadas da envoltória (m);

K_1, K_2, K_3 : condutividade térmica dos materiais da envoltória (W/m.K);

A : área da envoltória que ocorre condução (m²).

Parede externa	Transmitância (W/m.k)
Tijolo cheio (12 cm), rebocado nas duas faces	2,91
Tijolo refratário cheio (12 cm), rebocado nas duas faces	3,37
Bloco de concreto oco (20 cm), rebocado nas duas faces	3,17
Parede de concreto (5 cm), sem reboco	4,88
Parede de concreto (10 cm), sem reboco	4,19
Parade de concreto (5 cm), rebocada nas duas faces	4,07
Parede de concreto (10 cm), rebocada nas duas faces	3,49

Tabela 1 - Transmitância em envoltórias (COSTA, 1991)

2.3. FATORES QUE AFETAM A TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DAS FACHADAS

O fluxo de calor na superfície das fachadas tende a não ser uniforme a depender da presença de defeitos. As variações da temperatura na fachada são observadas nos termogramas, nos quais conduzem a estabelecer critérios investigativos, seja para balizar métodos de inspeção ou identificar defeitos.

2.3.1. Altura da região investigada

A temperatura na superfície das fachadas é influenciada por um conjunto de variáveis como radiação direta, radiação refletida e incidência de vento, que estão em função da altura. Regiões de maior proximidade com a base do edifício possuem temperatura superior as regiões de maior altura devido a maior incidência de radiação refletida advinda do solo ou de edificações vizinhas (AIDAR, 2019). As regiões de maior altura possuem maior incidência de vento, o que ajuda a ter temperaturas inferiores comparada com as regiões próximas à base (KAHSAY; BITSUAMLAK; TARIKU, 2019).

Investigações de termografia efetuadas em fachadas de revestimento cerâmico observam tendencias semelhantes, sendo que as regiões próximas a base das edificações, geralmente, possuem temperatura superior as regiões mais altas, independente da orientação da fachada (AIDAR; BAUER, 2019). A figura 16 apresenta o termograma de uma investigação em uma fachada de revestimento cerâmico, onde as temperaturas das regiões de maior altura possuem temperatura inferior, em torno de 1 grau, das regiões próximas à base da edificação.

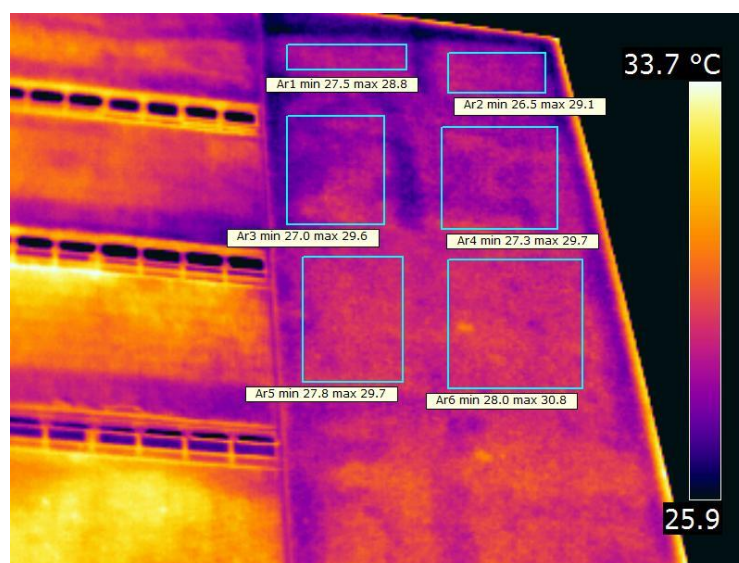


Figura 16 - Diferença de temperatura em diferentes alturas (AIDAR, 2019)

2.3.2. Defeitos

2.3.2.1. Umidade

Em relação a umidade, a região que se identifica é aquela que, por evaporação, tem a temperatura diferente da região sem a presença de umidade. Investigações de umidade por termografia em revestimentos cerâmicos indicam que, em regime de aquecimento, há um aumento da visibilidade das regiões úmidas, sendo essas regiões de menor temperatura no aquecimento e maior temperatura no resfriamento (EDIS; FLORES-COLEN; DE BRITO, 2014). Se a superfície estiver saturada de água, essa determinação não é possível, pois a água estará na temperatura ambiente e não em temperaturas menores que identificam evaporação (BARREIRA; ALMEIDA; DELGADO, 2016). A investigação de umidade por termografia é meramente qualitativa. Investigações de termografia em revestimentos de argamassa, identificam umidade no revestimento próximo ao solo, como região de menor temperatura, conforme apresenta a figura 17.

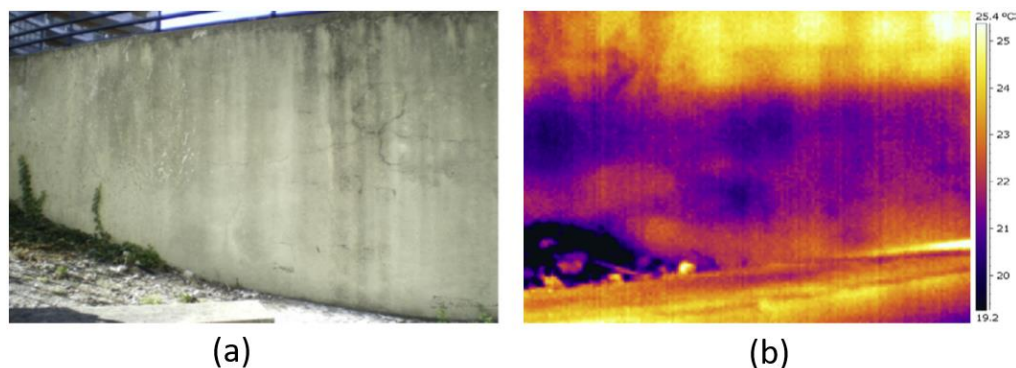


Figura 17 - Identificação de umidade: (a) imagem sem detecção; (b) umidade detectada no termograma (MENEZES; GOMES, 2015)

2.3.2.2. Descolamento cerâmico

A identificação de descolamento de revestimento cerâmico por termografia já é uma técnica consolidada e com métodos investigativos definidos. Na identificação de descolamento cerâmico, conforme a figura 18 (a), a região com defeito possui temperatura superior às regiões sem defeito durante o aquecimento, conforme a figura 18 (b), já durante no resfriamento ocorre o oposto, conforme a figura 18 (c) (PAVÓN, 2017). No aquecimento há aumento da variação de temperatura entre a região com e sem defeito, onde o descolamento cerâmico é mais visível no período inicial do aquecimento, que é o instante de maior Delta-T (BAUER et al., 2016c). Investigações de termografia em fachadas de revestimento,

estabelecem critérios de identificação de defeitos, nos quais valores de Delta-T iguais ou superiores a 2 °C caracterizam descolamento (BAUER, 2023).

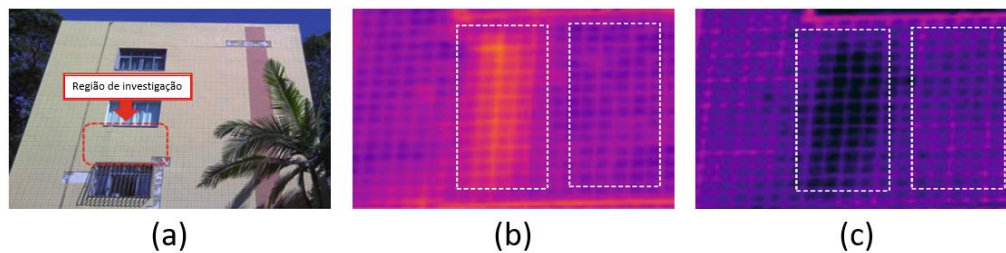


Figura 18 - Inspeção de fachada de revestimento cerâmico: (a) área de investigação; (b) termograma de descolamento no aquecimento; (c) termograma de descolamento no resfriamento (BAUER et al., 2016c)

2.3.2.3. Fissuras

A identificação e investigação de fissuras podem ser efetuada por termografia, no qual a temperatura da fissura é afetada por suas dimensões, largura e profundidade, em regime de aquecimento ou resfriamento (BAUER et al., 2016b; LIU et al., 2003). Investigações de termografia aplicadas em regiões de uma fachadas de argamassa na avaliação de fissuras, conforme a figura 19 (a), indicam que as fissuras possuem temperatura superior a região sem defeito durante o resfriamento, como é apresentado na figura 19 (b) (BAUER et al., 2016a).

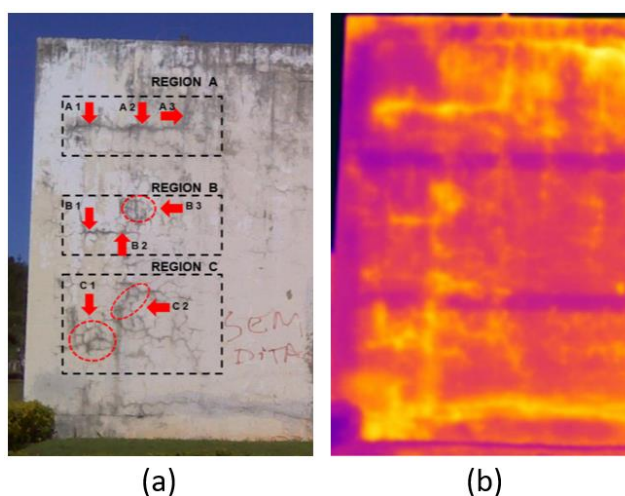


Figura 19 - Inspeção em fachada de argamassa: (a) Região de investigação; (b) termograma no resfriamento (BAUER et al., 2016a)

2.3.3. Diferentes materiais

Elementos constituintes das fachadas, como esquadrias, pilares e vigas, podem ser identificados pela termografia. Devido a fachada ser constituída de diferentes materiais, o fluxo de calor é diferente, pois cada material possui condutividade térmica distinta, o que interfere no fluxo de calor e, conseqüentemente, na temperatura superficial observada no termograma (GLAVAŠ et al., 2019).

A diferença de temperatura entre os elementos da fachada é observada em investigações de termografia efetuadas em laboratório, em ciclo de aquecimento e resfriamento, onde é simulado o revestimento em argamassa em uma placa com diferentes materiais em seu interior, conforme apresenta a figura 20 (a). É constatado que a termografia é clara na diferenciação entre a temperatura dos revestimentos de argamassa sobre concreto, tijolos cerâmicos, madeira e poliestireno. Nos termogramas obtidos na investigação, o revestimento de argamassa sobre madeira possui temperatura superior aos revestimentos sobre concreto, tijolos e poliestireno durante o aquecimento, conforme a figura 20 (b), e inferior durante o resfriamento, conforme a figura 20 (c) (LUCENAS; BAUER; PAVÓN, 2021).

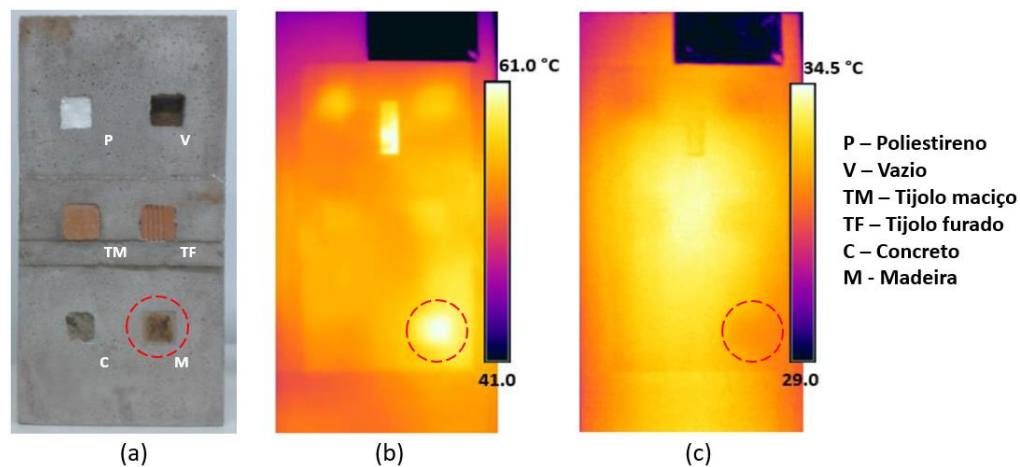


Figura 20 - Identificação de diferentes materiais por termografia: (a) fundo da placa em argamassa e identificação dos materiais; (b) termograma frontal da placa no aquecimento; (c) termograma frontal da placa no resfriamento (LUCENAS; BAUER; PAVÓN, 2021)

No aquecimento a região de revestimento sobre madeira possui maior temperatura, pois a madeira possui menor coeficiente de condutividade térmica, fazendo com que o fluxo de calor para o interior da placa seja dificultado e concentrado no revestimento. Já no resfriamento a mesma região possui menor temperatura, pois a madeira concentra menor temperatura, por possuir baixa condutividade. Conseqüentemente, na inspeção de fachadas por termografia, a condutividade térmica é determinante para identificação de diferentes materiais (LUCENAS; BAUER; PAVÓN, 2021).

2.4. PARÂMETROS DE TERMOGRAFIA

A inspeção de termografia exige que alguns parâmetros fundamentais sejam estabelecidos para a iniciação da investigação. Os parâmetros de termografia são referentes ao objeto alvo e a câmera termográfica, nos quais possibilitam que as temperaturas observadas nos termogramas sejam determinadas com precisão.

2.4.1. Parâmetros relacionados ao alvo

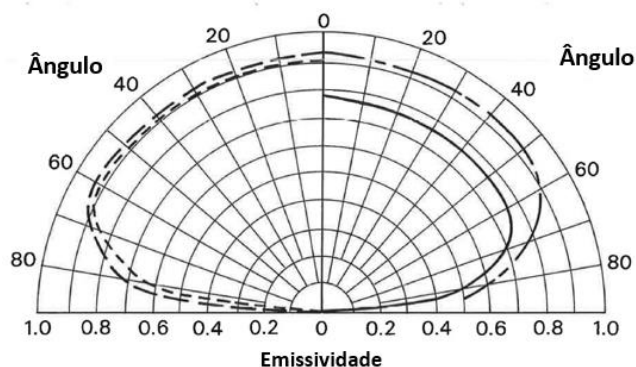
A emissividade é um dos principais parâmetros a serem obtidos para o início da investigação de termografia. A emissividade (ϵ) é a razão entre a radiação emitida pela superfície de um material em determinada temperatura e a radiação emitida pelo corpo negro na mesma temperatura (ÇENGEL, 2012). Na investigação de termografia, a emissividade é um dado empregado pelo algoritmo da câmera da infravermelho para transformar a radiação em temperatura, que, em investigações de campo, pode sofrer variações a depender da umidade do material (BARREIRA; ALMEIDA; SIMÕES, 2021; SFARRA; BARREIRA; LAGÜELA, 2021). Barreira et al., (2015) apresenta a emissividade dos materiais de construção conforme as prescrições da norma C1371 (ASTM, 2022), sendo apresentadas na tabela 2.

Material	Emissividade
Aço inoxidável	0,16
Gesso	0,79
Argamassa	0,93
Telha cerâmica	0,88
Madeira de pinho	0,86
Calcário	0,87
Granito	0,87
Tijolo maciço	0,91

Tabela 2 - Emissividade dos materiais de construção (BARREIRA et al., 2015)

As principais variáveis que afetam a emissividade é radiação solar, umidade, incidência de chuva, sombreamento, reflexão de edificações vizinhas, temperatura do ar, distância entre câmera e alvo e angulação (BARREIRA; DE FREITAS, 2007; BAUER; CASTELO; LEAL, 2013; LI et al., 2000).

As variações de ângulo também interferem nas leituras de temperatura obtidas por termografia. Se o ângulo entre a câmera e alvo for inferior a 60° não há interferência nas leituras de temperatura, no entanto ângulos acima de 60° dificultam a obtenção correta da emissividade. A figura 21 ilustra a variação de emissividade em função do ângulo, onde a emissividade se manteve constante até o ângulo de 60°. Para ângulos superiores a 60° o valor da emissividade decresce, sendo próximo de 0 depois dos 80° (AIDAIR; MILHOMEM; BAUER, 2018; BAUER; CASTELO; LEAL, 2013).



(a)

Figura 21 - Variações de emissividade em função do ângulo de observação; (ITC, 2008)

Para a inspeção de fachadas, a distância e o ângulo entre câmera e alvo são fundamentais na precisão da identificação de defeitos, pois com o aumento da distância e do ângulo, um menor número de pixels do termograma irá representar o defeito (FAYE; DANGLES; PINCEBOURDE, 2016). O aumento da distância faz com que os pixels do termograma representem uma maior dimensão e, conseqüente, reduz a precisão de identificação de temperatura. A imprecisão referente da medição de temperatura em função da distância, ocorre pois um mesmo pixel pode incluir a temperatura de regiões com e sem defeito, (MURPHY; OPPENHEIMER; DE SOUZA FILHO, 2014).

Em investigação de termografia para a detecção de defeitos internos com 5 a 20 mm de diâmetro, em uma placa de resina epóxi reforçada com fibra de vidro, constatou-se que à medida que a distância aumenta, em relação ao alvo, a detecção é prejudicada (TU et al., 2022). Na investigação de detecção de defeitos na placa de resina epóxi reforçada com fibra de vidro, é observado que a uma distância de 4 metros, conforme a figura 22 (a), os defeitos contidos na placa são identificados com maior temperatura. A uma distância de 7 metros, apenas os defeitos de maior dimensão são identificados, próximos ao topo, conforme a figura 22 (b). Na investigação de termografia efetuada à 10 metros, os defeitos de maior dimensão são identificados, porém com menor precisão que nas investigações efetuadas a 7 metros, conforme a figura 22 (c).

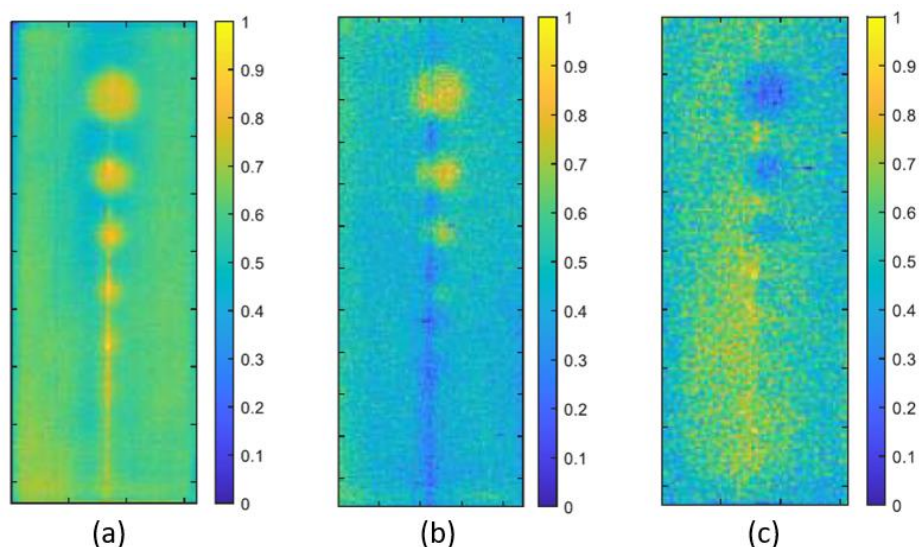


Figura 22 - Termograma para identificação de defeito em placa de resina epóxi reforçada com fibra de vidro: (a) 4 metros de distância; (b) 7 metros de distância; (c) 10 metros de distância (TU et al., 2022)

Investigações de termógrafa em revestimentos de argamassa com variação do ângulo de observação, apontam que, com o aumento do ângulo, há redução das temperaturas observadas nos termogramas. A figura 23 apresenta a variação de temperatura de termogramas de uma mesma região obtidos em diferentes ângulos de uma fachada de argamassa. Observa-se que os termogramas obtidos entre ângulos próximos a 15° e 65° apresentam diferença de temperatura em torno de 1 °C (MILHOMEM; AIDAR; BAUER, 2018).

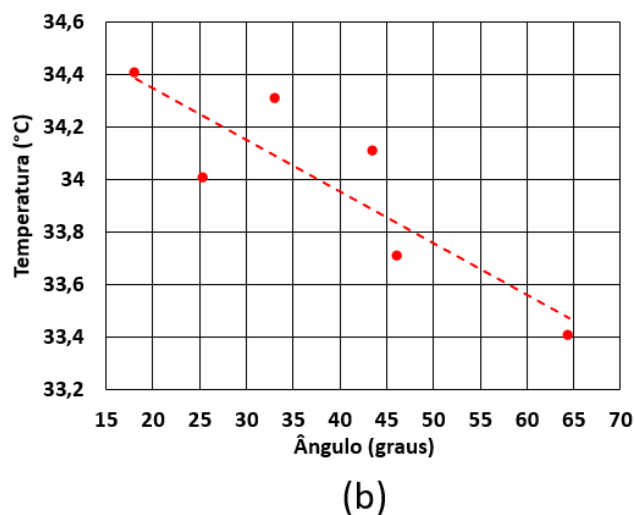


Figura 23 - Variação de temperatura detectada no termograma em função da mudança de ângulo (MILHOMEM; AIDAR; BAUER, 2018)

2.4.2. Parâmetros relacionados ao equipamento

Os parâmetros relacionados ao equipamento são amplitude térmica e campo de visão. A amplitude térmica é os limites de temperatura máxima e mínima determinadas para investigar os termogramas, onde temperaturas superiores ou inferiores à amplitude térmica não podem ser medidas. A amplitude térmica geralmente é determinada automaticamente nas leituras dos termogramas, mas pode ser fixado para investigações de temperatura dos termogramas em uma mesma escala.

O campo de visão é denominado como IFOV (*Instantaneous Field Of View*), que corresponde à dimensão de detecção projetada no termograma. O IFOV tem como variável a abertura da lente, em graus, e a resolução da câmera, que é a quantidade de pixels que a imagem é capaz de representar, que determinam o menor objeto capaz de ser detectado. O IFOV é medido em ângulo, miliradianos (mrad), onde a redução do IFOV aumenta a precisão de detecção, porém o aumento da distância, entre câmera e alvo, reduz a precisão de detecção (MALDAGUE, 2001).

Para uma câmera termográfica com abertura de lente de 12° , distanciada a 1000 mm do alvo, conforme a figura 24 (a), o campo de visão é de 210 mm. O campo de visão é obtido conforme descreve a figura 24 (b), onde a abertura da câmera é dividida por dois, gerando 6° , e a partir do ângulo e da distância é formado um triângulo retângulo. O produto da distância, 1000 mm, com a tangente do ângulo, que é 6° , equivale à metade do campo de visão, correspondente a 105 mm. Para a câmera termográfica exemplificada na figura 24 (a), que possui resolução de 320 x 240 pixels, o IFOV correspondente é de 0,65, onde a resolução é referente ao lado que possui maior quantidade de pixel, 320 pixels. O IFOV é calculado conforme a equação 6, onde diminui pela redução da abertura da lente e pelo aumento da resolução, o que garante maior precisão de detecção. Cada pixel da câmera da figura 24 (a), que possui IFOV de 0,65 e distância do alvo de 1000 mm, possui 0,65 mm de largura, no qual o tamanho dos defeitos em um termograma pode ser calculado em função do número de pixels, IFOV e distância da câmera, conforme a equação 7.

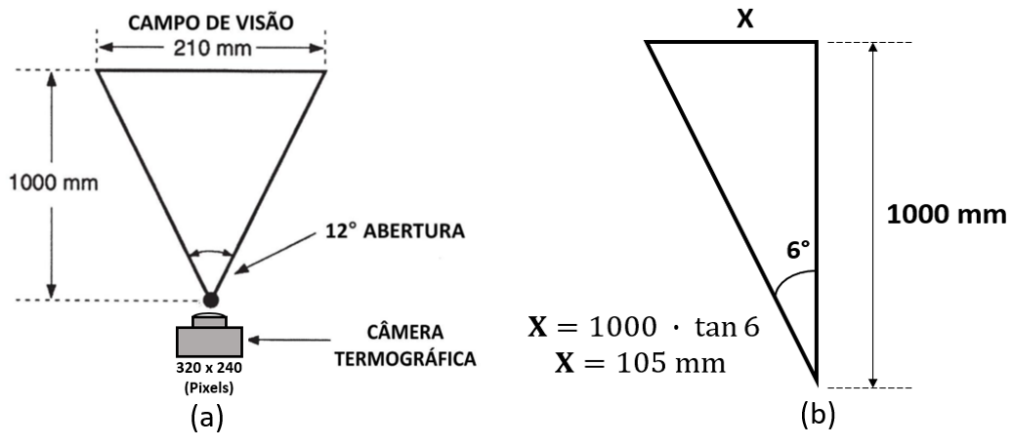


Figura 24 - Campo de visão termográfico: (a) para uma lente de abertura de 12° e distância de 1000 mm; (b) método de cálculo para obtenção do campo de visão. Adaptado de (MALDAGUE, 2001)

$$IFOV = 1000 \cdot \frac{\theta}{R} \cdot \frac{\pi}{180} \quad (6)$$

$$L_{def.} = N_p^o \cdot IFOV \cdot D \quad (7)$$

Onde:

$IFOV$: campo de visão (mrad);

θ : Ângulo de abertura da câmera (graus);

R : Maior quantidade de pixels da resolução (n.u.)

π : pi, aproximadamente 3,14 (n.u.)

$L_{def.}$: Número de pixel que representam um defeito (n.u.)

N_p^o : Número de pixels que representam o defeito (n.u.)

D : Distância entre a câmera e o alvo (m)

2.5. INVESTIGAÇÕES DE TERMOGRAFIA

A termografia é investigada por diferentes formas de aquecimento e análise de termogramas. O aquecimento pode ser ativo ou passivo. O aquecimento ativo, geralmente ocorre em laboratório, onde é possível investigar a evolução de temperatura de um objeto durante o aquecimento e resfriamento. Por meio da termografia ativa é observado as tendências de evolução de temperatura de materiais e defeitos que auxiliam nas investigações de termografia passiva, que são as investigações que ocorrem sem uma fonte de calor.

A análise dos termogramas pode ser qualitativa ou quantitativa. A análise qualitativa tem por objetivo identificar variações de temperatura. A análise quantitativa classifica as regiões anômalas a partir da diferença de temperatura em relação a temperatura esperada do objeto,

onde a observação das mudanças de temperatura que ocorrem no aquecimento e resfriamento são determinantes na análise.

2.5.1. Termografia passiva e ativa

A investigação de termografia é classificada quanto a forma de aquecimento, sendo passiva ou ativa. A investigação passiva ocorre quando não há nenhum estímulo térmico induzido além do disposto pelo ambiente, onde o objeto alvo está naturalmente aquecido (MALDAGUE, 2001). Já a investigação ativa ocorre por aquecimento induzido (IBARRA-CASTANEDO et al., 2017). A termografia ativa geralmente implica na aquisição de uma série de termogramas durante, ou após, o aquecimento por um intervalo de tempo, em que os defeitos são identificados com base na evolução das temperaturas (EDIS; FLORES-COLEN; DE BRITO, 2015).

Em condições de inspeções termográficas em edificações, a termografia acontece geralmente de forma passiva, no qual o aquecimento ocorre por radiação solar direta, difusa e refletida (AIDAR; BAUER, 2019). Há casos em que o aquecimento ativo é usado na inspeção de fachadas, quando os elementos apresentam condutividade térmica semelhante entre si e o aquecimento por radiação solar não é suficiente para provocar diferença de temperatura entre eles (GLAVAŠ et al., 2019).

2.5.2. Formas de aquecimento ativo

A avaliação por termografia ativa pode ser efetuada por diferentes formas de aquecimento, no qual o aquecimento por pulso é a forma mais corrente. No aquecimento por pulso há diferentes configurações de aquecimento, sendo as principais: Aquecimento pontual, Linha de aquecimento e Aquecimento de superfície (MALDAGUE, 2001).

- a) *Aquecimento pontual.* Efetua-se o aquecimento pontual por meio de um feixe laser, onde se obtém aquecimento uniforme de ponto a ponto. Para investigações termográficas de aquecimento pontual é necessário efetuar uma varredura com a fonte de aquecimento por toda a superfície do objeto alvo, tornando a investigação vagarosa, conforme a figura 25 (a).
- b) *Linha de Aquecimento.* Usa lâmpadas em linha como fonte de calor, que possam aquecer toda uma das dimensões, horizontal ou vertical, do objeto alvo. O aquecimento por linha necessita de varredura com a fonte de aquecimento sobre a superfície do objeto alvo. A varredura da linha de aquecimento possui uniformidade

e velocidade de aquecimento superior quando comparada com o aquecimento pontual, conforme a figura 25 (b).

- c) *Aquecimento de superfície*: Tem como fonte de calor lâmpadas que podem ser estáticas ou móveis. Essa forma de aquecimento condiciona aquecimento de quase toda a superfície do objeto alvo, porém o aquecimento pode não ser uniforme, conforme a figura 25 (c).

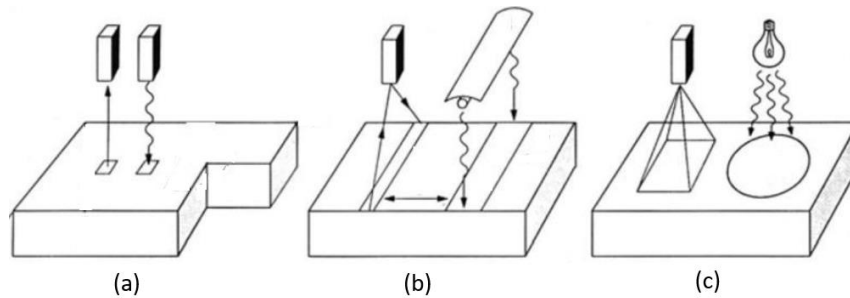


Figura 25 - Formas de aquecimento ativo: (a) Aquecimento pontual; (b) Aquecimento de linha; (c) Aquecimento de superfície (MALDAGUE, 2001)

Para a detecção de defeitos como fissuras, as formas de aquecimento pontual e linha de aquecimento não são aconselháveis, pois possuem tempo de aquecimento curto na superfície de investigação, sendo o aquecimento de superfície mais adequado (KALHOR et al., 2021). O aquecimento de superfície promove maiores intervalos de aquecimento, o que possibilita identificar defeitos em materiais de baixa condutividade térmica, como argamassa, onde o tempo de aquecimento para a observação dos defeitos é maior para materiais de baixa condutividade térmica (ÇENGEL, 2012; OSWALD-TRANTA, 2017).

2.5.3. Termografia qualitativa e quantitativa

As investigações de termografia podem ser qualitativas ou quantitativas. A investigação qualitativa consiste em identificar pontos quentes e frios em um termograma e observar se a tendência de temperatura indica possíveis defeitos, pela comparação com a temperatura padrão do objeto alvo (ITC, 2008; PAOLETTI et al., 2013). A termografia qualitativa é aplicada na investigação de possíveis defeitos em um transformador, conforme a figura 26 (a). Observa-se que a temperatura é constante ao longo do conector A, conforme a (figura 26 (b)). O conector B possui padrão de temperatura diferente do conector A, onde possui maior temperatura na região superior do conector, o que pode indicar falha, conforme a figura 26 (c).

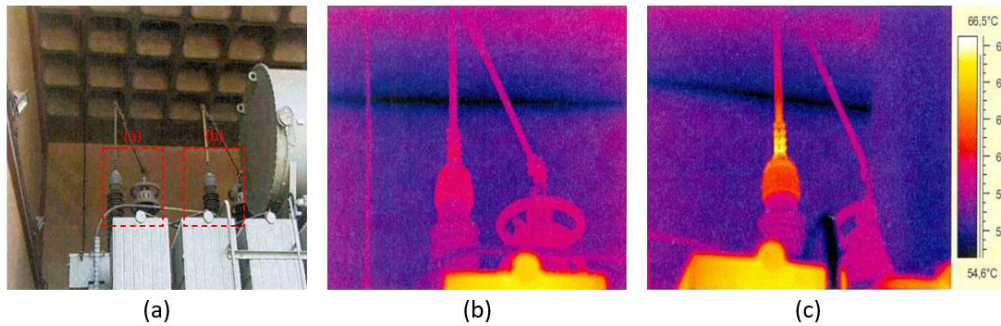


Figura 26 - Termografia quantitativa em conectores de um transformador: (a) regiões de observação; (b) conector a; (c) conector b (ITC, 2008)

A investigação quantitativa consiste em uma abordagem de maior especificidade onde se deve entender o comportamento térmico do objeto alvo e de seus possíveis defeitos quando submetidos ao aquecimento e resfriamento (BAUER et al., 2016b). São necessários parâmetros como emissividade e temperatura refletida, pois na abordagem quantitativa o valor preciso da temperatura é fundamental para a investigação e não somente identificar se há zonas quentes ou frias no termograma (EDIS; FLORES-COLEN; DE BRITO, 2015; HART, 1992; SFARRA; BARREIRA; LAGÜELA, 2021). A figura 27 apresenta o esquema investigativo da termografia quantitativa e seus parâmetros, onde é estabelecido uma distância de investigação em relação ao objeto alvo e uma referência para obtenção da temperatura aparente refletida e emissividade.

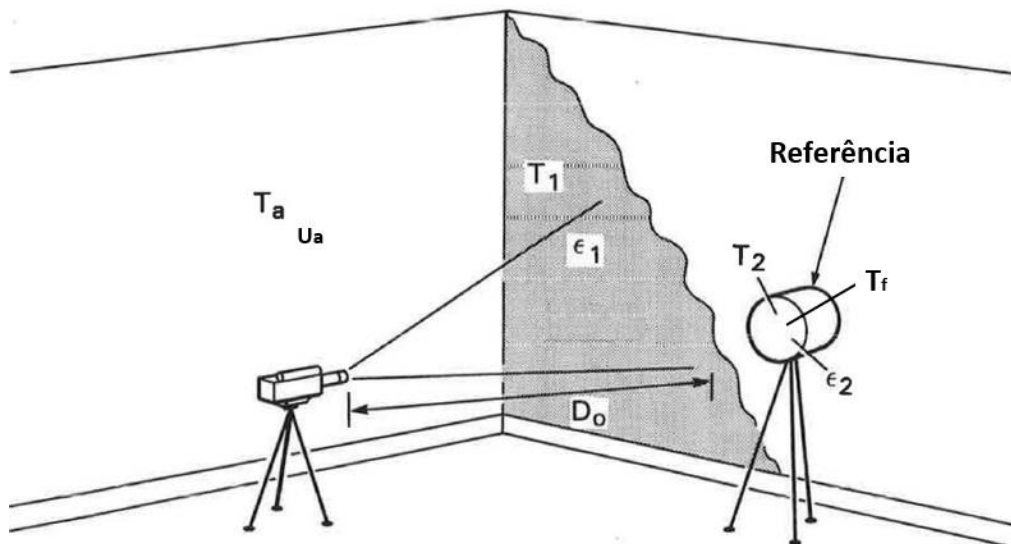


Figura 27 - Esquema de investigação quantitativa (HART, 1992)

Onde:

T_a : Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

U_a : Umidade relativa do ar (%);

T_1 : Temperatura do objeto alvo ($^{\circ}\text{C}$);

T_2 : Temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$);

T_f : Temperatura refletida ($^{\circ}\text{C}$)

ϵ_1 : Emissividade do objeto alvo (n.u.);

ϵ_2 : Emissividade de referência (n.u.);

D_0 : Distância entre a câmera e o objeto alvo (m).

A investigação quantitativa usa as temperaturas observadas no termograma como critério para identificar e determinar a gravidade de um defeito e, em alguns casos, é possível classificar seu grau de dano, quanto suas dimensões, largura e profundidade, por meio da diferença entre a temperatura do defeito e da região sem defeito (BAUER et al., 2015; GARRIDO et al., 2022). A termografia quantitativa é aplicada em fachadas de revestimento cerâmico, onde é investigado três regiões diferentes, conforme apresenta a figura 28 (a). Observa-se na figura 28 (b) que a diferença de temperatura da fissura e da região sem defeito contida na região de investigação 1 é superior as observadas na região 2 e 3, o que pode indicar maior dimensão da fissura e, conseqüentemente, maior dano (BAUER; MILHOMEM; AIDAR, 2018).

