



UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU
Programa de Mestrado Profissional *Stricto Sensu* em Engenharia Civil

**INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM USO DA
TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHO**

Leandro Barioni Do Nascimento

São Paulo
Março 2022

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU
Programa de Mestrado Profissional *Stricto Sensu* em Engenharia Civil

**INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM USO DA
TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área do conhecimento: Engenharia Civil

Especialidade: Materiais e Componentes de Construção

Orientador: Prof. Me. Maurício Marques Resende

São Paulo
Março 2022

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca
da Universidade São Judas Tadeu**

Bibliotecária: Marieta Rodrigues Brechet - CRB 8/10384

N244i Nascimento, Leandro Barioni do.
Inspeção de estruturas de concreto com uso da termografia por infravermelho. / Leandro Barioni do Nascimento. - São Paulo, 2022.
f.182: il.; 30 cm.

Orientador: Maurício Marques Resende.
Dissertação (mestrado) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2022.

1. Termografia por infravermelho. 2. Termografia passiva. 3. Inspeção de estruturas de concreto. 4. Gradiente de temperatura superficial. I. Resende, Maurício Marques. II. Universidade São Judas Tadeu, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22 – 624

Leandro Barioni do Nascimento

**INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM USO DA
TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHO**

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu.

São Paulo, 24 de março 2022.

Prof. Maurício Marques Resende, Msc.
Universidade São Judas Tadeu (USJT)

Prof. Sandro Martini, Dr.
Universidade São Judas Tadeu (USJT)

Prof. Saulo Güths, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Dedicatória

Hercília Aguiar Barioni (em memória).

Resumo

A inspeção de estruturas de concreto é o conjunto de procedimentos técnicos e especializados que compreendem a coleta de dados necessários, incluindo a inspeção física e visual, e a formulação de diagnóstico e prognóstico da estrutura, visando manter ou reestabelecer os requisitos de segurança estrutural, de funcionalidade e de durabilidade. Durante estes tipos de inspeção apenas superfícies visíveis da estrutura de concreto, podem ser inspecionadas. Sendo necessário, o uso de ferramentas que podem complementar o poder de resposta de uma inspeção. A termografia por infravermelho é um ensaio não destrutivo que realiza a medição da radiação infravermelha emitida pela superfície do material, através de uma câmera termográfica, produzindo uma imagem térmica visual (termograma), com a capacidade de detecção de defeitos internos ocultos. Os termogramas possibilitam dois tipos de análises de superfície, sendo elas: a quantitativa (avaliação dos dados de temperatura) e a qualitativa (visualização dos contrastes de cores). Estas duas análises são embasadas nos gradientes de temperatura superficiais (ou contraste térmico). Para a qualidade dos termogramas, a termografia por infravermelho deve ser aplicada em campo considerando algumas condições. Na construção civil não se dispõem de documento normativo nacional, específico, voltado para a aplicação da técnica por infravermelho para o processo de inspeção de estruturas de concreto, evidenciando a necessidade do desenvolvimento científico. Nesse contexto, o presente estudo tem por objetivo principal avaliar os gradientes de temperatura superficiais do concreto, ao longo do tempo, podendo se obter o gradiente mínimo de temperatura superficial, para que seja possível a identificação do defeito, no concreto, pela termografia por infravermelho, sob dadas condições (ambientais, de exposição da superfície, especificações do equipamento utilizado, propriedades do objeto de análise, dosagem do concreto, propriedades térmicas dos materiais utilizados, tamanho e profundidade do defeito e distância de medição). Além da identificação dos períodos (janelas de tempo) aplicáveis para inspecionar um elemento de concreto sob determinada condição de exposição. Para este fim, o programa experimental consistiu na confecção de três corpos de prova de concreto com falhas simuladas a profundidades: 1,0 cm (simulando um defeito superficial), 2,5 cm e 4,5 cm (valores de cobertura nominal de estruturas de concreto, admitidos pela ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014)). Foi utilizado da termografia passiva como meio de estímulo (o aquecimento solar diurno e o resfriamento noturno). O monitoramento ocorreu durante um período de 12 horas (das 7:00 às 19 horas), a partir da captura de termogramas com 3 câmeras térmicas de diferentes especificações técnicas, e termopares instalados no interior dos corpos de prova de concreto. Foi observado que o contraste térmico mínimo deve ser superior $\pm 0,2$ °C para que seja possível a detecção do defeito, no concreto, pela câmera termográfica. As diferentes condições (ambientais e de exposição da superfície) estão relacionadas com menor ou maior amplitude do contraste térmico desenvolvido e do período útil para identificação

do defeito, sendo assim, resultantes no nível de desempenho da inspeção termográfica na detecção de defeitos em estruturas de concreto. Vale ressaltar que, a pesquisa está relacionada ao objetivo de desenvolvimento sustentável ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), proposto pela Organização das Nações Unidas.

Palavras chaves: termografia por infravermelho, termografia passiva, inspeção de estruturas de concreto, gradiente de temperatura superficial.

Abstract

Inspection of concrete structures is the set of technical and specialized procedures that comprise the collection of necessary data, including physical and visual inspection, and the formulation of diagnosis and prognosis of the structure, aiming to maintain or reestablish the structural safety requirements, functionality and durability. During these types of inspection, only visible surfaces of the concrete structure can be inspected. Being necessary, the use of tools that can complement the response power of an inspection. Infrared thermography is a non-destructive test that measures the infrared radiation issued by the surface of the material, through a thermographic camera, producing a visual thermal image (thermogram), with the ability to detect hidden internal defects. Thermograms allow two types of surface analysis, namely: quantitative (evaluation of temperature data) and qualitative (visualization of color contrasts). These two analyzes are based on surface temperature gradients (or thermal contrast). For the quality of thermograms, infrared thermography must be applied in the field considering some conditions. In civil construction, there is no specific national normative document, aimed at the application of the infrared technique for the inspection process of concrete structures, evidencing the need for scientific development. In this context, the present study has as main objective to evaluate the surface temperature gradients of the concrete, over time, being able to obtain the minimum surface temperature gradient, so that it is possible to identify the issue, in the concrete by Infrared thermography, under given conditions (environmental, surface exposure, specifications of the equipment used, properties of the object of analysis, concrete dosage, thermal properties of the materials used, size and depth of the defect and measurement distance). In addition to identifying the periods (time slots) applicable to inspect a concrete element under certain exposure conditions. For this purpose, the experimental program consisted in the manufacture of three concrete specimens with simulated failures at depths: 1.0 cm (simulating a superficial defect), 2.5 cm and 4.5 cm (nominal coverage values of structures of concrete, admitted by ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014)). Passive thermography was used as a means of stimulation (daytime solar heating and night cooling), from the capture of thermograms with 3 thermal cameras of different technical specifications, and thermocouples installed inside the concrete specimens. It was observed that the minimum thermal contrast must be greater than ± 0.2 °C for it to be possible to detect the defect, in the concrete, by the thermographic camera. The different conditions (environmental and surface exposure) are related to a smaller or larger amplitude of the thermal contrast developed and the useful period for identifying the defect, thus resulting in the performance level of thermographic inspection in the detection of defects in concrete structures. It is worth mentioning that the research is related to the sustainable development goal ODS 9 (Industry, innovation, and infrastructure), proposed by the United Nations Organization.

Key-words: infrared thermography, passive thermography, inspection of concrete structures, surface temperature gradient.

Lista de Abreviaturas e Siglas

Sigla Descrição

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing Materials
BIS	Bureau of Indian Standards
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EN	European Standards
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

Abreviatura Descrição

FPA	Focal Plane Array
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados
COVID - 19	Coronavírus
LW	Faixa de onda longa
MW	Faixa de onda média
SW	Faixa de onda curta
IR	Radiação infravermelha
FOV	Field of view
HFOV	Horizontal field of view
VFOV	Vertical field of view
MFOV / $IFOV_{meas}$	Instantaneous measurement field of view
IFOV	Instantaneous field of view
NETD	Sensibilidade térmica (em inglês: “noise equivalent temperature difference”)
EPS	Poliestireno Expandido
MF	Módulo de finura
DMC	Dimensão máxima característica
CP	Cimento Portland
RA	Redutor de água

Lista de Símbolos

Símbolo	Unidade	Descrição
ε	Adimensional	Emissividade da superfície
σ	$W/m^2.K^4$	Constante de Stefan Boltzmann
m	kg	Massa
ΔT	$^{\circ}C$	Contraste térmico
T_A	$^{\circ}C$	Temperatura de superfície da área íntegra (sem defeito)
T_B	$^{\circ}C$	Temperatura de superfície da área danificada
τ_{atm}	Adimensional	Emissividade atmosférica
T_{atm}	$^{\circ}C$	Temperatura atmosférica
A	-	Radiação emitida a partir da atmosfera
B	-	Radiação emitida pela superfície do objeto de interesse
T_s	$^{\circ}C$	Temperatura superficial
τ_{atm}	Adimensional	Transmitância da atmosfera
C	-	Radiação emitida a partir da reflexão de objetos presentes no ambiente
ρ	Adimensional	Refletância de sua superfície
T_{ref}	$^{\circ}C$	Temperatura das fontes de objetos de reflexão/Temperatura aparente refletida
E_{det}	-	Energia de radiação total no detector da câmera
E_{obj}	-	Energia emitida pela superfície do objeto
E_{atm}	-	Energia emitida pela atmosfera
E_{amb}	-	Energia emitida pelo ambiente
$B_H \times B_V$	m^2	Área total capturada
D	m	Distância
R	$m^2 \cdot \frac{K}{W}$	Resistência térmica

Símbolo	Unidade	Descrição
q	W	Fluxo de calor médio medidos pelos fluxímetros 1 e 2
T_1 e T_2	K	Temperaturas médias nas superfícies do corpo de prova
A	m^2	Área perpendicular ao sentido de fluxo de calor
L	m	Espessura do corpo de prova
Fck	MPa	Resistência característica do concreto à compressão
Sd	MPa	Desvio padrão de dosagem
Fcm	MPa	Resistência média de dosagem do concreto à compressão
a/c	Adimensional	Relação água/cimento

Lista de Figuras

Figura 1 – Diferentes níveis de desempenho de uma estrutura em função do tempo e dos diferentes fenômenos patológicos (SOUZA; RIPPER, 1998).....	2
Figura 2 - Consequências de uma estratégia de manutenção estrutural baseada apenas em inspeções visuais (STEEN ROSTAM, 1991 apud SOUZA; RIPPER, 1998).....	4
Figura 3 - Evolução das tecnologias de infravermelho da década de 70 até os dias atuais (Adaptado de SANTOS et al., 2005).....	5
Figura 4 - Diferentes domínios para a aplicação da termografia por infravermelho (TELEDYNE FLIR, 2018, 2019a, 2019b, 2019c, 2020a, 2020b).....	8
Figura 5 - Representação esquemática do processo básico de medição da radiação infravermelha pela câmera de imagem térmica (1). A radiação infravermelha emitida pelo: objeto (2); ambiente (3) e atmosfera (4). E o resultado desta medição é o termograma (5) da superfície de um determinado objeto (Adaptada de FLIR SYSTEMS, 2010; ANDRADE, 2020).....	19
Figura 6 - Diagrama de blocos simplificado dos principais componentes da câmera termográfica (FLIR SYSTEMS, [s.d.].....	24
Figura 7 - Ilustração de diferentes tamanhos/resoluções de FPA para uma mesma área capturada (mesma óptica, campo de visão e distância) e sua relação com a quantidade de pixels (detectores) (VOLLMER; MOLLMANN, 2010).....	25
Figura 8 - Representação esquemática dos principais parâmetros espaciais (ópticos e geométricos) da câmera termográfica: (A) Campo de visão FOV: Matriz de Plano Focal (FPA) e lente; (B) Representação do FOV (VFOV e HFOV) e, sua relação com a área total capturada; (C) AFOV: FOV em relação a uma determinada distância D; e (D) Campo de visão instantâneo IFOV (Adaptado de VOLLMER; MOLLMANN, 2010; LANZONI, 2015).....	26
Figura 9 - Ângulos de observação para inspeção termográfica (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).....	28
Figura 10 – Diferentes amplitudes térmicas selecionadas durante a análise da imagem térmica.....	29