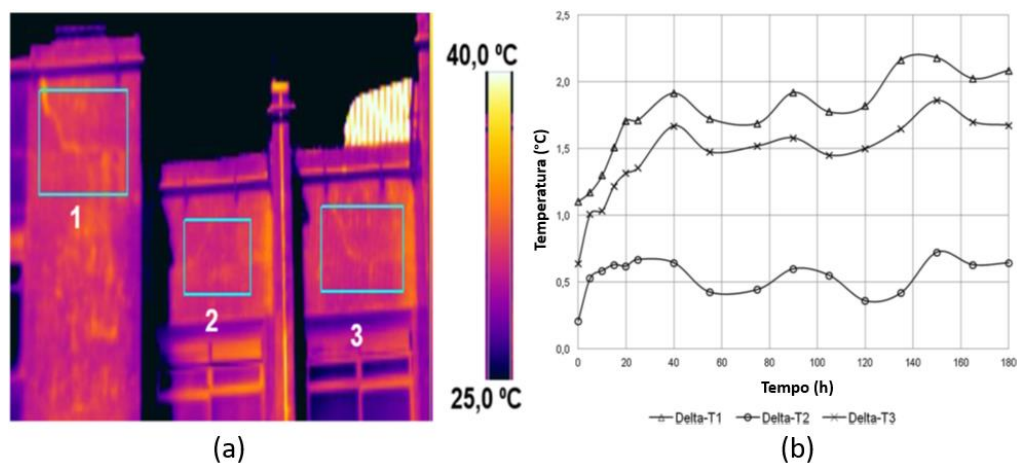


Figura 28 - Fissuração em fachada de revestimento cerâmico: (a) termograma; (b) avaliação quantitativa (BAUER; MILHOMEM; AIDAR, 2018)

Investigações de termografia quantitativa aplicadas em revestimento cerâmico possibilitam a identificação de descolamento. Inspeções de termografia quantitativa em fachadas de revestimento cerâmico, indicam que, durante o aquecimento, o descolamento cerâmico possui maior temperatura que a região sem defeito, nos quais podem ser identificadas por uma diferença de temperatura igual ou superior a 2 °C, em relação a região sem defeito (LUCENAS, 2022). O descolamento cerâmico é melhor identificado quando a variação de temperatura na superfície do revestimento é máxima, em condições em que a diferença de temperatura entre a superfície do revestimento e do bloco de alvenaria é superior a zero (PAVÓN, 2017). A identificação de regiões com descolamento cerâmico é efetuada na

fachada apresentada na figura 29 (a). Em condições em que a variação de temperatura na superfície é máxima, conforme a figura 29 (b), é possível identificar regiões de maior temperatura que indicam descolamento. No termograma obtido em condições em que a variação de temperatura é mínima, conforme a figura 29 (c), a região com descolamento não é identificada, pois possui a mesma temperatura das regiões sem descolamento.

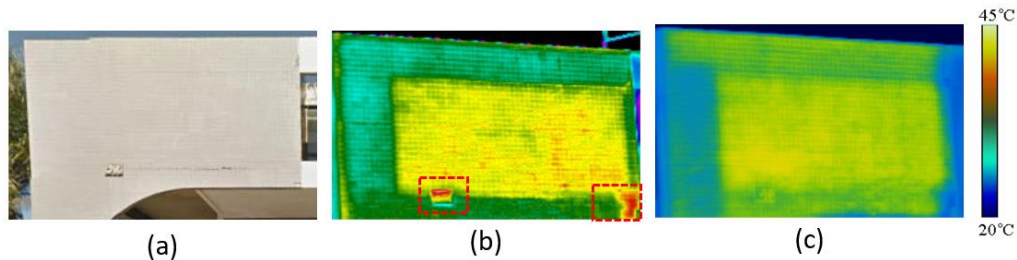


Figura 29 - Inspeção em fachada de revestimento cerâmico: (a) imagem digital; (b) termograma observado em variação de temperatura alta na superfície; (c) termograma observado em variação de temperatura baixa na superfície (PAVÓN, 2017)

2.6. INVESTIGAÇÃO QUANTITATIVA

As investigações de termografia quantitativa são conduzidas a partir da observação da temperatura dos termogramas, durante o aquecimento e resfriamento. Além da identificação de defeitos, análises de variação de temperatura são fundamentais para estabelecer tendências de comportamento da temperatura do defeito em relação a região livre de dano.

2.6.1. Funções de contraste

As funções de contraste são formas representativas da variação de temperatura da região com e sem defeito. São usadas para identificar defeitos, por meio das variações de temperatura observadas no termograma, e determinar o momento de maior adequação para identificação dos defeitos durante o aquecimento e resfriamento. As principais funções são: Contraste absoluto (Delta-T); Contraste corrido; Contraste normalizado e Contraste padrão (MALDAGUE, 2001).

- a) *Contraste absoluto (Delta-T)*: O Delta-T é a diferença de temperatura entre a região com e sem defeito em determinado intervalo de tempo, determinado conforme a equação 8.

$$\Delta T = T_{def.} - T_{sd} \quad (8)$$

Onde:

ΔT : Delta-T (°C);

$T_{def.}$: Temperatura do defeito (°C);

T_{sd} : Temperatura da região sem defeito (°C).

- b) *Contraste corrido (C^r)*: O contraste corrido é um ajuste do Delta-T, onde busca-se associar as variações de Delta-T à variação de temperatura da região sem defeito. O C^r indica uma variação de temperatura percentual do Delta-T em relação a região sem defeito, por meio da divisão do Delta-T pela $T_{sd}(t)$. A justificativa do ajuste apresentado por C^r em relação ao Delta-T, é a dependência da evolução de temperatura apresentada pela região sem defeito do material investigado. O C^r é determinado conforme a equação 9.

$$C^r = \frac{\Delta T}{T_s} \quad (9)$$

Onde:

C^r : Contraste corrido (n.u.);

ΔT : Contraste Absoluto (°C);

T_{sd} : Temperatura da região sem defeito (°C).

- c) *Contraste normalizado (C^n)*: O contraste normalizado observa a evolução de temperatura do defeito e da região sem defeito em relação a temperatura máxima obtida, para a região com defeito e sem defeito. Consequentemente, no C^n é investigado a diferença da variação de temperatura que ocorre no defeito em relação a variação de temperatura que ocorre na região sem defeito, conforme a equação 10.

$$C^n = \frac{T_{def.}}{T_{max.def.}} - \frac{T_{sd}}{T_{máx.sd}} \quad (10)$$

Onde:

C^n : Contraste normalizado (n.u.);

$T_{def.}$: Temperatura do defeito (°C);

$T_{máx.def.}$: Temperatura máxima do defeito (°C);

T_{sd} : Temperatura da região sem defeito (°C);

$T_{máx.sd}$: Temperatura máxima da região sem defeito (°C).

- d) *Contraste padrão (C^p)*: O contraste padrão investiga a evolução de temperatura do defeito e da região sem defeito em relação a temperatura do momento inicial do ensaio. O valor obtido de C^p é a variação da evolução de temperatura do defeito em relação a evolução da temperatura da região sem defeito. O C^p é calculado conforme a equação 11.

$$C^p = \frac{T_{def} - T_{def}(t_0)}{T_{sd} - T_{sd}(t_0)} \quad (11)$$

Onde:

C^p : Contraste padrão (n.u.);

T_{def} : Temperatura do defeito (°C);

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

T_{sd} : Temperatura da região sem defeito (°C);

$T_{sd}(t_0)$: Temperatura da região sem defeito no tempo zero (°C).

O Delta-T é o contraste mais usado nas investigações de defeitos. O delta-T é usado na avaliação de fissuras em revestimentos de argamassa e na identificação de descolamento de revestimento cerâmico, que, a depender do aquecimento ou resfriamento, assume valores positivos ou negativos (BAUER et al., 2016c; SILVA; MILHOMEM; BAUER, 2022). Por consequência, a avaliação quantitativa por Delta-T pode indicar a gravidade de um defeito, por meio dos valores de máximo e de mínimo atingidos e seu comportamento durante a evolução do aquecimento ou resfriamento (BARREIRA; DE FREITAS, 2007). A figura 30 (a) apresenta o termograma de uma placa de argamassa com fissura e a figura 30 (b) apresenta uma placa de revestimento cerâmico com descolamento, submetidos ao aquecimento. Observa-se, que as fissuras possuem menor temperatura e o descolamento maior temperatura em relação a região livre de defeito, quando observadas no aquecimento (PAVÓN, 2017).

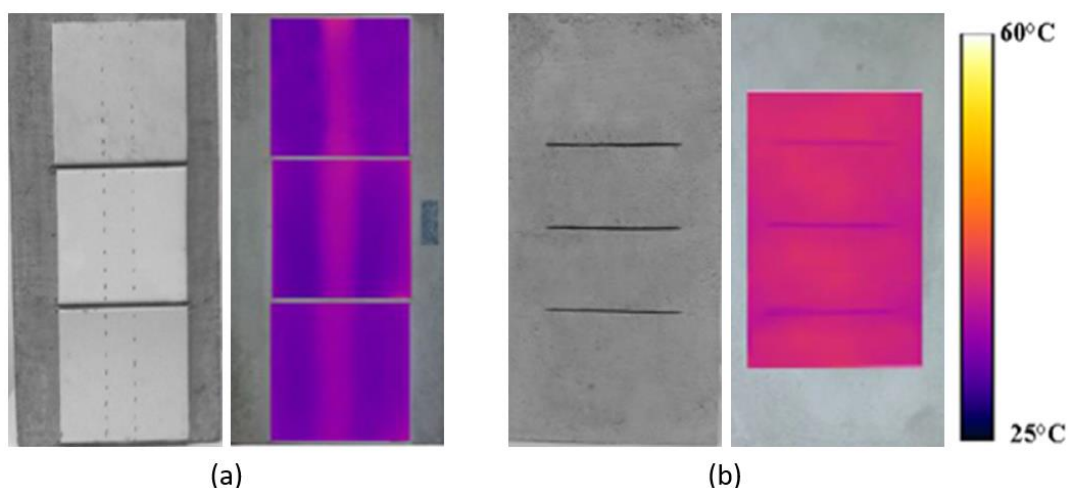


Figura 30 - (a) termograma de descolamento cerâmico no início do aquecimento; (b) termograma de fissura em revestimento de argamassa no início do aquecimento (BAUER et al., 2016c)

2.6.2. Aplicações de termografia quantitativa

A termografia quantitativa pode ser usada para mensurar as dimensões de um defeito, largura e profundidade. Investigações de termografia quantitativa são efetuadas para determinar a área de descolamento cerâmico em painéis de argamassa, estando em função do número de pixels observados no termograma, que representam a temperatura do defeito, do IFOV da câmera e da distância de observação (PAVÓN, 2017).

Para a mensuração da região da área com descolamento, é determinado a temperatura de cada pixel de uma linha que atravessa o defeito, conforme ilustra a figura 31 (a). Calcula-se a média da temperatura entre cada dois pixels consecutivos e a diferença entre as médias consecutivas, que corresponde a inclinação. A diferença entre o ponto mínimo e máximo da inclinação indica o número de pixels que representam o defeito. A figura 31 (b) apresenta a temperatura da linha que cruza o defeito, onde os pontos de mínimo e máximo da inclinação são próximos a 20 e 30 pixels, indicando que o descolamento é representado por um pouco mais de 10 pixels.

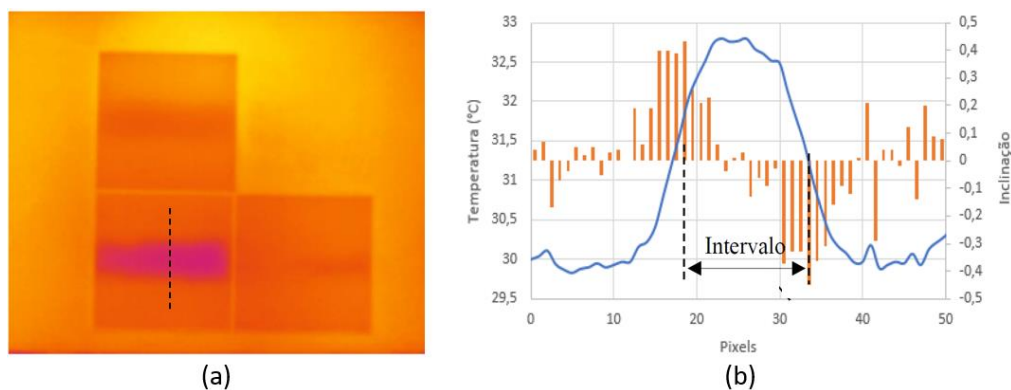


Figura 31 - Determinação da dimensão do descolamento: (a) linha de investigação; (b) identificação dos pontos de inclinação mínima e máxima e intervalo de pixels que representam o defeito (PAVÓN, 2017)

Investigações quantitativas de termografia são empregadas para estimar a profundidade dos defeitos. Defeitos internos com diferentes dimensões, em uma placa de polímero reforça com carbono, submetida a aquecimento e resfriamento, indicam que o Delta-T é maior, em módulo, para maiores profundidades de defeito (DUAN et al., 2012; LIU et al., 2016). Modelagens de simulação em elementos finitos para investigação de temperatura de fissuras em metais reafirmam as observações de Duan et al., (2012). A investigação simula o aquecimento e resfriamento em uma placa de metal com fissuras de diferentes profundidades. Constata-se que a temperatura da fissura é determinante para estimar a sua profundidade, pois maiores temperaturas de fissura, no resfriamento, estão relacionadas com maiores profundidades, conforme ilustra a figura 32 (OSWALD-TRANTA, 2018).

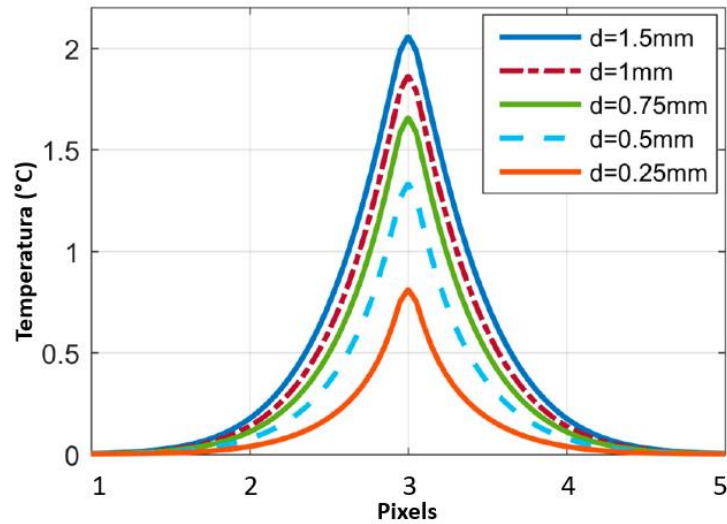


Figura 32 - Temperatura da fissura no resfriamento em função da profundidade (OSWALD-TRANTA, 2018)

Investigações de termografia para identificação de furos internos em uma placa de aço, submetida a aquecimento, indicam que a dimensão dos defeitos possui influência nos valores de contraste padrão. Na figura 33 é observado a evolução do contraste padrão de furos interno em uma placa de aço com variações de largura e profundidade, durante o aquecimento, onde os defeitos de maior profundidade possuem maior contraste, quando comparado com os furos de maior largura (CHUNG et al., 2020).

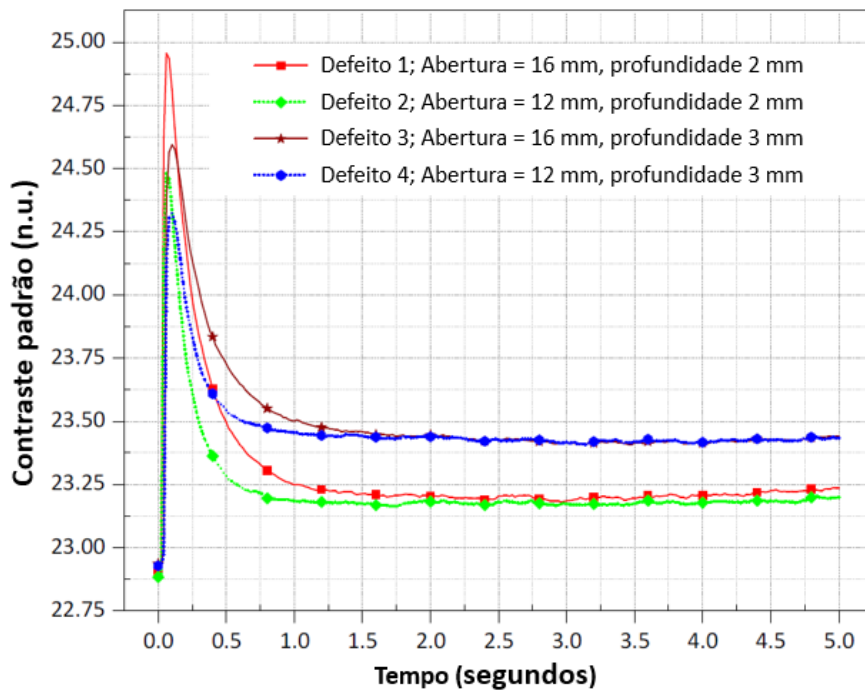


Figura 33 - Contraste térmico de defeitos em placa de aço submetidos ao aquecimento (CHUNG et al., 2020)

2.6.3. Avaliação de fissuras por termografia

Para a avaliação de fissuras por termografia, os valores de contraste Delta-T são dependentes da dimensão da fissura, largura e profundidade, e do sentido e duração do fluxo de calor. As fissuras presentes em uma superfície quando investigadas por termografia possuem menor temperatura no aquecimento e maior temperatura no resfriamento quando comparada as regiões livre de dano. As maiores diferenças entre a temperatura da fissura e região livre de dano acontecem no início do aquecimento ou resfriamento (MILHOMEM, 2019).

A utilização da termografia para a investigação de fissuras requer conhecimento da evolução da temperatura do elemento estudado. As maiores diferenças de temperatura entre a fissura e a região sem defeito que ocorrem no início do aquecimento e resfriamento, conduzem a maiores valores de Delta-T, indicando que o maior favorecimento para identificação das fissuras ocorre no início dos ciclos, momento em que o Delta-T é máximo, em módulo (BAUER et al., 2016a; PATRÍCIA M. MILHOMEM, LUIZ A. AIDAR, 2019). Ressalta-se que investigações realizadas no fim do aquecimento ou resfriamento dificultam a identificação das fissuras por Delta-T, pois a temperatura da fissura e região sem defeito é próxima, fazendo com que o Delta-T seja próximo de zero (BAUER; MILHOMEM; AIDAR, 2018).

Os valores de Delta-T tendem a serem maiores ou menores, em módulo, em função da profundidade da fissura. Fissuras de menor profundidade, por serem próximas a superfície aquecida, possuem temperatura superior no aquecimento e inferior no resfriamento em comparação com fissuras de maior profundidade (MILHOMEM, 2019). As diferentes temperaturas observadas por termografia em função das diferentes profundidades de fissura, indicam que fissuras de maior profundidade são melhor identificadas, pois conduzem maiores valores de Delta-T, em módulo, sendo o Delta-T negativo no aquecimento e positivo no resfriamento (MILHOMEM, 2019; OSWALD-TRANTA, 2019). As diferenças de Delta-T em função da profundidade da fissura sugerem que a termografia pode ser utilizada para avaliar a gravidade das fissuras em relação a sua profundidade (PAVON, 2017).

Em investigações de termografia em revestimentos de argamassa com fissuras de diferentes profundidades, é observado que o comportamento do Delta-T das fissuras difere com a evolução do aquecimento ou resfriamento. A figura 34 apresenta a evolução de Delta-T de fissuras com 0,5, 1,0 e 1,5 cm de profundidade, evolução do gradiente de temperatura entre a superfície frontal e posterior do revestimento de argamassa e evolução de temperatura ambiente durante o aquecimento. Na figura 34 (a) é observado que a evolução de Delta-T

das fissuras investigadas é dividida em três fases, onde no início do aquecimento (Fase 1) o Delta-T apresenta rápido crescimento, em módulo. Durante o restante do aquecimento (Fase 2), entre 10 e 100 minutos, o Delta-T das fissuras decresce, tendendo à zero. No fim do aquecimento (Fase 3), após 100 minutos, a evolução do Delta-T possui baixa variação, permanecendo contante até o fim do ciclo, estando próximo a zero (BAUER et al., 2016b).

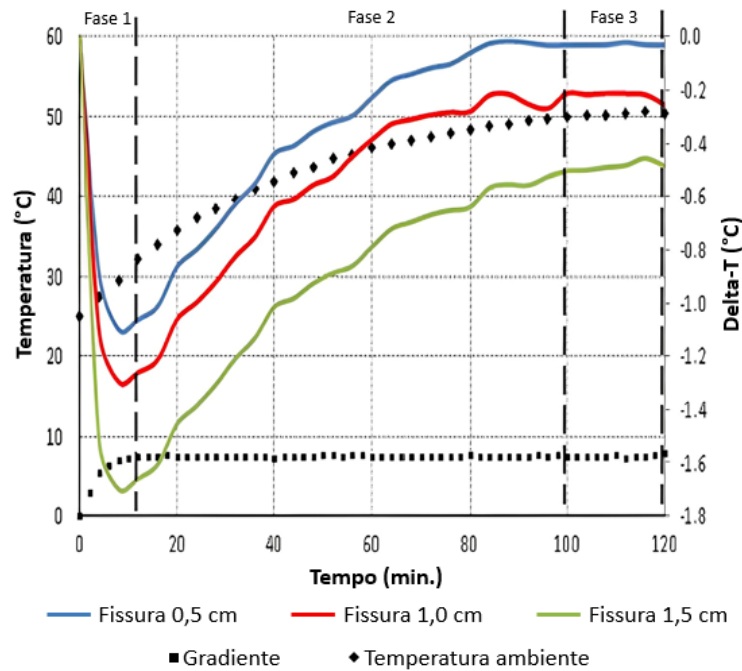


Figura 34 - Comportamento da evolução do Delta-T durante o aquecimento (BAUER et al., 2016b)

O Delta-T das fissuras durante o aquecimento pode assumir valor positivo a depender da largura da fissura e tempo de aquecimento. Em investigações de fissuras em revestimento de argamassa por termografia, é observado que fissuras com até 2 mm de largura, submetidos a 120 minutos de aquecimento, assumem valores positivos de Delta-T em um pouco mais de uma hora de aquecimento (MILHOMEM, 2019). Investigações por termografia em metais ferro magnéticos com fissuras superficiais de diferentes larguras submetidas a aquecimento, indicam que fissuras com largura superior a 8 mm possuem valores de Delta-T semelhantes, onde o aumento da largura da fissura, acima de 8 mm, não gera aumento do Delta-T (OSWALD-TRANTA, 2022). Conseqüentemente, a largura da fissura determina na investigação termográfica o valor e o limite de evolução do Delta-T.

3. DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

O desenvolvimento metodológico descreve a forma de investigação de termografia quantitativa, onde é observado o comportamento de Delta-T, no aquecimento e resfriamento, de fissuras lineares e ramificadas com diferentes dimensões, objetivando identificar as tendências evolutivas no Delta-T que podem ser balizadores de uma aplicação em campo. Investiga-se a evolução do Delta-T, durante o aquecimento e resfriamento, para fissuras lineares e ramificadas, observando se há diferença no comportamento do Delta-T em função da forma da fissura e o que caracteriza essa diferença. Além das condições de forma é observado a possibilidade de atribuição de dano as fissuras, em função dos valores de Delta-T, para fissuras de diferentes dimensões, largura e profundidade. Observa-se qual variável, largura ou profundidade, indica maior variação de temperatura e velocidade de aquecimento e resfriamento, caracterizando as tendências de comportamento de Delta-T em função da largura e profundidade da fissura. A mensuração da largura da fissura é efetuada para identificar as limitações de aplicação da termografia na atribuição de dano das fissuras e com as variações de temperatura interferem nos resultados.

A investigação ocorre em duas etapas, sendo uma em laboratório e outra em campo. A investigação termográfica em laboratório é efetuada em ambiente controlado, por termografia ativa. A investigação em laboratório estabelece as condições de ensaio e comportamento térmico das fissuras durante a evolução do aquecimento e resfriamento, para aplicação em investigações de termografia passiva, investigação de campo. Na investigação de campo, é identificado se as tendências de comportamento de Delta-T observadas em laboratório se repetem. As variáveis investigadas em laboratório são classificadas como dependentes e independente, conforme a tabela 3, sendo os resultados da investigação, balizadores da investigação aplicada em campo.

Independentes	Dependentes
Tipo de fissura (Linear e ramificada) Profundidade (5, 10 e 15 mm) Largura da fissura (1, 2 e 3 mm)	Delta-T Velocidade de aquecimento e resfriamento Mensuração de largura da fissura

Tabela 3 - Variáveis de estudo

A investigação em laboratório é dividida em 7 etapas, no qual, após estabelecido a metodologia de investigação, é efetuado a inspeção termográfica em campo, como descreve o fluxograma da figura 35. As etapas da metodologia são descritas em detalhe a seguir.

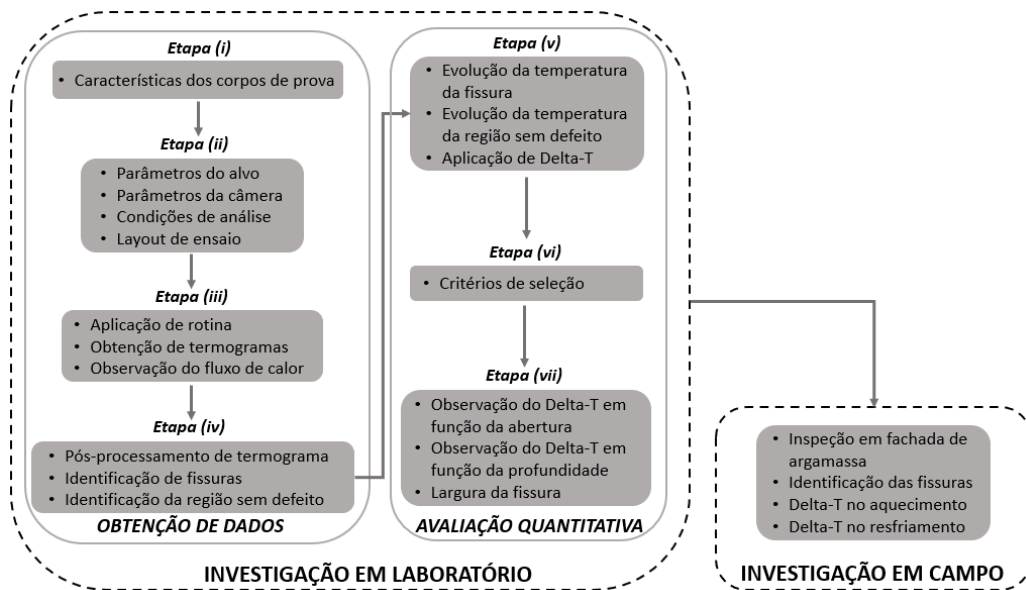


Figura 35 - Fluxograma das etapas do desenvolvimento metodológico

- (i) Características dos corpos de prova: Apresenta as amostras de argamassa com fissuras lineares e ramificadas e as profundidades e larguras das fissuras.
- (ii) Avaliações preliminares: Nessa etapa é definido os parâmetros de termografia quantitativa de aquecimento ativo, como a obtenção de emissividade, temperatura refletida, as condições de análise dos termogramas no aquecimento e resfriamento e o layout do ensaio. Essa investigação é efetuada em uma amostra piloto, onde os parâmetros obtidos são empregados no restante da investigação.
- (iii) Investigação termográfica: Nessa etapa é aplicado a rotina de investigação nas amostras do ensaio e obtidos os termogramas durante o aquecimento e resfriamento. Nessa etapa é observado a evolução da temperatura nos ciclos de aquecimento e resfriamento. A investigação dos termogramas ocorre nos softwares Flir Tools 6.4 e Excel 2019.
- (iv) Identificação das fissuras e das regiões livre de dano: Nessa etapa os termogramas referentes ao aquecimento e resfriamento são tratados, para identificar as regiões do termograma que representam a fissura e a região sem defeito, possibilitando a aplicação de Delta-T. A identificação das fissuras é feita nos softwares Rstudio 4.2.1 e Excel 2019.

- (v) Análise quantitativa: Nessa etapa é observado o comportamento de evolução da temperatura das fissuras e das regiões sem defeito, no aquecimento e resfriamento. A aplicação do Delta-T é feita e analisado seu comportamento durante a evolução do aquecimento e resfriamento.
- (vi) Critérios de seleção: Essa etapa retira os espúrios e seleciona os valores de Delta-T de todas as fissuras de mesma largura e profundidade de uma mesma amostra, para que seja possível estabelecer um Delta-T representativo das fissuras investigadas.
- (vii) Avaliação das variáveis independentes: Avalia-se como a evolução de Delta-T e as velocidades de aquecimento e resfriamento são influenciadas pelas variações de largura e profundidade das fissuras. Essa investigação enseja a possibilidade de classificação das fissuras, em relação a suas dimensões, com base no Delta-T. Por fim é efetuado a mensuração da largura da fissura, com objetivo de identificar as limitações de mensuração no aquecimento e resfriamento e indicar a condição mais propícia para a investigação da largura da fissura.

A investigação termográfica em campo é feita por meio da inspeção em uma edificação de um pavimento construída em parede de alvenaria e revestimento de argamassa, onde há fissuras lineares e ramificadas. A investigação é efetuada em dois momentos do dia, durante o aquecimento e resfriamento da fachada. Na investigação em campo, as condições de análise quantitativa obtidas em laboratório são aplicadas, onde é comparado as tendências de evolução do Delta-T das investigações laboratório e campo. A comparação entre os resultados de campo e laboratório identificam quais as limitações da investigação de fissuras em fachadas por termografia.

3.1. INVESTIGAÇÃO EM LABORATÓRIO

As etapas em laboratório investigam a evolução de temperaturas das fissuras por termografia quantitativa em corpos de prova, nos quais são definidos quanto a forma, largura e profundidade da fissura. Determina-se duas etapas de investigação, uma de aquecimento e outra de resfriamento, onde é investigado os fenômenos pertinentes à termografia. A avaliação termográfica é efetuada de forma quantitativa, pela aplicação do Delta-T, como pela observação das temperaturas na região da fissura (T_d) e região sem defeito (T_{nd}).

3.1.1. ETAPA 1: Características dos corpos de prova

A etapa de características dos corpos de prova apresenta as amostras de investigação. Os corpos de prova investigados são os mesmos utilizados por (MILHOMEM, 2019), no quais são constituídos por duas placas de argamassa, placa base e placa de revestimento. A placa base é feita de argamassa em cimento e areia e a placa de revestimento é feita de argamassa autoadensável, onde são definidas as fissuras. A placa base possui as dimensões de 400x160x35 mm (altura, largura e espessura), já a placa de revestimento em argamassa autoadensável possui altura de 350 mm por 150 mm de largura e espessura variável de 5 mm, 10 mm e 15 mm, que equivale a profundidade da fissura.

A moldagem da placa de revestimento sobre a placa base foi feita por Milhomem (2019) a partir do rompimento da placa de revestimento para posterior colagem na placa base. A placa de revestimento é rompida e dividida em partes menores pela aplicação de carga pontual em uma prensa hidráulica, onde a placa de revestimento é colada seguindo as interfases de ruptura, para a formação das fissuras lineares e ramificadas. A largura das fissuras é determinada no momento do assentamento das partes da placa de revestimento por meio de espaçadores, de 1 mm, 2 mm e 3 mm (MILHOMEM, 2019).

Para o desenvolvimento dos ensaios, nas fases de aquecimento e posterior resfriamento, as placas são seladas lateralmente com poliestireno expandido, de forma a induzir que o fluxo de calor seja predominante no sentido da espessura da placa. Ao todo são 12 corpos de prova, sendo 6 com fissuras lineares e 6 com fissuras ramificadas com variações de largura e profundidade, onde é investigado as tendências de Delta-T em função da forma e dimensão das fissuras. A tabela 4 apresenta a identificação e as características de dimensão dos corpos de prova e a figura 36 e figura 37 apresentam as placas com fissuras lineares e ramificadas.

Largura (mm)	Profundidade (mm)	Placas	
		Linear	Ramificada
1	5	L1	R1
	10	L2	R2
2	10	L3	R3
3	5	L4	R4
	10	L5	R5
	15	L6	R6

Tabela 4 - Caracterização de dimensão e identificação dos corpos de prova

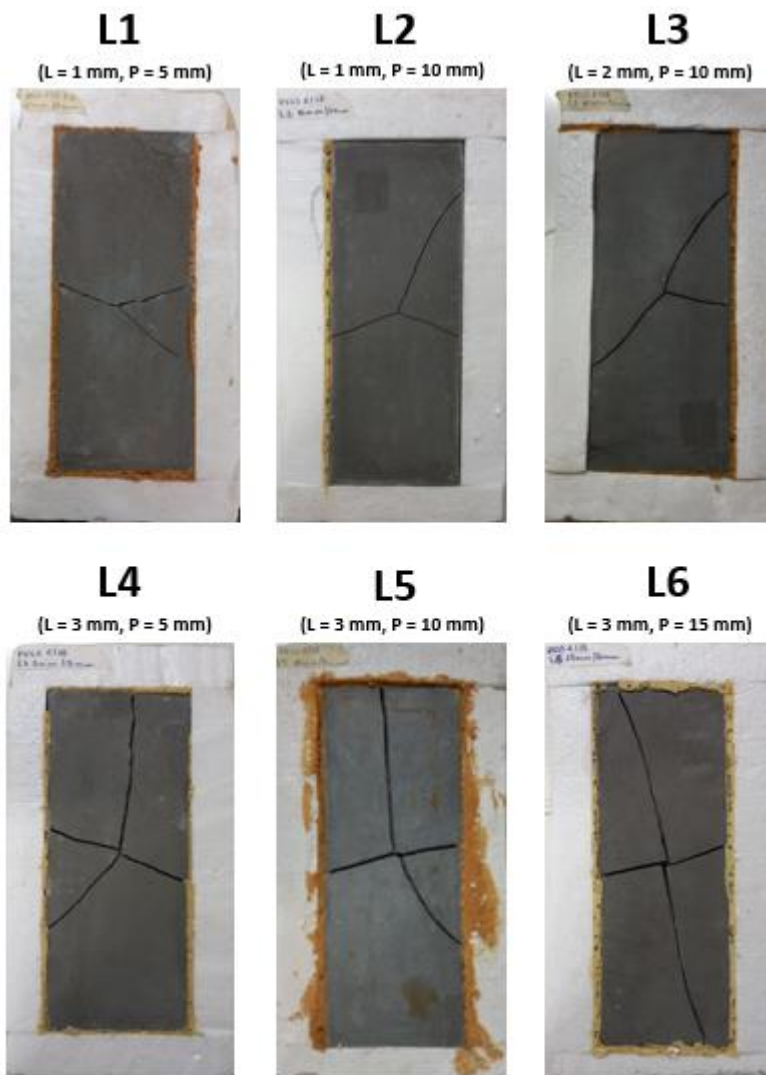


Figura 36 - Placas com fissura linear, onde L é a largura e P a profundidade da fissura (MILHOMEM, 2019)

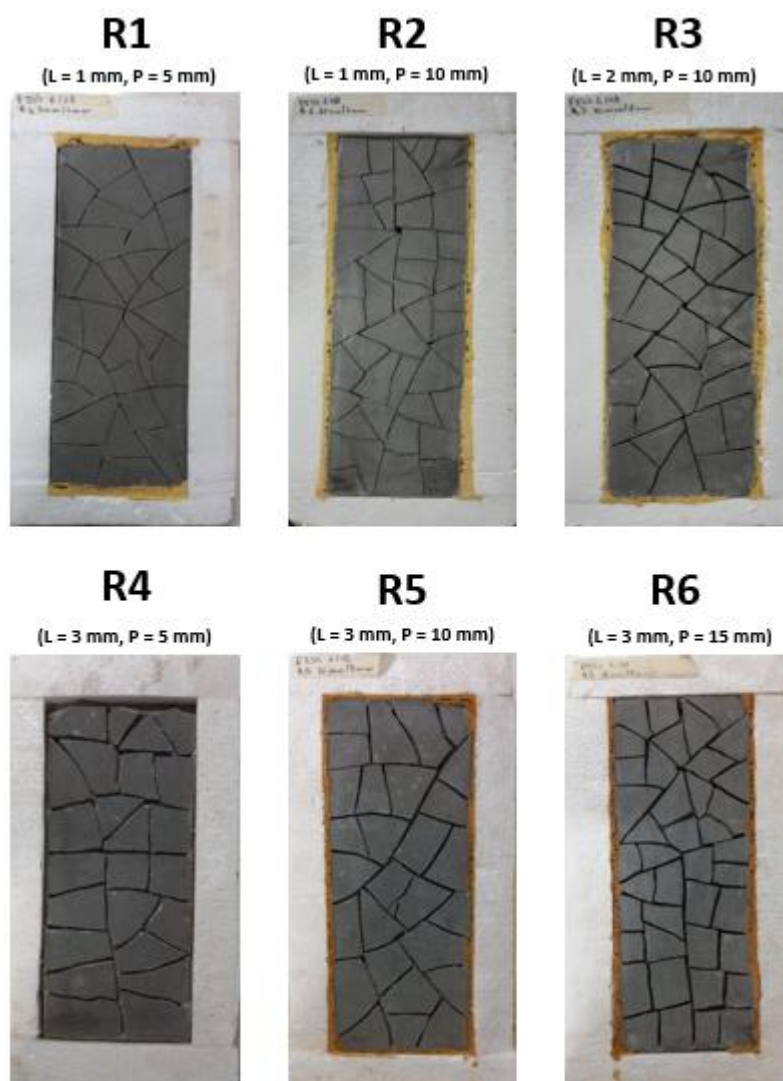


Figura 37 - Placas com fissura ramificada, onde L é a largura e P a profundidade da fissura (MILHOMEM, 2019)

3.1.2. ETAPA 2: Avaliações preliminares

A etapa de avaliações preliminares efetua um ensaio piloto para obtenção de parâmetros como emissividade e temperatura refletida. O ensaio é iniciado em um corpo de prova piloto, sem fissuração nas dimensões de 350 mm x 150 mm x 10 mm, submetido ao aquecimento ativo e monitoramento por termografia para determinação de temperatura aparente refletida e emissividade. Esses dois parâmetros são necessários para iniciar a rotina de investigação termográfica e são dados de entrada inseridos no software Flir Tools 6.4, software usado para investigar os termogramas. A temperatura atmosférica e umidade relativa são obtidas empregando o medidor EXTECH MO297. Para a obtenção dos termogramas, é empregada a câmera termográfica FLIR T-400 com faixa espectral de 7,5 a 13,0 μm , com uma faixa de temperatura de -20 a 120 $^{\circ}\text{C}$ e resolução de 320 x 240 pixels. Na câmera é acoplada uma lente de 15 $^{\circ}$, o que resulta num IFOV de 0,82 mrad.