Figura 11 – Representação esquemática dos princípios básicos da termografia por infravermelho para a identificação de anomalias em concreto: (A) Períodos de tempo aplicáveis (período do dia e período da noite); (B) Dia típico de aquecimento; (C) Noite típica de resfriamento (HIASA; BIRGUL; CATBAS, 2017).....	31
Figura 12 - Efeito do vazio, defeito ou anomalia na distribuição de temperatura do tabuleiro de concreto durante o fluxo de calor (Adaptado de ACI 228.2R-13, 2013).....	32
Figura 13 – Dois tipos de deteriorações na superfície de concreto investigadas por termografia por infravermelho: fissuração do concreto causada pelo processo de corrosão da armadura e descolamento entre materiais (Adaptado de WASHER et al., 2015).....	33
Figura 14 - Identificação do processo de fissuração, sem danos visíveis, pelos valores de temperatura média para o eixo longitudinal do corpo de prova.....	34
Figura 15 - Profundidade de falha (defeito) detectada/não detectada em relação ao seu tamanho (área e espessura). À direita: profundidade versus área de falha. À esquerda: profundidade versus espessura da falha (HIASA; BIRGUL; CATBAS, 2017).....	37
Figura 16 - Faixa de contraste térmico ΔT admitido para a detecção ou não detecção de defeitos utilizando a termografia por infravermelho (HIASA; BIRGÜL; CATBAS, 2017).....	39
Figura 17 - Scanner infravermelho e o gravador de vídeo montados em um veículo (MALHOTRA; CARINO, 2003).....	40
Figura 18 – Modelo tridimensional de corpo de prova com falhas simuladas de vários tamanhos e profundidades, com a possibilidade de aplicação de diferentes condições de contorno: fluxo de calor aplicado (termografia ativa) ou à interação dos elementos de superfície com o ambiente circundante, por meio de fenômenos de transferência de calor, convecção e radiação (termografia passiva) e temperatura (Adaptado de KHAN et al., 2015).....	49
Figura 19 – Resultados obtidos a partir de modelagens computacionais (modelos de termogramas) (A) e (C) e, testes de campo (captura dos termogramas) (B) e (D), de um bloco de concreto armado com falhas artificiais simulados (RUMBAYAN; WASHER, 2014).....	52
Figura 20 – Programa experimental: categorias principais e suas atividades subsequentes.....	54
Figura 21 - Características geométricas dos corpos de prova de concreto e das falhas de poliestireno com suas respectivas profundidades – valores em metro.....	56

Figura 22 - Etapas do estudo de dosagem do concreto para a confecção dos corpos de prova.....	57
Figura 23 – Processo de moldagem e cura dos corpos de prova de concreto: (a) preenchimento da primeira camada de concreto e escarificação da superfície; (b) preenchimento da última camada de concreto (c) colocação da lona plástica. Legenda: (1) gabaritos laterais; (2) forma de madeira; (3) concreto; (4) lona plástica.....	59
Figura 24 – Processo de acabamento da superfície de análise dos corpos de prova de concreto: (a) superfície de análise sem acabamento, com pontos de acúmulo de pasta (cimento e água) (b) superfície de análise em processo de acabamento com a lixadeira. Legenda: (1) superfície de concreto; (2) lixadeira angular; (3) disco desbaste diamantado segmentado.....	59
Figura 25 – Localização dos corpos de prova de concreto com falha simulada: (a) entrada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (coordenada: -23,55591°; -46,73558°); (b) entrada (ponto de referência) e o local dos corpos de prova de concreto com falha simulada (também conhecido como campo de envelhecimento do IPT). Legenda: (1) entrada; (2) local dos corpos de prova de concreto com falha simulada (GOOGLE EARTH, 2021; GOOGLE MAPS, 2021).....	63
Figura 26 –Pontos de instalação dos termopares para a medição das temperaturas, do concreto íntegro e com defeito (falha simulada): (a) esquema; (b) execução: utilização de aços guia para o correto posicionamento dos termopares (indicação – seta na cor amarela) e termopar utilizado (indicação – seta na cor vermelha).....	64
Figura 27 - Esquema do processo de medição e materiais utilizados.....	67
Figura 28 – Condições (fixas e variáveis) e os seus respectivos itens investigados selecionados no programa experimental da pesquisa.....	69
Figura 29 – Método para o cálculo do contraste térmico ΔT (TRAN et al., 2017).....	70
Figura 30 - Resultados do processo de medição da temperatura média aparente refletida das superfícies dos corpos de prova de concreto, durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00). Total de quatro dias de investigação: (a) 24 de agosto de 2021; (b) 09 de setembro de 2021; (c) 27 de agosto de 2021 (d) 22 de setembro de 2021. Legenda: C.P.C (FA. P. 1,0 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 1,0 cm); C.P.C (FA. P. 2,5 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 2,5 cm); C.P.C (FA. P. 4,5 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 4,5 cm).....	72

Figura 31 – Posição solar em relação ao local dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas (coordenada: -23,5557°; -46,7361°). Total de quatro dias de investigação: (a) 24 de agosto de 2021; (b) 27 de agosto de 2021; (c) 09 de setembro de 2021; (d) 22 de setembro de 2021. Legenda: (1) Posição dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas (SUNEARTH TOOLS.COM, 2021).....	75
Figura 32 - Temperatura média aparente refletida versus temperatura ambiente. (a) 24 de agosto de 2021; (b) 22 de setembro de 2021.....	77
Figura 33 - Diferença entre a temperatura média das superfícies de análise e a temperatura ambiente, durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00). Total de quatro dias de investigação.....	81
Figura 34 – Variação dos parâmetros de entrada no software de imagens térmicas para a avaliação da influência do ambiente (temperatura aparente refletida) e da capacidade de emissão da superfície (emissividade) nas temperaturas de superfície, do concreto íntegro e do defeito e no contraste térmico desenvolvido.....	82
Figura 35 - Resultados das temperaturas médias, do concreto íntegro e do defeito, ao longo do período de monitoramento, obtidos a partir da variação dos parâmetros de entrada do software de imagens térmicas e da medição direta dos termopares, em relação ao dia investigado. 24 de agosto com a superfície do corpo de prova de concreto com falha simulada a 1,0 cm de profundidade: (a.1) emissividade máxima, obtida em campo, em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C) e variável (valores medidos em campo); (a.2) emissividade média em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C) e variável e (a.3) emissividade mínima em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C) e variável.....	84
Figura 36 - Resultados das temperaturas médias, do concreto íntegro e do defeito, ao longo do período de monitoramento, obtidas a partir da variação do parâmetro de entrada de emissividade da superfície do software de imagens térmicas e da medição direta dos termopares em relação ao dia investigado. Dois dias de investigação com duas superfícies analisadas. 24 de agosto com a superfície do corpo de prova de concreto com falha simulada a 1,0 cm de profundidade: (a) emissividade mínima, média e máxima, obtida em campo, em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C). 22 de setembro com a superfície do corpo de prova de concreto com falha simulada a 2,5 cm de profundidade: (b) emissividade mínima, média e máxima, obtida em campo, em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C).....	87

Figura 37 - Resultados de frequência dos valores de emissividade das superfícies de concreto em relação aos 4 dias de investigação. (a) Superfície 1: C.P.C (FA. P. 1,0 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 1,0 cm); (b) Superfície 2: C.P.C (FA. P. 2,5 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 2,5 cm); (c) Superfície 3: C.P.C (FA. P. 4,5 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 4,5 cm).....	91
Figura 38 - Resultados das temperaturas médias de superfície, do concreto íntegro (a) e do defeito (b), e no contraste térmico desenvolvido (c), ao longo do período de monitoramento, em função das diferentes profundidades (1,0 cm; 2,5 cm e 4,5 cm). Dia de investigação: 24 de agosto de 2021.....	92
Figura 39 – Contrastes de cores obtidos nos termogramas, em intervalos de tempo, durante o período de monitoramento, em função da profundidade do defeito. Os dias e os intervalos de tempo investigados são: (a) 24 de agosto, às 12:00; (b) 27 de agosto, às 7:00; (c) 09 de setembro às 19:00 e (d) 22 de setembro, às 11:00.....	94
Figura 40 - Resultados da capacidade de detecção (faixa certamente provável e faixa provável) ou não (faixa improvável) de defeitos nas superfícies dos corpos de prova de concreto, em função das câmeras térmicas utilizadas, segundo o modelo proposto por Hiasa; Birgül; Catbas (2017). (a) FLIR ONE Pro e INFIRAY C210 a uma distância de medição de 1 m (continua).....	101
Figura 41 - Resultados do tempo médio mensal de exposição solar para o ano de 2021 (ano do monitoramento) em relação a localização (no caso, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT) (SUNEARTH TOOLS.COM, 2021).....	107
Figura 42 - Resultados das temperaturas, do concreto íntegro e defeito, obtidas de forma direta a partir dos termopares, durante um período de 24 horas de monitoramento, sob dadas condições ambientais e de exposição. (a) Dia quente e superfície exposta a radiação solar direta (24 de agosto); (b) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (27 de agosto) e (c) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (22 de setembro).....	110

Figura 43 - Resultados da delineação dos processos físicos, resfriamento (1), equilíbrio térmico (2) e aquecimento (3), a partir das temperaturas médias de superfície, do concreto íntegro e defeito, e dos contrastes ou não de cores, obtidas a partir da captura dos termogramas, durante o período de monitoramento, sob diferentes condições ambientais e de exposição. (c) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (27 de agosto) e (d) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (22 de setembro).....	114
Figura 44 – Mudanças no sentido de fluxo de calor no interior da estrutura de concreto (aquecimento ou resfriamento), para que seja possível a identificação do defeito: (a) Condição do processo de aquecimento; (b) Condição do processo de resfriamento.....	116
Figura 45 – Mudanças no sentido de fluxo de calor no interior da estrutura de concreto (aquecimento ou resfriamento), para que seja possível a identificação do defeito: (a) Condição do processo de aquecimento; (b) Condição do processo de resfriamento.....	117
Figura 46 - Diagrama de Ishikawa: organização e categorização das causas (baseado nos 6M) em relação ao uso da termografia por infravermelho para inspeção de estruturas de concreto (processo).....	123
Figura 47 - Elementos utilizados para a realização dos ensaios das propriedades termofísicas: (a) moldagem dos corpos de prova de concreto (b) corpos de prova de concreto (CP1 e CP2) e (c) falha de poliestireno expandido (EPS).....	134
Figura 48 - Princípio do método de medição da resistência térmica.....	136
Figura 49 - Composição Granulométrica do agregado miúdo (DMC=4,75mm e MF=3,39).....	143
Figura 50 - Composição Granulométrica da Brita 0 (DMC=12,5mm e MF=5,04).....	145
Figura 51 - Composição Granulométrica da Brita 1 (DMC=19mm e MF=5,70).....	146
Figura 52 – Método refletor.....	149
Figura 53 - Processo de medição em campo da Temperatura Aparente Refletida (<i>T_{ref}</i>) pelo método refletor: (a) refletor infravermelho utilizado e modos de reflexão de acordo com a rugosidade da superfície; (b) refletor infravermelho colado sobre a superfície de análise e câmara termográfica a curta distância, de modo que toda a área refletora esteja inteiramente contida nos termogramas. Legenda: (1) papel alumínio; (2) modos de reflexão: especular e difusa; (3) superfície de concreto analisada; (4) câmara termográfica; (5) termograma capturado.....	150

Figura 54 - Processo de medição da Temperatura Aparente Refletida (T_{ref}) no software de imagens térmicas: Média da temperatura aparente refletida dos termogramas capturados ($T_{ref\ média}$).
Legenda: (1) papel alumínio (área refletora); (2) ferramenta de medição de área.....151

Figura 55 – Método da emissividade conhecida.....152

Figura 56 – Processo de medição em campo da emissividade da superfície (ϵ) pelo método da emissividade conhecida: material utilizado como referência de emissividade, colado sobre a superfície de análise, onde é feito a captura do termograma a curta distância de medição. Legenda: (1) fita adesiva isolante; (2) superfície de concreto analisada; (3) termograma capturado.....153

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Vantagens e limitações referentes a aplicação da termografia por infravermelho (ACI 228.2R-13, 2013; BARREIRA, 2004; CLARK; MCCANN; FORDE, 2003; MALHOTRA; CARINO, 2003).....	9
Tabela 2 - Principais documentos nacionais e estrangeiros relacionado as aplicações de monitoramento de condição utilizando a termografia por infravermelho (Adaptado de BAGAVATHIAPPAN et al., 2013).....	11
Tabela 3 – Norma brasileira e seus respectivos anexos com as metodologias para a obtenção dos parâmetros de medição como: emissividade da superfície, temperatura aparente refletida e transmitância atmosférica.....	23
Tabela 4 – Detecção de defeitos em relação a profundidade, o tamanho (área do defeito) e o tempo de coleta (ROCHA; TAVARES, 2017).....	36
Tabela 5 - Condições ambientais necessárias para identificação de deteriorações em tabuleiros de pontes de concreto (com e sem camadas de asfalto) com o uso da tecnologia de infravermelho (desenvolvimento de um gradiente mínimo de temperatura para que seja possível a detecção), conforme a ASTM D4788-03 (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).....	41
Tabela 6 – Resumo das diretrizes para inspeção de pontes de concreto com o uso da termografia por infravermelho (Washer; Fenwick e Bolleni 2009).....	42
Tabela 7 - Condições ambientais brasileiras obtidas a partir dos resultados das pesquisas de Rocha; Póvoas (2019) e Rocha; Póvoas; Santos (2018).....	44
Tabela 8 – Resumo das propriedades do concreto utilizado.....	58
Tabela 9 - Resultados das propriedades térmicas dos materiais utilizados (concreto e poliestireno expandido) na confecção dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas à superfície: (1) Valores medidos em laboratório; (2) Valores teóricos.....	60
Tabela 10 – Resultados de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto aos 28 dias, moldados durante o processo de confecção dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas a superfície (profundidade da falha: 1,0 cm; 2,5 cm e 4,5 cm).....	62
Tabela 11 – Câmeras térmicas utilizadas e suas principais especificações (continua).....	65

Tabela 12 – Valores de temperatura ambiente (mínima, média e máxima) e de umidade relativa do ar (mínima, média e máxima), durante o período de monitoramento, dos quatro dias investigados.....	71
Tabela 13 - Resumo dos resultados do processo de medição da temperatura aparente refletida (mínima, média e máxima) das superfícies dos corpos de prova de concreto, durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00). Total de quatro dias de investigação.....	73
Tabela 14 – Resumo dos resultados do processo de medição da emissividade (mínima, média e máxima) das superfícies dos corpos de prova de concreto, durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00). Total de quatro dias de investigação.....	78
Tabela 15 - Resultados do contraste térmico (mínimo, média e máximo), ao longo do período de monitoramento, das duas superfícies analisadas dos corpos de prova de concreto, para os 2 dias investigados.....	88
Tabela 16 – Parâmetros de entrada adotados no software de imagens térmicas para avaliação da influência da profundidade do defeito na temperatura de superfície, do concreto íntegro e do defeito e no contraste térmico desenvolvido, para os 4 dias de investigação.....	90
Tabela 17 - – Resumo dos resultados de contraste térmico (mínimo, média e máximo) das superfícies analisadas dos corpos de prova de concreto, em função da profundidade do defeito, dos 4 dias investigados.....	93
Tabela 18 - Câmeras térmicas utilizadas, durante o período de monitoramento, nas superfícies dos corpos de prova de concreto, suas principais especificações técnicas e os parâmetros considerados na investigação.....	95
Tabela 19 – Resumo dos resultados do contraste térmico (mínimo, média e máximo), da profundidade do defeito detectado e do período útil para a identificação do defeito, em função das câmeras térmicas utilizadas.....	97
Tabela 20 – Condições ambientais monitoradas, durante o período de monitoramento (das 7:00 às 19:00), dos dias investigados.....	105
Tabela 21 – Classificação dos dias investigados em relação a condição de inspeção, a estação do ano, o dia e a condição de exposição da superfície da estrutura.....	106
Tabela 22 – Resultados do tempo de exposição solar, para os dias investigados, em relação a estação do ano (SUNEARTH TOOLS.COM, 2021).....	108

Tabela 23 - Ensaio realizados, elementos ensaiados e as metodologias utilizadas para a determinação das propriedades termofísicas dos materiais (concreto e falha de poliestireno expandido).....	133
Tabela 24 - Resultados de resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios de corpos de prova cilíndricos de concreto aos 28 dias.....	135
Tabela 25 - Resultados de resistência térmica e de condutividade térmica dos elementos ensaiados.....	137
Tabela 26 - Especificações do concreto para o estudo de dosagem.....	138
Tabela 25 - Especificações do concreto para o estudo de dosagem (continuação).....	139
Tabela 27 - Propriedades do concreto no estado fresco.....	140
Tabela 28 - Propriedades do concreto no estado endurecido.....	141
Tabela 29 - Resultados da Absorção de água após imersão (sem fervura), índice de vazios e massa específica real de corpos de prova cilíndricos de concreto.....	141
Tabela 30 - Resultados da massa específica nas condições, seco, saturado superfície seca e aparente, para o agregado miúdo.....	143
Tabela 31 - Resultados da massa específica nas condições, seco, saturado superfície seca e aparente, para as britas graníticas, B0 e B1.....	145
Tabela 32 - Determinação da composição "ideal" entre as britas graníticas B0 e B1, a partir da massa unitária no estado compactado seco.....	147
Tabela 33 - Metodologias brasileiras aplicadas para a obtenção dos parâmetros de medição.....	148

Sumário

Resumo.....	VI
Abstract.....	VIII
Lista de Abreviatura e Siglas.....	X
Lista de Símbolos.....	XII
Lista de Figuras.....	XIV
Lista de Tabelas.....	XXI

Capítulo 1

1. Introdução.....	2
1.1 Justificativa.....	9
1.2 Objetivos.....	14

Capítulo 2

2. Termografia por infravermelho aplicada para inspeção de estruturas de concreto.....	16
2.1 A Termografia por infravermelho.....	16
2.2 Processo de medição utilizando a termografia por infravermelho.....	18
2.2.1 A influência das propriedades do objeto de análise no processo de medição da termografia por infravermelho.....	17
2.2.2 A influência das propriedades do equipamento no processo de medição da termografia por infravermelho.....	22
2.3 Avaliação de estruturas de concreto com o uso da termografia por infravermelho.....	30
2.4 A influência das condições do defeito do concreto (tamanho e profundidade) no uso da termografia por infravermelho.....	35

2.5 A influência das condições ambientais no uso da termografia por infravermelho.....	38
2.6 A Influência das propriedades termofísicas do concreto no uso da termografia por infravermelho.....	46
2.7 Os avanços no estudo da termografia por infravermelho para inspeção de estruturas de concreto modelagem computacional.....	48

Capítulo 3

3. Programa experimental.....	53
3.1 Método de construção dos corpos de prova.....	54
3.1.1 Propriedades térmicas.....	60
3.1.2 Avaliação da qualidade do concreto produzido.....	61
3.2 A forma de monitoramento dos parâmetros.....	63
3.3 O método de avaliação.....	67

Capítulo 4

4. Resultados e discussão.....	69
4.1 Condições variáveis.....	71
4.1.1 Objeto de análise.....	71
4.1.1.1 Temperatura aparente refletida.....	71
4.1.1.2 Emissividade da superfície.....	77
4.1.1.3 Influência das propriedades do objeto de análise.....	81
4.1.2 Influência das condições do defeito do concreto.....	89
4.1.3 Equipamento.....	94
4.1.4 Condições ambientais.....	104

4.1.4.1 Forma de classificação dos dias investigados.....	105
4.1.4.2 Detalhamento dos processos físicos de aquecimento e resfriamento das estruturas de concreto.....	109
Conclusões.....	119
Referências Bibliográficas.....	124
Apêndice A – Determinação das propriedades termofísicas dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova.....	133
Determinação da resistência térmica.....	135
Apêndice B - Estudo de dosagem do concreto utilizado para a confecção dos corpos de prova.....	138
Especificações dos materiais utilizados no concreto.....	142
Cimento.....	142
Agregado miúdo.....	142
Massa unitária.....	142
Massa específica.....	142
Agregados graúdos.....	144
Massa unitária.....	144
Massa específica.....	144
Composição granulométrica.....	145
Mistura de agregados graúdos.....	146
Apêndice C – Metodologias utilizadas para obtenção dos parâmetros de medição.....	148
Temperatura aparente refletida.....	148
Emissividade da superfície.....	151

Anexo – Relatórios dos ensaios das propriedades termofísicas.....	155
--	------------

1. Introdução

As estruturas de concreto podem apresentar diferentes níveis de desempenho em função do tempo e dos diferentes fatores que influenciam no seu processo de deterioração, como o desgaste natural associado a exposição ambiental, possíveis acidentes que possam ocorrer ou até mesmo a necessidade de reforço (SOUZA; RIPPER, 1998). A programação de intervenções técnicas (manutenções) constantes e eficientes, bem como uma correta avaliação, geram tomadas de decisão satisfatórias, assegurando o atendimento ao nível mínimo de desempenho ao longo da vida útil de projeto da estrutura (Figura 1).

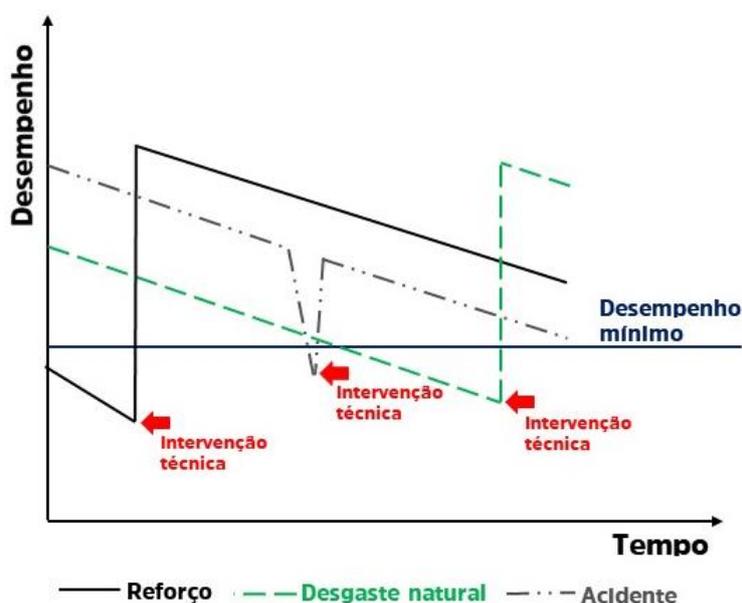


Figura 1 – Diferentes níveis de desempenho de uma estrutura em função do tempo e dos diferentes fenômenos patológicos (SOUZA; RIPPER, 1998).

A inspeção de estruturas de concreto é o conjunto de procedimentos técnicos e especializados que compreendem a coleta de dados necessários, incluindo a inspeção física e visual, e a formulação de diagnóstico¹ e prognóstico da estrutura, visando manter ou reestabelecer os requisitos de segurança

¹ **Diagnóstico** é o resultado da atividade de identificação da natureza de uma anomalia. A Anomalia como sendo a descaracterização de um elemento ou sistema integrante da estrutura em relação à sua concepção original, conforme as definições da ABNT NBR 9452 (ABNT, 2019).

estrutural², de funcionalidade³ e de durabilidade⁴ (ABNT NBR 9452, 2019; ABNT NBR 16230, 2013; DNIT, 2004).

Durante a inspeção física, alguns tipos de deteriorações do concreto, como, as desagregações⁵, as disgregações⁶ e os vazios de concretagem ainda não visíveis, podem ser avaliados por processos físicos (DNIT, 2004).

A inspeção visual é um exame da estrutura de concreto para identificar e definir diferentes condições que o concreto pode apresentar durante sua vida útil. Durante o exame, apenas superfícies aparentes da estrutura de concreto, podem ser inspecionadas, sendo uma possível limitação da técnica. Normalmente é uma das primeiras etapas na avaliação de uma estrutura de concreto (PERENCHIO, 1989 apud ACI 228.2R-13, 2013), sendo utilizada como uma etapa introdutória na avaliação, quanto sua capacidade estrutural, como para justificar o uso continuado ou alterado, para analisar a resistência ou deformação no local ou para definir a necessidade de manutenção e reabilitação (ACI 201.1R-08, 2008).