A temperatura aparente refletida é a temperatura emitida por um objeto externo a análise, que, somado a radiação do alvo da investigação, gera imprecisão na mediação de temperatura, caso não seja compensada (ABNT, 2021c). A temperatura aparente refletida é determinada pelo método da lâmina de alumínio corrugada, seguindo as especificações da norma E1862 (ASTM, 2002a) e NBR 16969 (ABNT, 2021c), no qual é fixado junto a superfície aquecida do corpo de prova uma folha de papel alumínio, que reflete a temperatura induzida.

A emissividade é a propriedade que representa eficiência de uma superfície em emitir radiação térmica, no qual pode ser obtida utilizando câmera termográfica ou radiômetro. A emissividade varia entre 0 e 1, onde valores de emissividade próximos a zero, apresentam maior dificuldade da medição de temperatura (ABNT, 2021c). A emissividade é obtida pelo método da emissividade conhecida, como descreve a norma E 1933 (ASTM, 2002b) e NBR 16969 (ABNT, 2021c), no qual é fixado na superfície submetida ao aquecimento da amostra piloto, uma fita adesiva de cor preta, de emissividade conhecida, onde a área referente a fita é delimitada e obtido seu valor de temperatura média. O valor de temperatura média da fita é comparado com a temperatura média de uma área próxima à região de medição da fita, no qual ambas as regiões, devem possuir o mesmo valor de temperatura média, pelo ajuste de valor da emissividade. Quando essas regiões apresentarem o mesmo valor de temperatura média, o valor de emissividade ajustado é considerado o empregado para a rotina de investigação.

Durante o estudo piloto, é obtido o valor de emissividade e temperatura refletida, nos quais são iguais para os ciclos de aquecimento e resfriamento e para toda a rotina de investigação, Tabela 5. Os dados de umidade relativa do ar e temperatura ambiente são obtidos no início do ensaio de cada amostra. Conseqüentemente, há um valor de temperatura ambiente e umidade relativa do ar para cada amostra investigada, sendo relativo ao local do ensaio e do dispositivo de investigação. Os valores de temperatura ambiente e umidade relativa do ar são apresentados na tabela 6 e tabela 7.

Parâmetros de termografia	
Temperatura aparente refletida (°C)	34,3
Emissividade	0,96

Tabela 5 - Identificação dos dados de entrada para termografia quantitativa

Dados do ambiente						
Identificação das amostras	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Temperatura ambiente (°C)	27,3	27,5	27,2	27,2	27,1	27,3
Umidade relativa do ar (%)	46	47	64	59	59	59

Tabela 6 - Dados do ambiente obtidos para as investigações das placas com fissuras lineares

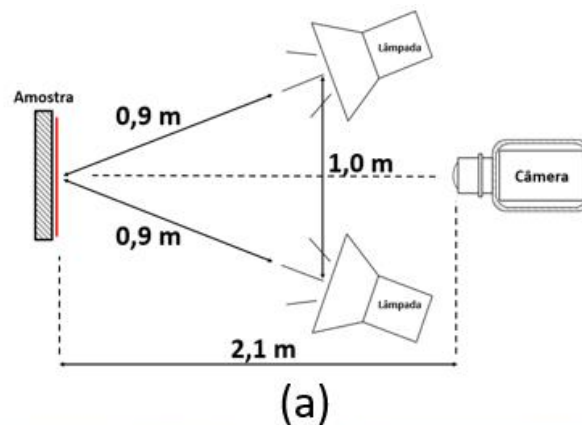
Dados do ambiente						
Identificação das amostras	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Temperatura ambiente (°C)	26,6	26,6	26,5	26,4	26,8	27,1
Umidade relativa do ar (%)	60	60	62	53	49	45

Tabela 7 - Dados do ambiente obtidos para as investigações das placas com fissuras ramificadas

Os ciclos de aquecimento e resfriamento dos corpos de prova foram desenvolvidos de modo que se possa estudar a detecção das fissuras pela evolução de temperatura. Para o aquecimento é empregado a fonte de calor desenvolvidas por (PAVÓN, 2017), que são dois conjuntos de 3 lâmpadas de infravermelho, com potência de 750W para cada conjunto, com potência total de 1500W, conforme a figura 38. A figura 39 (a) ilustra o layout, em planta baixa, do aparato empregado da investigação de termografia quantitativa, no qual a câmera termográfica é posicionada a 2,1 metros de distância do corpo de prova. As lâmpadas de infravermelho estão a 0,9 metros de distância do corpo de prova, onde cada lâmpada infravermelha é distanciada uma da outra em 1 metro. As lâmpadas de infravermelho estão apontadas para o centro do corpo de prova, possibilitando aquecimento uniforme. A figura 39 (b) ilustra o conjunto experimental de monitoramento termográfico e aquecimento do corpo de prova. A figura 39 (c) ilustra a visualização da fonte de calor apontada para o corpo de prova.



Figura 38 - Fonte de aquecimento



(b)



(c)

Figura 39 - Aparato de investigação termográfica: (a) Layout de termografia ativa em planta baixa; (b) observação do conjunto experimental submetido a aquecimento; (c) observação lateral da placa e fonte de calor no aquecimento

3.1.3. ETAPA 3: Aplicação de rotina

A sequência do experimento inicia com o posicionamento da placa e da câmara termográfica alimentada com os valores de emissividade e temperatura aparente refletida obtidos no ciclo

piloto. Inicia-se a aquisição dos termogramas de forma contínua, a cada 4 minutos, durante o aquecimento e resfriamento. O intervalo de 4 minutos é estabelecido para que se possa investigar a evolução do Delta-T com precisão durante os ciclos de aquecimento e resfriamento. A aquisição inicia com a obtenção de dois termogramas no sistema em repouso. Na sequência liga-se as lâmpadas iniciando o ciclo de aquecimento, que tem duração de 120 minutos, onde, após o atingido o tempo de aquecimento, as lâmpadas são desligadas, iniciando o ciclo de resfriamento, continuando-se a obtenção dos termogramas por mais 120 minutos. Ao atingir os 240 minutos é finalizado o experimento.

A investigação é finalizada com um total de 62 termogramas, sendo 2 do sistema em repouso, 30 no aquecimento, referente a 120 minutos de aquecimento, e 30 no resfriamento, referente a 120 minutos de resfriamento. Os termogramas investigados são referentes a toda a placa, onde é definido uma zona central de análise que representa toda a configuração da fissura, como é apresentado na figura 40.

A temperatura dos pixels da zona central de análise definida no termograma pode ser exportada em planilha, no qual cada temperatura dos pixels corresponde a uma célula da planilha. A zona central de análise é definida para todas as amostras e tem dimensão corresponde a uma matriz de 33 pixels verticais por 71 pixels horizontais, onde cada pixel possui dimensão de 1,7 mm. A figura 41 e a figura 42 apresentam a área delimitada de investigação dos termogramas para cada amostra de fissuras lineares e ramificadas. A forma de investigação dos termogramas difere da forma de investigação adotada por (MILHOMEM, 2019), pois é determinado um trecho de análise, já a análise feita por (MILHOMEM, 2019) é global, onde não há uma delimitação da região de investigação.

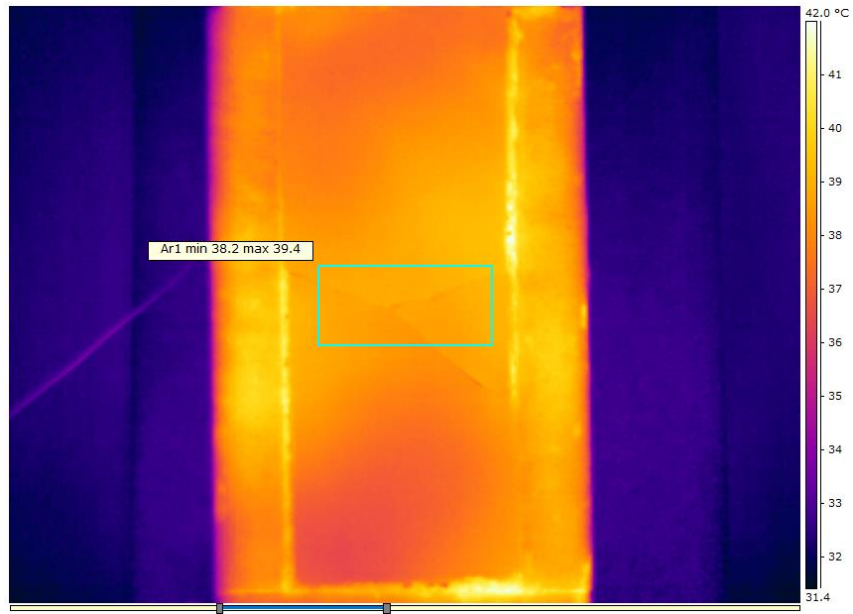


Figura 40 - Delimitação da zona central de análise de um termograma a ser investigada

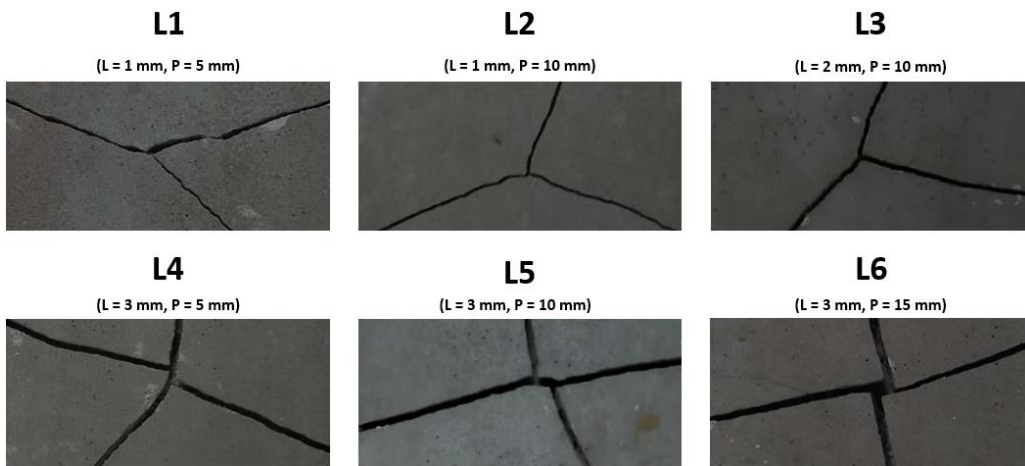


Figura 41 - Área delimitada de investigação das fissuras lineares

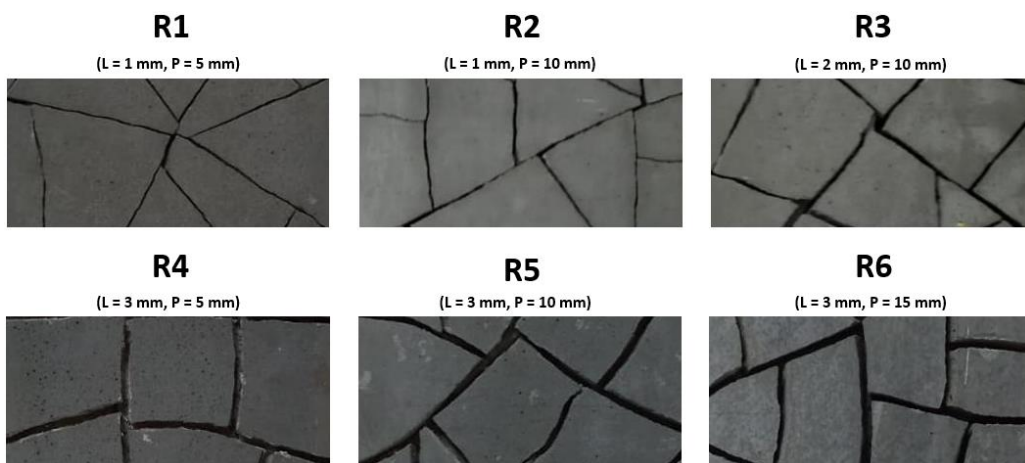


Figura 42 - Área delimitada de investigação das fissuras ramificadas

3.1.4. ETAPA 4: Identificação das fissuras e região livre de dano

A identificação das fissuras e região sem defeito é fundamental para a investigação quantitativa, pois a partir da temperatura da fissura e da região sem defeito que é calculado o Delta-T. Para a identificação das fissuras é efetuada uma investigação em cada linha da matriz de pixels da região de investigação dos termogramas, observando a evolução de temperatura no aquecimento e resfriamento. A investigação isolada da evolução de temperatura de uma determinada linha da matriz de pixels da região de investigação é efetuada pela produção de uma nova matriz, onde o eixo horizontal possui os valores de temperatura e o eixo vertical é a evolução do tempo no aquecimento e resfriamento, ou seja, uma matriz pixel/tempo. A figura 43 apresentam um exemplo da matriz pixel/tempo em planilha de uma determinada linha, onde as colunas da matriz, orientadas pelas especificações em minutos, indicam a evolução de tempo dos termogramas obtidos a cada 4 minutos. Já as linhas da matriz, orientadas pela especificação de pixel, apresentam as temperaturas dos pixels da linha de investigação.

Pixel minutos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4	28,42	28,41	28,34	28,41	28,35	28,43	28,45	28,39	28,42	28,42	28,34	28,46	28,42	28,39	28,39	28,40
8	32,63	32,69	32,60	32,67	32,60	32,67	32,65	32,67	32,60	32,62	32,56	32,62	32,62	32,62	32,63	32,72
12	34,84	34,77	34,90	34,81	34,72	34,75	34,75	34,80	34,76	34,85	34,76	34,84	34,88	34,81	34,80	34,81
16	36,20	36,22	36,25	36,20	36,22	36,20	36,29	36,21	36,27	36,22	36,23	36,27	36,25	36,28	36,29	36,26
20	37,54	37,62	37,54	37,61	37,59	37,51	37,54	37,52	37,58	37,58	37,58	37,59	37,54	37,57	37,62	37,51
24	38,69	38,61	38,66	38,69	38,67	38,72	38,69	38,67	38,66	38,69	38,70	38,68	38,68	38,76	38,76	38,67
28	39,69	39,73	39,70	39,75	39,74	39,74	39,77	39,71	39,77	39,75	39,75	39,68	39,75	39,83	39,72	39,80
32	40,56	40,54	40,56	40,51	40,53	40,58	40,60	40,59	40,62	40,58	40,66	40,57	40,60	40,62	40,65	40,64
36	41,47	41,48	41,45	41,45	41,41	41,41	41,48	41,44	41,50	41,48	41,45	41,53	41,51	41,51	41,44	41,52
40	42,35	42,35	42,46	42,38	42,36	42,38	42,42	42,44	42,52	42,41	42,41	42,41	42,39	42,47	42,44	42,47
44	43,16	43,18	43,16	43,10	43,16	43,19	43,22	43,20	43,18	43,23	43,22	43,26	43,20	43,24	43,26	43,24
48	43,82	43,81	43,82	43,84	43,86	43,87	43,92	43,91	43,91	43,89	43,86	43,96	43,87	43,95	43,92	43,90
52	44,66	44,66	44,70	44,64	44,60	44,61	44,64	44,73	44,74	44,73	44,66	44,66	44,73	44,78	44,70	44,81
56	45,40	45,38	45,44	45,44	45,43	45,42	45,49	45,52	45,49	45,44	45,56	45,48	45,55	45,58	45,51	45,58
60	45,96	46,04	46,01	46,06	46,00	46,09	46,05	46,09	46,16	46,14	46,14	46,14	46,10	46,22	46,04	46,15
64	46,40	46,46	46,48	46,47	46,42	46,50	46,47	46,54	46,52	46,55	46,55	46,62	46,62	46,66	46,64	46,66

Figura 43 - Exemplo de matriz pixel/tempo

A produção de uma matriz pixel/tempo facilita a identificação dos defeitos, pois a identificação possui maior eficiência quando investigada por uma sequência de termogramas, em vez apenas um de maior contraste (MAIERHOFER et al., 2016). A justificativa, da produção de uma matriz pixel/tempo, é que a investigação efetuada por uma série de termogramas é apropriada para a detecção de defeitos múltiplos, por exemplo fissuras ramificadas (POZZER et al., 2021). A produção das matrizes pixel/tempo e o método de pós processamento para identificação das fissuras é apresentado no anexo. Finalizado o pós procesamento das matrizes pixel/tempo são identificados os pixels que representam as fissuras e as regiões sem defeito.

Para a análise quantitativa, é definido a região que representa a fissura e a região sem defeito, onde é investigado as temperaturas para calculo de Delta-T. A região da fissura é representada por todos os pixels de um segmento de fissura limitado pela interseção de outra fissura, excluindo as extremidades onde há junção de fissuras. A região sem defeito é toda a área circundante ás fissuras, recuando um pixel em relação ao pixel da fissura. A figura 44 exemplifica o esquema de identificação das regiões.

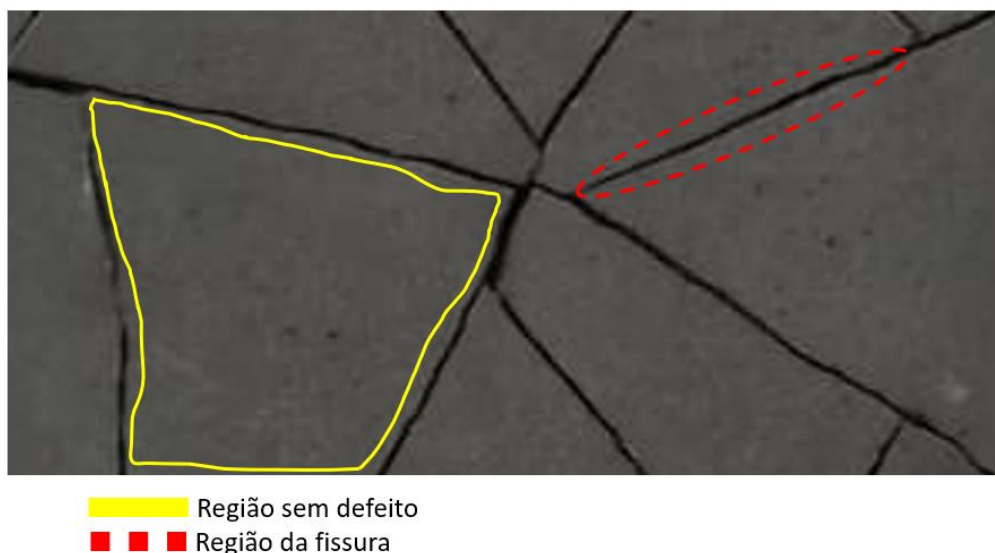


Figura 44 - Identificação da região sem defeito e da fissura

3.1.5. ETAPA 5: Análise quantitativa

Nessa etapa são definidas as temperaturas das fissuras (T_d) e as temperaturas da região sem defeito (T_{nd}). T_d é a média de temperatura de todos os pixels que representam uma fissura e T_{nd} é a média de temperatura de todos os pixels que representam uma região sem defeito, onde as fissuras e as regiões sem defeito são delimitadas e definidas na etapa de identificação, Etapa 4. O número de pixels que representam a fissura e a região sem defeito é dependente da distância e IFOV empregados na investigação e do tamanho da fissura e região sem defeito.

Define-se o T_d e o T_{nd} de todas as fissuras e regiões sem defeito presentes na zona de investigação do termograma para todas as amostras, lineares e ramificas, onde é observado a evolução do T_d e T_{nd} durante o aquecimento e resfriamento. A partir dos valores de T_d e T_{nd} é calculado o Delta-T, para cada termograma obtido no aquecimento e resfriamento, onde é investigado sua evolução durante os ciclos.

Cada fissura possui dois valores de Delta-T, sendo calculados pela diferença entre T_d e T_{nd} das regiões vizinhas. A figura 45 (a) ilustra a obtenção de Delta-T, onde dois valores são

possíveis, um pela diferença entre a temperatura média da fissura e a temperatura média da região sem defeito 1, conforme a figura 45 (b), e outro pela diferença de temperatura média da fissura e a temperatura média da região 2, conforme a figura 45 (c).

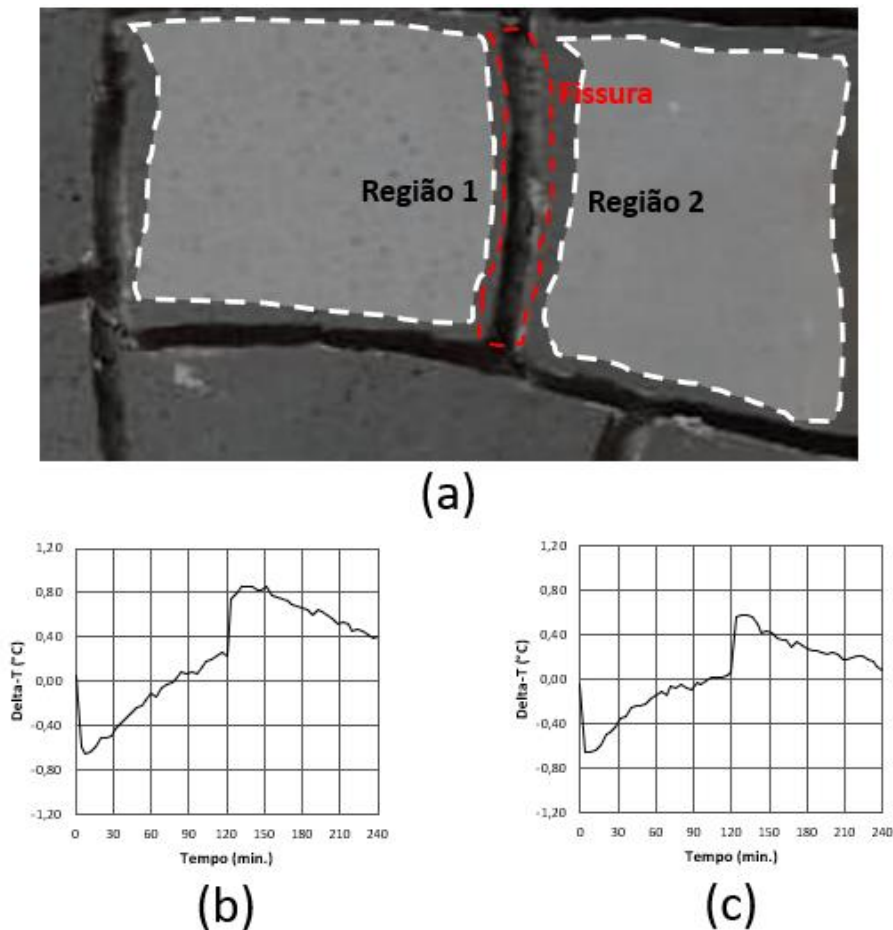


Figura 45 - Delta-T formado por uma mesma fissura e duas regiões sem defeito: (a) descrição da fissura e das regiões sem defeito; (b) Delta-T da região 1; (c) Delta-T da região 2

3.1.6. ETAPA 6: Critérios de seleção

Os critérios de seleção têm o objetivo de selecionar os valores de Delta-T e definir um Delta-T representativo para cada amostra. Os Delta-T são selecionados pelo comportamento de evolução esperado durante o aquecimento e resfriamento e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento.

A pré seleção é feita por comportamento de Delta-T, onde os Delta-T selecionados são os que possuem valor negativo durante o aquecimento e positivos durante o resfriamento. Conseqüentemente, é atribuído como comportamento esperado, o Delta-T negativo no aquecimento e positivo no resfriamento, onde as evoluções de Delta-T que não possuem esse comportamento são consideradas como anômalas e descartadas da investigação. A figura 46

apresenta um exemplo de evolução Delta-T de comportamento esperado. Na figura 46 é observado que durante o aquecimento o Delta-T se mantém negativo, o que indica que a fissura possui temperatura inferior em relação a região sem defeito, e com a evolução do ciclo os valores de Delta-T se aproximam de zero. Durante o resfriamento, o Delta-T de comportamento esperado possui valores positivos, o que indica que a fissura possui temperatura superior em relação a região sem defeito, e com a evolução do ciclo os valores de Delta-T se aproximam de zero.

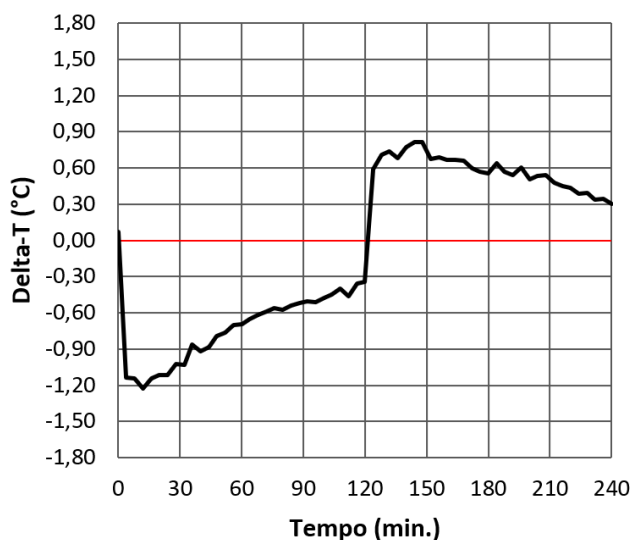


Figura 46 – Características de evolução no aquecimento e resfriamento do Delta-T de comportamento esperado

Depois de pré-selecionados os Delta-T, obtém-se dois valores de média de Delta-T, sendo um calculado para os valores de Delta-T no aquecimento e para os valores de Delta-T no resfriamento, onde é utilizado para o cálculo os Delta-T pré-selecionados pelo critério de comportamento evolutivo esperado. A média de Delta-T no aquecimento é a média de todos os valores de Delta-T obtidos nos 120 minutos de aquecimento, onde há um valor de Delta-T a cada 4 minutos. A média de Delta-T no resfriamento, segue a metodologia da média de aquecimento, onde os valores utilizados no cálculo são todos os valores de Delta-T obtidos nos 120 minutos do resfriamento.

Obtido as médias de Delta-T no aquecimento e resfriamento, de cada fissura da amostra com Delta-T de comportamento esperado, é calculado a média das médias de Delta-T no aquecimento e resfriamento e o desvio padrão da média das médias de Delta-T no aquecimento e resfriamento. Os valores médios de Delta-T que estão fora do intervalo de desvio padrão, no aquecimento e resfriamento, são descartados, sendo que, para os Delta-T que possuem Delta-T médio dentro do intervalo de desvio padrão, do aquecimento e resfriamento, é calculado a média entre os valores de Delta-T, durante o aquecimento e

resfriamento, sendo a média o Delta-T representativo da amostra. A média dos Delta-T de comportamento esperado, no aquecimento e resfriamento, identifica qual Delta-T possui a média com maior diferença por meio do desvio padrão, fazendo com que o Delta-T representativo seja composto por valores de maior uniformidade, durante o aquecimento e resfriamento.

A figura 47 descreve a seleção dos Delta-T em função do desvio padrão obtido pela média da Médias de Delta-T, (MD), no aquecimento e resfriamento. Observa-se que, para o aquecimento, como apresenta a figura 47 (a), o MD 3 e MD 4 estão fora do intervalo de desvio padrão da média dos valores de MD, representado pelas linhas tracejadas em vermelho. Já no resfriamento, conforme a figura 47 (b), o MD 2 e MD 5 estão fora do intervalo de desvio padrão da média dos valores de MD, representado pelas linhas tracejadas em vermelho. Consequentemente, os Delta-T com MD fora de intervalo de desvio padrão, no aquecimento e resfriamento, não são considerados na média de Delta-T representativo da amostra, onde a média do Delta-T representativo é calculado pelos valores de Delta-T das fissuras que possuem o MD 1 e MD 6, pois são as fissuras que possuem MD dentro do intervalo de desvio padrão da média dos valores de MD do aquecimento e resfriamento.

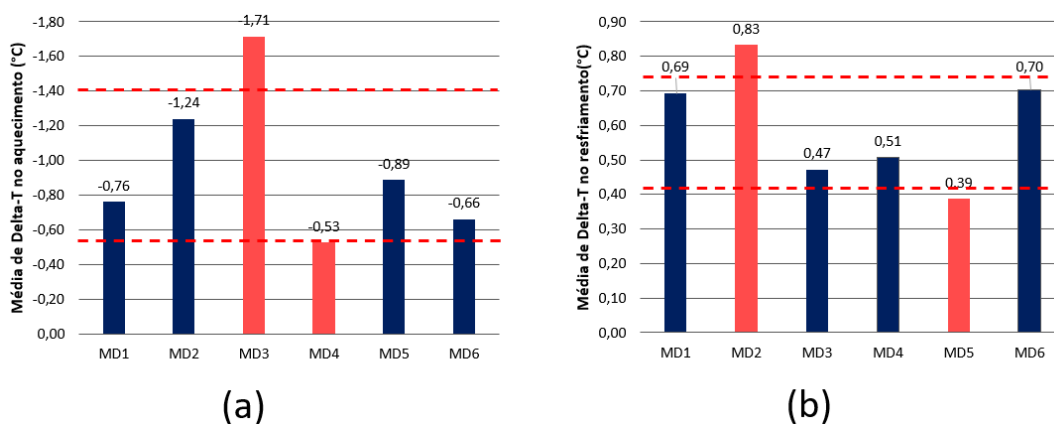


Figura 47 – Seleção por desvio padrão dos valores médios de Delta-T: (a) Aquecimento; (b) resfriamento, onde (MD) é a média de Delta-T

3.1.7. ETAPA 7: Investigação das variáveis dependentes e independentes

O comportamento de Delta-T representativo das amostras, lineares e ramificadas, são investigados em função da dimensão das fissuras, largura e profundidade, durante o aquecimento e resfriamento. A investigação é efetuada em duas etapas, variando a largura e fixando a profundidade da fissura e variando a profundidade e fixando a largura da fissura. Identifica-se quais as tendências e como a forma da fissura contribui, conjuntamente com as mudanças de dimensão, na evolução do Delta-T durante o aquecimento e resfriamento. A

tabela 8 apresenta as etapas em dois grupos de investigação em função da largura e profundidade, no qual cada grupo possui duas análises. O objetivo das etapas é observar se os valores de Delta-T, máximo e mínimo e velocidade de aquecimento e resfriamento, sofrem maior variação em função da profundidade ou da largura.

Grupo 1 – Influência da largura da fissura			
Análise	Profundidade	Largura	Placas
1	5	1	L1/R1
		3	L4/R4
2	10	1	L2/R2
		2	L3/R3
		3	L5/R5
Grupo 2 – Influência da profundidade da fissura			
1	5	1	L1/R1
	10		L2/R2
2	5	3	L4/R4
	10		L5/R5
	15		L6/R6

Tabela 8 - Esquema de investigação das variáveis independentes

Na investigação das variáveis independentes, é analisado a capacidade de mensuração da largura da fissura por termografia. A investigação é conduzida pela determinação de 4 linhas transversais a fissura, com emprego do software Flir Tools 6.4. As temperaturas nessas linhas são exportadas em planilha, obtendo-se as temperaturas pixel a pixel ao longo da linha. Para a temperatura da região sem defeito, Tnd, se identifica um patamar de temperatura relativamente constante nas zonas laterais da fissura. Para a temperatura da fissura, Td, se identifica as temperaturas inferiores, no aquecimento, e superiores, no resfriamento, em relação a Tnd.

Para cada linha transversal é aplicado a metodologia de mensuração proposta por (PAVÓN, 2017), onde a média da largura da fissura obtida das 4 linhas transversais representa a largura da fissura. A metodologia de mensuração da largura é efetuada nas fissuras das placas lineares que possuem comportamento de Delta-T próximo ao comportamento do Delta-T médio representativo da amostra. A investigação de largura da fissura é efetuada nos ciclos de aquecimento e resfriamento, nos intervalos de 20, 40, 60, 80 e 112 minutos do aquecimento e aos 140, 160, 180, 200 e 232 minutos do resfriamento. A figura 48 apresenta o esquema de mensuração da largura da fissura, onde as 4 linhas perpendiculares da fissura condida na região de investigação são exportadas para software Excel 2019, sendo observado

a inclinação da linha média, que indica que a largura da fissura está no intervalo entre o pixel de número 5 e 7.