É um dos mais versáteis dos métodos de ensaios não destrutivos, entretanto, sua eficácia depende do conhecimento e experiência do inspetor. O inspetor deve possuir um amplo conhecimento em engenharia estrutural, materiais, mecanismos de deterioração e métodos de construção, para extrair o máximo de informações da inspeção visual. (ACI 228.2R-13, 2013). É importante que o inspetor observe, classifique e documente adequadamente a aparência de deteriorações nas superfícies expostas da estrutura de concreto (ACI 228.2R-13, 2013), sendo as observações relacionadas à exposição ambiental (efeitos de cargas físicas, deformações, defeitos, imperfeições e desgaste).

² **Requisitos de segurança estrutural** são aqueles referentes à sua estabilidade e capacidade portante (resistente), sob os critérios de seus estados limites último (colapso da estrutura) e de utilização (resposta da estrutura perante ao uso diário, por exemplo, fissuração, flechas e vibrações excessivas) (ABNT NBR 9452, 2019).

³ **Requisitos de funcionalidade** são aqueles aspectos da estrutura relacionados diretamente aos fins a que ela se destina. Deve proporcionar conforto e segurança a seus usuários (ABNT NBR 9452, 2019).

⁴ **Requisitos de durabilidade** são aqueles diretamente associados à vida útil, ou seja, o tempo estimado em que a estrutura deve cumprir suas funções em serviço. Os requisitos vinculam-se à resistência da estrutura contra ataques de agentes ambientais agressivos, por exemplo, anomalias associadas à durabilidade, ausência de cobrimento de armadura, corrosão, fissuração que permite infiltrações, entre outras (ABNT NBR 9452, 2019).

⁵ **Desagregação** do concreto é um dos sintomas mais característicos da existência de um ataque químico (presença de sulfatos e dos cloretos, por exemplo); quando ocorre, o cimento perde sua função ligante; deixando os agregados livres. O fenômeno da desagregação se inicia na superfície dos elementos de concreto, por uma mudança na coloração, seguido por um aumento na abertura das fissuras e, por fim ocorre a desintegração da massa de concreto com os seus materiais componentes (DNIT, 2004)

⁶ **Disgregação** do concreto é um sintoma característico de fenômenos físicos, onde solicitações internas provocam fortes trações localizadas e sobrecargas anormais, provocando substanciais deformações nos elementos estruturais. Sendo umas das causas mais frequentes de disgregações, a corrosão de armaduras, onde a grande pressão exercida pela camada expansiva de óxido de ferro provoca um forte estado de tensões no concreto (DNIT, 2004).

A inspeção visual também pode ser utilizada para o acompanhamento periódico durante a vida útil da estrutura de concreto, fornecendo informações históricas importantes sobre desempenho e durabilidade, auxiliando na detecção precoce de deterioração. Caso os reparos necessários sejam feitos aplicando-se os procedimentos terapêuticos que são elaborados para cada caso, possibilita a diminuição de riscos à estabilidade da estrutura, podendo evitar a substituição (ACI 201.1R-08, 2008; ACI 228.2R-13, 2013).

Steen Rostam (1991) considera que, em alguns casos, a vida útil da estrutura poderá estar seriamente comprometida se as inspeções a serem feitas se limitarem apenas aos registros com recurso a observação a olho nu, apoiada apenas por meios tradicionais, sem instrumentação adequada, posto que o ponto de identificação visual dos problemas estruturais normalmente ocorre já a meio caminho da etapa de propagação dos mesmos, como se pode observar no esquema genérico mostrado na Figura 2 (apud SOUZA; RIPPER, 1998).

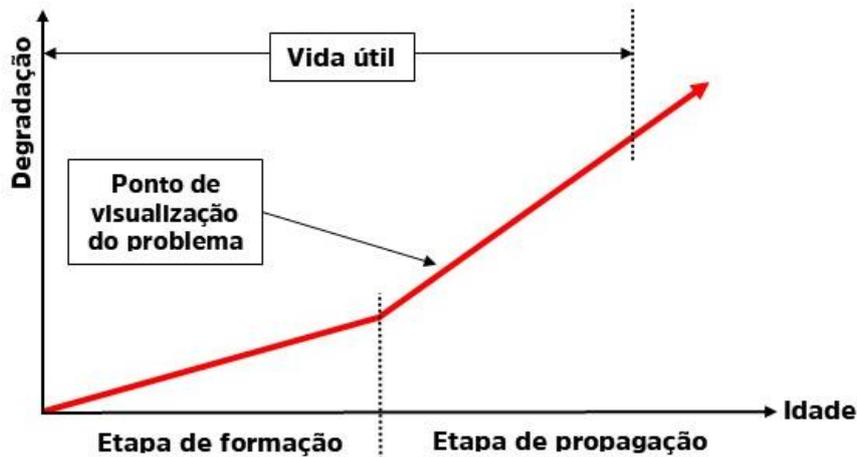


Figura 2 - Consequências de uma estratégia de manutenção estrutural baseada apenas em inspeções visuais (STEEN ROSTAM, 1991 apud SOUZA; RIPPER, 1998).

Desta forma, a inspeção visual pode ser complementada com o uso de ensaios não destrutivos, ensaios destrutivos e outras investigações, principalmente quando a deterioração não é observada visualmente, tendo a necessidade de informações sobre a condição interna do concreto (ACI 201.1R-08, 2008; ACI 228.2R-13, 2013). Defeitos internos passam despercebidos e nenhuma informação qualitativa ou quantitativa é obtida sobre as propriedades do concreto. O inspetor deve considerar outras ferramentas úteis que podem aumentar o poder de uma inspeção visual (ACI 228.2R-13, 2013).

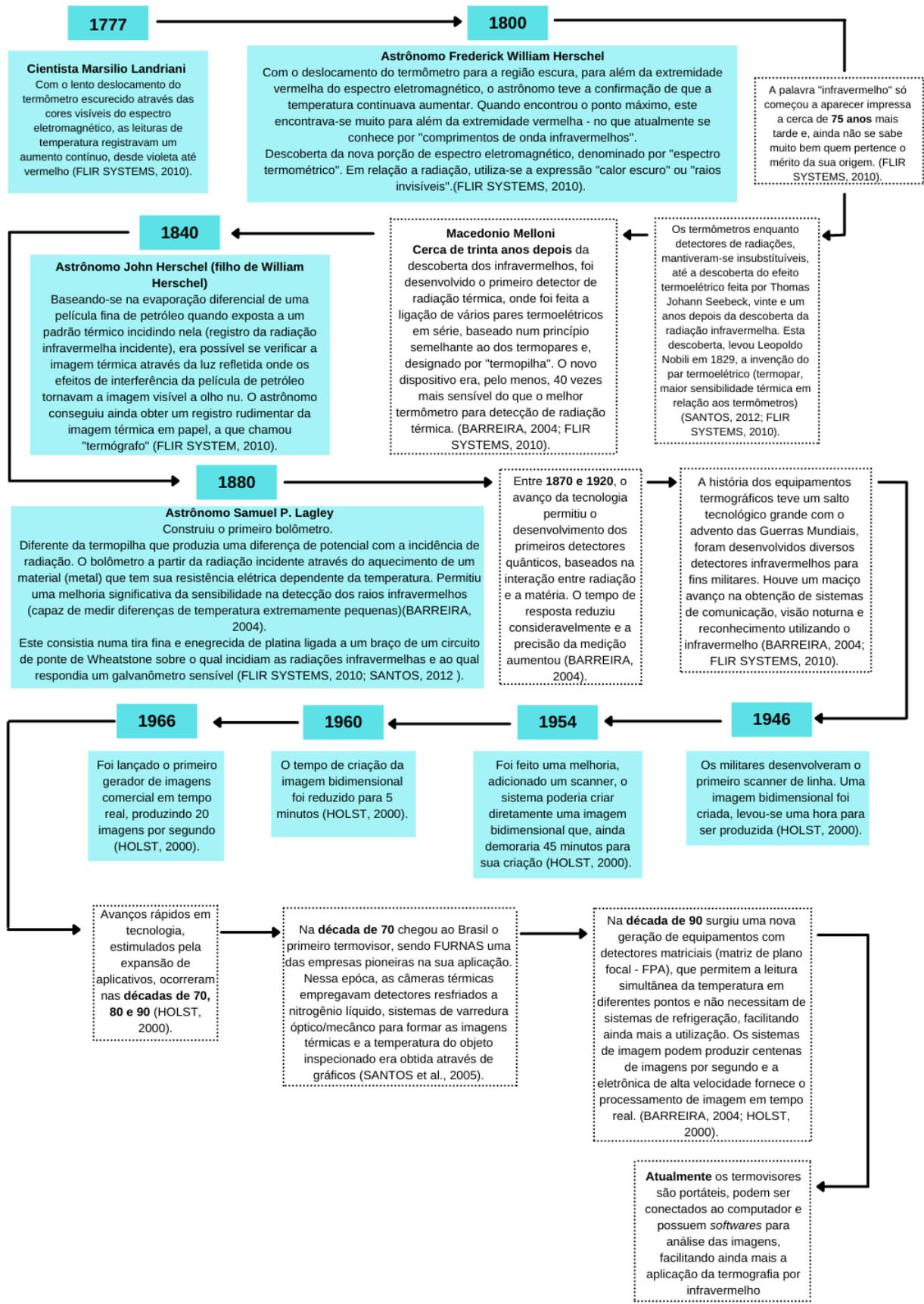
Dentre estas ferramentas, nos últimos anos, vem se destacando a utilização da termografia por infravermelho. A termografia por infravermelho é um ensaio não destrutivo que, realiza a medição,

através de uma câmera termográfica, da radiação infravermelha emitida pela superfície do material. Como resultado desta medição, produz-se uma imagem térmica visual, conhecida como termograma. Com este termograma é possível ter o conhecimento das distribuições de temperatura da superfície. Em relação a avaliação de estruturas de concreto com a termografia por infravermelho, vazios, defeitos ou anomalias interrompem o fluxo de calor no interior do concreto. Sendo estes próximos à superfície, a termografia por infravermelho é capaz de detectar essas diferenças de temperatura entre o concreto íntegro (sem defeito) e o danificado (ACI 228.2R-13, 2013).

Rápidos avanços na tecnologia de infravermelhos foram observados desde 1970 até os dias atuais (Fluxograma 1 e Figura 3). Detectores de resfriamento criogênico evoluíram para resfriados eletricamente e, em seguida, para detectores sem resfriamento. Os sistemas de varredura óptico/mecânico foram substituídos pela tecnologia FPA (*Focal Plane Array*), o peso que nos anos 70 chegava próximo dos 40 kg, diminuíram para menos de 1 kg, as leituras de temperatura passaram a ser mostradas diretamente no monitor da câmera e a sensibilidade térmica melhorou consideravelmente (SANTOS et al., 2005). Tendo também, a possibilidade da conexão de câmeras térmicas nos dispositivos móveis, utilizados como termovisores, bem como, a junção em veículos aéreos não tripulados (VANT). As câmeras termográficas podem ser conectadas ao computador e possuem softwares para análise das imagens, facilitando ainda mais a aplicação da termografia por infravermelho.



Figura 3 - Evolução das tecnologias de infravermelho da década de 70 até os dias atuais (Adaptado de SANTOS et al., 2005).



Fluxograma 1 - Estudos e descobertas mais relevantes relacionados a tecnologia por infravermelhos (BARREIRA, 2004; FLIR SYSTEMS, 2010; HOLST, 2000; SANTOS, 2012; SANTOS et al., 2005).

O desenvolvimento, a facilidade de aplicação e o poder de resposta da termografia por infravermelho possibilita a sua presença em diferentes domínios, como:

- I. Na identificação de vazamentos de gás de metano, invisível e potencialmente perigoso, em usinas de gás natural, instalações de produção de energia renovável, plantas industriais e outros locais ao longo de uma cadeia de fornecimento de gás natural (Figura 4 (A)) (TELEDYNE FLIR, 2019b);
- II. Nos equipamentos de detecção para fins militares, socorristas e equipes de busca (segurança e vigilância) (Figura 4 (B)) (TELEDYNE FLIR, 2018);
- III. No sistema de veículos autônomos (Figura 4 (C)) (TELEDYNE FLIR, 2019a);
- IV. No mapeamento da superfície de geleiras (levantamento térmico) para o entendimento da influência da cobertura da superfície na taxa de derretimento (Figura 4 (D)) (TELEDYNE FLIR, 2020a);
- V. Na visualização do eclipse lunar (onde o branco é a cor mais quente, seguida de vermelho e preto) (Figura 4 (E)) (TELEDYNE FLIR, 2019c);
- VI. Na atualidade, em uma das maiores crises sanitárias mundiais, a epidemia do coronavírus (COVID – 19), a técnica por infravermelho pode contribuir para o controle rápido, seguro e sem contato, de pessoas infectadas em espaços de grande circulação, como, aeroportos, estações de metrô e de trem, empresas e fábricas. Utilizando-se da ferramenta para obter a informação visual e quantitativa da distribuição das temperaturas superficiais do corpo, identificando indivíduos com temperatura corporal elevada para realização do processo de triagem (Figura 4 (F)) (TELEDYNE FLIR, 2020b).

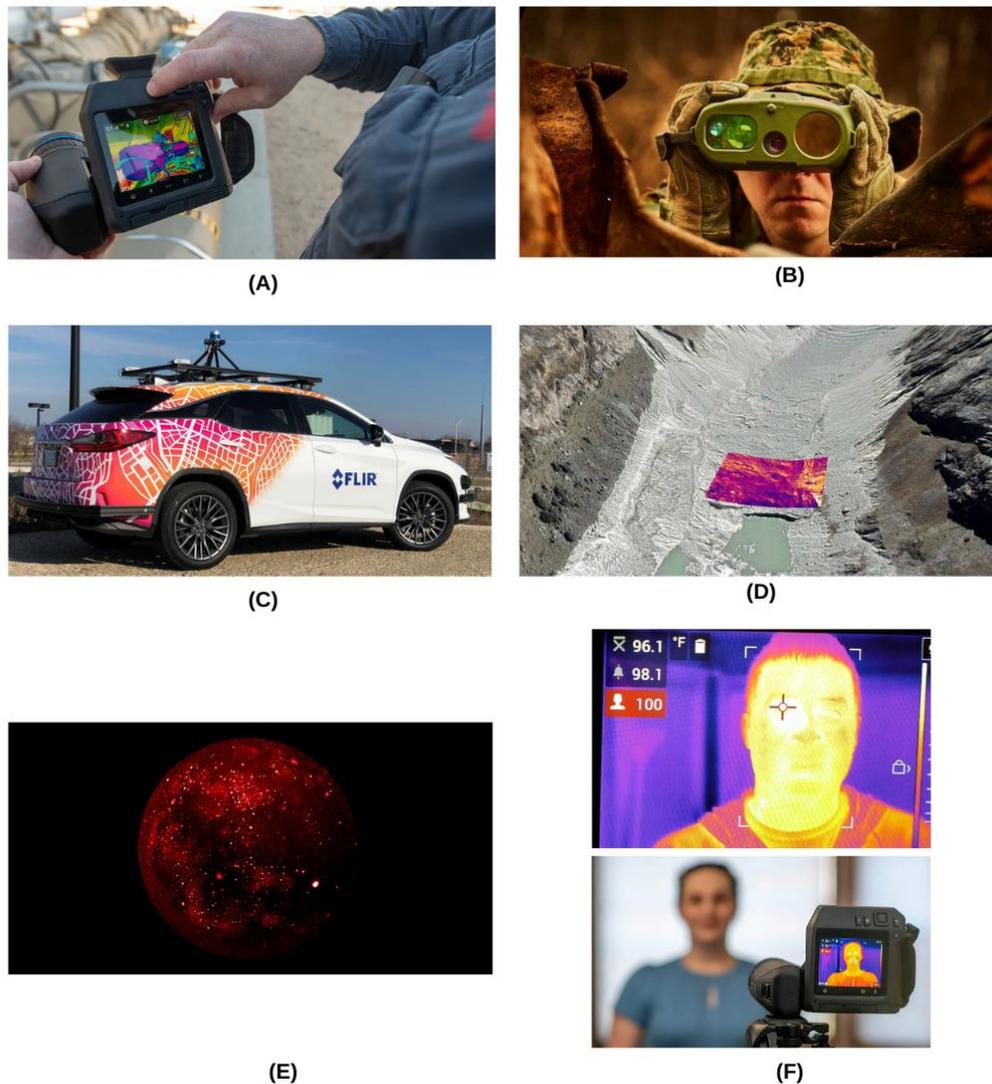


Figura 4 - Diferentes domínios para a aplicação da termografia por infravermelho (TELEDYNE FLIR, 2018, 2019a, 2019b, 2019c, 2020a, 2020b).

Na patologia das estruturas de concreto, área de interesse desta dissertação, as aplicações da termografia por infravermelho são muitas e, passam por: identificação das delaminações, dos deslocamentos, das fissuras, das infiltrações, dos produtos de corrosão, dos vazios e diversos defeitos ocultos ou visíveis. A técnica por infravermelho pode ser empregada como ferramenta auxiliar de diagnóstico em diversas estruturas, como edifícios e pontes, possibilitando avaliar a estrutura sem precisar destruí-la ou removê-la de seu local de uso e aplicação.

Apesar da potencialidade e dos resultados da termografia por infravermelho, ela deve ser aplicada em campo considerando algumas condições. Sendo algumas dessas condições: o meio ambiente (condições ambientais), o equipamento utilizado (câmera térmica), a metodologia de avaliação (ângulo de obtenção da imagem térmica, janelas de inspeção e outros), as propriedades do

material analisado, a mão de obra e os dados obtidos em campo, como, emissividade da superfície e temperatura aparente refletida. Uma técnica de diagnóstico extremamente útil desde que aplicada com o conhecimento técnico adequado, caso executada de forma incorreta, altera significativamente os resultados e, conseqüentemente, a análise.

1.1 Justificativa

Na presente pesquisa, faz-se necessário o estudo do acompanhamento periódico de estruturas de concreto com o uso da termografia por infravermelho, como meio de avaliar este tipo de estrutura, diminuindo os riscos associados a essas obras e, buscando garantir a segurança desses componentes, proporcionando diagnósticos e prognósticos eficazes, garantindo manutenções preventivas eficientes, desempenho adequado em uso e a durabilidade da estrutura.

O avanço nas tecnologias por infravermelhos foi direcionado para a melhoria na capacidade de detecção da radiação infravermelha (maior sensibilidade térmica), na criação e redução no tempo de resposta dos termogramas, no peso e na versatilidade do equipamento, no desenvolvimento de softwares e de aplicativos. A partir do referencial teórico, ACI 228.2R-13 (2013); Barreira (2004); Clark; Mccann; Forde (2003); Malhotra; Carino (2003), foi feito o levantamento das principais vantagens e limitações referentes a aplicação da termografia por infravermelho (Tabela 1).

Tabela 1 - Vantagens e limitações referentes a aplicação da termografia por infravermelho (ACI 228.2R-13, 2013; BARREIRA, 2004; CLARK; MCCANN; FORDE, 2003; MALHOTRA; CARINO, 2003) (continua).

Vantagens	Limitações
O ensaio pode ser realizado durante o dia e a noite, dependendo das condições ambientais;	Necessitam-se de condições ambientais adequadas e de condições de fluxo de calor entre o ambiente e o objeto analisado;
Sistemas de medição infravermelhos são extremamente precisos. A câmera térmica é capaz de detectar e monitorar flutuações rápidas de temperatura com uma incerteza de $\pm 0,08^{\circ}\text{C}$;	Obtém-se diferentes respostas de ensaios termográficos com condições ambientais variáveis (gradiente de temperatura, sombra ou radiação solar direta, cobertura de nuvens e água de superfície);

Tabela 1 - Vantagens e limitações referentes a aplicação da termografia por infravermelho (ACI 228.2R-13, 2013; BARREIRA, 2004; CLARK; MCCANN; FORDE, 2003; MALHOTRA; CARINO, 2003) (continuação).

Vantagens	Limitações
A termografia infravermelha é capaz de formar uma imagem bidimensional da superfície ensaiada, mostrando a extensão das anomalias de superfície;	Podem-se tornar difícil a detecção da profundidade (localização) e da espessura de uma anomalia de superfície;
Uma técnica de ensaio que cobre áreas muito maiores do que outros métodos de ensaios, por exemplo, os destrutivos que são testes pontuais ou de linha;	Deve-se adotar de metodologia adequada (distância correta de medição entre o objeto analisado e o equipamento, ângulo de visão e entre outros). A ausência provoca distorções na distribuição de temperaturas superficiais do elemento construtivo e influencia significativamente os resultados, caso não sejam evitados durante a realização do ensaio;
A técnica pode determinar as localizações de anomalias de superfície e dimensões horizontais, e, com novos métodos de análise de dados, pode ser possível estimar a profundidade de um defeito. Os resultados fornecem uma indicação da porcentagem de área deteriorada na região de análise;	Deve-se ter a consideração de alguns parâmetros de medição como emissividade, reflexão de objetos vizinho para a captura e interpretação dos termogramas;
Metodologia de ensaio não destrutiva, rápida (ensaio em tempo real) e eficaz. Com economia de mão de obra, de equipamento, de controle de tráfego e de problemas de programação;	A presença de objetos vizinhos (árvores, edifícios altos, linhas elétricas aéreas) pode afetar o processo de medição, condições de sombra, por exemplo;
Método de ensaio de sensoriamento remoto (coleta de informações realizada por sensores distantes, remotos, a partir da radiação eletromagnética da superfície), não invasivo e de longo alcance. Como não há contato, não interfere com o funcionamento e comportamento do elemento a medir;	Necessita-se um profissional treinado para garantir que os dados adquiridos sejam significativos e corretamente interpretados;
A análise computadorizada de imagens térmicas melhora muito a precisão e a velocidade da interpretação do ensaio;	Custo do equipamento é relativamente elevado
Medição de objetos móveis, de difícil acesso ou ambientes perigosos e, não requer andaimes ou plataformas de trabalho.	

Verifica-se um total de seis normas brasileiras voltadas para aplicação da termografia por infravermelho, como técnica não invasiva e não destrutiva, onde os documentos podem ser utilizados

em áreas distintas, como em sistemas elétricos e na construção civil. A norma brasileira apresentada na Tabela 2 (item: 1) está voltada para os princípios gerais para qualquer área de aplicação do método da termografia infravermelha, como os aspectos práticos de medição (medidas de compensação em campo) que devem ser determinados durante uma avaliação. As normas voltadas para aspectos teóricos do método de ensaio, estão nos itens 2 e 3 da Tabela 2, onde é tratado de terminologias, definições e, também de informações mínimas para elaboração de procedimento escrito. Sendo estas três normas dispostas, possíveis para um melhor aproveitamento do campo da construção. As demais normas apresentadas na Tabela 2 (itens: 4, 5 e 6) estão relacionadas a aspectos do equipamento, como a calibração e, voltada para a área de sistemas elétricos.

Tabela 2 - Principais documentos nacionais e estrangeiros relacionado as aplicações de monitoramento de condição utilizando a termografia por infravermelho (Adaptado de BAGAVATHIAPPAN et al., 2013) (continua).

Item	Número de referência Ano (Edição)	Título da norma	Escopo	Organismo de Normalização
1	ABNT NBR 16969: 2021 (1°)	Ensaio não destrutivo – Termografia infravermelha – Princípios gerais	Princípios gerais para aplicação do método da termografia infravermelha	
2	ABNT NBR 15424: 2016 (2°)	Ensaio não destrutivo - Termografia - Terminologia	Definições dos termos	
3	ABNT NBR 16818: 2020 (1°)	Ensaio não destrutivo – Termografia infravermelha - Procedimento para aplicações do método da termografia infravermelha	Diretrizes contendo as informações mínimas para a elaboração de procedimento escrito	
4	ABNT NBR 15572: 2013 (2°)	Ensaio não destrutivo - Termografia - Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos	Procedimentos para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos	Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT
5	ABNT NBR 15763: 2009 (1°)	Ensaio não destrutivo - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência	Definição de critérios de periodicidade de inspeção por termografia de sistemas elétricos de potência.	
6	ABNT NBR 15866: 2010 (1°)	Ensaio não destrutivo - Termografia - Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos	Metodologia de avaliação térmica para equipamentos em sistemas elétricos.	