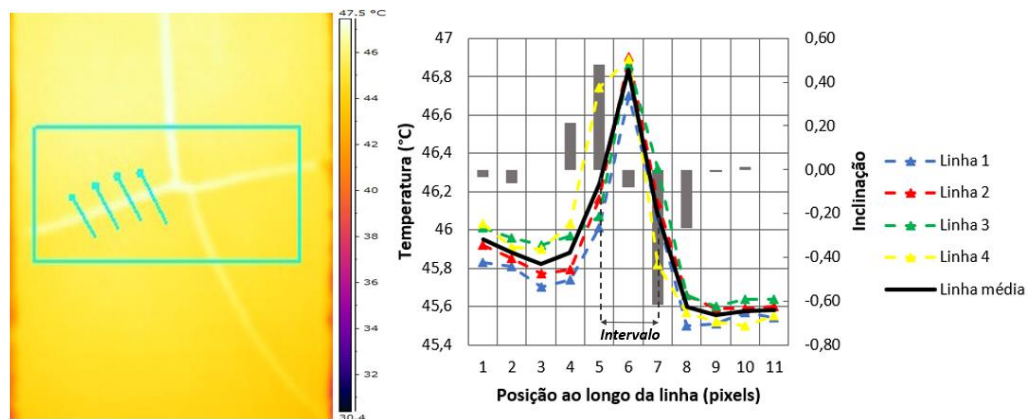


Figura 48 - Esquema de identificação da largura da fissura

3.2. INVESTIGAÇÃO EM CAMPO

A investigação de campo foi efetuada por (BAUER et al., 2016a), onde objetiva-se analisar os resultados da investigação e identificar se as condições de análise estabelecidas em laboratório são possíveis de aplicação em campo, por meio da comparação da tendência de Delta-T dos resultados obtidos em laboratório e campo. Na investigação de campo é observado quais as limitações da termografia quantitativa para avaliação de fissuras em revestimentos de argamassa. A investigação em campo é efetuada a partir dos termogramas obtidos por (BAUER et al., 2016a) de um fachada de alvenaria com revestimento de argamassa localizada na cidade de Brasília, no Campus Universitário Darcy Ribeiro. A edificação da investigação é o edifício Dois Candangos, apresentada na figura 49, em planta, onde a fachada inspecionada tem orientação leste.



Figura 49 - Fachada de argamassa inspecionada por termografia

Os termogramas da investigação de campo são referentes a um levantamento efetuado em julho de 2015, período do ano sem chuvas e céu claro, onde é identificado que a fachada inspecionada possui fissuras lineares e ramificadas, possíveis de identificar por termografia. A captura de imagem é referente a toda a área da fachada, onde são definidas três regiões de investigação no termograma, sendo topo (região 1), centro (região 2), base (região 3), conforme figura 50 (a). Entre as regiões investigadas, é observado no termograma, conforme a figura 50 (b), que a região 1 e 2 possuem fissuras lineares e a região 3 possui fissuras ramificadas.

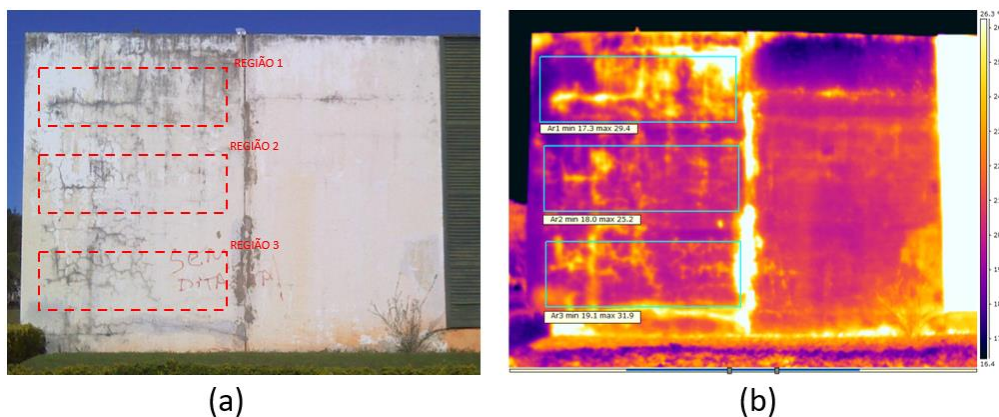


Figura 50 - Fachada de argamassa inspecionada por termografia: (a) imagem digital com a delimitação das regiões investigadas; (b) termograma da fachada

A obtenção dos termogramas ocorreu de forma contínua, a cada hora, sendo a investigação iniciada às 8 horas e finalizada às 18 horas. Por meio de simulação higrotérmica, feita por (BAUER et al., 2016a), usando o software WUFI, é possível observar o horário em que a fachada está em aquecimento e resfriamento. A simulação higrotérmica apresenta que a fachada investigada está submetida a aquecimento entre às 8 e 12 horas e, após esse intervalo

a fachada encontra-se em resfriamento. A figura 51 ilustra a evolução de temperatura da superfície da fachada e da temperatura ambiente obtida por simulação higrotérmica, efetuada por (BAUER et al., 2016a).

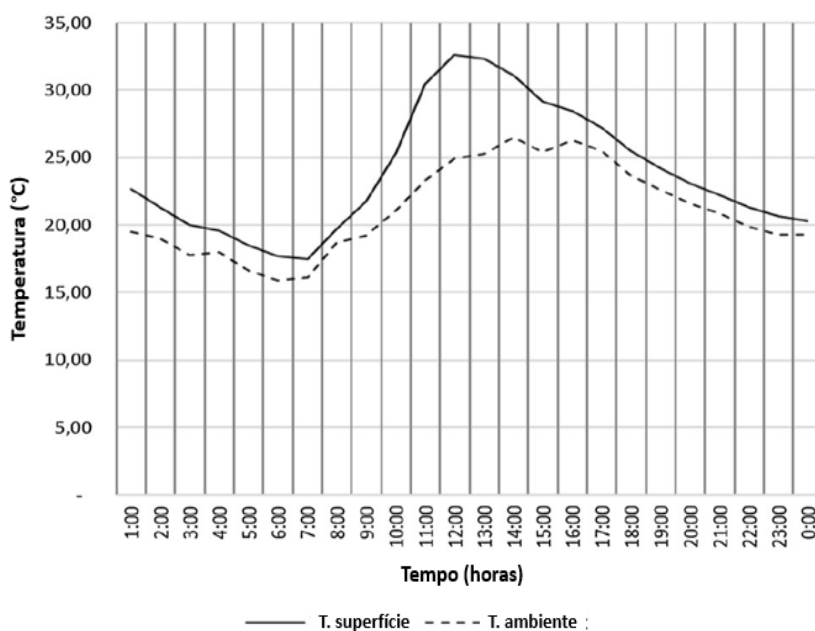


Figura 51 - Evolução da temperatura da superfície da fachada e da temperatura ambiente pelo software WUFI (BAUER et al., 2016a)

A inspeção foi efetuada com câmera termográfica FLIR T-400 com resolução de 320 x 240 pixels, com lente de 25°, que corresponde a um IFOV de 1,37, a uma distância de 18,5 metros. Os parâmetros de termografia quantitativa, emissividade e temperatura aparente refletida, são obtidos pelas mesmas metodologias usadas na investigação de laboratório. Para a obtenção da emissividade é adotado o método da emissividade conhecida, onde é fixado na superfície da fachada uma fita de isolante de cor preta, conforme as orientações da norma E 1933 (ASTM, 2002b) onde o valor de emissividade da investigação de campo é 0,95. A temperatura aparente refletida é determinada pelo método da lâmina de alumínio corrugada, seguindo as especificações da norma E1862 (ASTM, 2002a), onde o valor da temperatura aparente refletida da investigação de campo é 25 °C.

Depois de estabelecido a rotina de obtenção dos termogramas, referentes ao intervalo entre 8 e 18 horas, onde há um termograma para cada hora, é efetuado a análise quantitativa. Na análise quantitativa é identificado as fissuras e regiões sem defeito para o cálculo da temperatura da fissura (T_d) e temperatura da região sem defeito (T_{nd}). T_d é a média da temperatura dos pixels identificados como fissura nos termogramas. T_{nd} é a média da temperatura dos pixels identificados como região sem defeito nos termogramas. T_d e T_{nd} é

calculado para as três regiões delimitadas no termograma da fachada, conforme a figura 44 (a), nos intervalos de 8 a 18 horas.

O Delta-T é obtido pela diferença entre T_d e T_{nd} , onde cada fissura possui dois valores de Delta-T, conforme ilustra a figura 45. A evolução do Delta-T é observada durante o aquecimento e resfriamento, que compreende o intervalo de investigação, iniciando as 8 horas e finalizando as 18 horas. A evolução do Delta-T das fissuras lineares e ramificadas obtidas em campos são comparadas com a evolução de Delta-T obtida em laboratório, com o objetivo de identificar se há tendências no comportamento de Delta-T, da investigação de campo e laboratório, em função da forma da fissura.

4. RESULTADOS

A apresentação dos resultados segue a metodologia de investigação de termografia quantitativa, onde é estudado a evolução do Delta-T das fissuras lineares e ramificadas em revestimentos de argamassa. Objetiva-se identificar se as tendências de evolução de Delta-T diferem em função da forma da fissura, linear e ramificada, durante o aquecimento e resfriamento, e se as diferentes tendências de Delta-T, obtidas em investigação de laboratório, são observadas em investigação de campo.

4.1. EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DAS FISSURAS E REGIÃO SEM DEFEITO

A investigação da evolução da temperatura da fissura (T_d) e região sem defeito (T_{nd}) é efetuada para observar as tendências de comportamento de T_d e T_{nd} , durante o aquecimento e resfriamento. A investigação da evolução de T_d e T_{nd} indica os momentos, do aquecimento e resfriamento, onde as fissuras de uma mesma amostra assumem temperaturas diferentes entre si, que pode influenciar nos resultados de Delta-T.

4.1.1. Fissuras lineares

- Placa L1 (1 mm de largura por 5 mm de profundidade)

A evolução da temperatura das fissuras (T_d) e da região sem defeito (T_{nd}) é investigada na placa L1 (1 mm de abertura por 5 mm de profundidade), onde a localização das fissuras e regiões sem defeito são apresentadas na figura 52. A figura 52 demonstra que para a região de investigação da placa L1, há três fissuras e três regiões sem defeito, onde se obtém seis valores de Delta-T, pois cada fissura possui dois valores de Delta-T da região vizinha.

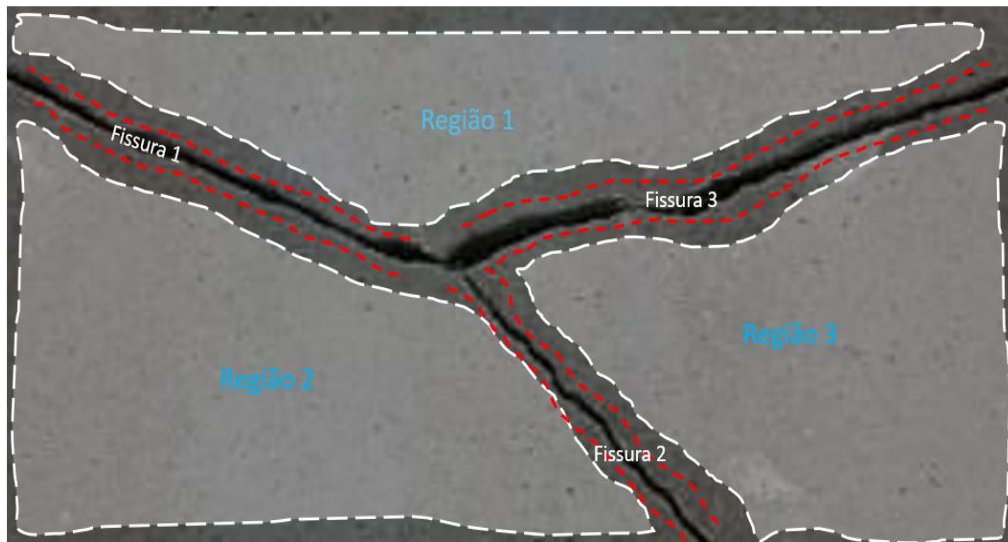


Figura 52 – identificação da posição das fissuras e regiões sem fissura da placa L1

A evolução de T_d e T_{nd} no aquecimento é apresentada na figura 53, como exemplo da evolução de temperatura das fissuras lineares, pois as fissuras lineares das outras placas possuem o mesmo comportamento. A figura 53 (a) apresenta a evolução dos valores de T_d e T_{nd} em todo o ciclo de aquecimento, onde não é possível identificar se há diferença entre os valores de T_d e T_{nd} . Nos primeiros 40 minutos do aquecimento, conforme descreve a figura 53 (b), os valores de T_d e T_{nd} possuem diferentes tendências de evolução, onde T_d pode assumir valores superiores a T_{nd} . Entre os 40 a 80 minutos do aquecimento, conforme apresenta a figura 53 (c), é observado que a tendência de evolução T_d e T_{nd} possui maior diferença entre si, comparado com o início do aquecimento

No fim do ciclo, entre 80 e 120 minutos do aquecimento, conforme a figura 53 (d), o ganho de temperatura de T_d e T_{nd} é inferior ao observado nos intervalos anteriores do aquecimento, no entanto a diferença entre os valores de T_d e T_{nd} é superior as obtidas nos intervalos apresentados nas figuras 53 (b) e figura 53 (c). A investigação da evolução de T_d e T_{nd} durante o aquecimento, indica que T_d pode assumir valores superiores a T_{nd} com a evolução do ciclo, o que conduz valores de ΔT positivos durante o aquecimento.

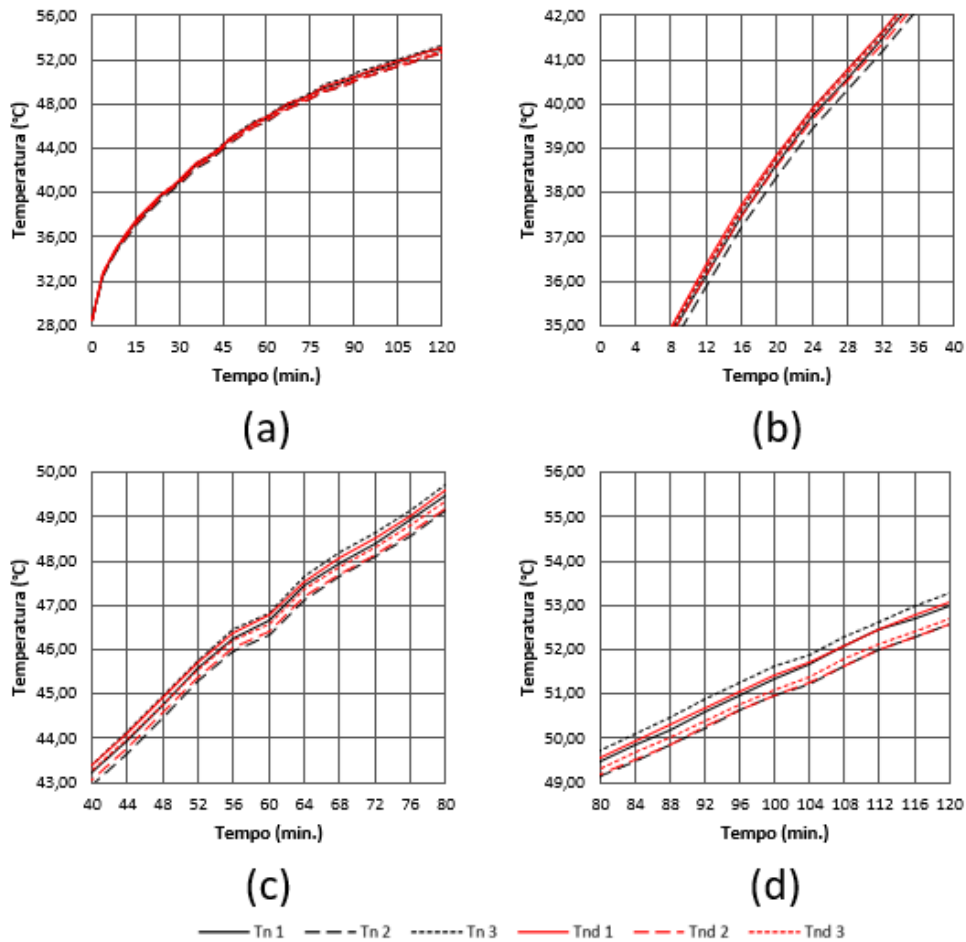


Figura 53 - Evolução de Td e Tnd no aquecimento da placa L1: (a) 0 a 120 minutos; (b) 20 minutos a 40 minutos; (c) 40 a 80 minutos; (d) 80 a 120 minutos

A evolução de Td e Tnd no resfriamento é apresentada na figura 54. Todo o resfriamento é apresentado na figura 54 (a), onde não é possível identificar, por condições de escala, diferença entre os valores de Td e Tnd durante a evolução do ciclo. Na figura 54 (b) é apresentado o resfriamento de Td e Tnd nos primeiros 40 minutos do ciclo, sendo identificado diferentes valores de Td e Tnd, onde Td é superior a Tnd. Na figura 54 (c), é observado que as diferenças entre Td e Tnd são menores que no início do resfriamento. Na figura 54 (d) os valores de Td e Tnd são semelhantes, o que indica que durante o resfriamento, Td é superior a Tnd, onde tendem a um equilíbrio de temperatura com a evolução do ciclo, o que conduz Delta-T positivo no resfriamento.

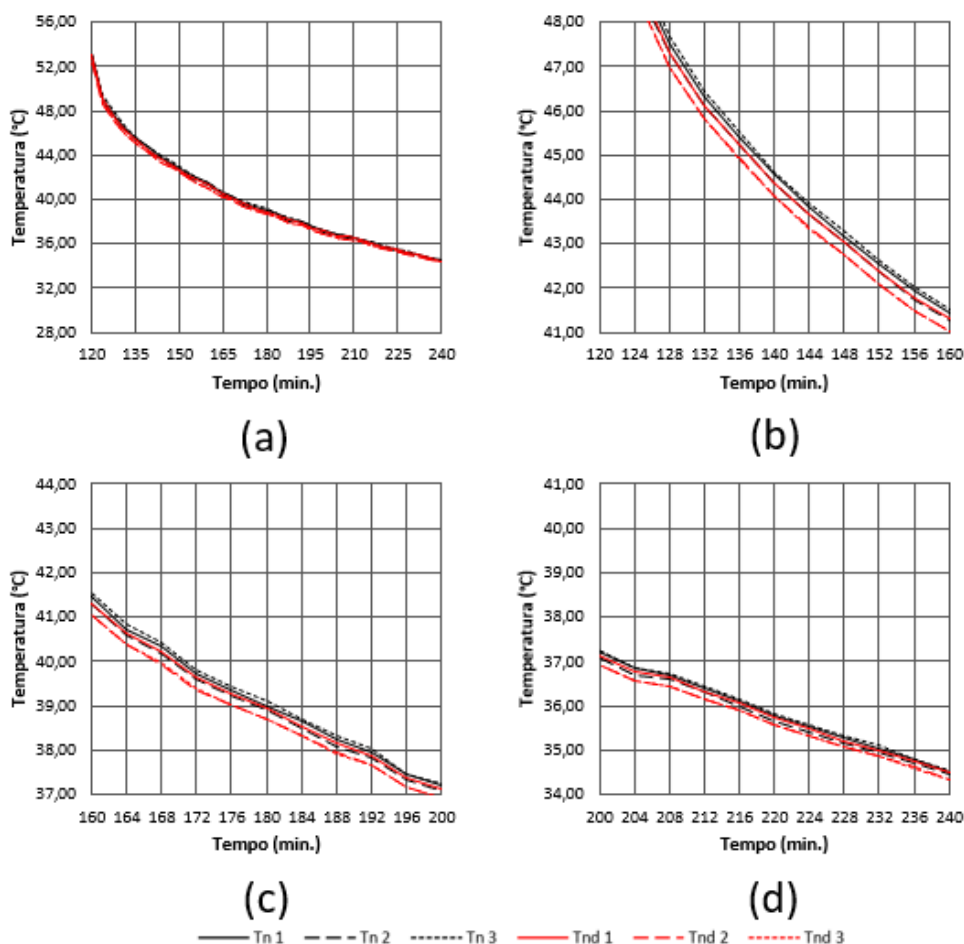


Figura 54 - Evolução de Td e Tnd no resfriamento da placa L1: (a) 120 a 240 minutos; (b) 120 minutos a 160 minutos; (c) 160 a 200 minutos; (d) 200 a 240 minutos

A investigação da evolução de Td e Tnd indica que, no aquecimento, os valores de Td e Tnd possuem maior diferença entre si comparado com o resfriamento. A evolução de Td e Tnd no aquecimento difere da evolução no resfriamento, pois, durante o aquecimento, os valores de Td e Tnd possuem maior diferença entre si com a evolução do ciclo. Durante o resfriamento, os valores de Td e Tnd tendem a serem semelhantes com a evolução do ciclo. A diferença dos valores de Td e Tnd que ocorre no aquecimento, indicam que, nesse ciclo, há maior possibilidade do Delta-T assumir comportamento anômalo, pois o comportamento esperado de Delta-T é negativo no aquecimento e positivo no resfriamento.

4.1.2. Fissuras ramificadas

- Placa R1 (1 mm de largura por 5 mm de profundidade)

A evolução da temperatura de Td e Tnd da placa R1 (1 mm de abertura por 5 mm de profundidade) é investigada, onde a localização das fissuras e regiões sem defeito são apresentadas na figura 55. Na figura 55 é apresentado que para a região de investigação da

placa R1, há oito fissuras e oito regiões sem defeito, onde se obtém dezesseis valores de Delta-T, pois cada fissura possui dois valores de Delta-T da região vizinha.

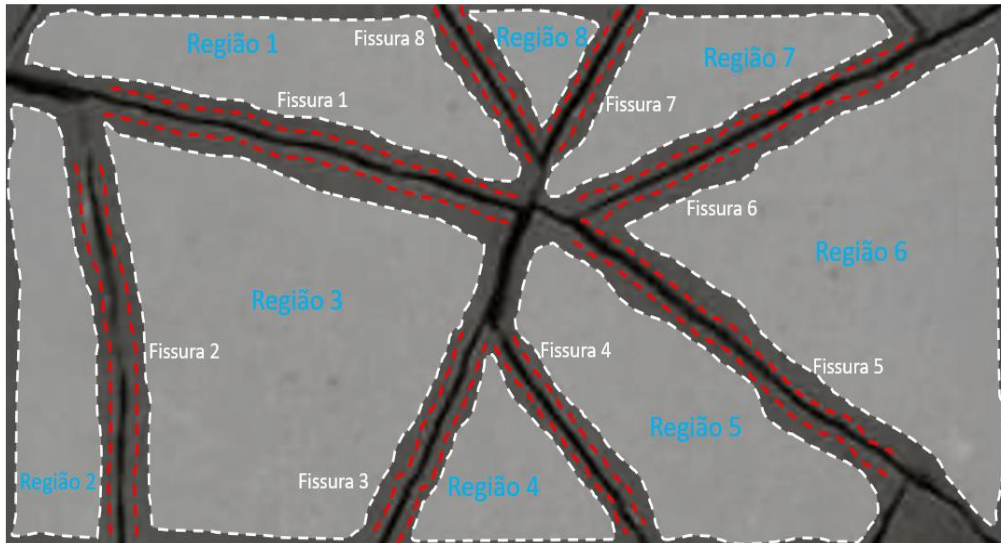


Figura 55 – Identificação da posição das fissuras e regiões sem fissura da placa R1

A evolução de T_d e T_{nd} é apresentada na figura 56, como exemplo da evolução de temperatura das fissuras ramificadas, pois as fissuras ramificadas das outras placas possuem a mesma tendência. Na figura 56 (a) é apresentado a evolução de T_d e T_{nd} durante todo o ciclo de aquecimento, onde é possível observar que há diferença entre os valores de T_d e T_{nd} com a evolução do aquecimento. A evolução dos primeiros 40 minutos do aquecimento é apresentada na figura 56 (b), onde é observado que, próximo aos 20 minutos do aquecimento, as diferenças entre T_d e T_{nd} são aproximadamente de 1 °C. Na figura 56 (c) é apresentado a evolução de T_d e T_{nd} no intervalo de 40 a 80 minutos, onde, com a evolução do aquecimento, há maior diferença entre os valores de T_d e T_{nd} , quando comparado com o intervalo anterior, apresentados na figura 56 (b). Na figura 56 (d) é apresentado a evolução de T_d e T_{nd} no fim do aquecimento, entre 80 e 120 minutos, onde o ganho de temperatura das fissuras e da região sem defeito é menor, porém a diferença entre T_d e T_{nd} é superior comparado aos intervalos anteriores.

Ao comparar a diferença entre T_d e T_{nd} no aquecimento da placa de fissuras lineares (L1), conforme a figura 53, com a placa de fissuras ramificadas (R1), conforme a figura 56, é observado que a diferença entre T_d e T_{nd} é superior para a placa R1. Consequente, as diferenças de T_d e T_{nd} que ocorrem nas placas lineares e ramificadas, indicam que fissuras ramificadas possuem maiores diferenças entre T_d e T_{nd} .

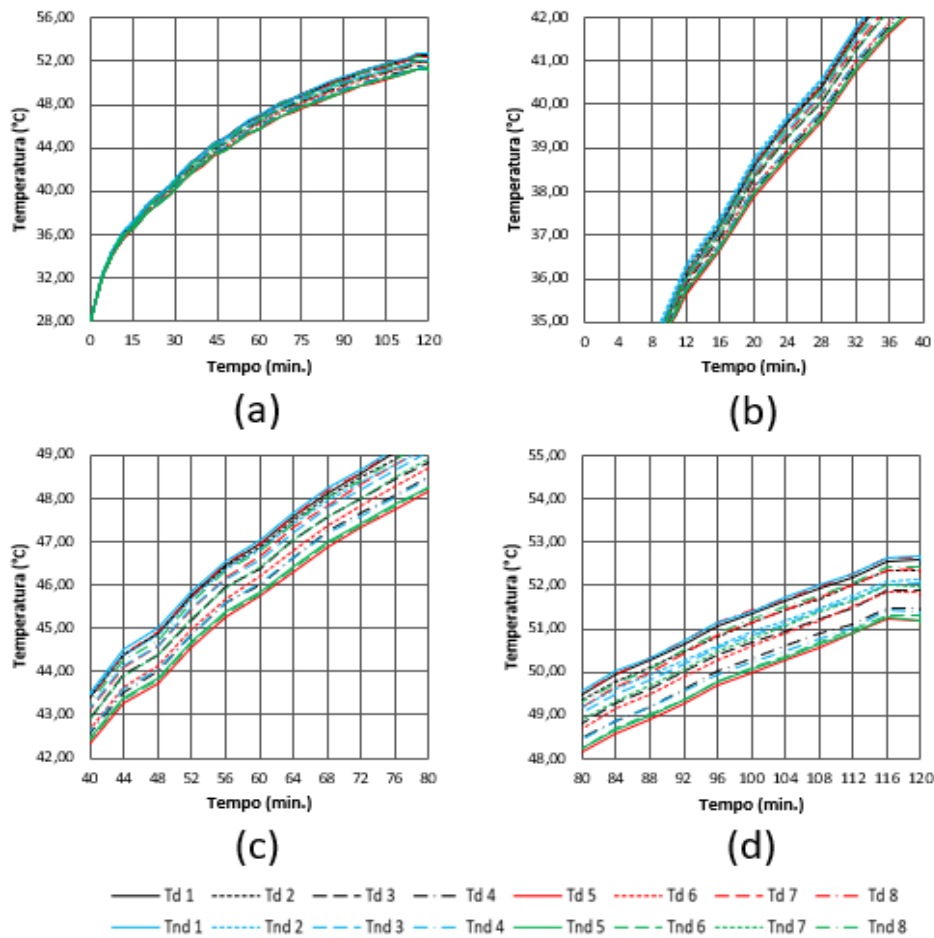


Figura 56 - Evolução de Td e Tnd no aquecimento da placa R1: (a) 0 a 120 minutos; (b) 00 minutos a 40 minutos; (c) 40 a 80 minutos; (d) 80 a 120 minutos

A evolução de Td e Tnd no resfriamento é apresentada na figura 57. A evolução de Td e Tnd durante todo o ciclo de resfriamento é apresentada na figura 57 (a), onde, por condição de escala, não é possível identificar as diferenças que ocorrem entre Td e Tnd. A evolução de Td e Tnd nos primeiros 40 minutos do resfriamento é apresentado na figura 57 (b), onde a diferença entre os valores de Td e Tnd que ocorre no intervalo entre 120 e 160 minutos, é constante. Para o intervalo de 160 a 200 minutos do resfriamento, conforme a figura 57 (c), é observado a redução da diferença entre os valores de Td e Tnd. Já no fim do ciclo de resfriamento, conforme apresenta a figura 57 (d), tanto a perda de temperatura como a diferença de Td e Tnd é menor quando comparada com os intervalos anteriores.

Ao comparar a evolução de Td e Tnd no resfriamento da placa L1, com fissuras lineares, conforme a figura 48, com a placa R1, com fissuras ramificadas, conforme a figura 57, é identificado que as diferenças entre Td e Tnd que ocorrem no resfriamento da placa ramificada é superior as diferenças que ocorrem na placa linear. As diferenças de Td e Tnd observadas nas fissuras lineares e ramificadas, indicam que as fissuras ramificadas possuem maior diferença de Td e Tnd no resfriamento, quando comparada com fissuras lineares.

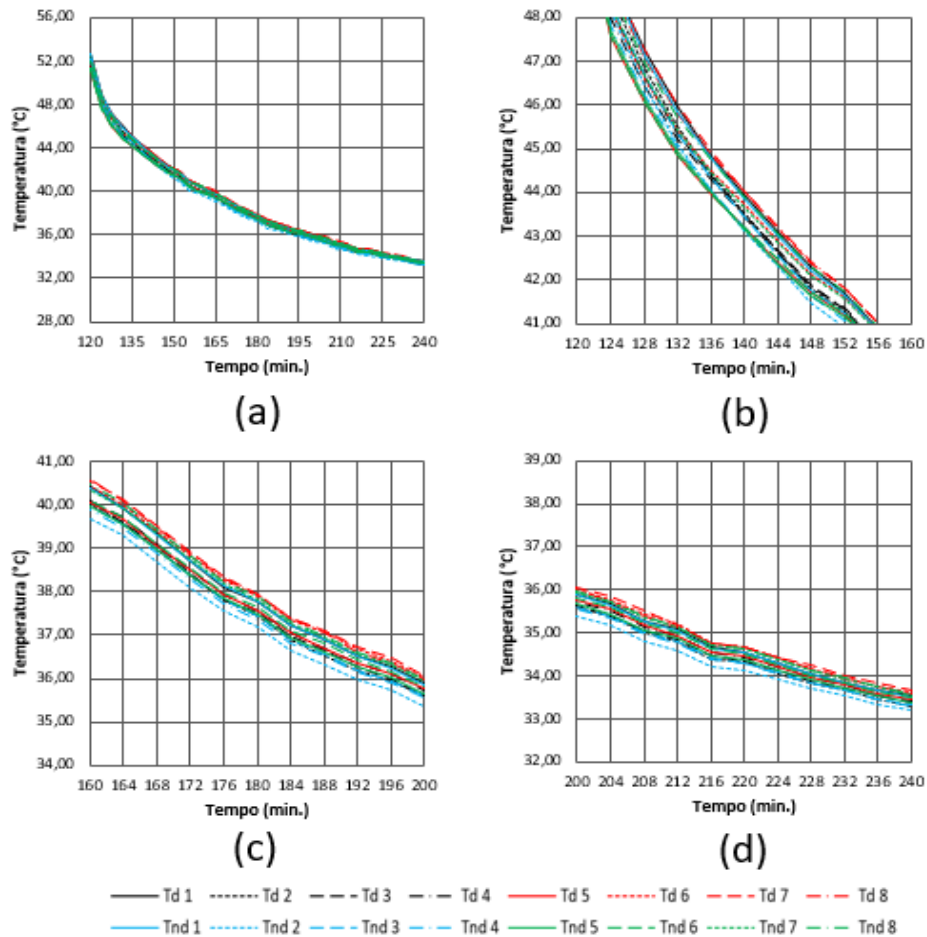


Figura 57 - Evolução de temperatura Td e Tnd no resfriamento da placa R1: (a) 120 a 240 minutos; (b) 120 minutos a 160 minutos; (c) 160 a 200 minutos; (d) 200 a 240

A investigação da evolução da Td e Tnd das placas com fissuras ramificadas, indicam que a diferença de Td e Tnd é influenciado pela forma da fissura, onde fissuras ramificadas possuem maior diferença entre Td e Tnd, quando comparado com a fissura lineares. Os valores de Td e Tnd, das fissuras lineares e ramificadas, possuem maior semelhança no resfriamento, quando comparado com o aquecimento, fazendo com que os valores de Delta-T obtidos no resfriamento sejam inferiores, em módulo, aos obtidos no aquecimento.

4.2. ANÁLISE DE EVOLUÇÃO DO DELTA-T

Na análise quantitativa é investigado a evolução de Delta-T, durante o aquecimento e resfriamento, das fissuras lineares e ramificadas, por meio da aplicação da equação 8. O Delta-T representativo de cada amostra, seja de fissura linear ou ramificada, é obtido pela média dos Delta-T selecionados pelos critérios de seleção exemplificados no item de desenvolvimento metodológico. Os critérios de seleção possibilitam estabelecer um Delta-T representativo para amostras que possuem múltiplos defeitos de mesma dimensão, largura

e profundidade, com base no comportamento evolutivo no aquecimento e resfriamento e diferença entre os valores de Delta-T médio.

4.2.1. Fissuras lineares

A evolução, durante o aquecimento e resfriamento, do Delta-T representativo das fissuras lineares é apresentado a seguir, onde é identificado o valor máximo e mínimo do Delta-T, durante a evolução dos ciclos e qual ciclo possui maior Delta-T em módulo.

- Placa L1 (1 mm de largura por 5 mm de profundidade)

A região de investigação da placa L1 é apresenta na figura 58, onde há três fissuras que possibilitam seis valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras lineares da placa L1 (1 mm de largura por 5 mm de profundidade), conforme apresenta a figura 59. O valor de Delta-T mínimo é observado no início do aquecimento e o valor de Delta-T máximo no início do resfriamento, onde, com a evolução dos ciclos, os valores de tendem a zero.

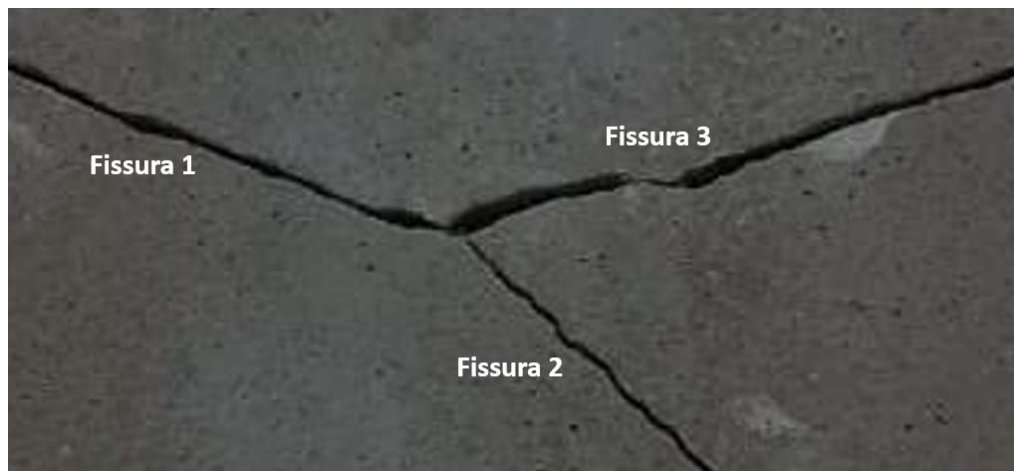


Figura 58 - Identificação das fissuras da placa L1

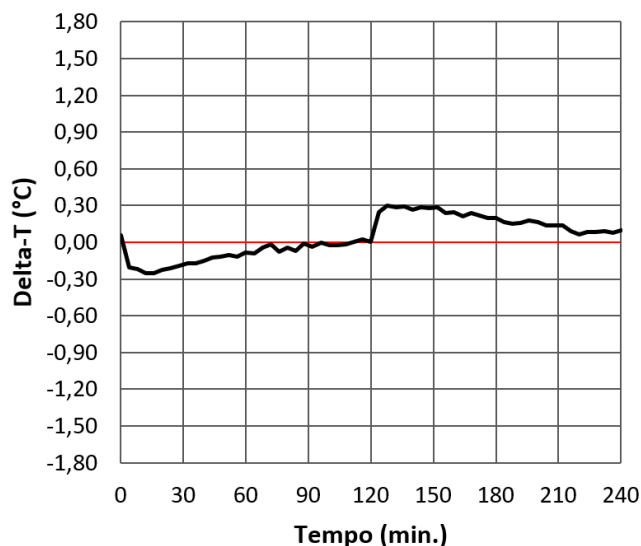


Figura 59 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L1

- Placa L2 (1 mm de largura por 10 mm de profundidade)

A região de investigação da placa L2 é apresentada na figura 60, onde há três fissuras que possibilitam seis valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras lineares da placa L2 (1 mm de largura por 10 mm de profundidade), conforme apresenta a figura 61. O valor de Delta-T mínimo, observado no início do aquecimento é maior, em módulo, ao Delta-T máximo do resfriamento, indicando que, para a investigação dessa placa, o ciclo de aquecimento possibilita maior Delta-T em módulo. Com a evolução dos ciclos, de aquecimento e resfriamento, os valores de Delta-T se aproximam de zero, onde o Delta-T no fim do aquecimento é superior, em módulo, ao Delta-T no fim do resfriamento.