Tabela 2 - Principais documentos nacionais e estrangeiros relacionado as aplicações de monitoramento de condição utilizando a termografia por infravermelho (Adaptado de BAGAVATHIAPPAN et al., 2013) (continua).

Item	Número de referência Ano (Edição)	Título da norma	Escopo	Organismo de Normalização
7	ACI 228.2R – 13 (2013)	Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures	Theoretical Reference	American Concrete Institute - ACI
8	D 4788 - 03 1988 (*) 2013 (**)	Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography	Metodologia de ensaio para a determinação de defeitos em tabuleiros de pontes de concreto usando a tecnologia por infravermelho	
9	ASTM-E1213-97	Standard test method for minimum resolvable temperature difference for thermal imaging systems	Temperature resolution	
10	ASTM-E1311-89	Standard test method for minimum detectable temperature difference for thermal imaging systems	Temperature resolution	
11	ASTM-E1543-00	Standard test method for noise equivalent temperature difference of thermal imaging systems	Temperature resolution	
12	ASTM-E1862-97	Standard test methods for measuring and compensating for reflected temperature using infrared imaging radiometers	Temperature correction	American Society for Testing and Materials - ASTM
13	ASTM-E1933-99a	Standard test methods for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers	Emissivity correction	
14	ASTME1934-99a	Standard guide for examining electrical and mechanical equipment with infrared thermography	Electrical and mechanical inspection	
15	ASTM-E2582-07	Standard practice for infrared flash thermography of composite panels and repair patches used in aerospace applications	Aerospace industry	
16	ASTM C1046-95	Standard practice for in situ measurement of heat flux and temperature on building envelope components	Building inspection	
17	ASTM C1060-11a	Standard practice for thermographic inspection of insulation installations in envelope cavities of frame buildings	Building inspection	
18	ASTM C1153-10	Standard practice for location of wet insulation in roofing systems using infrared imaging	Building inspection	

Tabela 2 - Principais documentos nacionais e estrangeiros relacionado as aplicações de monitoramento de condição utilizando a termografia por infravermelho (Adaptado de BAGAVATHIAPPAN et al., 2013) (continuação).

Item	Número de referência Ano (Edição)	Título da norma	Escopo	Organismo de Normalização
19	ISO 18434	Condition monitoring and diagnostics of machines - thermography	Mechanical inspection	
20	ISO-18436-8	Condition monitoring and diagnostics of machines - requirements for training and certification of personnel- thermography	Mechanical inspection	International Organization for Standardization - ISO
21	ISO 6781	Thermal insulation – qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - infrared method	Building inspection	
22	ISO 13790	Annual energy use for heating and cooling of the building	Building inspection	
23	IS 12782: 1989	Guidelines for using thermography for monitoring of industrial components	Industrial inspection	Bureau of Indian Standards - BIS
24	EN 13187:1998	Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - infrared method	Building inspection	European Standard- EN

Em relação a documentos estrangeiros, a ASTM D4788-03 (2013) estabelece algumas recomendações na identificação de deteriorações em tabuleiros de pontes de concreto. Estas recomendações são específicas para a aplicação da técnica por infravermelho, apresentando critérios e requisitos relacionados as condições ambientais, como, tempo mínimo de irradiação solar direta, mudança de temperatura ambiente e velocidade do vento. Além de estabelecer um gradiente mínimo para a detecção do defeito com a técnica e, a condição de exposição necessária da superfície do tabuleiro (Tabela 2, item: 8). Outro documento que trata da termografia por infravermelho voltada para estruturas de concreto é o ACI 228.2R-13 (2013) que possui recomendações gerais. Trata-se de um referencial teórico e não prático, sem apresentação de critérios e requisitos para a aplicação da termografia por infravermelho em estruturas de concreto (Tabela 2, item:7).

Os demais documentos publicados por diferentes organismos de normatização, listados na Tabela 2 (itens: do 9 ao 24), foram obtidos de uma revisão bibliográfica realizada por Bagavathiappan et al. (2013) relacionado as aplicações de monitoramento de condição, utilizando a termografia por infravermelho.

Como evidenciado, na construção civil não se dispõe de documento normativo nacional, específico, voltado para a aplicação da técnica por infravermelho para o processo de inspeção e, no caso em questão, inspeção de estruturas de concreto, evidenciando a necessidade do desenvolvimento científico relacionado ao uso da termografia por infravermelho, neste processo de avaliação.

Em relação a avaliação de estruturas de concreto com uso da termografia por infravermelho, vazios, defeitos ou anomalias afetam o fluxo de calor no material, sendo os mesmos próximos a superfície, influenciam no desenvolvimento da distribuição superficial de temperaturas, aparecendo como regiões quentes ou frias no termograma, dependendo das condições ambientais. Portanto, para a facilitação das atividades periódicas de inspeção, seja elas preditivas ou corretivas, torna-se necessário fomentar iniciativas brasileiras de aplicação da termografia por infravermelho. A proposição de métodos que possam acessibilizar a utilização da técnica com confiabilidade, é uma das lacunas a serem preenchidas e a exploração do tema pode estimular sua disseminação.

Vale ressaltar que, a pesquisa está relacionada ao objetivo de desenvolvimento sustentável ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), proposto pela Organização das Nações Unidas.

1.2 Objetivos

O objetivo geral é se obter o gradiente mínimo de temperatura superficial, para que seja possível, a identificação do defeito no concreto com uso da termografia por infravermelho, sob dadas condições (fixas e variáveis). Para isso, foram definidos 3 objetivos específicos descritos a seguir:

- I. Avaliar, por meio de ensaios laboratoriais, o gradiente de temperatura (ou contraste térmico) da superfície do concreto, ao longo do tempo, sob dadas condições.
- II. Identificar, por meio de ensaios laboratoriais, as condições variáveis, como, objeto de análise (temperatura aparente refletida e emissividade da superfície), profundidade do defeito, especificações do equipamento utilizado, distância de medição e condições ambientais, que influenciam no processo de medição com a termografia por infravermelho.
- III. Identificar por meio de ensaios laboratoriais, os períodos (janelas de tempo) aplicáveis para inspecionar um determinado elemento de concreto sob dada condição de exposição.

2. Termografia por infravermelho aplicada para inspeção de estruturas de concreto

2.1 A Termografia por infravermelho

Todo corpo com temperatura de superfície acima do zero absoluto emite radiação térmica. A termografia por infravermelho é uma tecnologia baseada na medição da radiação térmica emitida pela superfície do corpo, que varia em função de alguns parâmetros físicos, como: temperatura da superfície; emissividade da superfície; propriedades térmicas, como a condutividade térmica; espessura da camada aquecida e intensidade de radiação solar incidente. Os dados desta medição são convertidos em um sinal elétrico a ser processado, criando imagens térmicas visuais, que permitem visualizar as distribuições de temperatura da superfície do corpo, conhecidas como termogramas (ACI 228.2R-13, 2013; BAGAVATHIAPPAN et al., 2013).

A condição de fluxo de calor necessária pode ser dividida em duas categorias, ativa e passiva. A termografia ativa é realizada por meio de fontes externas de estimulação, por exemplo, usando lâmpadas de aquecimento. Já a termografia passiva não exige o uso de fontes externas de estimulação, ocorrendo naturalmente por aquecimento solar diurno e resfriamento noturno (condição ambiente).

Uma câmera infravermelha que mede a intensidade de energia emitida pelo material na faixa infravermelha pode ser usada para produzir uma imagem da temperatura de superfície. As variações na uniformidade da temperatura superficial do material são resultantes dos defeitos que podem ser observados, qualitativamente e, quantificados, a partir da imagem produzida (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

A partir dessas imagens produzidas, há dois tipos de análises em termografia por infravermelho para a detecção de defeitos. O primeiro tipo, uma abordagem qualitativa, onde é feito a obtenção de valores relativos a pontos quentes e frios (anomalia térmica, área danificada) em relação a outras partes do mesmo objeto (área íntegra), tendo essas partes como referência na detecção de defeitos. O segundo tipo, uma abordagem quantitativa que consiste em obter a temperatura do objeto com precisão (ROCHA e TAVARES, 2017).

Em relação a abordagem qualitativa, geralmente, durante o dia, os defeitos podem ser detectados como “pontos quentes” na superfície do material em relação a área íntegra (referência). E, durante a noite, esses defeitos aparecem como “pontos frios” em relação a área íntegra. As

temperaturas de superfície na imagem térmica são representadas por uma escala de cores selecionada pelo usuário, com variações térmicas na imagem representadas por diferentes cores. Ao visualizar uma imagem na tentativa de identificar defeitos, o operador está analisando as variações de temperatura representadas pelas variações de cores na imagem. Por exemplo, a paleta de cores usada pode representar áreas relativamente "quentes" como branco, áreas "frias" como preto e temperaturas entre "quente" e "frio", variando em uma paleta de cores escolhida. Logo, as variações na temperatura da superfície causadas por um defeito são avaliadas, de forma qualitativa, por seu "contraste" de cor quando comparadas com áreas íntegras (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

Por vezes, pode ser difícil a detecção de defeitos, apenas baseado nas variações de cores dos termogramas, dado que, a própria estrutura de concreto tende a ter um gradiente de temperatura, dependendo de sua localização e orientação em relação ao sol. Além do mais, superfícies de concreto, como os tabuleiros de ponte, podem apresentar cores diferentes devido a manchas, remendos, marcações na pista, detritos e lixos ("ruídos") que, criam diferentes temperaturas, dificultando a abordagem qualitativa (durante uma inspeção termográfica há necessidade de um acoplamento de imagens térmicas e visuais para a fácil distinção desses "ruídos") (HIASA; BIRGÜL; CATBAS, 2017).

Em compensação, há abordagem quantitativa que, consiste na obtenção dos dados de temperatura e não das cores. Esta abordagem é baseada no contraste térmico que representa a diferença da temperatura de superfície entre a área íntegra (sem defeito) e a área danificada. Essas diferenças localizadas na temperatura da superfície, conhecido por contraste térmico ΔT , é definido como:

$$\Delta T = T_A - T_B \quad (1)$$

Onde T_A é a temperatura de superfície que está na região do defeito e, T_B é a temperatura de superfície da área íntegra da região circundante.

Durante uma avaliação com termografia por infravermelho, o contraste térmico ΔT é dependente do tempo t , onde pode ser representado da seguinte forma:

$$\Delta T (t) = T_A(t) - T_B(t) \quad (2)$$

2.2 Processo de medição utilizando a termografia por infravermelho

Para o uso correto da termografia por infravermelho, durante a realização da inspeção termográfica, algumas propriedades relacionadas ao objeto de análise e ao equipamento, devem ser conhecidas e mensuradas.

As principais propriedades a serem consideradas em relação ao objeto de análise são: emissividade, distância e reflexão. As principais propriedades relacionadas ao equipamento, podem ser apontados como: resolução térmica da câmera, resolução óptica e geométrica, foco e ângulo de visão. A sensibilidade e amplitude térmica também serão tratadas. Todos estes parâmetros afetam, as vezes em maior ou menor escala, a precisão dos resultados e a sua interpretação.

Para isso, primeiramente, foi feita a descrição do modelo físico de medição da radiação infravermelha por termografia, voltado para o objeto de análise. E, posteriormente, a descrição detalhada dos parâmetros que influenciam neste processo, levando em conta o equipamento.

2.2.1 A influência das propriedades do objeto de análise no processo de medição da termografia por infravermelho

Como foi mencionado anteriormente, a termografia por infravermelho é uma tecnologia baseada na medição da radiação infravermelha emitida pela superfície do objeto. Vale ressaltar que, nem toda a energia captada pela termografia por infravermelho é proveniente da superfície do objeto em análise, há outros fenômenos que influenciam nesta energia e, conseqüentemente, caso não sejam considerados não representam de fato a real temperatura da superfície do objeto.