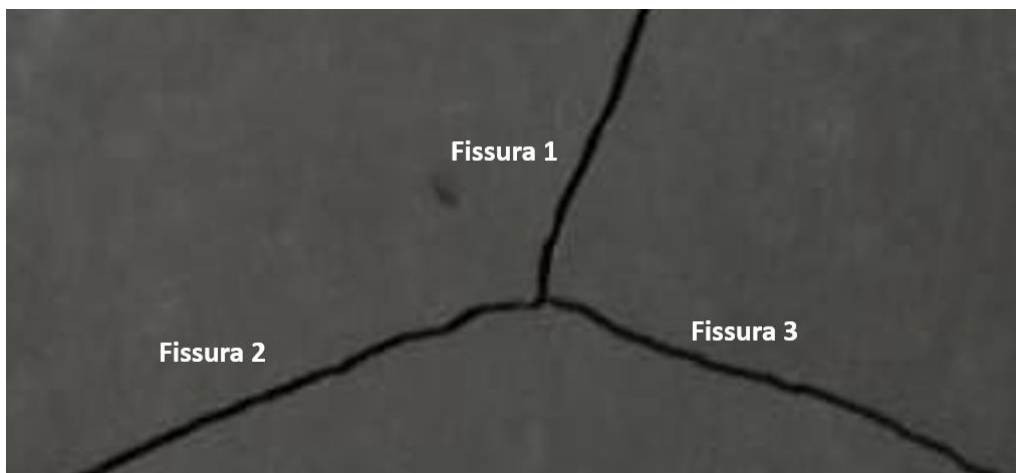


Figura 60 - Identificação das fissuras da placa L2

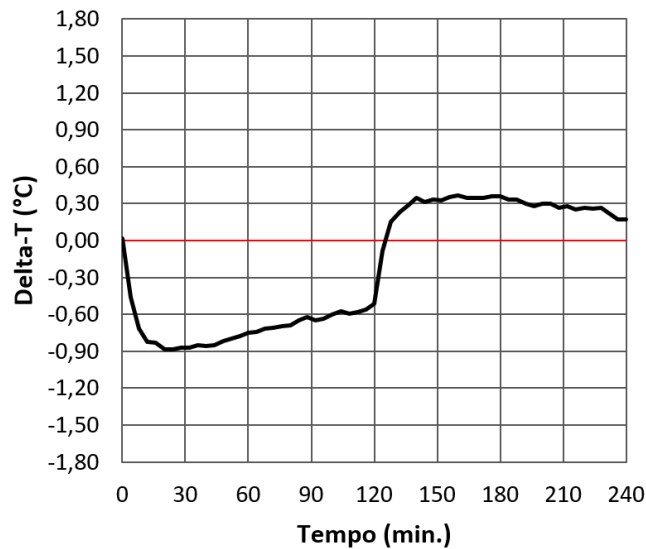


Figura 61 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L2

- Placa L3 (2 mm de largura por 10 mm de profundidade)

A região de investigação da placa L3 é apresentada na figura 62, onde há três fissuras que possibilitam seis valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras lineares da placa L3 (2 mm de largura por 10 mm de profundidade), conforme a figura 63. Para a evolução do Delta-T representativo da placa L3, no aquecimento e resfriamento, é observado que o valor de Delta-T mínimo e Delta-T máximo, são semelhantes em módulo, onde o Delta-T no fim do resfriamento possui maior proximidade de zero que o Delta-T no fim do aquecimento, o que pode indicar que, a velocidade de aquecimento é superior a velocidade de resfriamento.



Figura 62 -Identificação das fissuras da placa L3

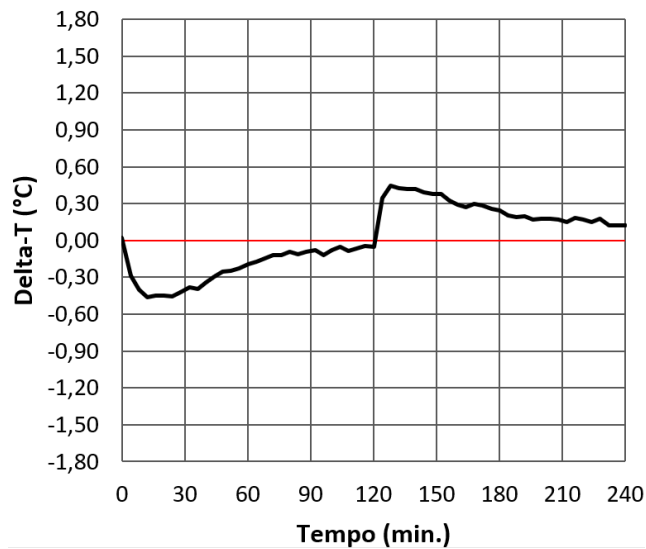


Figura 63 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L3

- Placa L4 (3 mm de largura por 5 mm de profundidade)

A região de investigação da placa L4 é apresentada na figura 64, onde há quatro fissuras que possibilitam oito valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras lineares da placa L4 (3 mm de largura por 5 mm de profundidade), conforme apresenta a figura 65. Durante a evolução do Delta-T representativo das fissuras da placa L4, é observado que o valor de Delta-T mínimo é ligeiramente superior, em módulo, ao Delta-T máximo obtido no resfriamento.

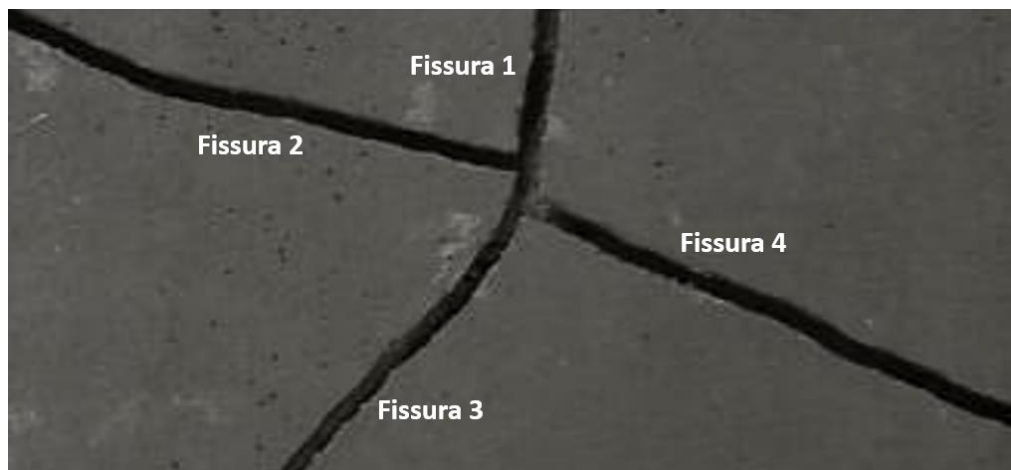


Figura 64 - Identificação das fissuras da placa L4

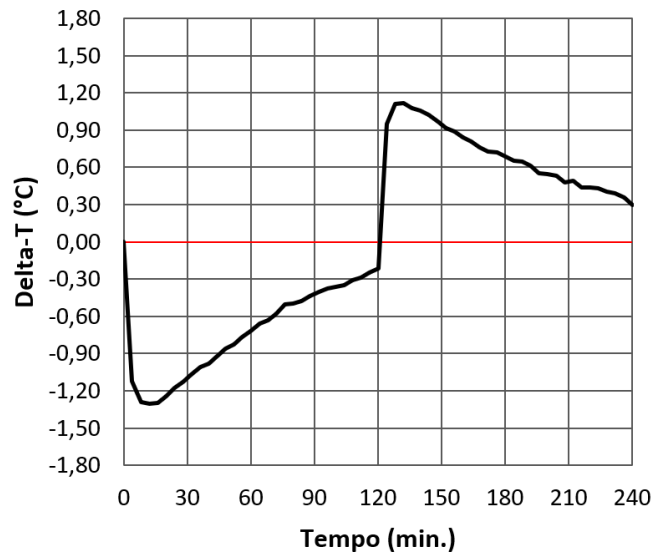


Figura 65 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L4

- Placa L5 (3mm de largura por 10 mm de profundidade)

A região de investigação da placa L5 é apresentada na figura 66, onde há quatro fissuras que possibilitam oito valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras lineares da placa L5 (3 mm de largura por 10 mm de profundidade), conforme a figura 67. Para a evolução do Delta-T representativo das fissuras da placa L5, é observado que o Delta-T mínimo, é superior, em módulo, ao Delta-T máximo obtido no resfriamento, onde a diferença dos valores de Delta-T máximo e mínimo são superiores as observadas na evolução de Delta-T das fissuras da placa L4, conforme a figura 65.



Figura 66 - Identificação das fissuras da placa L5

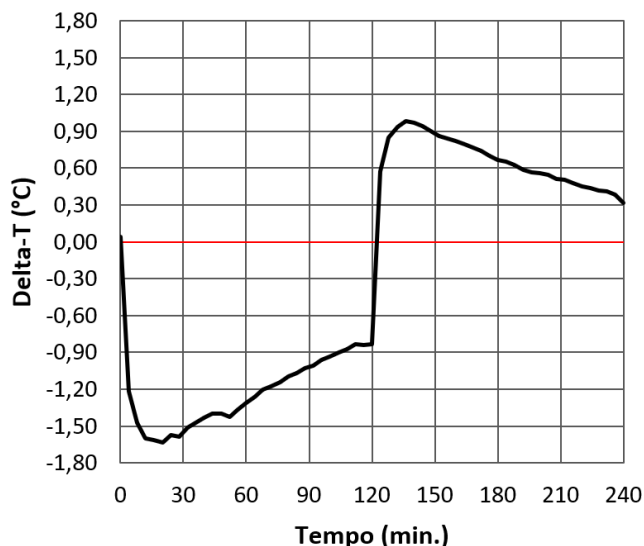


Figura 67 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L5

- Placa L6 (3 mm de largura por 15 mm de profundidade)

A região de investigação da placa L6 é apresentada na figura 68, onde há quatro fissuras que possibilitam oito valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras lineares da placa L6 (3 mm de largura por 15 mm de profundidade), conforme a figura 69. Para o Delta-T representativo da placa L6, os valores durante a evolução do aquecimento são semelhantes aos do resfriamento, pois no fim do aquecimento e resfriamento o Delta-T é próximo de 0,3 °C, porém o Delta-T mínimo do aquecimento é superior, em módulo, ao Delta-T máximo do resfriamento.

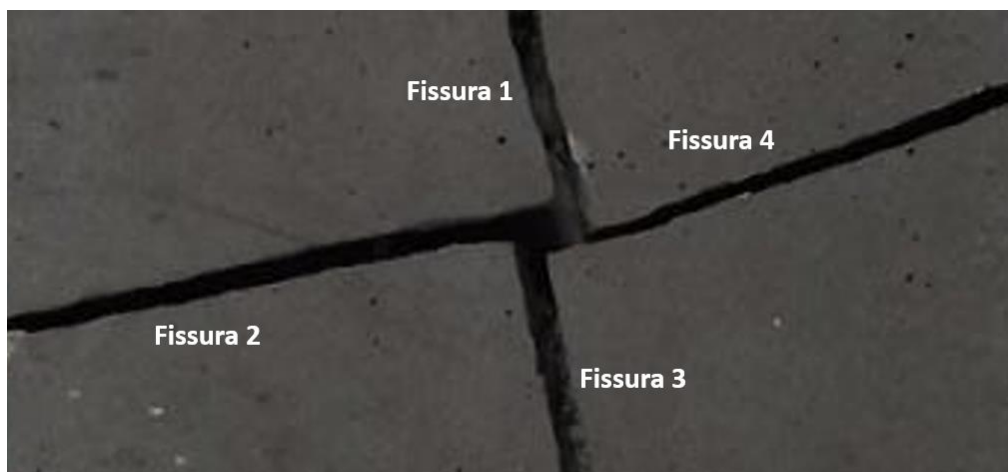


Figura 68 - Identificação das fissuras da placa L6

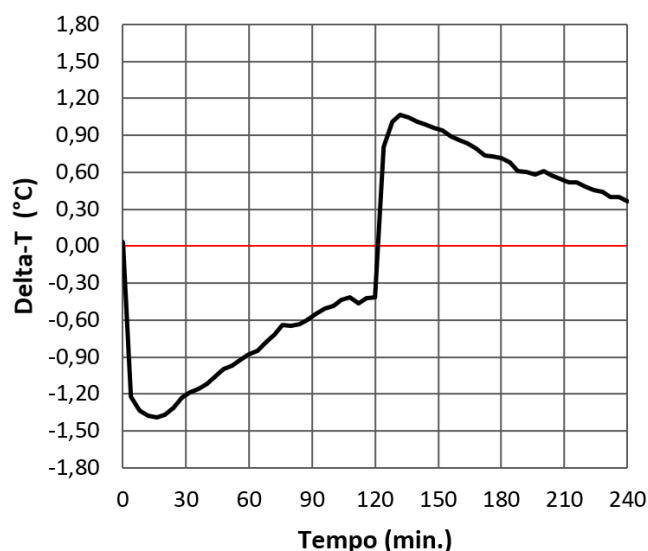


Figura 69 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa L6

A análise quantitativa, apresenta o comportamento do Delta-T, no aquecimento e resfriamento, representativo das placas com fissuras lineares. A evolução dos valores de Delta-T representativos de todas as fissuras lineares investigadas, é apresentada na figura 70. A figura 70 indica que os valores de Delta-T são superiores em módulo no aquecimento, quando comparado com o resfriamento, onde os valores de mínimo e máximo estão concentrados nos primeiros 30 minutos do aquecimento e do resfriamento, início dos ciclos. Os valores de Delta-T máximo e mínimo das fissuras então em função da largura da fissura, pois as placas que possuem fissuras com largura de 1 e 2 mm, possuem Delta-T, no aquecimento ou resfriamento, semelhantes e inferiores a 1 °C, em módulo. Já as placas com fissuras de largura igual a 3 mm, possuem Delta-T máximo e mínimo próximos de 1 °C, em módulo. A investigação da evolução de Delta-T de fissuras lineares com diferentes dimensões, largura profundidade, indicam que, para as fissuras lineares, o Delta-T é, veemente, influenciado pelas variações de largura da fissura.

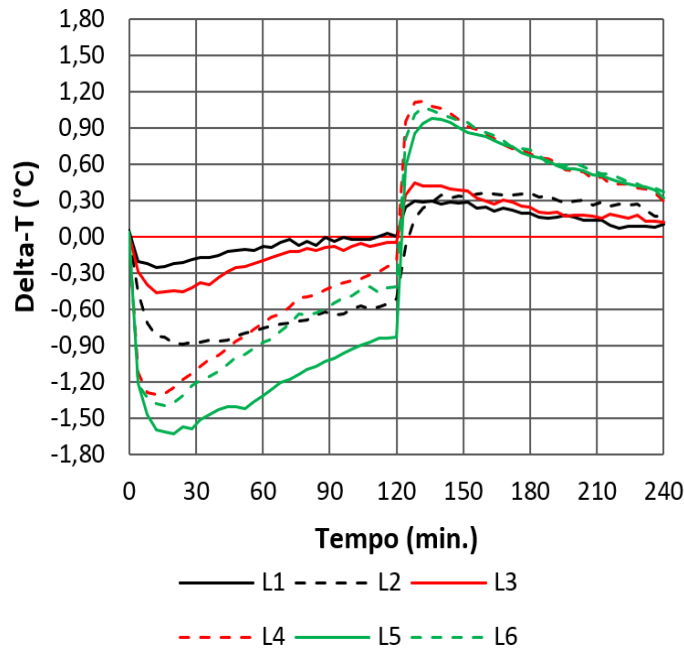


Figura 70 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo de todas das fissuras lineares

4.2.2. Delta-T das fissuras ramificadas

A evolução do Delta-T representativo das fissuras ramificadas, durante o aquecimento e resfriamento, é apresentada a seguir, onde é identificado o valor máximo e mínimo do Delta-T, durante a evolução dos ciclos e qual ciclo possui maior Delta-T em módulo

- Placa R1 (1 mm de largura por 5 mm de profundidade)

A região de investigação da placa R1 é apresenta na figura 71, onde há oito fissuras que possibilitam dezesseis valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras ramificadas da placa R1 (1 mm de largura por 5 mm de profundidade), conforme a figura 72. Durante a evolução do Delta-T no aquecimento e resfriamento, é observado que os valores são próximos de zero para ambos os ciclos, independente se está no início ou fim do ciclo, onde o momento de Delta-T mínimo e máximo não é claramente definido.

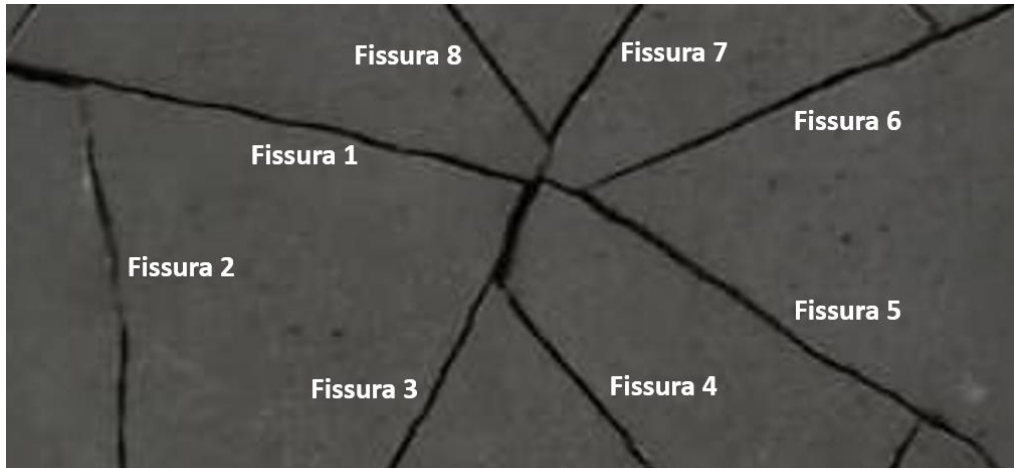


Figura 71 - Identificação das fissuras da placa R1

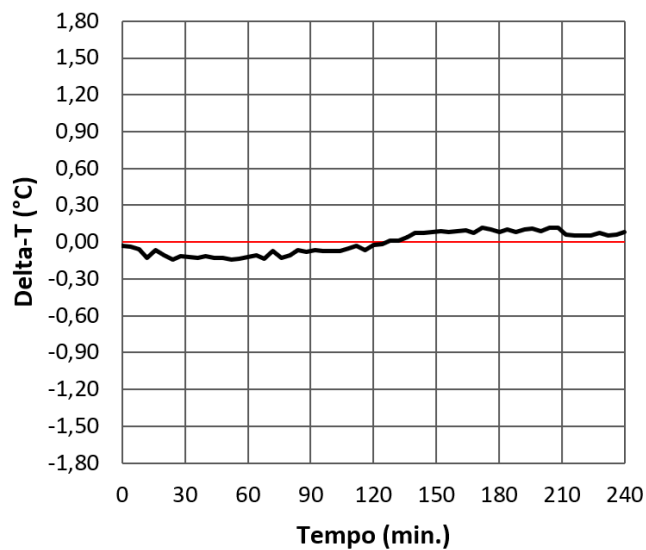


Figura 72 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R1

- Placa R2 (1 mm de largura por 10 mm de profundidade)

A região de investigação da placa R2 é apresentada na figura 73, onde há treze fissuras que possibilitam vinte e seis valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras ramificadas da placa R2 (1 mm de largura por 10 mm de profundidade), conforme a figura 74. A evolução do Delta-T representativo das fissuras ramificadas da placa R2, possui valor de mínimo e máximo semelhante em módulo, onde os valores de mínimo e máximo estão concentrados no início do aquecimento e resfriamento.

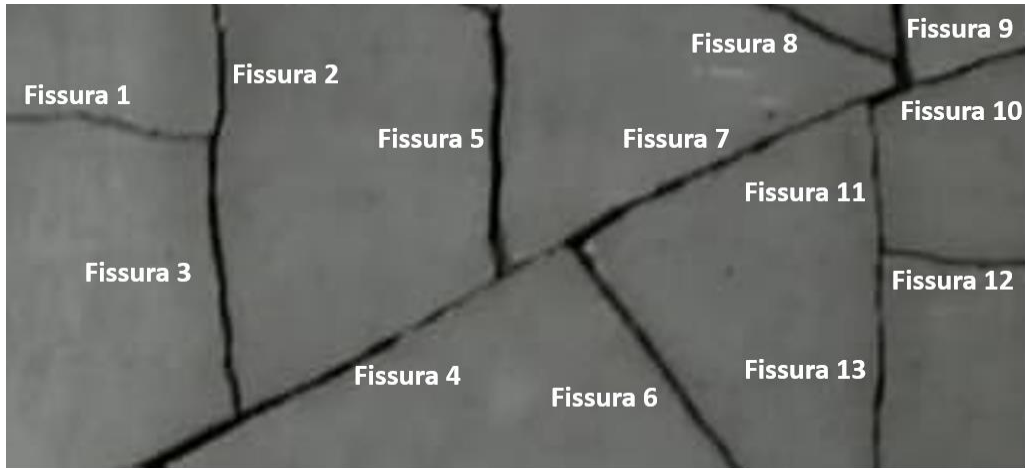


Figura 73 - Identificação das fissuras da placa R2

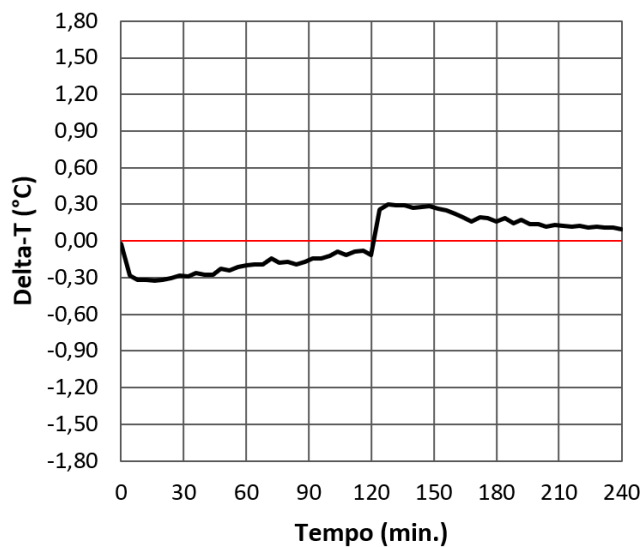


Figura 74 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R2

- Placa R3 (2 mm de largura por 10 mm de profundidade)

A região de investigação da placa R3 é apresentada na figura 75, onde há nove fissuras que possibilitam dezoito valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras ramificadas da placa R3 (2 mm de largura por 10 mm de profundidade), conforme a figura 76. Os valores de mínimo e máximo do Delta-T representativo das fissuras da placa R3, são semelhantes aos valores observados do Delta-T representativo da placa R2, conforme a figura 74, mas com o Delta-T mínimo é ligeiramente superior, em módulo, ao Delta-T máximo.



Figura 75 - Identificação das fissuras da placa R3

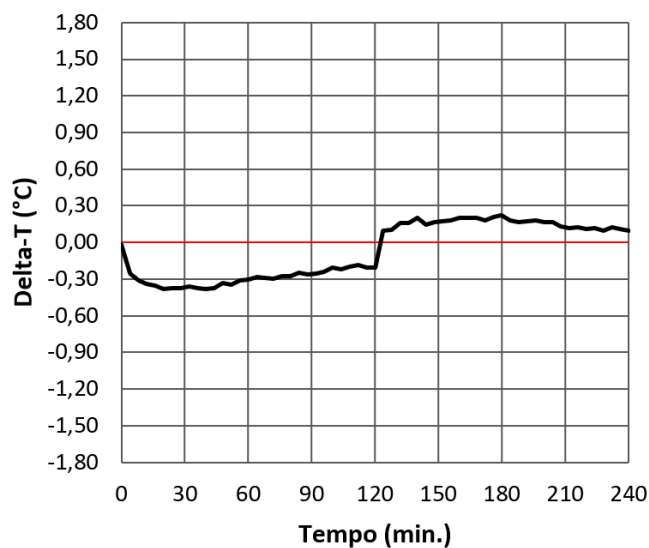


Figura 76 Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R3

- Placa R4 (3 mm de largura por 5 mm de profundidade)

A região de investigação da placa R4 é apresentada na figura 77, onde há quatro fissuras que possibilitam oito valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras ramificadas da placa R4 (3 mm de largura por 5 mm de profundidade), conforme a figura 78. Durante a evolução do Delta-T representativo das fissuras da placa L4, é observado que há um incremento dos valores de Delta-T mínimo e máximo, comparado com as investigações anteriores. Para as fissuras ramificadas da placa R4 o momento onde o Delta-T atinge valor mínimo e máximo é no início dos ciclos, sendo essa tendência clara para essa investigação. O Delta-T no fim do aquecimento possui maior proximidade com zero, quando comparado com o resfriamento, o que indica que, para a

investigação de Delta-T das fissuras ramificadas da placa R4, a velocidade de aquecimento é superior a velocidade de resfriamento.

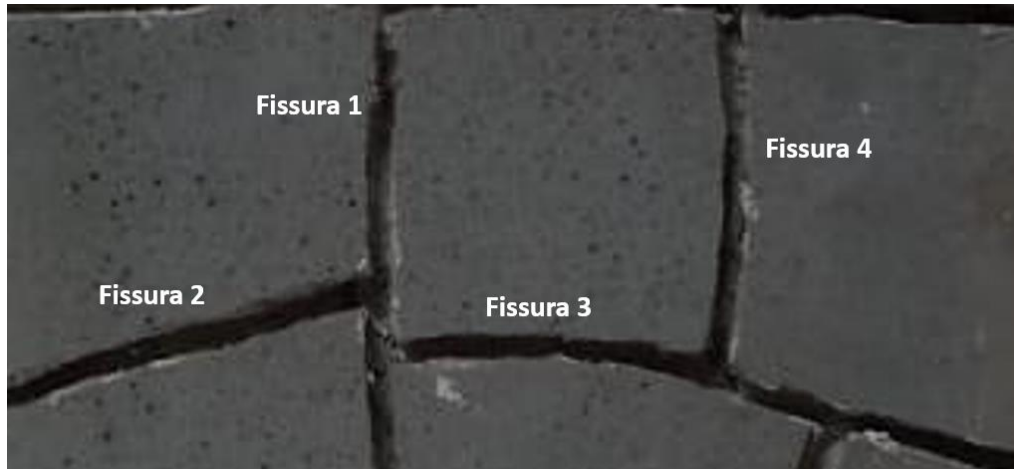


Figura 77 - Identificação das fissuras da placa R4

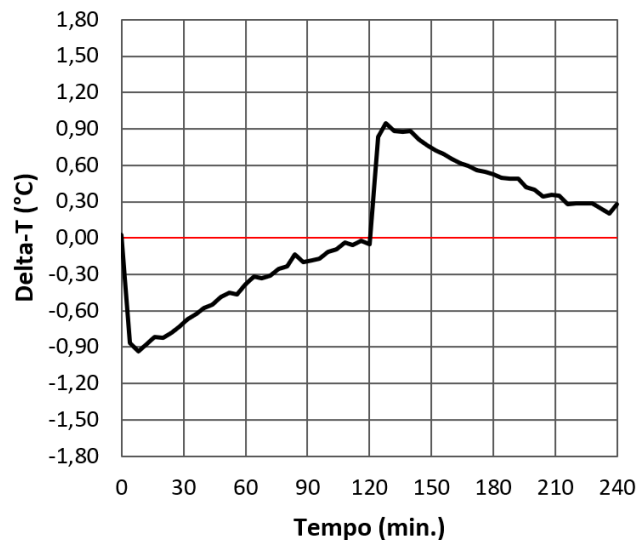


Figura 78 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R4

- Placa R5 (3 mm de largura por 10 mm de profundidade)

A região de investigação da placa R5 é apresentada na figura 79, onde há sete fissuras que possibilitam catorze valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras ramificadas da placa R5 (3 mm de largura por 10 mm de profundidade), conforme a figura 80. Para o Delta-T representativo das fissuras ramificadas da placa L5, é observado a tendência de que o Delta-T mínimo é superior, em módulo, ao Delta-T máximo do resfriamento, onde a velocidade de aquecimento é superior a velocidade de resfriamento.



Figura 79 - Identificação das fissuras da placa R5

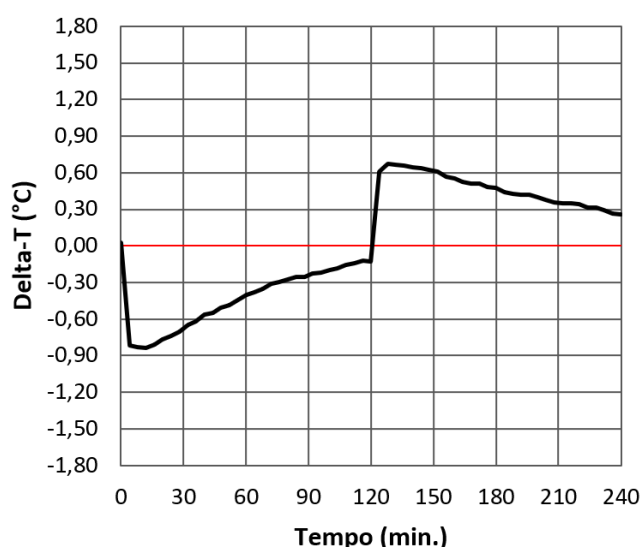


Figura 80 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R5

- Placa R6 (3 mm de largura por 15 mm de profundidade)

A região de investigação da placa R6 é apresentada na figura 81, onde há onze fissuras que possibilitam vinte e dois valores de Delta-T. Usando os critérios de seleção, de comportamento esperado e média de Delta-T no aquecimento e resfriamento, é obtido o Delta-T representativo das fissuras ramificadas da placa R6 (3 mm de largura por 15 mm de profundidade), conforme a figura 82. Para o Delta-T representativo das fissuras ramificadas da placa L6, é observado que durante o aquecimento o Delta-T mínimo é superior, em módulo ao Delta-T máximo do resfriamento. A velocidade de aquecimento é superior a velocidade de resfriamento, pois no fim do aquecimento o Delta-T é mais próximo de zero comparado com o fim do resfriamento.

O Delta-T máximo das fissuras ramificadas da placa R6 (3 mm de largura por 15 mm de profundidade) é semelhante ao Delta-T máximo das fissuras ramificadas da placa R5 (3 mm

de largura por 10 mm de profundidade), conforme a figura 80. A semelhança entre o Delta-T das fissuras ramificadas das placas R5 e R6, faz com que não sendo possível identificar diferença entre as fissuras por meio da evolução de Delta-T no resfriamento. A diferença entre o Delta-T das fissuras ramificadas das placas R5 e R6 é identificada no aquecimento, onde o Delta-T representativo das fissuras ramificadas da placa R6 é superior, em módulo, ao Delta-T representativo das fissuras ramificadas da placa R5.

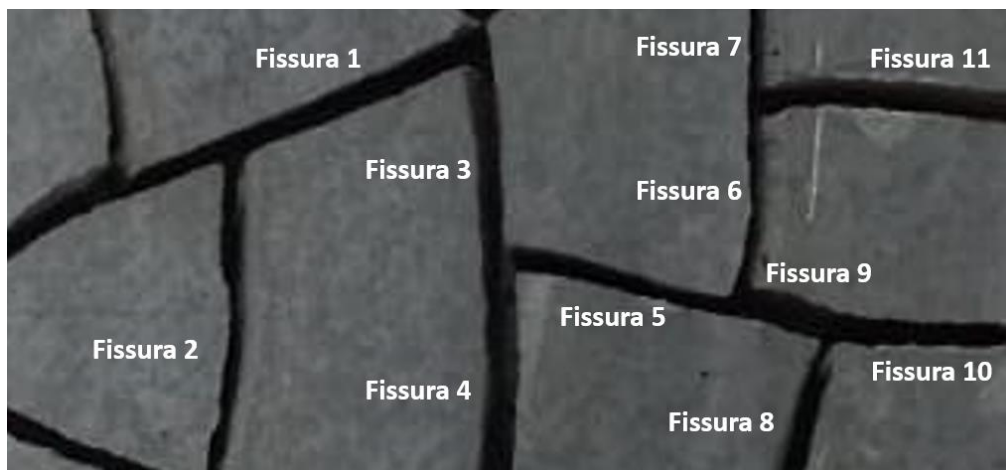


Figura 81 - Identificação das fissuras da placa R6

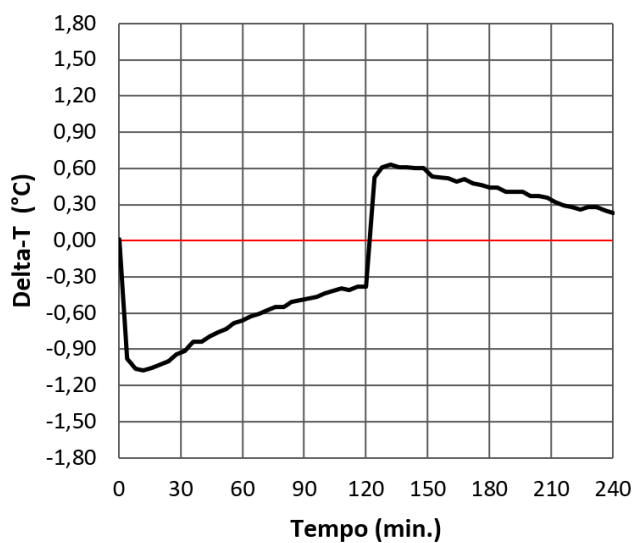


Figura 82 Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo das fissuras da placa R6

A análise quantitativa apresenta o comportamento do Delta-T representativo das placas com fissuras ramificadas durante o aquecimento e resfriamento. A evolução dos valores de Delta-T representativos de todas as fissuras ramificadas investigadas, é apresentada na figura 83. O Delta-T das fissuras ramificadas possui a mesma tendência de evolução observada nos Delta-T das fissuras lineares. As tendências de Delta-T observadas são: O Delta-T é maior, em módulo, no aquecimento, onde pode ser observado que os valores diferentes entre as

fissuras. O Delta-T aumenta com o aumento conjunto da largura e profundidade, onde as fissuras de 1 e 2 mm de largura possuem Delta-T semelhante e inferior, em módulo, ao Delta-T das fissuras de 3 mm de largura, no aquecimento e resfriamento, o que indica que os maiores valores de Delta-T, em módulo, estão associados a maiores larguras.

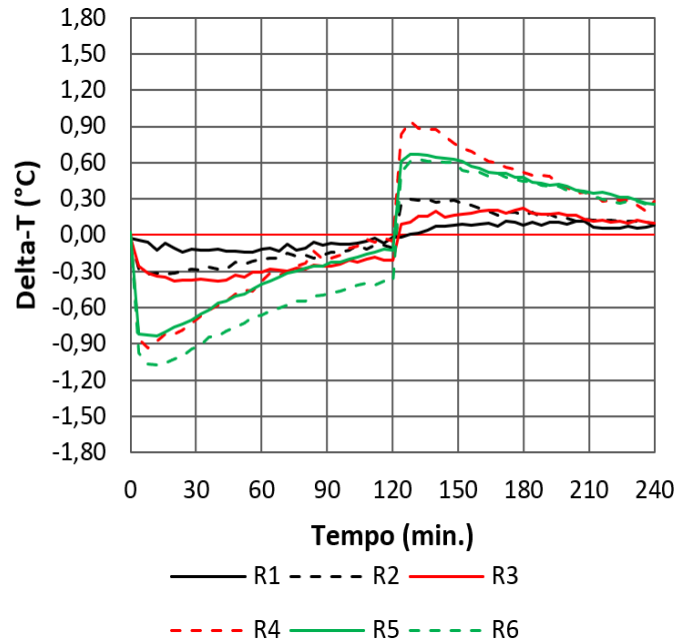


Figura 83 - Evolução durante o aquecimento e resfriamento do Delta-T representativo de todas das fissuras ramificadas

4.3. EVOLUÇÃO DO DELTA-T EM FUNÇÃO DA LARGURA E PROFUNDIDADE DA FISSURA

A investigação das tendências de evolução do Delta-T, no aquecimento e resfriamento, é efetuada em função da largura e profundidade das fissuras, para as fissuras lineares e ramificadas. A investigação é efetuada seguindo a etapa de investigação das variáveis dependentes e independentes estabelecida no desenvolvimento metodológico, onde é investigação a evolução do Delta-T em função da largura e, em seguida, em função da profundidade. Os resultados da investigação objetivam identificar como as características de forma e dimensão das fissuras afetam o comportamento do Delta-T durante o aquecimento e resfriamento.

4.3.1. Grupo 1 - Evolução do Delta-T em função largura

4.3.1.1. Análise 1 – Fissuras com profundidade de 5 mm e largura de 1 mm e 3 mm

- Fissuras lineares

A evolução de Delta-T, no aquecimento e resfriamento, das fissuras lineares com 5 mm de profundidade e 1 mm (Placa L1) e 3 mm de largura (placa L4) é apresentado na figura 84.

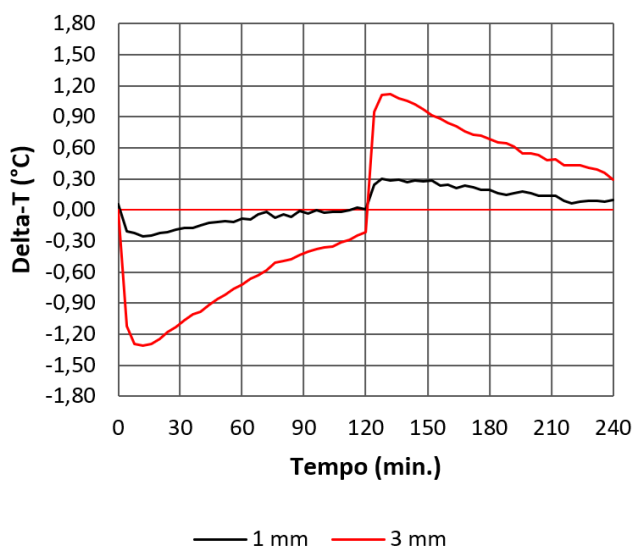


Figura 84 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras lineares com profundidade de 5 mm e largura de 1 mm e 3mm

Para as fissuras investigadas lineares (1 mm e 3 mm de largura), é observado que o Delta-T é máximo, em módulo, no início do aquecimento e resfriamento, onde a fissura de 3 mm de largura possui Delta-T máximo em módulo, aproximadamente, quatro vezes maior que o Delta-T máximo, em módulo da fissura de 1 mm. Conseqüentemente a maior largura da fissura linear, para uma profundidade de 5 mm, conduz, nessa investigação, a valores de Delta-T, maiores, indicando que o maior Delta-T está relacionado com maiores larguras da fissura.

A evolução de Delta-T no aquecimento para as fissuras de 5 mm de profundidade por 3 mm de largura, possui maior variação durante a evolução do ciclo, quando comparada com o Delta-T da fissura de 5 mm de profundidade por 1 mm de largura. A maior variação dos valores de Delta-T da fissura com largura de 3 mm, faz com que a curva que representa a evolução do Delta-T possua inclinação superior a curva que representa a evolução de Delta-T das fissuras de 1 mm de largura.

A inclinação das curvas de Delta-T no aquecimento, indica uma diferença, a contar do Delta-T mínimo até o Delta-T obtido no fim do ciclo, em torno de 1,0 °C, para a fissura com 3 mm de largura, e em torno de 0,30 °C, para a fissura de 1 mm de largura, conforme a figura 84. Conseqüente, durante o aquecimento as fissuras de maior largura possuem maior velocidade de aquecimento, quando comparada com fissuras de menor largura. A tendência da maior velocidade de aquecimento, atribuída a fissura de 3 mm, é observada no resfriamento.

Durante a evolução do resfriamento a fissura de 3 mm possui maior velocidade de resfriamento, no entanto a evolução do Delta-T da fissura de 1 mm de largura e do Delta-T da fissura de 3 mm, possui paralelismo, onde as inclinações das curvas são inferiores quando comparadas com a inclinação observada no aquecimento, indicando que a velocidade de resfriamento é inferior a velocidade de aquecimento.

- Fissuras ramificadas

A evolução de Delta-T, no aquecimento e resfriamento, das fissuras ramificadas com 5 mm de profundidade e 1 mm (Placa L1) e 3 mm de largura (placa L4) é apresentado na figura 85.

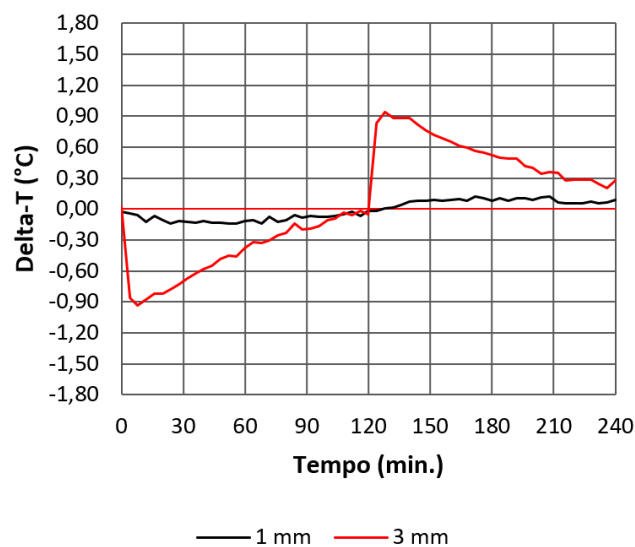


Figura 85 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras ramificadas com profundidade de 5 mm e largura de 1 mm e 3mm

Para as fissuras ramificadas de 1 mm largura, o momento que o Delta-T é máximo ou mínimo não é possível de ser identificado, pois a evolução de Delta-T, da fissura de 1 mm de largura, durante o aquecimento e resfriamento, é próximo de zero. A evolução de Delta-T da fissura de 5 mm de profundidade com 3 mm de largura, apresenta valor de Delta-T máximo e mínimo próximo a 1 °C, em módulo, ocorrendo no início do aquecimento e resfriamento. A evolução do Delta-T das fissuras de 1 mm de largura por 5 mm de profundidade, não possui a mesma tendência observada na fissura de 3 mm largura por 5 mm de profundidade. Conseqüentemente, a comparação dos valores de Delta-T e evolução no aquecimento e resfriamento entre as fissuras, não é efetuada com precisão.

A inclinação da curva de Delta-T, que representa a fissura de 5 mm de profundidade por 3 mm de largura, durante a evolução dos ciclos, garante maior velocidade de aquecimento e

resfriamento, comparado com a fissura de 1 mm de abertura, que mantém velocidade de aquecimento e resfriamento, aproximadamente, constante.

A investigação da evolução de Delta-T, durante o aquecimento e resfriamento, das fissuras lineares e ramificadas com profundidade de 5 mm e largura de 1 mm e 3 mm, possibilita a comparação das tendências de Delta-T em função da forma da fissura. O Delta-T das fissuras lineares e ramificadas possuem valor mínimo e valor máximo no início do aquecimento e resfriamento, onde, com a evolução dos ciclos, os valores de Delta-T são menores em módulo. Para as fissuras lineares e ramificadas, maiores larguras de fissuras conduzem a maiores valores de Delta-T, onde o Delta-T mínimo, predominantemente, é superior, em módulo, ao Delta-T máximo. A velocidade de aquecimento e resfriamento é maior em função do aumento da largura da fissura, onde a velocidade de aquecimento é superior a velocidade de resfriamento, sendo esse comportamento observado para as fissuras lineares e ramificadas.

A semelhança do comportamento evolutivo de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas, indicam que a evolução do Delta-T é igual para fissuras lineares e ramificadas. Consequentemente, o aquecimento e resfriamento da fissura e região sem defeito ocorre da mesma forma para as fissuras lineares e ramificadas, o que indica que a investigação quantitativa por Delta-T é igual para diferentes formas de fissura. A tabela 9 apresenta os valores de Delta-T máximo e mínimo e as velocidades de aquecimento e resfriamento. Os dados da tabela 9, identificam que as fissuras ramificadas possuem Delta-T máximo e mínimo, inferior, em módulo, ao Delta-T máximo e mínimo das fissuras lineares, onde a velocidade de aquecimento e resfriamento é menor para as fissuras ramificadas. Consequentemente, as fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência evolutiva durante o aquecimento e resfriamento, porém os valores de Delta-T das fissuras ramificadas são inferiores, o que indica que em uma investigação de termografia, fissuras de mesma dimensão, mas com formas diferentes, podem assumir diferentes valores de Delta-T.

Identificação	P (mm)	L (mm)	Delta-T mín. (°C)	Delta-T máx. (°C)	Velocidade de Aq. (°C/hora)	Velocidade de Res. (°C/hora)
L1	5	1	-0,25	0,30	0,14	0,11
L4	5	3	-1,31	1,12	0,60	0,46
R1	5	1	-0,14	0,12	0,10	0,06
R4	5	3	-0,93	0,94	0,47	0,36

Tabela 9 - Propriedades da evolução de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas de 5 mm de profundidade e 1 mm e 3 mm de largura, sendo (P) profundidade e (L) largura

4.3.1.2. Análise 2 – Fissuras com profundidade de 10 mm e largura de 1 mm, 2 mm e 3 mm

- Fissuras lineares

A evolução de Delta-T, no aquecimento e resfriamento, das fissuras lineares com 10 mm de profundidade e 1 mm (placa L2), 2 mm (placa L3) e 3 mm (placa L5) de largura é apresentado na figura 86.

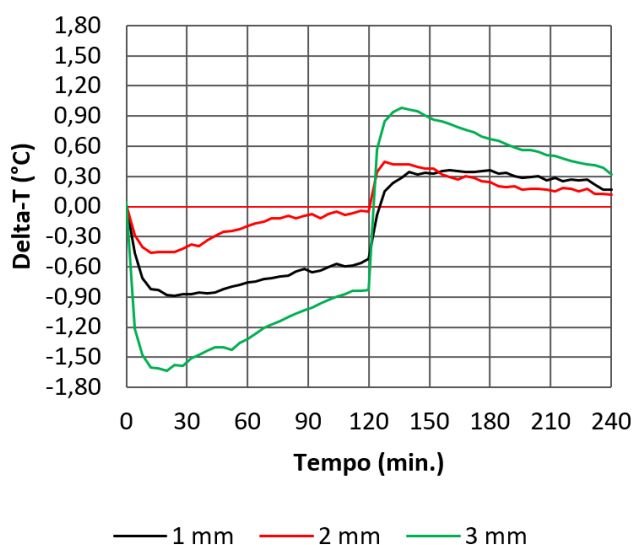


Figura 86 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras lineares com profundidade de 10 mm e largura de 1 mm, 2 mm e 3 mm

Durante a evolução do aquecimento, é observado diferença entre os valores de Delta-T, superior ao observado no resfriamento, conforme a figura 86. Durante a evolução do aquecimento, a fissura com 3 mm de largura por 10 mm de profundidade possui o maior Delta-T, em módulo, durante todo o ciclo, onde o menor Delta-T, em módulo, é apresentado pela fissura de 2 mm de largura por 10 mm de profundidade. O Delta-T da fissura de 1 mm de largura por 10 mm de profundidade, apresenta Delta-T mínimo, no aquecimento, aproximadamente, três vezes maior, em módulo, que o Delta-T máximo, no resfriamento, o indica não uniformidade da evolução do Delta-T durante o aquecimento e resfriamento.

Durante o resfriamento, a diferença da evolução do Delta-T das fissuras é menor, comparado com o aquecimento, onde o Delta-T da fissura com largura de 3 mm é superior ao Delta-T das fissuras de 1 mm e 2 mm durante a evolução do ciclo, conforme a figura 80. No resfriamento, a evolução do Delta-T das fissuras de 1 mm e 2 mm de largura são semelhantes,

no entanto a fissura de 1 mm de largura, assume valor máximo de Delta-T próximo aos 180 minutos do resfriamento. Consequentemente, na investigação da evolução de Delta-T de fissuras lineares com profundidade de 10 mm e largura de 1 mm, 2 mm e 3 mm, o Delta-T, referente fissura com 1 mm de largura, possui maior diferença dos valores de Delta-T em relação as outras fissuras investigadas.

Durante a evolução do aquecimento e resfriamento, é observado a velocidade do Delta-T das fissuras em função das diferentes larguras. O Delta-T das fissuras de 1 mm e 2 mm de largura, possui evolução paralela, durante o ciclo de aquecimento, o que indica que as fissuras com 1 mm e 2 mm de largura possuem velocidade de aquecimento semelhantes. A fissura 3 mm de abertura por 10 mm de profundidade, possui velocidade de resfriamento superior as fissuras de 1 mm e 2 mm de largura por 10 mm de profundidade, conforme apresenta a figura 86.

Consequentemente, na investigação de evolução de Delta-T, durante o aquecimento e resfriamento, das fissuras lineares com 10 mm de profundidade e 1 mm, 2 mm e 3 mm de largura, é indicado diferença do Delta-T em função da largura da fissura. A evolução de Delta-T, no aquecimento e resfriamento, demonstra que os maiores valores de Delta-T em módulo, e velocidade de aquecimento e resfriamento, estão relacionados com maiores larguras de fissura.

- Fissuras ramificadas

A evolução de Delta-T, no aquecimento e resfriamento, das fissuras ramificadas com 10 mm de profundidade e 1 mm (placa R2), 2 mm (placa R3) e 3 mm (placa R5) de largura é apresentado na figura 87.

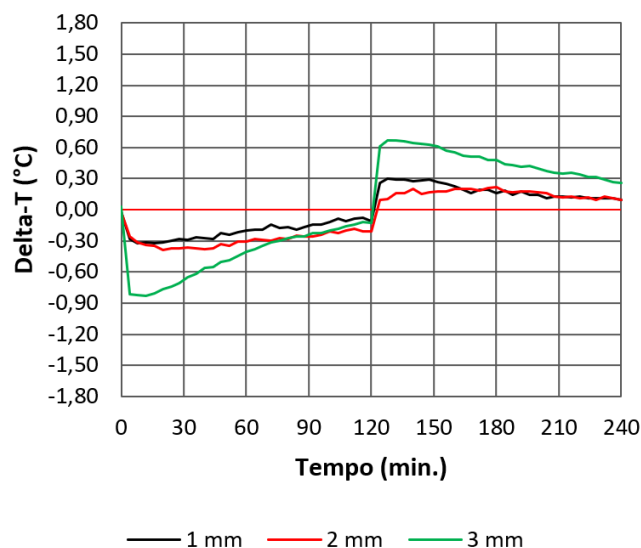


Figura 87 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras ramificadas com profundidade de 10 mm e largura de 1 mm, 2 mm e 3 mm

Durante a evolução do Delta-T representativo das fissuras ramificadas com 10 mm de profundidade e 1 mm, 2 mm e 3 mm de largura, no aquecimento e resfriamento, é observado tendência de comportamento semelhante aos Delta-T das fissuras lineares, conforme a figura 87. Durante o aquecimento, a fissura de 3 mm de largura possui maior Delta-T, em módulo, comparado com o Delta-T das outras fissuras, onde a fissura com 1 mm de largura possui valores de Delta-T semelhantes aos valores de Delta-T da fissura de 2 mm.

Durante o resfriamento, os valores de Delta-T, máximo, das fissuras ramificadas de 10 mm de profundidade e 1 mm, 2 mm e 3 mm de largura, são inferiores, em módulo, ao Delta-T mínimo observado no aquecimento, conforme a figura 87. A fissura com 3 mm de largura possui o maior Delta-T durante a evolução do resfriamento, onde o Delta-T das fissuras com 1 mm e 2 mm de largura são semelhantes com a evolução do ciclo.

A velocidade de aquecimento do Delta-T apresentada pelas fissuras da figura 87, indicam que a velocidade de aquecimento é superior para fissura de 3 mm de largura. As fissuras de 1 mm e 2 mm possuem evolução paralela, durante o ciclo de aquecimento, indicando que possuem velocidade de aquecimento semelhante. A fissura de 3 mm possui maior velocidade de aquecimento, que faz com que, no fim do ciclo, possua valor de Delta-T semelhante ao Delta-T das fissuras de 1 mm e 2 mm.

A velocidade de resfriamento das fissuras de 10 mm de profundidade e 1 mm e 2 mm de largura, é semelhante, fazendo com que, durante a evolução do ciclo, possuam o mesmo valor de Delta-T. A fissura de 3 mm de largura possui velocidade de resfriamento superior

às das fissuras de 1 mm e 2 mm, o que indica que fissuras de maior largura possuem maior velocidade de aquecimento e resfriamento.

A investigação da evolução do Delta-T representativo das fissuras lineares e ramificadas de 10 mm de profundidade com largura de 1 mm, 2 mm e 3 mm possibilitam a comparação das tendências de Delta-T de fissuras de diferentes formas. As fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência de evolução, onde o Delta-T é máximo, em módulo, no início dos ciclos e o maior Delta-T, em módulo, está associado a fissura de maior largura. A tabela 10 apresenta as propriedades de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas, onde é observado que os valores de Delta-T mínimo e máximo são menores, em módulo para as fissuras ramificadas. Consequentemente, fissuras ramificadas possuem a mesma tendência de evolução de Delta-T das fissuras lineares, porém os valores de Delta-T das fissuras ramificadas são inferiores.

Identificação	P (mm)	L (mm)	Delta-T mín. (°C)	Delta-T máx. (°C)	Velocidade de Aq. (°C/hora)	Velocidade de Res. (°C/hora)
L2	10	1	-0,89	0,36	0,23	0,15
L3	10	2	-0,46	0,44	0,23	0,17
L5	10	3	-1,63	0,98	0,48	0,38
R2	10	1	-0,33	0,30	0,11	0,11
R3	10	2	-0,38	0,22	0,11	0,12
R5	10	3	-0,83	0,67	0,38	0,22

Tabela 10 - Propriedades da evolução de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas de 10 mm de profundidade e 1 mm, 2 mm e 3 mm de largura, sendo (P) profundidade e (L) largura

4.3.2. Grupo 2 - Evolução do Delta-T em função da profundidade

4.3.2.1. Análise 1 – Fissuras com largura de 1 mm e profundidade de 5 mm e 10 mm

- Fissuras lineares

A evolução de Delta-T, no aquecimento e resfriamento, das fissuras lineares com 1 mm de largura e 5 mm (placa L1) e 10 mm (placa L2) de profundidade, é apresentado na figura 88.

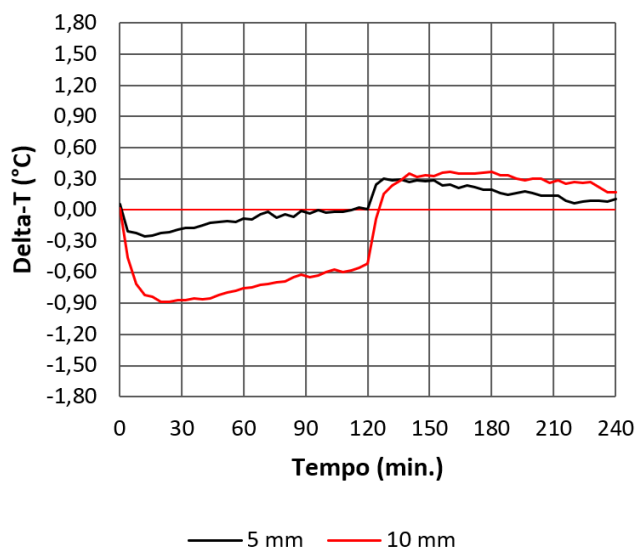


Figura 88 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras lineares com largura de 1 mm e profundidade de 5 mm e 10 mm

Durante a evolução de Delta-T, no aquecimento, a fissura de 10 mm profundidade possui Delta-T superior, em módulo, a fissura de 5 mm de profundidade, onde a fissura de 10 mm de profundidade possui Delta-T diferente de zero no fim do ciclo, conforme a figura 88. A fissura de 5 mm de profundidade possui valor de Delta-T próximo de zero com a evolução do aquecimento. A evolução de Delta-T no aquecimento, indica que maiores profundidades da fissura conduzem a maiores valores de Delta-T, em módulo.

Durante o resfriamento a evolução de Delta-T das fissuras de 5 mm e 10 mm de profundidade é semelhante, comparado com a evolução de Delta-T no aquecimento, onde a diferença de profundidade entre as fissuras não garante a mesma diferença de Delta-T observada no aquecimento. No resfriamento a fissura de 10 mm de profundidade possui Delta-T superior a fissura de 5 mm, indicando que maiores valores de Delta-T no resfriamento estão em função de maiores profundidades de fissura.

A velocidade de aquecimento do Delta-T das fissuras investigadas na figura 88, apresenta que a fissura com 10 mm de profundidade possui maior velocidade de aquecimento. A maior velocidade de aquecimento do Delta-T para a fissura de 10 mm de profundidade, em comparação a fissura de 5 mm de profundidade, indica que fissuras de maior profundidade possuem maior velocidade de aquecimento.

A velocidade de resfriamento é inferior a velocidade de aquecimento para as fissuras investigadas na figura 88, onde a fissura de 10 mm de profundidade possui velocidade de resfriamento superior as fissuras de 5 mm de profundidade. Consequentemente, o aumento

da profundidade da fissura garante maior velocidade no aquecimento e resfriamento do Delta-T, onde a velocidade de aquecimento é superior a velocidade de resfriamento.

- Fissuras ramificada

A evolução de Delta-T, no aquecimento e resfriamento, das fissuras ramificadas com 1 mm de largura e 5 mm (placa L1) e 10 mm (placa L2) de profundidade, é apresentado na figura 89.

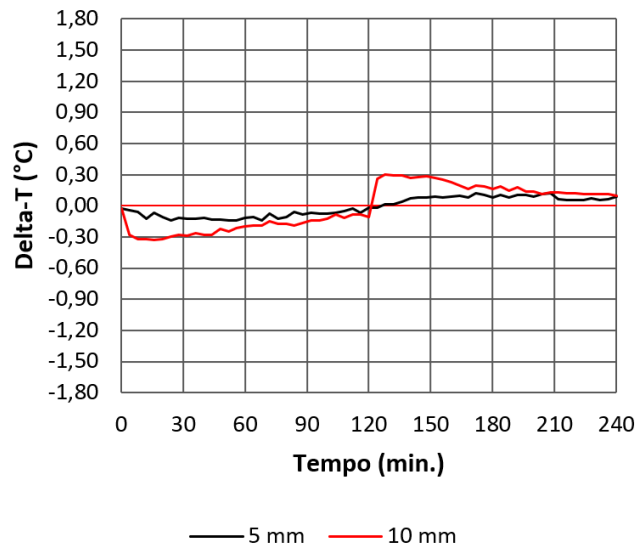


Figura 89 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras ramificadas com largura de 1 mm e profundidade de 5 mm e 10 mm

Durante a evolução do aquecimento é observado que o valor mínimo de Delta-T é obtido no início do ciclo, para ambas as fissuras da figura 89, onde a fissura com 10 mm de profundidade possui Delta-T superior em módulo durante a evolução do ciclo. A evolução de Delta-T, durante o aquecimento da fissura de 1 mm de largura e 5 mm de profundidade, é próxima de zero durante todo o ciclo, não sendo claramente identificado o momento em que o Delta-T é mínimo. Consequentemente, maiores profundidades da fissura conduzem a maiores valores Delta-T em módulo durante o aquecimento.

A evolução do resfriamento apresenta a mesma tendência observada no aquecimento, onde as fissuras de maior profundidade conduzem a maiores valores de Delta-T. O maior Delta-T no resfriamento para as fissuras com 10 mm de profundidade, indica que maiores profundidades de fissura conduzem maiores valores de Delta-T, em módulo, no aquecimento e no resfriamento.

A velocidade de aquecimento e resfriamento do Delta-T é superior para as fissuras de maior profundidade. A fissura com 10 mm de profundidade possui velocidade de aquecimento e

resfriamento do Delta-T superior a fissura de 5 mm de profundidade, o que indica que a velocidade de aquecimento e resfriamento é maior para maiores valores de profundidade.

A investigação da evolução do Delta-T das fissuras lineares e ramificadas de 1 mm de largura com 5 mm e 10 mm de profundidade, possibilitam a comparação das tendências de Delta-T de fissuras de diferentes formas. As fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência de evolução de Delta-T, durante aquecimento e resfriamento, em função da diferença de profundidade da fissura. A tabela 11 apresenta os valores de Delta-T e velocidade de aquecimento e resfriamento do Delta-T, onde é observado que as fissuras ramificadas possuem menor valor de Delta-T máximo e mínimo, em módulo, e menor velocidade de aquecimento e resfriamento.

Identificação	P (mm)	L (mm)	Delta-T mín. (°C)	Delta-T máx. (°C)	Velocidade de Aq. (°C/hora)	Velocidade de Res. (°C/hora)
L1	5	1	-0,25	0,30	0,14	0,11
L2	10	1	-0,89	0,36	0,23	0,15
R1	5	1	-0,14	0,12	0,10	0,06
R2	10	1	-0,33	0,30	0,11	0,11

Tabela 11 - Propriedades da evolução de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas de 1 mm de largura e 2 mm e 3 mm de profundidade, sendo (P) profundidade e (L) largura

4.3.2.2. Análise 2 – Fissuras com largura de 3 mm e largura de 1 mm, 2 mm e 3 mm

- Fissuras lineares

A evolução de Delta-T, no aquecimento e resfriamento, das fissuras lineares com 3 mm de largura e 5 mm (placa L4), 10 mm (placa L5) e 15 mm (placa L6) de profundidade, é apresentado na figura 90.

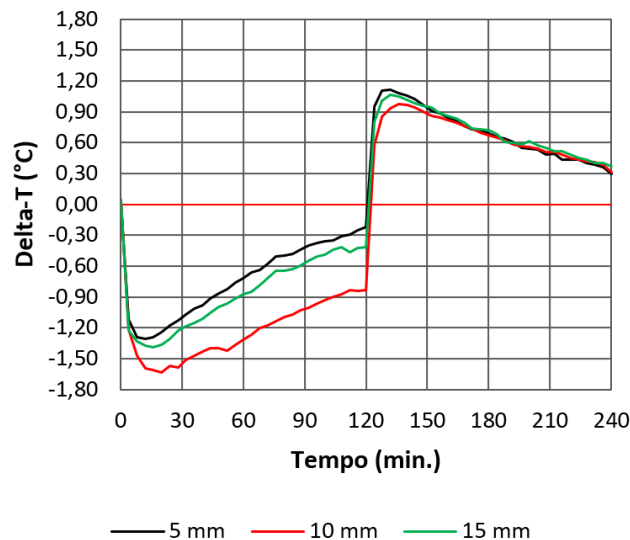


Figura 90 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras lineares com largura de 3 mm e profundidade de 5 mm, 10 mm e 15 mm

Durante a evolução do aquecimento, é observado que a fissura de maior profundidade não é a que possui maior Delta-T em módulo, não apresentando a tendência de evolução de Delta-T das investigações anteriores, que seria o esperado, pois, até então, maiores valores de profundidade e largura conduzem maiores valores de Delta-T em módulo. No aquecimento, a fissura de 10 mm de profundidade possui o maior Delta-T, em módulo, onde as fissuras com 5 mm e 15 mm de profundidade possuem Delta-T mínimo semelhante.

Durante o resfriamento a fissura de maior profundidade não possui o maior Delta-T, onde a tendência de evolução do Delta-T, obtido nas investigações anteriores, em que o Delta-T é maior em módulo para maiores profundidades de fissura, não é observado. Para o resfriamento, a fissura de 5 mm de profundidade possui maior Delta-T, onde os valores de Delta-T das fissuras investigadas, são semelhantes, assumindo mesmo valor de Delta-T durante a evolução do ciclo.

A tendência observada do Delta-T, no aquecimento e resfriamento, das fissuras de maior profundidade apresentadas na figura 90, não descrevem que os maiores valores de Delta-T, em módulo, são atribuídos a maiores profundidades. O comportamento de Delta-T das fissuras investigadas na figura 90, pode estar associado com a largura da fissura, onde as diferenças de profundidade podem não possuir influencia considerável nos valores de Delta-T para maiores larguras de fissura.

A velocidade de aquecimento do Delta-T das fissuras investigadas na figura 90 é semelhante, fazendo com que a evolução do Delta-T das fissuras durante o aquecimento seja paralela até o fim do ciclo. A velocidade de aquecimento do Delta-T em função de diferentes

profundidades indica que, para fissuras com 3 mm de largura, a variação da profundidade não é tão pertinente na velocidade de aquecimento do Delta-T.

A velocidade de resfriamento do Delta-T das fissuras investigadas na figura 90 são semelhantes entre si, fazendo com que os valores de Delta-T das fissuras sejam semelhantes durante a evolução do resfriamento. Consequente, durante a evolução do resfriamento, não é possível diferenciar as fissuras de 3 mm de largura com profundidades de 5mm, 10 mm, e 15 mm em função do valor de Delta-T. A semelhança na velocidade de resfriamento entre as fissuras investigadas, indica que a variação de profundidade não possui grande impacto na velocidade de resfriamento.

- Fissuras ramificadas

A evolução de Delta-T, no aquecimento e resfriamento, das fissuras ramificadas com 3 mm de largura e 5 mm (placa L4), 10 mm (placa L5) e 15 mm (placa L6) de profundidade, é apresentado na figura 91.

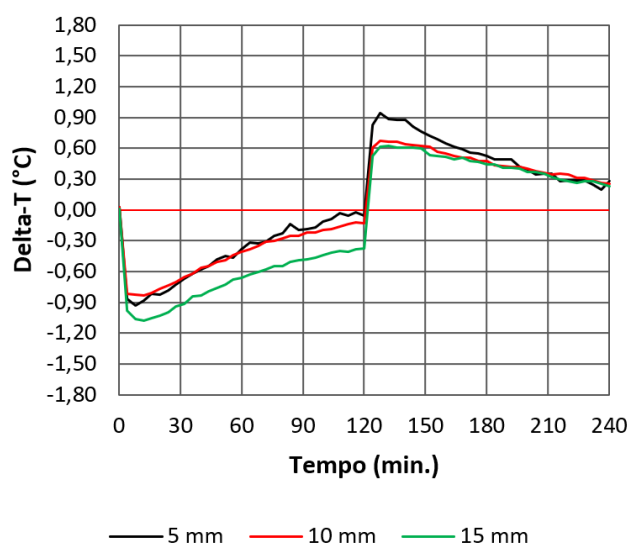


Figura 91 - Evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento das fissuras ramificadas com largura de 3 mm e profundidade de 5 mm, 10 mm e 15 mm

Durante a evolução do aquecimento, a fissura de 15 mm de profundidade possui maior Delta-T, em módulo, em relação as fissuras de 5 mm e 10 mm de profundidade, onde a evolução de Delta-T das fissuras de 5 mm e 10 mm de profundidade são semelhantes. No aquecimento as maiores profundidades de fissuras conduzem a maiores valores de Delta-T.

Durante o resfriamento a fissura com 5 mm de profundidade possui o maior Delta-T máximo. A diferença entre os valores de Delta-T das fissuras, de 5 mm, 10 mm e 15 mm de profundidade, no resfriamento, é melhor identificada no momento em que o Delta-T é

máximo, pois com a evolução do ciclo, os valores de Delta-T tendem a serem semelhantes. Durante o resfriamento as fissuras de 10 mm e 15 mm de profundidade são semelhantes em todo o ciclo, indicando que, no ciclo de resfriamento, fissuras de profundidades diferentes podem assumir valores semelhantes de Delta-T.

A velocidade de aquecimento do Delta-T das fissuras da figura 91 é semelhante, pois é observado que, durante o aquecimento, a evolução dos Delta-T das fissuras investigadas segue de forma paralela, onde a fissura de maior profundidade não possui velocidade de aquecimento superior as fissuras de 5 mm e 10 mm. A igualdade entre os valores de velocidade de aquecimento de Delta-T, indica que as variações de profundidade das fissuras possuem baixa influência na evolução do Delta-T.

A velocidade de resfriamento do Delta-T das fissuras investigadas na figura 91 é semelhante entre si, onde o Delta-T da fissura de 5 mm de profundidade possui velocidade de resfriamento, ligeiramente, superior, as fissuras de 10 mm e 15 mm de profundidade, onde a velocidade de resfriamento das fissuras de 10 e 15 mm de profundidade são semelhantes. Conseqüentemente, a velocidade de resfriamento, das fissuras investigadas, não sofre variação, significativa, em função da profundidade da fissura.

A investigação da evolução do Delta-T das fissuras lineares e ramificadas de 3 mm de largura com 5 mm, 10 mm e 15 mm de profundidade, possibilitam a comparação das tendências de Delta-T de fissuras de diferentes formas. As fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência de evolução durante o ciclo de aquecimento e resfriamento, sendo os valores de Delta-T das fissuras ramificadas inferiores os valores de Delta-T das fissuras lineares. Para fissuras de 3 mm de largura, a variação da profundidade possui baixa influencia na evolução do Delta-T, sendo observado esse comportamento nas fissuras lineares e ramificadas. A tabela 12 apresenta os valores de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas investigadas. O valor de Delta-T das fissuras lineares é superior, em módulo, os valores de Delta-T das fissuras ramificadas, o que indica que, em uma investigação de termografia, fissuras com dimensões iguais podem possuir diferentes valores de Delta-T em função da forma da fissura.

Identificação	P (mm)	L (mm)	Delta-T mín. (°C)	Delta-T máx. (°C)	Velocidade de Aq. (°C/hora)	Velocidade de Res. (°C/hora)
L4	5	3	-1,31	1,12	0,60	0,46
L5	10	3	-1,63	0,98	0,48	0,38
L6	15	3	-1,39	1,07	0,57	0,39
R4	5	3	-0,93	0,94	0,47	0,36
R5	10	3	-0,83	0,67	0,38	0,22
R6	15	3	-1,07	0,63	0,39	0,22

Tabela 12 - Propriedades da evolução de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas de 3 mm de largura e 5 mm, 10 mm e 15 mm de profundidade, sendo (P) profundidade e (L) largura

A investigação da evolução do Delta-T em função da variação da largura e profundidade da fissura, indicam que fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência de evolução de Delta-T durante o aquecimento e resfriamento, independente da dimensão da fissura, largura e profundidade. As fissuras lineares e ramificadas diferem, durante a evolução do aquecimento e resfriamento, nos valores de Delta-T, onde as fissuras lineares possuem Delta-T superior. Os menores valores de Delta-T das fissuras ramificadas dificultam a investigação de pequenas fissuras, como as fissuras da placa R1 (1 mm de largura e 5 mm de profundidade) onde a identificação de Delta-T máximo e mínimo e evolução durante o aquecimento e resfriamento não é definido de forma clara. Consequentemente, em uma investigação de termografia, os valores de Delta-T, no aquecimento e resfriamento, são dependentes da forma da fissura.

A evolução de Delta-T obtida na investigação, onde é analisado, o comportamento do Delta-T em função da largura (grupo 1) e em função da profundidade (grupo 2), indicam que maiores valores de Delta-T estão relacionados com maiores dimensão da fissura, largura e profundidade. Tanto a largura com a profundidade conduzem variações nos valores de Delta-T, onde a variação da largura da fissura possui influencia superior a variação da profundidade, nos valores de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas. Consequentemente, o Delta-T de uma fissura está relacionado com largura e profundidade, conjuntamente, onde maiores valores de Delta-T, não estão, de forma estrita, relacionados com maiores valores de profundidade, pois a largura possui maior influência, comparado a profundidade, nos valores no Delta-T no aquecimento e resfriamento.