O processo básico de medição da radiação infravermelha emitida pela superfície do objeto a uma determinada temperatura e, captada pela câmera de imagem térmica é demonstrado na Figura 5. Quando o operador aponta a câmera de imagem térmica (1) para seu objeto de interesse (2), os principais fenômenos que influenciam nesta medição são: o próprio objeto (2), o ambiente (3) e a atmosfera (4). O resultado deste processo é a medição do brilho (radiação infravermelha) emitido pela superfície, a qual se refere a “imagem radiométrica” e sua representação gráfica, na forma de termograma (5), ou seja, o perfil de temperaturas e fluxo térmico da superfície de um determinado objeto.

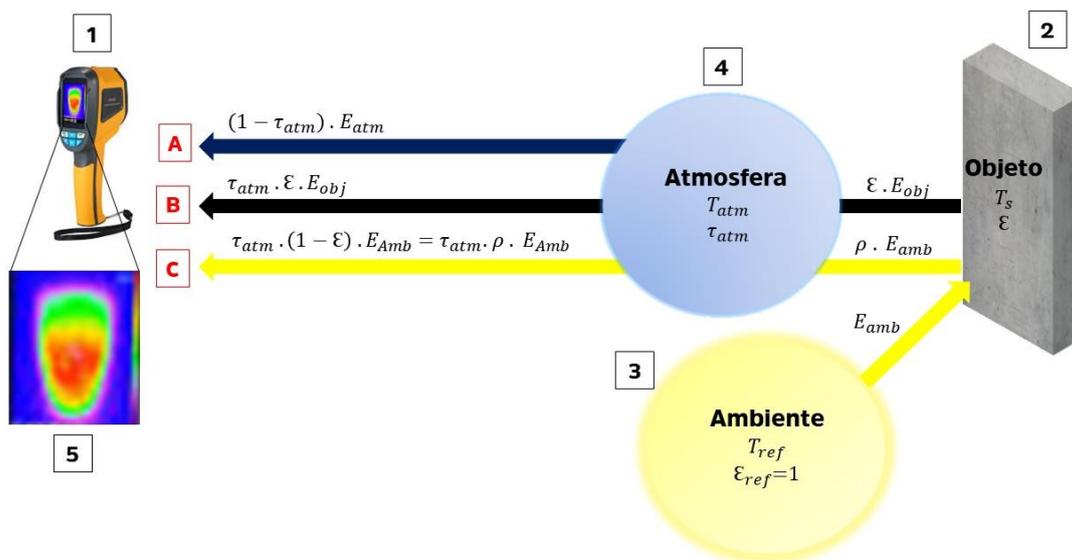


Figura 5 - Representação esquemática do processo básico de medição da radiação infravermelha pela câmera de imagem térmica (1). A radiação infravermelha emitida pelo: objeto (2); ambiente (3) e atmosfera (4). E o resultado desta medição é o termograma (5) da superfície de um determinado objeto (Adaptada de FLIR SYSTEMS, 2010; ANDRADE, 2020).

Esta descrição do processo de medição, apresentado na Figura 5, pode ser considerado “uma descrição fiel das condições reais”. É possível que tenha sido negligenciada, por exemplo, a difusão da luz do Sol na atmosfera ou a radiação difusa, oriundas de fontes de radiação intensa, posicionadas no ambiente do campo de estudo. É difícil de mensurar essas “quantidades de influência”, porém na maioria dos casos, estas influências são reduzidas a ponto de serem desprezíveis. Sendo da responsabilidade do operador da câmera de imagem térmica identificar as influências no campo de estudo que podem prejudicar o processo de medição e, assim, alterar processos, por exemplo, a direção de visão, protegendo a câmera contra fontes de radiação intensa, entre outros, a fim de evitar que estas influências sejam significativas (FLIR SYSTEMS, 2010).

Vale destacar que a Figura 5, representa as contribuições energéticas E (energia radiante), da atmosfera A , do objeto B e do ambiente C , recebidas pela câmera de imagem térmica de um objeto opaco (como as encontradas em 99% das aplicações) e de corpo cinza. Sendo esta representação esquemática do processo de medição, a forma simplificada, utilizada para determinar a real temperatura da superfície de um determinado objeto (LANZONI, 2015; VOLLMER; MOLLMANN, 2010).

Para se obter a real energia emitida pela superfície do objeto de interesse e, logo sua temperatura com precisão, é necessário levar em conta alguns parâmetros e excluir algumas das contribuições energéticas.

Alguns dos parâmetros a serem considerados são: a emissividade da superfície ε do objeto de interesse (como se trata de um corpo real, ele tem emissividade menor que 1 e, portanto, não é perfeitamente eficiente na emissão de sua própria energia, ocorrendo também o processo de reflexão); a reflexão da radiação dos objetos presentes no ambiente com um fator de refletância ρ e, todas estas radiações são, em parte, atenuadas pela atmosfera (efeito de absorção) na trajetória de captação da câmera térmica, sendo considerado a transmitância atmosférica τ_{atm} . Também deve ser levado em conta que a atmosfera em uma determinada temperatura tem o efeito de radiações emitidas com fator de emissividade $1 - \tau_{atm}$ (FLIR SYSTEMS, 2010; LANZONI, 2015; VOLLMER; MOLLMANN, 2010).

Algumas das contribuições energéticas A , B , e C , mostradas na Figura 5, são definidas como (ANDRADE, 2020; FLIR SYSTEMS, 2010):

Radiação emitida a partir da atmosfera A :

$A = (1 - \tau_{atm}) \cdot E_{atm}$, sendo influenciada pela emissividade atmosférica $1 - \tau_{atm}$ e a temperatura atmosférica T_{atm} ;

Radiação emitida pela superfície do objeto de interesse B :

$B = \tau_{atm} \cdot \varepsilon \cdot E_{obj}$, sendo influenciada pela emissividade da superfície ε do objeto e sua temperatura superficial T_s , adicionalmente, existe um volume atmosférico entre o objeto de interesse e os sensores presente na câmera térmica, nesta condição, a transmitância da atmosfera τ_{atm} deve ser considerada a parcela captada;

Radiação emitida a partir da reflexão de objetos presentes no ambiente C :

$C = \tau_{atm} \cdot \rho \cdot E_{amb}$, sendo influenciada pela refletância de sua superfície ρ ($\rho = 1 - \varepsilon$) e a temperatura das fontes de objetos de reflexão T_{ref} , adicionalmente, a transmitância da atmosfera τ_{atm} deve ser considerada.

De modo geral, a câmera de imagem térmica detecta uma mistura de energia radiante com contribuições da atmosfera A , do objeto B e do ambiente C . O incidente de energia de radiação total no detector da câmera E_{det} ($E_{det} = A + B + C$) podendo ser descrito conforme a equação:

$$E_{det} = (1 - \tau_{atm}) \cdot E_{atm} + \tau_{atm} \cdot \varepsilon \cdot E_{obj} + \tau_{atm} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot E_{amb} \quad (3)$$

Com base na Equação (3) para a radiação de corpo negro ($\varepsilon = 1$) e distâncias curtas de medição ($\tau_{atm} = 1$), a energia de radiação total no detector da câmera E_{det} é igual a energia de radiação emitida por um corpo negro. Esse processo, onde é possível correlacionar a temperatura interna conhecida com a radiação 100% emitida pelo corpo negro e medida pelo equipamento, é utilizada com diferentes corpos negros com diferentes temperaturas e intensidades de radiação formando uma curva de calibração para as câmeras térmicas (ANDRADE, 2020). A curva de calibração também fornece a conversão do brilho medido em temperaturas (LANZONI, 2015).

A partir de operações matemáticas aplicadas a Equação 3 pode ser visto, a energia emitida pela superfície do objeto E_{obj} , conforme a Equação 4:

$$E_{obj} = \frac{E_{det}}{\tau_{atm} \cdot \varepsilon} - \frac{(1 - \tau_{atm}) \cdot E_{atm}}{\tau_{atm} \cdot \varepsilon} - \frac{\tau_{atm} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot E_{amb}}{\tau_{atm} \cdot \varepsilon} \quad (4)$$

Como pode ser visto na Equação 4, as contribuições energéticas da atmosfera (radiação emitida pela atmosfera A) e do ambiente (radiação emitida a partir da reflexão de objetos presentes no ambiente C) são subtraídas do incidente de energia total no detector da câmera E_{det} , como resultado, a energia que realmente interessa para a determinação correta das temperaturas superficiais do objeto E_{obj} . Os valores de radiação infravermelha emitida pela superfície são convertidos em valores de temperatura com base na Equação de Stefan Boltzmann ($E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$). Podendo ser reescrita a Equação 4 para a Equação 5:

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{E_{det} - (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 - (1 - \varepsilon) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{ref}^4}{\tau_{atm} \cdot \varepsilon \cdot \sigma}} \quad (5)$$

Portanto para determinar a correta distribuição superficial de temperaturas de um objeto, melhor dizendo, a obtenção de um termograma confiável para uma análise (qualitativa e quantitativa), alguns parâmetros devem ser definidos e introduzidos pelo operador da câmera de imagem térmica durante uma avaliação. Para que seja possível, a diferenciação das radiações (objeto, ambiente e atmosfera) e, realmente ter a mensuração da radiação proveniente da superfície do objeto e, assim, convertê-la em valores de temperatura (“calculados”) que, sujeitos às incertezas de medição, serão os reais. Sendo os parâmetros de medição:

- I. Emissividade do objeto ε ;
- II. Temperatura aparente refletida T_{ref} ;
- III. Distância;
- IV. Temperatura atmosférica T_{atm} ;
- V. Umidade relativa do ar.

A emissividade do objeto ε é uma propriedade radiante da superfície, sendo os valores de emissividade na faixa de $0 \leq \varepsilon \leq 1$. É um indicativo da eficiência na qual uma superfície real emite energia em relação a um corpo negro (INCROPERA et al., 2008). Sendo um fator influente na medição da temperatura (ou energia) radiante da superfície do material. De fato, a emissividade define a correlação entre a verdadeira cinética de temperatura e a temperatura radiante de um corpo e, ajuda a distinguir dois objetos com a mesma temperatura cinética, ou seja, nem todos os materiais no ambiente têm a mesma resposta à mudança de temperatura ambiente; isso causa uma variação de temperatura radiante dos objetos durante um período de tempo para diferentes materiais (VAGHEFI, 2011).

É uma propriedade intrínseca, ou seja, dependente fortemente, do tipo de material e da condição da superfície. Diferentes rugosidades (texturas) e acabamentos de superfície afetam as propriedades de radiação, deve-se tomar cuidado para garantir que as diferenças de temperatura medidas aparentes não sejam devidas a diferenças na emissividade. Superfícies mais ásperas do mesmo material tem valores de emissividade mais altos (ACI 228.2R, 1998). A cor e o teor de umidade são alguns fatores que também podem influenciar a emissividade dos materiais. O valor de emissividade geralmente é maior que 0,9 para o concreto (VAGHEFI, 2011).

Em relação a medição, a emissividade depende tanto do comprimento de onda, quanto de sua temperatura. Como também depende do ângulo de observação em relação a sua superfície de análise.

Os parâmetros como, distância, umidade relativa do ar e temperatura atmosférica, são fundamentais para o cálculo automático da transmitância atmosférica τ_{atm} , utilizando o software da câmera térmica (TRAN et al., 2017).

Para que a influência da atmosfera seja reduzida, além da distância curta de medição em relação ao objeto de análise, deve-se utilizar das chamadas janelas atmosféricas. As janelas atmosféricas são intervalos dentro do espectro infravermelho, nos quais a atenuação atmosférica é

mínima. Exemplos: 0,78 a 2,00 μm ; 2,00 a 5,50 μm e 7,5 μm a 14,00 μm (ABNT NBR 15424, 2016).

A Tabela 3 apresenta a norma brasileira e seus respectivos anexos com as metodologias para a obtenção dos parâmetros de medição como, emissividade do objeto de análise, temperatura aparente refletida e transmitância de um meio atenuante (como a atmosfera).

Tabela 3 – Norma brasileira e seus respectivos anexos com as metodologias para a obtenção dos parâmetros de medição como: emissividade da superfície, temperatura aparente refletida e transmitância atmosférica.