4.4. LARGURA DA FISSURA

A largura da fissura é calculada a partir do número de pixel que possuem temperatura inferior ou superior, a depender do aquecimento e resfriamento, em relação a região sem defeito. O

produto do número de pixels que representam a fissura, IFOV da lente da câmera termográfica e distância do alvo, corresponde a largura da fissura em milímetros, sendo calculado conforme a equação 7. A investigação da largura da fissura é efetuada nas placas de fissura linear, sendo investigado as fissuras com evolução de Delta-T no aquecimento e resfriamento, mais próximo do valor de Delta-T médio obtido pelos critérios de seleção. A investigação da largura das fissuras ramificadas não é efetuada, pois a mensuração da largura depende da evolução da temperatura da fissura, onde é definido, nos resultados de evolução de temperatura das fissuras e região sem defeito, que as fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência de evolução de temperatura durante o aquecimento e resfriamento.

A mensuração da largura da fissura das placas L1 (1 mm de largura por 5 mm de profundidade), L2 (1 mm de largura por 10 mm de profundidade) e L3 (2 mm de largura por 10 mm de profundidade) é apresentada na tabela 13.

Tempo	L1 N° pixels	Largura (mm)	L2 N° pixels	Largura (mm)	L3 N° pixels	Largura (mm)
20	2	3,4	2	3,4	3	5,2
40	2	3,4	2	3,4	2	3,4
60	2	3,4	3	5,2	2	3,4
80	2	3,4	3	5,2	2	3,4
112	2	3,4	5	8,6	3	5,2
140	2	3,4	2	3,4	2	3,4
160	2	3,4	2	3,4	2	3,4
180	2	3,4	2	3,4	3	5,2
200	3	5,2	2	3,4	2	3,4
232	2	3,4	2	3,4	2	3,4

Tabela 13 - Largura das fissuras lineares das placas L1 (1 mm de largura), L2 (1 mm de largura) e L3 (2 mm de largura)

Para a investigação da largura da fissura linear da placa L1 (1 mm de abertura por 5 mm de profundidade), é observado que a quantidade de pixels que representam a largura fissura é de dois pixels, sendo essa quantidade predominante durante a evolução do aquecimento e resfriamento. O número de pixels que representam a fissura da placa L1, durante a evolução do aquecimento e resfriamento, difere de dois pixels apenas próximo ao fim do resfriamento, momento em que o Delta-T é mínimo.

Para a fissura linear da placa L2 (1 mm de abertura por 10 mm de profundidade), a largura da fissura, durante a evolução do aquecimento, é representada por dois pixels, onde há variação no número de pixels no fim do ciclo, instante em que o Delta-T é menor, em módulo. No resfriamento o número de pixels que representam a largura fissura da placa L2 é de dois pixels, durante toda a evolução do ciclo.

Para a fissura linear da placa L3 (2 mm de abertura por 10 mm de profundidade), a largura predominante mensurada é de dois pixels, tanto no aquecimento como no resfriamento. As variações da largura da fissura da placa L3 ocorrem no fim do resfriamento, onde é apresentado os menores valores de Delta-T.

Para as fissuras das placas L1, L2 e L3, é observado que as variações de largura, pelo número de pixels, ocorrem nos momentos, do aquecimento e resfriamento, onde o Delta-T é menor em módulo. Consequente, há menores variações na largura da fissura, quando o Delta-T é máximo, em módulo, indicando o momento onde o Delta-T é máximo, em módulo, é o momento em que há maior precisão da mensuração da largura da fissura.

A largura predominante das fissuras das amostras L1, L2 e L3 é de dois pixels, nos instantes em que o Delta-T é máximo em módulo, correspondente aos primeiros 30 minutos do aquecimento e resfriamento, que, para o IFOV e distância da investigação de termografia, equivale a 3,4 mm. A largura de 3,4 mm atribuída para a fissura da placa L1, que possui largura e 1 mm, e placas L2 e L3, que possuem 2 mm de largura, indica que, para a investigação efetuada, a mensuração da largura da fissura por termografia, não é capaz de identificar diferença entre a largura das fissuras de 1 mm e 2 mm.

A mensuração da largura da fissura da placa L4 (3 mm de largura por 5 mm de profundidade), L5 (3 mm de largura por 10 mm de profundidade) e L6 (3 mm de largura por 15 mm) de profundidade é apresentada na tabela 14.

Tempo	L4 N° pixels	Largura (mm)	L5 N° pixels	Largura (mm)	L6 N° pixels	Largura (mm)
20	3	5,2	2	3,4	2	3,4
40	2	3,4	2	3,4	2	3,4
60	2	3,4	2	3,4	3	5,2
80	2	3,4	2	3,4	4	6,9
112	3	5,2	2	3,4	2	3,4
140	2	3,4	3	5,2	3	5,2
160	3	5,2	3	5,2	3	5,2
180	2	3,4	2	3,4	3	5,2
200	2	3,4	3	5,2	3	5,2
232	2	3,4	2	3,4	3	5,2

Tabela 14 - Largura das fissuras lineares das placas L4 (3 mm de largura), L5 (3 mm de largura) e L6 (3 mm de largura)

Para a investigação da largura da fissura linear da placa L4 (3 mm de abertura por 5 mm de profundidade), é observado que há variação no número de pixels que representam a fissura apenas em instante pontuais do aquecimento e do resfriamento, onde a quantidade predominante de pixels que representam a fissura é de dois pixels. A predominância no

número de pixels que representam a largura da fissura da placa L4, indica que não há diferença na visualização da largura da fissura em função da evolução do aquecimento e resfriamento.

Para a investigação da largura da fissura linear da placa L5 (3 mm de abertura por 10 mm de profundidade), é observado que durante a evolução do aquecimento e resfriamento a largura da fissura possui, predominantemente, dois pixels. No fim dos ciclos de aquecimento e resfriamento, das fissuras da placa L5, não há variação da largura da fissura mensurada, o que indica independência da mensuração, da fissura da placa L5, em função evolução do Delta-T.

Para a investigação da largura da fissura linear da placa L6 (3 mm de abertura por 15 mm de profundidade), é identificado que há variação da largura da fissura durante a evolução do aquecimento. Durante o resfriamento a largura da fissura de mantém constante em três pixels, indicando independência de mensuração em relação a evolução do ciclo.

Para a investigação da mensuração da largura da fissura, é indicado que, para as fissuras das placas L4 e L5, a largura da fissura é, predominantemente, dois pixels, que representa 3,4 mm. Para a fissura da placa L6, a largura da fissura é constante durante a evolução do resfriamento, possuindo três pixels, equivalente a 5,2 mm. Para a mensuração da largura das fissuras, que possuem 3 mm de largura, é identificado que a mensuração independe da evolução dos ciclos, de aquecimento ou resfriamento. Já as fissuras de menor largura, L1, L2 e L3, que possuem largura de 1 mm e 2 mm, a mensuração da fissura é depende do instante em que o Delta-T é máximo, em módulo.

A investigação da largura da fissura por termografia apresenta que a mensuração independe dos valores de profundidade, indicando que maiores valores de Delta-T, atrelados a fissuras de maior profundidade, não interferem nos resultados de mensuração de largura. As fissuras são melhor identificadas nos momentos do aquecimento e resfriamento onde o Delta-T é maior em módulo, sendo que a precisão de investigação reduz com a evolução do Delta-T no aquecimento e resfriamento. Os valores obtidos de largura de fissuras são de dois e três pixel, que correspondem a 3,4 mm e 5,2 mm, sendo esses valores superiores a maior largura de fissura investigada, que corresponde a 3 mm. Consequentemente, para a distância e IFOV empregados, a investigação da largura da fissura por termografia não é precisa, o que indica que não pode ser empregada como critério de análise de uma inspeção por termografia.

4.5. INVESTIGAÇÃO DE CAMPO

A investigação de campo é efetuada na cidade de Brasília em uma fachada em alvenaria com revestimento de argamassa. A fachada de argamassa é localizada no edifício Dois Candangos do Campus Darcy Ribeiro, da Universidade de Brasília, onde é estudado o comportamento termográfico de três regiões da fachada.

Na investigação de campo é observado se os padrões de evolução de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas, durante o aquecimento e resfriamento, possuem o mesmo padrão de evolução obtido em laboratório. A comparação entre as tendências de Delta-T das fissuras obtidas em laboratório e campo, visam identificar se o método investigativo e os padrões de Delta-T obtidos em laboratório são aplicáveis em campo.

Os termogramas empregados nesse estudo, são oriundos da pesquisa efetuada por (BAUER et al., 2016a), onde a investigação de termografia foi efetuada na fachada leste do edifício, como apresenta a figura 49. Os termogramas são obtidos de forma contínua a cada hora, iniciando as 8 horas e finalizando as 18 horas, onde a evolução de temperatura da superfície da fachada e temperatura ambiente é ilustrada na figura 51.

A investigação foi efetuada por uma câmera termográfica modelo FLIR T-400 que possui IFOV de 1,367 mrad. Os parâmetros termográficos para a investigação são: emissividade de 0,95, temperatura refletida de 26 °C e distância de 18,5 m. A umidade relativa e temperatura ambiente são apresentadas na tabela 15, sendo determinadas para cada hora da investigação.

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Umidade relativa (%)	76,5	71,0	62,2	46,1	40,4	40,8	41,8	41,4	39,8	40,8	50,1
Temperatura ambiente (°C)	18,7	20,5	23,2	26,4	28,1	28,2	28,1	27,8	27,5	27,1	24,9

Tabela 15 - Umidade relativa e temperatura ambiente da investigação de campo

4.5.1. Evolução de temperatura

Os termogramas da fachada em argamassa, obtidos das 8 horas até as 18 horas, são apresentados na figura 92, figura 93 e figura 94, onde é observado que as fissuras contidas na região de investigação, conforme apresenta a figura 50, possuem temperatura superior a região sem defeito.

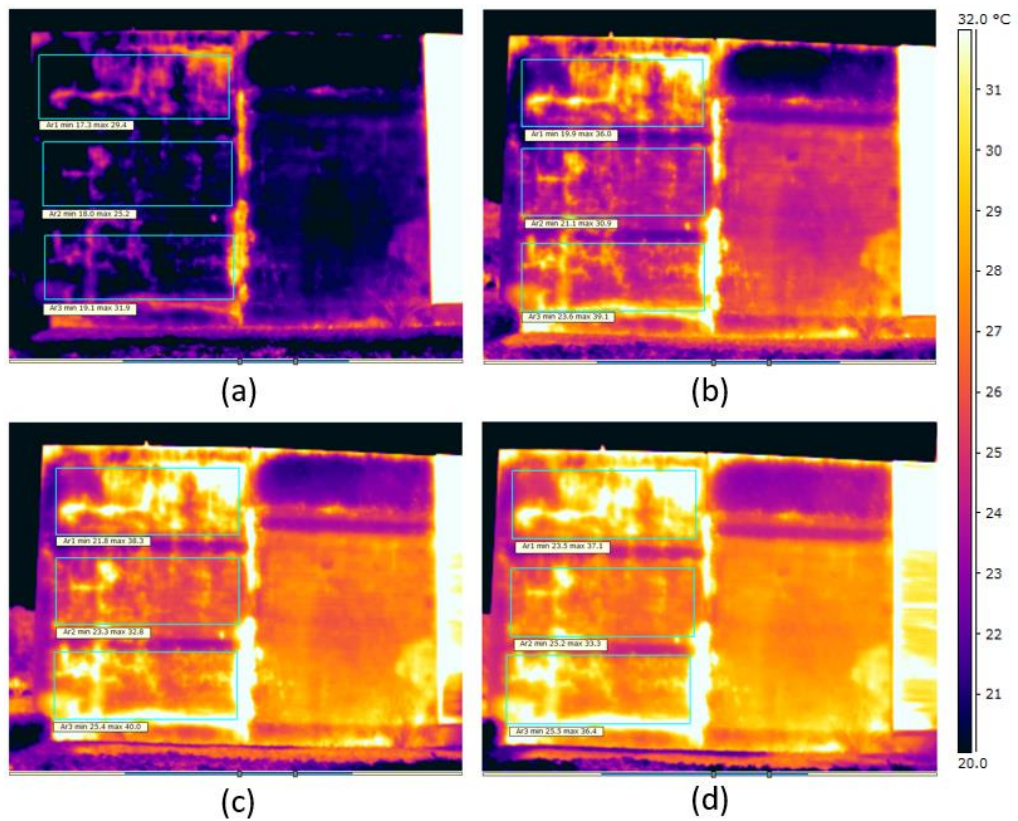


Figura 92 - Termogramas da fachada de argamassa da avaliação de campo: (a) 8 horas; (b) 9 horas; (c) 10 horas; (d) 11 horas

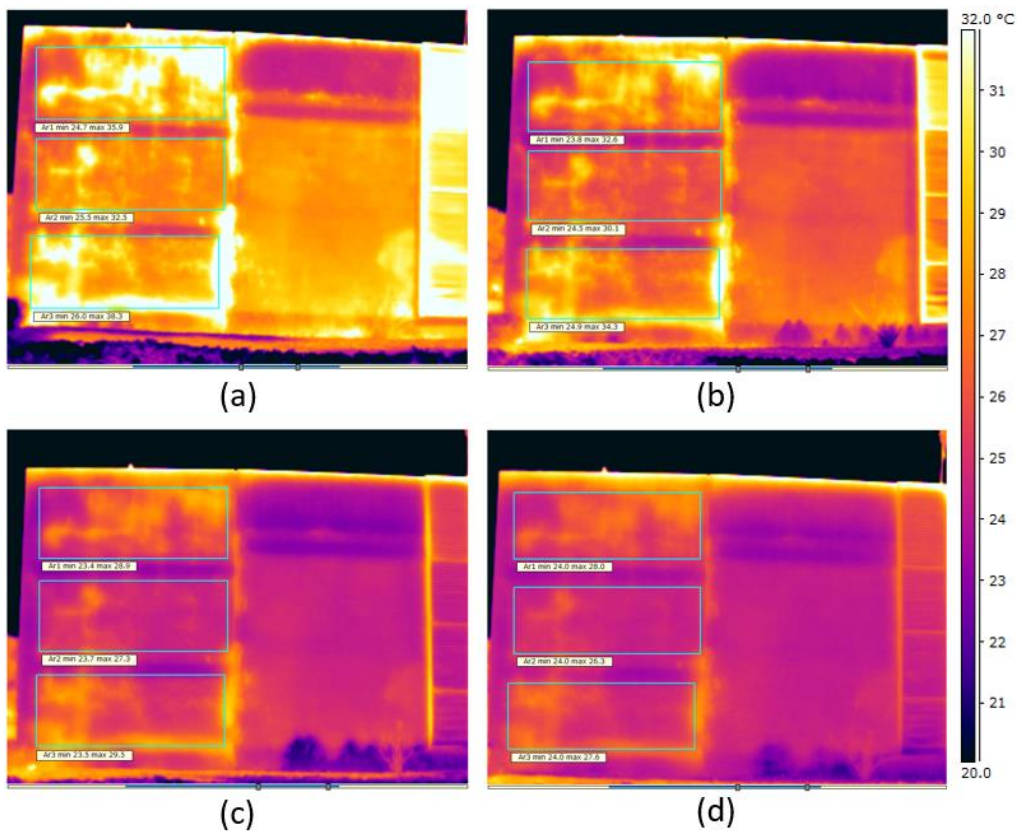


Figura 93 - Termogramas da fachada de argamassa da avaliação de campo: (a) 12 horas; (b) 13 horas; (c) 14 horas; (d) 15 horas

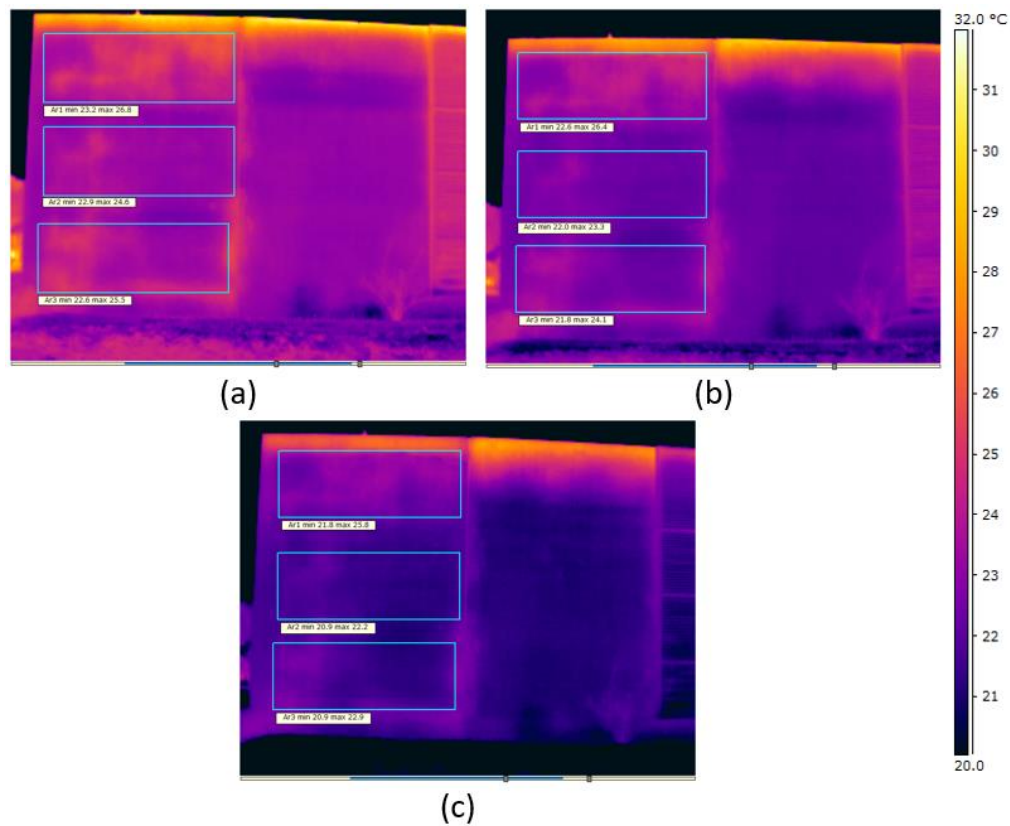


Figura 94 - Termogramas da fachada de argamassa da avaliação de campo: (a) 16 horas; (b) 17 horas; (c) 18 horas

Os termogramas de 8 horas até 12 horas, apresentados na figura 92 e figura 93 (a), são referentes ao aquecimento. Durante a evolução do aquecimento, as fissuras das regiões 1 (topo), 2 (centro) e 3 (base), são identificadas, onde a região 1 e 2 possuem fissuras lineares e a região 3 possui fissuras ramificadas.

Os termogramas referentes ao intervalo de 13 horas a 18 horas, apresentados na figura 93 (b) a figura 94 (c), são referentes ao resfriamento. No resfriamento, a identificação das fissuras, lineares e ramificadas, é reduzida com a evolução do ciclo, onde é observado, a partir do termograma de 14 horas, conforme a figura 93 (c), que não é possível identificar as fissuras lineares e ramificadas, indicando que, durante o resfriamento a identificação das fissuras ocorre apenas no início do ciclo, as 13 horas, conforma a figura 93 (b).

A identificação das fissuras, durante o aquecimento, pode ser favorecida pelo ganho de temperatura na superfície da fachada, entre 8 horas e 11 horas, como ilustra a figura 95. A evolução da temperatura da superfície da fachada é apresenta na figura 95, onde o maior incremento de temperatura ocorre durante as 8 horas e 11 horas do aquecimento, intervalo de maior visibilidade das fissuras.

A evolução da temperatura da superfície da fachada apresentada na figura 95, indica que o incremento de temperatura que ocorre no aquecimento, é superior ao incremento de temperatura que ocorre no resfriamento. Conseqüentemente, a velocidade de aquecimento é superior a velocidade de resfriamento, onde o aquecimento pode possibilitar maiores diferenças de temperatura entre a fissura e região sem defeito.

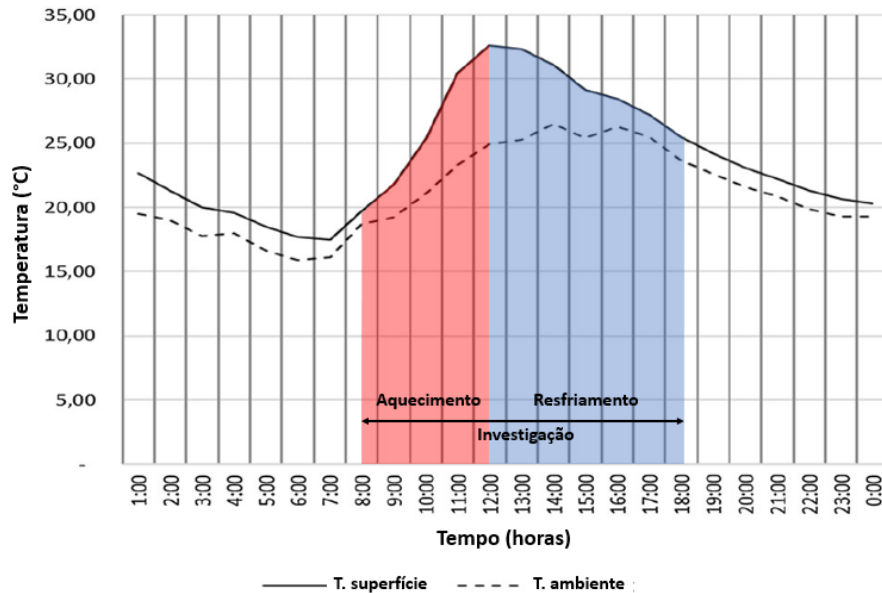


Figura 95 - Evolução da temperatura da superfície da fachada e da temperatura ambiente durante o aquecimento e resfriamento pelo software WUFI (BAUER et al., 2016a)

4.5.2. Comportamento de Delta-T

A investigação com uso do contraste Delta-T, é efetuada nas regiões de análise, delimitadas conforme a figura 50, onde as regiões 1 e 2 possuem fissuras lineares e a região 3 possui fissuras ramificadas. As fissuras lineares e ramificadas das regiões de investigação são apresentadas na figura 96. A região 1, possui três fissuras lineares, conforme apresenta a figura 96 (a), a região 2, possui duas fissuras lineares, conforme apresenta a figura 96 (b), e a região 3, possui cinco fissuras ramificadas, conforme apresenta a figura 96 (c).

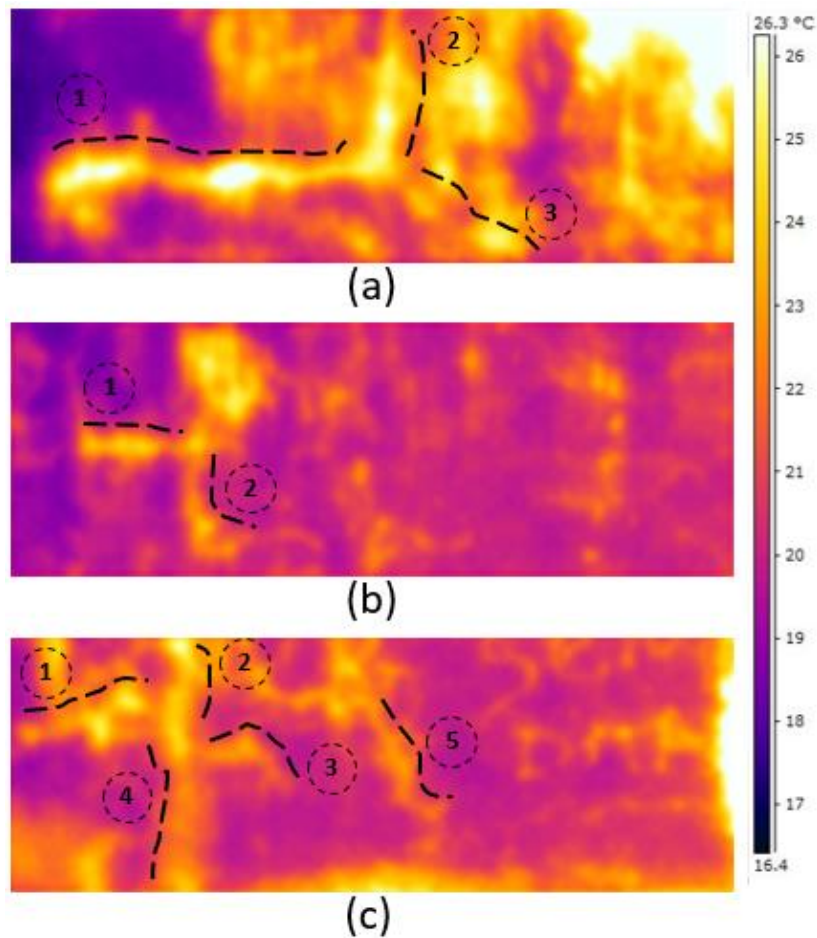


Figura 96 - Quantidade de fissuras identificadas nas regiões de investigação no termograma de 8 horas: (a) região 1; (b) região 2; (c) região 3

Para a investigação quantitativa é determinado T_d e T_{nd} das regiões 1, 2 e 3, sendo determinados em todos os termogramas obtidos das 8 horas até as 18 horas. O Delta-T, das fissuras lineares e ramificadas, é calculado a partir dos valores de T_d e T_{nd} dos termogramas das regiões de investigação, onde é observado a evolução de Delta-T das fissuras durante o aquecimento e resfriamento.

A evolução dos valores de Delta-T representativos, durante o aquecimento e resfriamento, das fissuras das regiões 1, 2 e 3, são apresentados na figura 97. Semelhante a investigação de laboratório, cada fissura da investigação de campo possui dois valores de Delta-T, onde são selecionados em função dos valores médios de Delta-T que estão dentro do intervalo de desvio padrão da média das médias de Delta-T no aquecimento e resfriamento. O critério de comportamento de Delta-T esperado não é utilizado na investigação de campo, visto que todas as fissuras assumem Delta-T positivo no aquecimento. O Delta-T representativo das fissuras lineares da região 1, é chamado de (FL1), o Delta-T representativo das fissuras

lineares da região 2, é chamado de (FL2) e o Delta-T representativo das fissuras ramificadas da região 3, é chamado de FR.

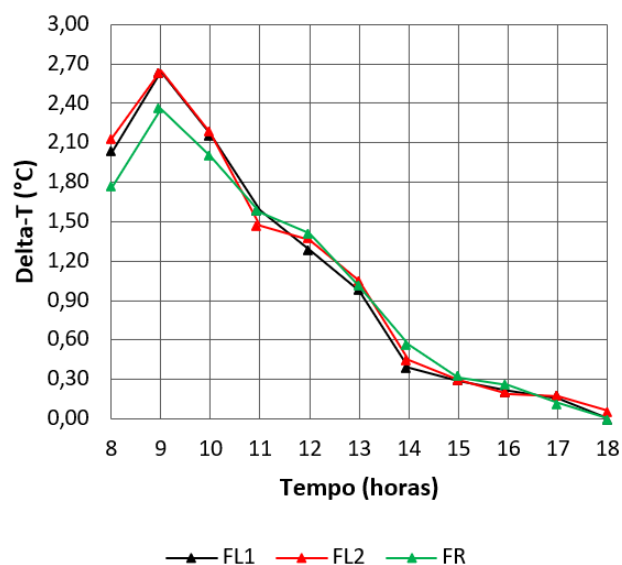


Figura 97 - Evolução de Delta-T representativo, no aquecimento e resfriamento, das fissuras lineares da região 1 (FL1), das fissuras lineares da região 2 (FL2) e das fissuras ramificadas da região 3 (FR)

Na investigação das fissuras em laboratório, é observado que o Delta-T é negativo para os momentos iniciais do aquecimento. No caso da investigação de campo, se observa que os valores de Delta-T são positivos no aquecimento. Os valores positivos de Delta-T, na investigação de campo, durante o aquecimento, podem ter ocorrido devido a obtenção dos termogramas ter iniciado duas horas após o início do aquecimento da superfície da fachada, como indica a figura 95. Conseqüentemente, há possibilidade do aquecimento que ocorre entre as 6 horas e 8 horas ser suficiente para as fissuras obterem temperatura superior a temperatura da região sem defeito, pois, em inspeções de campo, a investigação por termografia desde o início do aquecimento nem sempre é possível.

Para as três regiões de investigação, o maior Delta-T ocorre as 9 horas, momento em que a superfície da fachada está em aquecimento, onde é observado maior incremento de temperatura, conforme ilustra a figura 95. Os valores de Delta-T reduzem durante a evolução do aquecimento e resfriamento.

Durante o aquecimento, a diferença entre os valores de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas é superior no início do ciclo, onde os valores de Delta-T das fissuras tendem a serem semelhantes com a evolução do aquecimento. No resfriamento, os valores de Delta-T, das fissuras lineares e ramificadas são semelhantes, durante toda a evolução do ciclo.

A tendência de evolução do Delta-T, no aquecimento e resfriamento, das fissuras lineares e ramificadas da investigação de campo, é semelhante a tendência de evolução observadas na investigação de laboratório. A semelhança da tendência de evolução das fissuras lineares e ramificadas investigadas em campo e laboratório, indicam que as maiores diferenças entre os valores de Delta-T ocorrem no aquecimento, quando comparado com o resfriamento.

Durante o aquecimento e resfriamento é observado que as fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência de evolução, possuindo Delta-T máximo as 9 horas e apresentando redução de Delta-T com a evolução dos ciclos. Conseqüentemente, fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência de evolução de Delta-T durante o aquecimento e resfriamento. Os valores de Delta-T das fissuras lineares são superiores aos valores de Delta-T das fissuras ramificadas. A maior diferença entre os valores de Delta-T das fissuras, lineares e ramificadas, ocorre as 9 horas, momento em que o Delta-T é máximo. Com a evolução dos ciclos, de aquecimento e resfriamento, a diferença entre os valores de Delta-T das fissuras reduz, onde, próximo as 14 horas, as fissuras lineares e ramificadas possuem valores de Delta-T semelhantes.

A semelhança da entre evolução de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas obtidas em laboratório e campo, indicam que a metodologia de investigação, estabelecida em laboratório, é aplicável em campo. Na investigação de laboratório e campo, é observado que fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência de evolução no aquecimento e resfriamento, onde as fissuras lineares possuem valores de Delta-T superiores aos valores de Delta-T das fissuras ramificadas. Para a investigação de campo o Delta-T assume valor positivo durante o aquecimento, sendo que, na investigação de laboratório, o Delta-T das fissuras lineares e ramificadas, são negativos nesse ciclo. A diferença entre os valores de Delta-T observados, em laboratório e campo no ciclo de aquecimento, ocorre, pois, na investigação de laboratório o monitoramento termográfico é efetuado a partir do início do aquecimento, já na investigação de campo o monitoramento termográfico a partir do início do aquecimento nem sempre é possível.

Os valores positivos de Delta-T observados na investigação de campo, durante o aquecimento, indicam que o critério de seleção de Delta-T pelo comportamento esperado, estabelecido na investigação de laboratório, não pode ser aplicado, pois, nas investigações de campo, o Delta-T pode assumir valor positivo durante o aquecimento. Conseqüentemente, o comportamento esperado de Delta-T depende das condições de investigação, não sendo

possível afirmar que, para qualquer momento do aquecimento, o Delta-T das fissuras é negativo.

Os resultados de evolução de Delta-T das fissuras lineares e ramificadas obtidos em laboratório, indicam que a investigação por termografia de fissuras em revestimentos de argamassa é igual para as diferentes formas da fissura, onde é observado que os valores de Delta-T diferem em função da forma da fissura. Na investigação de campo as tendências de Delta-T entre as fissuras lineares e ramificadas são semelhantes as observadas em laboratório, onde as fissuras lineares possuem Delta-T superior a fissura ramificada, sendo essa diferença melhor identificada no momento onde o Delta-T é máximo. Conseqüentemente, para a inspeção de fissuras lineares e ramificadas em revestimentos de argamassa, a identificação da forma da fissura, momento de maior incremento de temperatura na superfície da fachada e o valor de Delta-T máximo, são informações determinantes da análise de termografia.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apresenta-se a discussão dos resultados obtidos nas investigações de termografia, para identificação das diferenças de tendência de evolução de Delta-T de fissuras lineares e ramificadas. O quadro 1, apresenta a síntese dos principais resultados das investigações, que são discutidos, de forma detalhada, posteriormente.

Forma da fissura	Fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência de evolução durante o aquecimento e resfriamento, onde os valores Delta-T das fissuras lineares é superior em módulo.
Delta-T	O Delta-T é máximo, em módulo, no início do aquecimento e resfriamento, onde fissuras de maior dimensão (largura x profundidade) possuem maior Delta-T, em módulo.
Profundidade da fissura	Fissuras de maior profundidade possuem Delta-T superior, em módulo, quando comparadas com fissuras de menor profundidade, independente da forma da fissura. Porém a profundidade possui menor influência no Delta-T comparado com a largura.
Largura da fissura	Fissuras de maior largura possuem maior Delta-T, em módulo, e apresentam maior velocidade de aquecimento e resfriamento, tanto para as fissuras lineares como ramificadas. A largura possui influência superior na evolução do Delta-T, quando comparada com a profundidade.
Mensuração da largura	A Precisão da medição da largura da fissura é menor para fissuras de menor largura, onde o IFOV e a distância entre câmera e alvo são determinantes.
Tendências de investigação	As tendências de Delta-T observadas em laboratório são observadas em campo, onde a identificação do momento de maior incremento de temperatura da fachada e valor do Delta-T máximo das fissuras são determinantes da investigação de fissuras de diferentes formas.

Quadro 1 - Síntese dos resultados

O Delta-T das fissuras lineares e ramificadas possuem a mesma tendência de evolução, durante o aquecimento e resfriamento, onde as fissuras ramificadas possuem valores de Delta-T inferior ao Delta-T das fissuras lineares, independente da dimensão da fissura (largura e profundidade). A diferença dos valores de Delta-T para as fissuras lineares e ramificadas, indica que fissuras de mesma dimensão podem possuir diferentes valores de Delta-T em função da forma. Conseqüentemente, a forma de análise dos resultados de termografia para fissuras lineares e ramificadas diferem a partir dos valores de Delta-T obtidos durante o aquecimento e resfriamento.

O Delta-T é máximo em módulo no início do aquecimento e resfriamento, onde os valores de Delta-T se aproximam de zero com a evolução dos ciclos. A redução do Delta-T com a evolução do aquecimento e resfriamento indicam que defeitos possuem menor possibilidade de quantificação quando tendem ao equilíbrio de temperatura (OSWALD-TRANTA, 2022). Na investigação de Delta-T em função da largura e profundidade, é observado que os valores de Delta-T, em módulo, aumentam em função da dimensão da fissura. O aumento do Delta-T pelo aumento da dimensão da fissura indica que tanto a largura quanto a profundidade influenciam nos valores de Delta-T (MOSKOVCHENKO et al., 2022). Conseqüentemente, o Delta-T não está limitado apenas as variações de profundidade. Resultados semelhantes são observados em avaliações de termografia quantitativa aplicadas em compostos de fibra de carbono com defeitos superficiais com 1 mm de profundidade e largura entre 1 mm e 30 mm. A investigação dos defeitos no composto de fibra de carbono indica dependência do Delta-T em função da dimensão da fissura, por uma razão de largura/profundidade, onde o Delta-T aumenta com o aumento da razão (ALMOND; PICKERING, 2012).

Outras investigações de termografia quantitativa, em metais com fissuras de diferentes profundidades, indicam que quanto maior a profundidade da fissura maior é o Delta-T, em módulo, na fase de aquecimento, pois fissuras de maior profundidade dificultam o fluxo de temperatura que inicia na superfície do metal (OSWALD-TRANTA, 2022). Por consequência tanto a largura como a profundidade da fissura interferem nos valores de Delta-T.

As variações entre os valores de Delta-T em função da largura são superiores as variações em função da profundidade, ensejando que fissuras de mesma profundidade e larguras diferentes possuem maior variação de Delta-T que fissuras de mesma largura e diferentes profundidades. A maior variação do Delta-T em função da largura ocorre, pois, fissuras de maior largura possuem maior área para receber temperatura, o que facilita o fluxo de temperatura para o interior da fissura (WANG; GAO; NETZELMANN, 2018). Resultados semelhantes são observados em defeitos internos em metais modelados por elementos finitos, submetidos a aquecimento e resfriamento, onde o Delta-T máximo aumenta com o aumento da largura (YUAN et al., 2014).

A velocidade de aquecimento e resfriamento possuem variação superior em função da largura, em comparação com a profundidade, indicando que a velocidade de aquecimento e resfriamento aumento com o aumento da largura. Resultados semelhantes são observados

em investigações de fissuras por termografia quantitativa em placas de aço, onde é constatado que o fluxo de temperatura possui maior velocidade para fissuras de maior largura (OSWALD-TRANTA, 2017).

A partir das investigações de Delta-T, é indicado que a largura da fissura possui influência superior na evolução de Delta-T em comparação com a profundidade. Os valores máximos e mínimos de Delta-T estão vinculados a maiores dimensões de fissura, onde maiores velocidades de aquecimento e resfriamento estão associados à maiores larguras de fissura (JENSEN et al., 2021; YUAN et al., 2014).

Na investigação da largura da fissura, é observado que, no início do aquecimento e resfriamento, momento em que o Delta-T é máximo, em módulo, há constância nos valores de largura mensurados, onde as variações da largura da fissura ocorrem no fim dos ciclos. Investigações de termografia em defeitos superficiais em compostos de fibra de carbono, indicam que a detecção das fissuras possui maior precisão quando o Delta-T é máximo (MOSKOVCHENKO et al., 2022).

A maior diferença entre a largura real e a mensurada ocorre para as fissuras de 1 mm de largura. pois fissuras de menor largura possuem maior dificuldade de detecção e quantificação (PECH-MAY et al., 2016). A menor diferença de mensuração de largura ocorre para as fissura de 3 mm, pois fissuras de maior largura são facilmente mensuradas (LIU et al., 2003). Investigações de Delta-T efetuadas em blocos de concreto com fissuras superficiais, indicam que, para obter precisam de mensuração da largura da fissura, o tamanho do pixel deve ser menor que a largura da fissura (PARK et al., 2022). As observações de Park et al (2022) estão de acordo com os resultados obtidos na investigação em laboratório, onde é atribuído 3,4 mm para fissuras com abertura de 3 mm. Para a distância de 2,1 m e um IFOV de 0,82, usados na investigação de laboratório, um pixel, possui 1,7 mm, fazendo com que a investigação da largura de fissuras de 1 mm seja imprecisa, onde possui maior precisão para mensurar as fissuras que possuem largura superior a largura do pixel, no caso as fissuras de 3 mm.

Conseqüentemente, em uma investigação de termografia quantitativa, o valor de IFOV e a distância entre o alvo e a câmera termográfica, deve garantir que o tamanho do pixel do termograma seja menor que a largura do defeito investigado. A investigação da largura da fissura conduz que o IFOV e a distância de captura de imagem termográfica são determinantes para a precisão de mensuração da largura das fissuras.

Na investigação de campo, os valores de Delta-T das fissuras das regiões de investigação são positivos durante o aquecimento e resfriamento. Os valores de Delta-T positivos durante os ciclos são possíveis, desde que haja tempo de aquecimento suficiente para que a fissura possua temperatura superior a região sem defeito (OSWALD-TRANTA, 2018). O Delta-T máximo das fissuras lineares e ramificadas ocorrem no momento de maior incremento de temperatura, o que indica que, nas investigações de termografia, o momento de maior incremento de temperatura é o momento de maior Delta-T.

O Delta-T no aquecimento das fissuras ramificadas, na investigação de campo, é inferior ao Delta-T das fissuras lineares, sendo que, durante o resfriamento, o Delta-T das fissuras lineares e ramificadas é semelhante. O Delta-T das fissuras da investigação de campo possuem a mesma tendência observada nas investigações de laboratório, onde as fissuras ramificadas possuem Delta-T inferior as fissuras lineares e as diferenças dos valores Delta-T entre as fissuras são superiores no aquecimento, em comparação com o resfriamento.

A metodologia de investigação estabelecida em laboratório é aplicável em campo, onde é observado as mesmas tendências de evolução de Delta-T para as fissuras lineares e ramificadas obtidas em laboratório. A investigação de laboratório e campo indicam que fissuras em revestimentos de argamassa podem ser investigadas por termografia. As fissuras lineares observadas em campo possuem Delta-T superior em relação as fissuras ramificadas, onde essa diferença é nítida quando o Delta-T é máximo, sendo que o Delta-T máximo ocorre no momento de maior incremento de temperatura na superfície da fachada.

6. CONCLUSÃO

A investigação quantitativa de termografia de infravermelho é capaz de atribuir diferentes valores de Delta-T, durante o aquecimento e resfriamento, para fissuras de diferentes dimensões e diferentes formas, podendo ser empregada na avaliação de fissuras lineares e ramificadas em revestimentos de argamassa. O Delta-T é máximo no início do aquecimento e resfriamento, sendo o momento de maior adequação para a investigação das fissuras, tanto para atribuição de dano como para identificação. Com a evolução do aquecimento e resfriamento, os valores de Delta-T se aproximam de zero, o que dificulta a investigação. Conseqüentemente, em uma inspeção por termografia a obtenção dos valores de Delta-T máximo, em módulo, no aquecimento e resfriamento, são determinantes na avaliação das fissuras em revestimentos de argamassa de diferentes formas e dimensões.

Os valores de Delta-T possuem maior diferença durante o aquecimento, pois no resfriamento as fissuras podem assumir valores semelhantes de Delta-T mesmo possuindo diferentes valores de largura e profundidade. Fissuras de menor largura possuem maior dificuldade de análise durante o aquecimento e resfriamento. As fissuras de maior largura são melhor analisadas por Delta-T em comparação com fissuras de menor largura, porém maiores valores de largura de fissura podem conduzir a valores semelhantes de Delta-T no resfriamento, independente da profundidade da fissura.

Para a avaliação de fissuras por meio dos valores de Delta-T, é observado que os maiores valores estão relacionados com maiores dimensões de fissura, onde a largura é predominante, em relação a profundidade, na variação de Delta-T. A predominância da largura nos valores de Delta-T indica que em uma investigação de termografia, maiores valores de Delta-T podem ser relacionados com fissuras, predominantemente, de maior largura do que de maior profundidade.

As fissuras lineares e ramificadas possuem o mesmo método de investigação por meio da evolução do Delta-T no aquecimento e resfriamento, onde as fissuras lineares possuem valores de Delta-T superiores, em módulo, as fissuras ramificadas. O comportamento de Delta-T indica que, para fissuras de mesma largura e profundidade, os valores de Delta-T são diferentes em função da forma da fissura. Conseqüentemente, em uma inspeção por termografia em campo, é desejável identificar a forma da fissura, preliminarmente

A mensuração da largura da fissura por meio da variação de temperatura observada por termografia, não apresenta precisão para fissuras com dimensões menores que 1 mm. A

mensuração da largura da fissura possui maior precisão quando o Delta-T é máximo, onde não sofre variação em função da profundidade da fissura. Recomenda-se que a distância e o IFOV garantam que os pixels dos termogramas possuam largura inferior a largura da fissura, para que a mensuração da largura da fissura possua maior precisão. Devido a imprecisão dos resultados de largura da fissura em função da distância, IFOV e número de pixels, essa investigação não pode ser adotada como critério investigativo em uma inspeção por termografia.

As tendências de evolução de Delta-T observadas em laboratório, são semelhantes as observadas em campo, onde as condições de investigação estabelecidas são aplicáveis em investigações de fachadas de argamassa. O resultado das investigações de campo indica que, em inspeções por termografia em fissuras em revestimentos de argamassa, a identificação do momento de maior incremento de temperatura na superfície da fachada, o valor de Delta-T máximo, em módulo, no aquecimento e resfriamento, e forma da fissura são determinantes na investigação por termografia.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade aos estudos sobre dano de fissuras em revestimentos de argamassa por termografia, é sugerido os seguintes trabalhos, que podem contribuir para o avanço científico da área de degradação de revestimentos:

- Elaborar métodos de atribuição de dano de fissuras em revestimentos de argamassa a partir da aplicação da termografia quantitativa, para diferentes formas e dimensões de fissuras.
- Estabelecer rotinas de investigação em campo de fissuras lineares e ramificadas em revestimentos de argamassa.
- Associar a avaliação de fissuras por Delta-T no método de degradação por mapeamento de dano.
- Efetuar ensaios de termografia em protótipos de revestimento de argamassa com fissuras em ciclos de aquecimento e resfriamento, onde a duração dos ciclos permita que o Delta-T no aquecimento e resfriamento chegue em zero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 15575-1 Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2021a.

ABNT. NBR 15575-4 Edificações habitacionais - Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedação vertical internas e externas - SVVIE. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2021b.

ABNT. NBR 16969 - Ensaio não destrutivo - Termografia infravermelha - Princípios gerais. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2021c.

AIDAR, L. A. G.; MILHOMEM, P. M.; BAUER, E. Análise das possíveis variações nos termogramas provocadas por alterações no ângulo de obtenção das imagens. **Anais do Congresso Brasileiro de Patologias das Construções - CBPAT**, n. May, 2018.

AIDAR, L. A. G. METODOLOGIA DE INSPEÇÃO E ANÁLISE DE TERMOGRAMAS PARA ESTUDO DE FACHADAS EM REVESTIMENTO CERÂMICO. **Dissertação (Doutorado em engenharia civil) - programa de pós-graduação em engenharia civil e estruturas - PECC/UNB, Brasília**, 2019.

AIDAR, L.; BAUER, E. Correction of Thermographic Contrast Values in Relation to the Average Temperature of the Region for Comparative Analysis of Anomalies Exposed to Different Thermal Flows. **Proceedings**, n. 1, p. 23, 2019.

ALCUDIA, F. S. **Patología de la edificación - El lenguaje de las grietas**, 1998.

ALMOND, D. P.; PICKERING, S. G. An analytical study of the pulsed thermography defect detection limit. **Journal of Applied Physics**, v. 111, n. 9, 2012.

ASTM. 632–82: standard practice for developing accelerated tests to aid prediction of the service life of building components and materials. **American Society for Testing and Materials, Philadelphia**, 1996.

ASTM. E 1862 - Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared imaging Radiometers. v. 97, n. Reapproved, p. 6–8, 2002a.

ASTM. E 1933 – 99a Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers. v. 97, n. Reapproved, p. 6–8, 2002b.

ASTM. C1371-15 Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers. 2022.

- BARREIRA, E. et al. Measurement of materials emissivity – Influence of the procedure. **13th International Workshop on Advanced Infrared Technology & Applications**, n. Setembro, p. 242–245, 2015.
- BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; DELGADO, J. M. P. Q. Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 251–269, 2016.
- BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; PEREIRA, M. Evaluation of heat transfer in humidification phenomena – Comparison between infrared thermography and numerical simulation. **MATEC Web of Conferences**, v. 282, n. 2019, p. 02032, 2019.
- BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; SIMÕES, M. L. Emissivity of building materials for infrared measurements. **Sensors**, v. 21, n. 6, p. 1–13, 2021.
- BARREIRA, E.; DE FREITAS, V. P. Evaluation of building materials using infrared thermography. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 218–224, 2007.
- BAUER, E. et al. Infrared thermography – evaluation of the results reproducibility. **Structural Survey**, v. 33, n. 1, p. 20–35, 2015.
- BAUER, E. et al. Facades inspection with infrared thermography: cracks evaluation. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, p. 7, 2016a.
- BAUER, E. et al. Analysis of building facade defects using infrared thermography: Laboratory studies. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 93–104, 2016b.
- BAUER, E. et al. Criteria for Identification of Ceramic Detachments in Building Facades with Infrared Thermography. **Building Pathology and Rehabilitation**, p. 51–68, 2016c.
- BAUER, E. et al. Relative importance of pathologies in the severity of facade degradation. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 5, n. 1, p. 1–10, 2020.
- BAUER, E. Critérios para identificação e diagnóstico de anomalias em fachadas cerâmicas através da termografia infravermelha quantitativa. **Ambiente Construído**, p. 101–119, 2023.
- BAUER, E.; CASTELO, F. E.; LEAL, B. Condicionantes Das Medições Termográficas Para Avaliação Da Temperatura Em Fachadas. **X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, n. May 2013, p. 14, 2013.
- BAUER, E.; MILHOMEM, P. M.; AIDAR, L. A. G. Evaluating the damage degree of

cracking in facades using infrared thermography the elements for allowing degradation agents such as. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, p. 12, 2018.

BAUER, E.; SOUZA, J. S.; MOTA, L. M. G. Degradação de fachadas revestidas em argamassas nos edifícios de Brasília, Brasil. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 4, p. 23–43, 2021.

BROEK, D. **The Practical Use of Fracture Mechanics**, 1989.

C. P. KOTHANDARAMAN. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 3. ed. [s.l.] one world, 2006.

CARRETERO-AYUSO, M. J.; MORENO-CANSADO, A.; DE BRITO, J. Study of the prevalence of critical and conflict-prone points in facades. **Engineering Failure Analysis**, v. 75, p. 15–25, 2017.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa - Uma Abordagem prática**. 4. ed, 2012.

CHUNG, Y. et al. Thermographic inspection of internal defects in steel structures: Analysis of signal processing techniques in pulsed thermography. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 21, p. 1–17, 2020.

CIB. Defects in Masonry Walls Guidance on Cracking: Identification , Prevention and Repair. **International Council for Research Innovation in Building and Construction**, 2014.

COSTA, E. C. DA. **Física aplicada à construção - Conforto térmico**. 4. ed, 1991.

CSTB. Guide Pathologies des Bâtiments - La pathologie des façades. **Centre Scientifique et Technique du Bâtiment**, v. 2, p. 191, 2017.

CSTB. Guide Pathologies des Bâtiments - La pathologie des fondations superficielles. **Centre Scientifique et Technique du Bâtiment**, v. 2, p. 530, 2021.

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

DIAS, R. et al. Mapping External Mortar Render (EMR) defects: case study in multi-storey residential buildings. **Alconpat**, v. 11, n. 3, p. 88–107, 2021.

DIEHL, J. R. **MANUAL OF LATHING AND PLASTERING**. **National Bureau for lathing and plastering**, 1960.

DUAN, Y. et al. ThermoPoD: A reliability study on active infrared thermography for the inspection of composite materials. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 26, n. 7, p. 1985–1991, 2012.

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; DE BRITO, J. Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 187–197, 2014.

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; DE BRITO, J. Quasi-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis. **Building and Environment**, v. 94, n. P1, p. 97–108, 2015.

FAYE, E.; DANGLES, O.; PINCEBOURDE, S. Distance makes the difference in thermography for ecological studies. **Journal of Thermal Biology**, v. 56, p. 1–9, 2016.

FLORES-COLEN, I.; BRITO, D.; FREITAS, D. Methodology for In-Service Performance Assessment of Rendering Façades for Predictive Maintenance. **TG75, W014, W080, W083 &W086, 388**, p. 388–400, 2009.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. Studio Nob ed. São Paulo: [s.n.].

GARRIDO, I. et al. Introduction of active thermography and automatic defect segmentation in the thermographic inspection of specimens of ceramic tiling for building façades. **Infrared Physics and Technology**, v. 121, 2022.

GASPAR, P. L.; BRITO, J. DE. Quantifying environmental effects on cement-rendered facades: A comparison between different degradation indicators. **Building and Environment**, v. 43, n. 11, p. 1818–1828, 2008.

GASPAR, P. M. DOS S. L. Vida útil das construções: Desenvolvimento de uma metodologia para a estimativa da durabilidade de elementos da construção. Aplicação a rebocos de edifícios correntes. **Tese de Doutorado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa**, 2009.

GLAVAŠ, H. et al. Locating hidden elements in walls of cultural heritage buildings by using infrared thermography. **Buildings**, v. 9, n. 2, 2019.

HART, J. M. A practical guide to infra-red thermography for building surveys. **Building Research Establishment**, p. 2–100, 1992.

- IBARRA-CASTANEDO, C. et al. Solar loading thermography: Time-lapsed thermographic survey and advanced thermographic signal processing for the inspection of civil engineering and cultural heritage structures. **Infrared Physics and Technology**, v. 82, p. 56–74, 2017.
- ISO. 15686: Buildings and constructed assets — Service life planning. Part 2: Service life prediction procedures. **British standards institution**, 2011.
- ITC. Termografia Nivel 1 - Manual do Curso. **Infrared Training Center**, 2008.
- JENSEN, F. et al. Active thermography for the detection of sub-surface defects on a curved and coated gfrp-structure. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 20, 2021.
- JOISEL, A. **Fisuras Y Grietas En Morteros Y Hormigones: Sus Causas Y Remedios**, 1981.
- KAHSAY, M. T.; BITSUAMLAK, G.; TARIKU, F. Numerical analysis of convective heat transfer coefficient for building facades. **Journal of Building Physics**, v. 42, n. 6, p. 727–749, 2019.
- KALHOR, D. et al. Cavity detection in steel-pipe culverts using infrared thermography. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 9, 2021.
- KYLILI, A. et al. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics : A review. **Applied Energy**, v. 134, p. 531–549, 2014.
- LAMBERTS, R. Desempenho térmico em edificações. **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**, v. 7º, p. 239, 2016.
- LI, Z. et al. Application of infrared thermography technique in building finish evaluation. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 19, n. 1, p. 11–19, 2000.
- LIU, B. et al. Quantitative evaluation of pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography on foreign object defect (FOD) in CFRP. **Sensors (Switzerland)**, v. 16, n. 5, 2016.
- LIU, H. et al. Detection of Defects in Thermal Barrier Coatings by Thermography Analyses. **Materials Transactions**, v. 44, n. 9, p. 1845–1850, 2003.
- LOURENÇO, T.; MATIAS, L.; FARIA, P. Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 419–428, 2017.
- LUCENAS, R.; BAUER, E.; PAVÓN, E. Diferenças nos padrões de identificação

termográfica de vários materiais e defeitos. **XVII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das construções**, p. 112–119, 2021.

LUCENAS, R. R. D. CRITÉRIOS PARA APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO QUANTITATIVA NA INVESTIGAÇÃO DE DESCOLAMENTOS CERÂMICOS DE FACHADA. **Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UnB. Brasília**, 2022.

MAIERHOFER, C. et al. A round robin test of flash thermography – detectability and quantification of artificial and natural defects in CFRP and metal structures. p. 1–8, 2016.

MALDAGUE, X. P. **Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing**, 2001.

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

MILHOMEM, P. M. CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO GRAU DE DANO DE FISSURAS EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS COM APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO. **Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UnB. Brasília**, p. 124, 2019.

MILHOMEM, P. M.; AIDAR, L. A. G.; BAUER, E. Estudo da evolução da temperatura nas regiões das fachadas por termografia. **PATORREB**, v. 6º, n. April, 2018.

MORGADO, A. et al. Durability of thermal renders with lightweight and thermal insulating aggregates: Regranulated expanded cork, silica aerogel and expanded polystyrene. **Gels**, v. 7, n. 2, 2021.

MOSKOVCHENKO, A. et al. Analyzing probability of detection as a function of defect size and depth in pulsed IR thermography. **NDT and E International**, v. 130, n. February, 2022.

MOTA, L. M. G. ESTUDO DA INICIAÇÃO E DA PROPAGAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE FACHADAS COM REVESTIMENTO EM ARGAMASSA. **Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UnB. Brasília**, p. 179, 2021.

MURPHY, S. W.; OPPENHEIMER, C.; DE SOUZA FILHO, C. R. Calculating radiant flux from thermally mixed pixels using a spectral library. **Remote Sensing of Environment**, v. 142, p. 83–94, 2014.

- NASCIMENTO, M. L. M. et al. Wind-driven rain incidence parameters obtained by hygrothermal simulation. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 1, p. 1–7, 2016.
- OSWALD-TRANTA, B. Time and frequency behaviour in TSR and PPT evaluation for flash thermography*. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 14, n. 2, p. 164–184, 2017.
- OSWALD-TRANTA, B. Induction thermography for surface crack detection and depth determination. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 8, n. 2, 2018.
- OSWALD-TRANTA, B. Lock-in inductive thermography for surface crack detection in different metals. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 16, n. 3–4, p. 276–300, 2019.
- OSWALD-TRANTA, B. Detection and characterisation of short fatigue cracks by inductive thermography. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 19, n. 4, p. 239–260, 2022.
- PAOLETTI, D. et al. Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation. **Journal of Cultural Heritage**, v. 14, n. 2, p. 116–121, 2013.
- PARK, M. J. et al. Machine Learning-Based Concrete Crack Depth Prediction Using Thermal Images Taken under Daylight Conditions. **Remote Sensing**, v. 14, n. 9, p. 1–12, 2022.
- PATRÍCIA M. MILHOMEM, LUIZ A. AIDAR, E. B. ANÁLISE EXPERIMENTAL DA FISSURAÇÃO DE REVESTIMENTO EM ARGAMASSA COM O EMPREGO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO. **XIII SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas**, 2019.
- PAVÓN, E. Critérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho. **Tese (Doutorado em engenharia civil) - programa de pós-graduação em engenharia civil e estruturas - PECC/UNB, Brasília**, p. 250, 2017.
- PAVON, E. B. E. ANÁLISE DA FISSURAÇÃO DE REVESTIMENTO EM ARGAMASSA COM O EMPREGO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO. **XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, 2017.
- PECH-MAY, N. W. et al. Fast Characterization of the Width of Vertical Cracks Using

Pulsed Laser Spot Infrared Thermography. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 35, n. 2, p. 1–10, 2016.

PEREIRA, C. et al. Contribution of Cracking and Spalling to the Degradation of Façade Claddings in Current Buildings. **CIB World Building Congress 2019**, 2019.

PEREIRA, C. H. D. A. F. CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA FISSURAÇÃO, DA RETRAÇÃO E DO MECANISMO DE DESCOLAMENTO DO REVESTIMENTO À BASE DE ARGAMASSA. **Tese (Doutorado em engenharia civil) - programa de pós-graduação em estruturas e construção civil - PECC/UNB, Brasília**, 2007.

PEREIRA, C.; HAMADYK, E.; SILVA, A. Probabilistic analysis of the durability of architectural concrete surfaces. **Applied Mathematical Modelling**, v. 77, p. 199–215, 2020.

PIAZZAROLLO, C. B. Estudo da evolução e da gravidade da degradação nas diferentes zonas componentes da fachada. **Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UnB. Brasília**, 2019.

POZZER, S. et al. Defect Segmentation in Concrete Structures Combining Registered Infrared and Visible Images: A Comparative Experimental Study †. **Engineering Proceedings**, v. 8, n. 1, p. 1–4, 2021.

PRATT, W. K. **Digital Image Processing**. Third Edit ed, 1977. v. 31–32

SAHB, C. A. S. Contribuição ao estudo da interface estrutura-alvenaria externa em edifícios verticais. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Mestrado em engenharia civil, Universidade Federal de Goiás**, p. 418, 2005.

SANTOS, D. G. Estudo Da Vida Útil E Degradação De Fachadas Em Argamassa a Partir Da Inspeção De Edifícios. **Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UnB. Brasília**, p. 136, 2018.

SFARRA, S.; BARREIRA, E.; LAGÜELA, S. Special issue on “infrared thermography and additional non-destructive testing for building, structure and material inspections”. **Sensors**, v. 21, n. 9, p. 2–5, 2021.

SILVA, A.; DE BRITO, J.; GASPAR, P. L. **Methodologies for service life prediction of buildings: with a focus on façade claddings**, 2016.

SILVA, M.; MILHOMEM, P.; BAUER, E. Avaliação de dano de fissuras em revestimentos argamassados por termografia de infravermelho. **XVIII CONGRESSO**

INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES, 2022.

SOUZA, J.; PIAZZAROLLO, C.; BAUER, E. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MENSURAÇÃO DE DEGRADAÇÃO EM REVESTIMENTOS DE FACHADAS. **2º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos (TECSIC)**, 2019.

STANDARDS, B. O. WALL PLASTER: ITS INGREDIENTS, PREPARATION, AND PROPERTIES. **CIRCULAR OF THE BUREAU OF STANDARDS**, v. 151, 1924.

TEJEDOR, B. et al. Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades. **Energy and Buildings**, v. 151, p. 187–197, 2017.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios - Causas, prevenção e recuperação**. 2. ed, 2020.

TU, Y. et al. Distance Effect in Transient Thermography for Internal Defects Detection in Composites. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, p. 1–12, 2022.

VEIGA, M. DO R. DA S. TPI 12 - Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação. **TESES E PROGRAMAS DE INVESTIGAÇÃO LNEC**, 1998.

WANG, Y.; GAO, X.; NETZELMANN, U. Detection of surface cracks in metals under coatings by induction thermography. **14th Quantitative InfraRed Thermography Conference Detection**, p. 602–611, 2018.

WILLIAM D. CALLISTER, J.; RETHWISCH, D. G. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS - UMA INTRODUÇÃO**, 2016.

YUAN, M. et al. Prediction of the Effect of Defect Parameters on the Thermal Contrast Evolution during Flash Thermography by Finite Element Method. **Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing**, v. 34, n. 1, p. 10–17, 2014.

ANEXO

PÓS PROCESSAMENTO DE IMAGEM

A identificação das fissuras e região sem defeito, para a obtenção de Td e Tnd é efetuada por pós processamento de imagem, pelo método de manipulação de histograma (MH) proposto por (PRATT, 1977). O MH efetua o processamento para cada pixel, individualmente, a partir de uma única linha do termograma, ou seja, promove um tratamento horizontal do termograma. Para o cálculo de pós processamento MH é necessário a temperatura máxima e mínima da linha do termograma, onde o pixel de menor ou maior temperatura indica um possível defeito. A temperatura dos defeitos, sejam ela a temperatura máxima ou mínima da linha de investigação do termograma, é modificada, onde recebe, para padronização de identificação, um valor hipotético, que no caso do pós processamento é o valor 100. A equação 1, 2 e 3, do anexo, apresenta a forma de tratamento dos pixels da linha de investigação, onde, quando possuem temperatura máxima ou mínima o valor do pixel será 100, sendo esse tratamento efetuado no aquecimento e resfriamento.

$$Pt = P \cdot m + b \quad (1)$$

$$m = \frac{100}{(T_{max.} - T_{min.})} \quad (2)$$

$$b = 100 - T_{máx.} \cdot m \quad (3)$$

Onde:

Pt: Píxel processado (n.u.);

P: Píxel do termograma sem processamento (°C);

T_{máx.}: Temperatura máxima observada na linha do termograma (°C);

T_{mín.}: Temperatura mínima observada na linha do termograma (°C).

A área de investigação delimitada no termograma, para o estudo do Delta-T, possui 33 pixels verticais, que indica 33 linhas, por 71 pixels horizontais, que indica 71 colunas na matriz. Conseqüentemente, como cada tratamento ocorre para cada linha, é produzida 33 matrizes para a identificação das fissuras, pois cada linha da região do termograma terá uma matriz pixel/tempo. Os termogramas pixel/tempo possuem dimensão de 60 pixels verticais, correspondente ao número de termogramas obtidos nos intervalos de aquecimento e resfriamento, por 71 pixels horizontais, referente ao número de pixel da linha de observação.

Para a produção dos termogramas pixel/tempo é utilizado programação em linguagem C++ no software Rstudio 4.2.1. Os termogramas obtidos no Flir Tools 6.4, são exportados em planilha, em formato Excel 2019, e nomeados pelo seu tempo de aquecimento (exemplo: T0, T4, T8, T12.....T240). Cada um dos termogramas foi exportado para a plataforma de programação do software Rstudio 4.2.1 para produzir as matrizes pixel/tempo, pela combinação entre as linhas dos termogramas de cada intervalo de tempo. O algoritmo de programação para produção das matrizes pixel/tempo é apresentado no quadro 1 do anexo, como exemplo da produção da matriz pixel/tempo referente à linha 1. O esquema de produção das matrizes pixel/tempo é apresentado na figura 1 do anexo, onde a matriz pixel/tempo é a função de todas as linhas de número 1 dos termogramas durante a evolução do aquecimento e resfriamento

```

1 - X1=T4[1,]
2 - X2=T8[1,]
3 - X3=T12[1,]
.
.
.
.
.
60 - X60=T240[1,]
61 - LINHA1=rbind(X1,X2,X3,.....,X60)
62 - install.packages("xlsx")
63 - library("xlsx")
64 - write.xlsx(LINHA1,file = "LINHA1.xlsx")

```

Anexo Quadro 1 - Algoritmo de programação do termograma pixel/tempo da linha 1

Onde:

X1: é a primeira linha que irá compor a matriz pixel/tempo. Oriunda dos primeiros 4 minutos de aquecimento, T4, no qual é referente a primeira linha do termograma de 4 minutos, [1,].

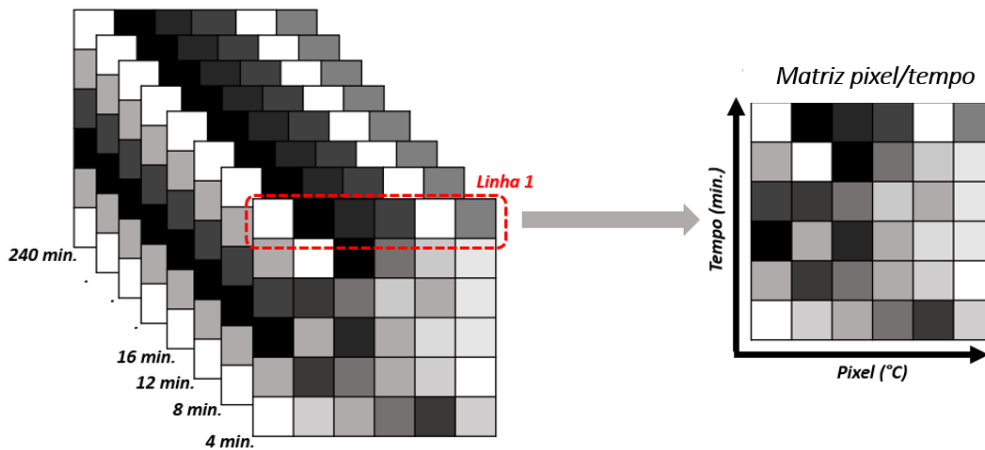
X60: é a última linha que irá compor matriz pixel/tempo. Oriunda dos 240 minutos do resfriamento, T240, no qual é referente a primeira linha do termograma de 240 minutos, [1,].

LINHA1: é a matriz pixel/tempo que combina todas as linhas de número 1 de todos os termogramas por meio do comando *rbind* que combina X1, X2, X3..... e X60 para formar uma matriz de 60 linhas por 71 colunas.

install.packages("xlsx"): comando que instala e possibilita ler, escrever e criar itens em formato de planilha.

library("xlsx"): Habilita as ações de ler, escrever e criar planilhas.

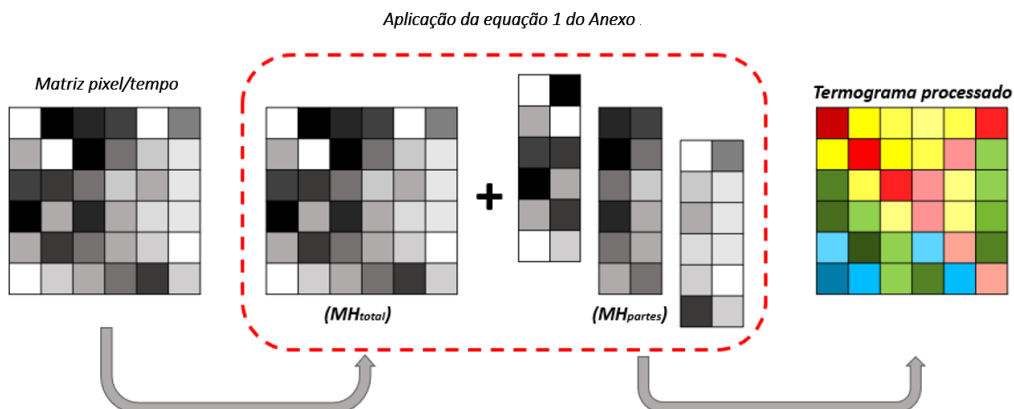
write.xlsx(LINHA1,file = "LINHA1.xlsx"): Cria em formato Excel o item LINHA1 e nomeia pelo comanda *file* e terminologia *xlsx*, que deve ser efetuado entre aspas.



Anexo Figura 1 - Esquema de produção dos termogramas pixel/tempo

Obtendo as matrizes pixel/tempo de cada linha componente da região do termograma, a identificação das fissuras e regiões sem defeito é efetuada pelos pós processamento de termograma MH, equação 1 do anexo. A desvantagem do uso do método MH é a baixa precisão em identificar defeitos horizontais ao termograma e identificar mais de um defeito em uma mesma linha do termograma. Outra desvantagem do método MH é a indicação de defeitos inexistentes nas extremidades do termograma, sendo necessários excluí-los da investigação.

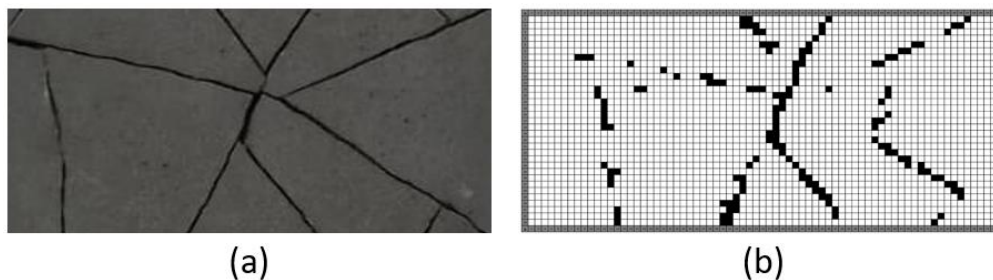
Sabendo das limitações da técnica MH, o processamento é aplicado de duas maneiras, efetuando o pós processamento em toda a matriz pixel/tempo (MH_{total}) e dividindo a matriz em três matrizes menores (MH_{partes}). Os defeitos presentes nas extremidades, antes não detectados, são observados pelo MH_{partes} , enquanto os defeitos centrais ao termograma são observados no MH_{total} . Em ambas as investigações as extremidades do termograma são excluídas, sendo representadas por duas colunas de pixel. O esquema de tratamento de termograma pela matriz pixel/tempo é apresenta na figura 2 do anexo, onde, após a produção das matrizes pixel/tempo, o tratamento de pixel é efetuado no software Excel 2019.



Anexo Figura 2 - Esquema de pós processamento MH dos termogramas pixel/tempo

Como existe a possibilidade de erros de identificação, a identificação da fissura é aferida pelo percentual de repetição do número hipotético 100 durante a evolução do aquecimento e resfriamento, sendo um percentua referente aos 60 termogramas obtidos, 30 termogramas no aqueicmento e 30 no resfriamento.

Percentuais iguais ou infeiores a 5% são considerados como erro, enter 5% e 9% são considerados variações de temperatuda próximas a fissura e percentuais iguais e acima de 10% indicam a região da fissura. Indicado a presença dos pixels que contem a fissura em cada uma das linhas, é montado uma matriz com os defeitos identificados de cada linha, produzindo um mocaiso de identificação das fissuras, possibilitando observar todas fissuras presentes e as regiões sem defeito. A figura 3 (a) do anexo apresenta, como exemplo, a região delimitada de investigação da placa ramificada R1 (1 mm de largura por 5 mm de profundidade), a figura 3 (b) do anexo apresenta o mocaiso de identificação das fissuras, após o pós procesamento dos termogramas, pelo percentual do número hipotético 100, efetuado no Excel 2019. Pelo moicaiso de pixels das fissuras, efetuado no software Excel 2019, é possível calcular Td e Tnd das amostras.



Anexo Figura 3 - Identificação de fissuras: (a) região de investigação; (b) mosaico de pós processamento