Simbologia utilizada	Descrição	Metodologia Correspondente
ε	Emissividade da superfície do objeto (0 a 1)	ABNT NBR 16969 (2021) – Ensaio não destrutivo – Termografia Infravermelha – Princípios gerais (ANEXO B – Emissividade)
T_{ref}	Temperatura das fontes de objetos de reflexão ou temperatura aparente refletida	ABNT NBR 16969 (2021) – Ensaio não destrutivo – Termografia Infravermelha – Princípios gerais (ANEXO C – Temperatura aparente refletida)
τ_{atm}	Transmitância atmosférica (0 a 1)	ABNT NBR 16969 (2021) – Ensaio não destrutivo – Termografia Infravermelha – Princípios gerais (ANEXO D – Transmitância)

2.2.2 A Influência das propriedades do equipamento no processo de medição da termografia por infravermelho

A energia proveniente do objeto é captada pela parte óptica e focado em um sensor (detector sensível a radiação infravermelha). Através de um sistema, ocorre o processamento dessas informações para a formação de um termograma que, de acordo com as intensidades de radiação infravermelha incidentes são convertidas em uma escala de cores e, calculados os valores de temperatura.

Em síntese, os principais componentes da câmera termográfica são: uma lente (parte óptica); um detector na forma de uma matriz de plano focal (FPA), possivelmente um resfriador para o detector e a eletrônica e; o software para o processamento e exibição dos termogramas (Figura 6) (FLIR SYSTEMS, [s.d.]).

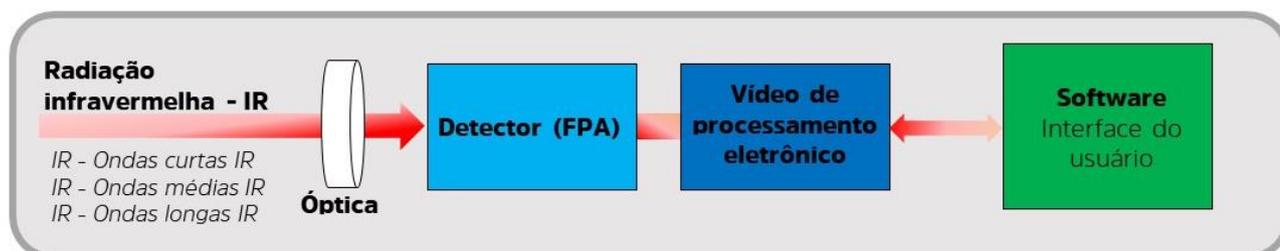


Figura 6 - Diagrama de blocos simplificado dos principais componentes da câmera termográfica (FLIR SYSTEMS, [s.d.])

O detector sensível a radiação infravermelha, onde é medido a quantidade de radiação incidida sobre ele, pode ser dividido em duas grandes categorias: térmicos (por exemplo, bolômetro) e quânticos. O conjunto desses detectores idênticos e individuais são organizados em uma matriz (bidimensional: linhas e colunas), posicionada no plano focal da câmera, chamada de matriz de plano focal FPA (FPA: focal plane array). De acordo com o tamanho/resolução de uma FPA, ela tem de aproximadamente 60.000 a mais de 1000.000 de detectores individuais. Cada detector detecta a intensidade de radiação infravermelha que a óptica se concentra nele, e envia-a para o transdutor através de um sistema eletrônico de processamento de imagens. Em relação ao termograma, resultado de todo este processo, pode-se entender, de maneira simples, que cada pixel⁷ (detector) presente na imagem térmica é a representação da “temperatura aparente medida” da superfície. O tamanho deste pixel pode ser de 50 μm ou menos. Quanto menor o tamanho do pixel melhor será a relação sinal/ruído do detector, assim como outras características. Logo, a FPA pode ser descrita como uma matriz de pixel bidimensional, determinando assim a resolução térmica da câmera termográfica, sendo que as resoluções FPA podem variar de 80 x 80 pixels a 1024 x 1024 pixels (Figura 7) (ABNT NBR 15424, 2016; ANDRADE, 2020; FLIR SYSTEMS, [s.d.]; LANZONI, 2015; VOLLMER; MOLLMANN, 2010)

⁷ Pixel significa elemento de imagem. Um único ponto numa imagem (FLIR SYSTEMS, 2010).

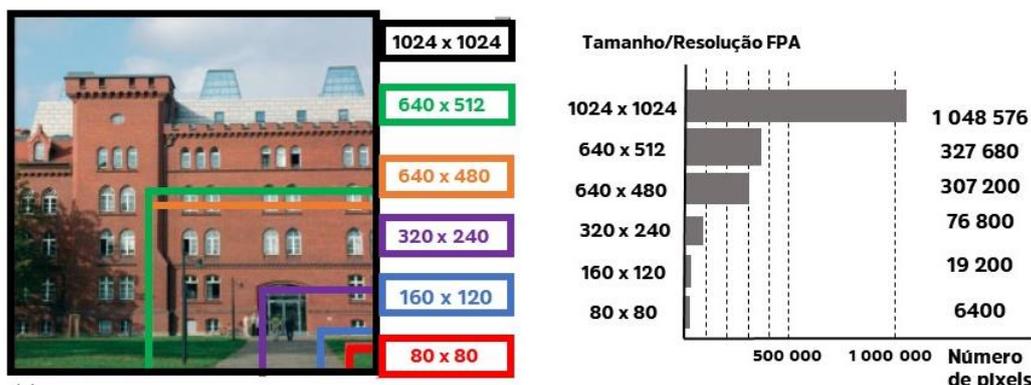


Figura 7 - Ilustração de diferentes tamanhos/resoluções de FPA para uma mesma área capturada (mesma óptica, campo de visão e distância) e sua relação com a quantidade de pixels (detectores) (VOLLMER; MOLLMANN, 2010).

Além do conhecimento da resolução térmica, é importante saber e calcular algumas especificações ópticas e geométricas da câmera termográfica, como FOV (FOV: field of view), AFOV, IFOV (IFOV: instantaneous field of view) e MFOV (MFOV ou $IFOV_{meas}$: instantaneous measurement field of view). Isso pode garantir o melhor desempenho da câmera termográfica, pois estas especificações determinam o quão pequeno um objeto ou área pode ser detectado e medido com precisão a uma determinada distância.

O campo de visão FOV depende das dimensões da lente e do FPA da câmera. Sendo ele a representação da abertura angular da óptica do instrumento (geralmente expresso em graus) (Figura 8 (A)). A partir do FOV, pode-se determinar a área total capturada pela câmera termográfica, em um dado momento. Quanto maior o FOV, maior será a área total capturada pela câmera termográfica. Como visto, a parte óptica deve focar a energia infravermelha proveniente do objeto, sendo captada pelo detector, na maioria das câmeras termográficas, este detector apresenta dimensões retangulares, onde a área capturada também deve ser retangular. De modo que, a representação do FOV é feita em duas aberturas diferentes, uma horizontal e outra vertical, sendo sua representação, por exemplo, FOV: 24°(H) x 16°(V) (ou FOV horizontal HFOV: 24° e FOV vertical VFOV: 16°) (Figura 8 (B)).

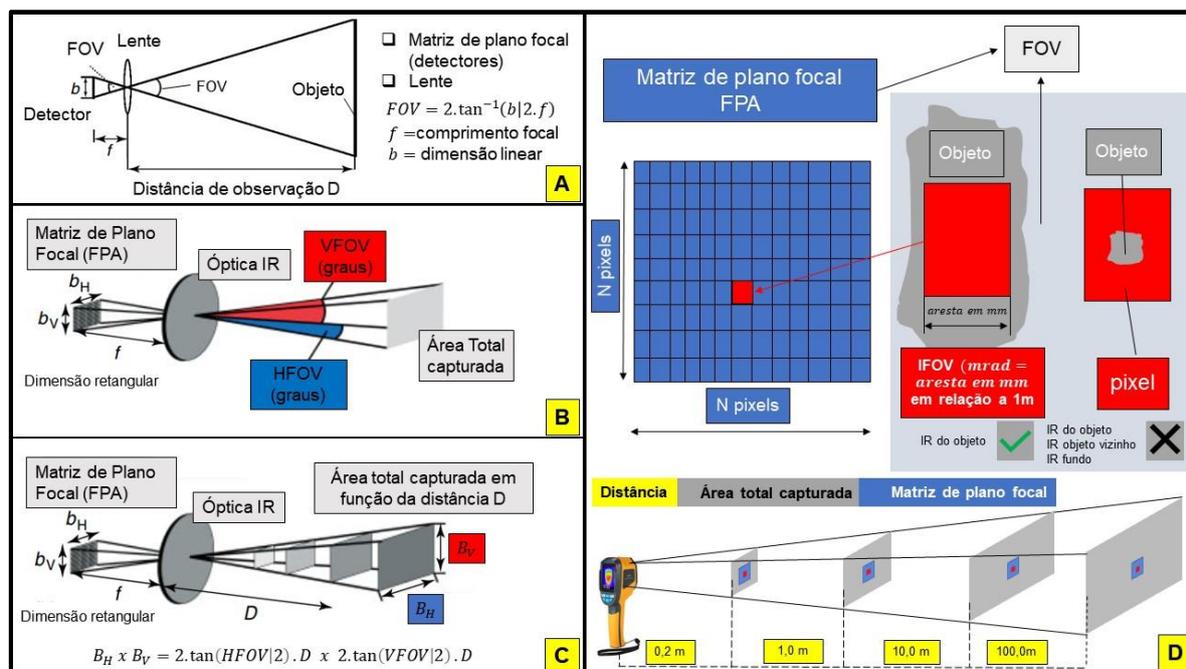


Figura 8 - Representação esquemática dos principais parâmetros espaciais (ópticos e geométricos) da câmera termográfica: (A) Campo de visão FOV: Matriz de Plano Focal (FPA) e lente; (B) Representação do FOV (VFOV e HFOV) e, sua relação com a área total capturada; (C) AFOV: FOV em relação a uma determinada distância D; e (D) Campo de visão instantâneo IFOV (Adaptado de VOLLMER; MOLLMANN, 2010; LANZONI, 2015).

O FOV pode ser determinado a uma certa distância de medição, conhecido como AFOV, onde a área total capturada pela câmera termográfica, depende da distância. Sendo a parte óptica da câmera termográfica retangular ($b_H \times b_V$), a área total capturada ($B_H \times B_V$) a uma certa distância D, pode ser expressa na Equação 23: (Figura 8 (C))

$$B_H \times B_V = 2 \cdot \tan(HFOV/2) \cdot D \times 2 \cdot \tan(VFOV/2) \cdot D \quad (6)$$

Como visto, a resolução/tamanho da FPA de uma câmera termográfica é de N pixels x N pixels, a multiplicação destes fatores resulta no total de elementos de imagem individuais (pixels). Deve-se levar em consideração que a área total capturada é em relação a uma distância de medição. Deste modo, necessita-se do campo de visão instantâneo IFOV, que representa a abertura angular de um único elemento detector da FPA (geralmente expresso em miliradianos, o valor representado em *mrad* corresponde ao tamanho da aresta da área do pixel em mm a uma distância de 1m), onde é determinado o menor objeto do campo de visão que pode ser detectado a uma certa distância de medição (ou na razão D:S, distância de observação dividida pelo tamanho do alvo). Para o melhor entendimento do IFOV, pode se ter como exemplo, os termômetros infravermelhos, onde o IFOV é

o próprio FOV (ou seja, o termômetro infravermelho apresenta-se um único detector, IFOV). A resolução de medição destes termômetros também é definida pela razão D:S e, quanto maior o número dessa razão, melhor a resolução do instrumento e menor o ponto mensurável. Por exemplo, um termômetro infravermelho como resolução D:S de 60:1 pode medir corretamente a uma distância de 60cm um objeto com um diâmetro de 1cm; um objeto menor não será medido corretamente, pois, caso o ponto for muito pequeno, o instrumento recebe energia não apenas do objeto, mas também dos objetos adjacentes ou do fundo. Em uma câmera termográfica, o termômetro infravermelho representa a resolução de um único elemento detector (pixel) (Figura 8 (D)).

Assim sendo, o IFOV depende do número de pixels do FPA e do FOV. Sendo o IFOV ou a razão D:S de fundamental importância para garantir maior confiabilidade de medição. Um valor típico pode ser 1000:1, ou seja, em uma distância de 1000mm (1m) de um alvo, a câmera termográfica mede uma temperatura média em um quadrado de 1mm. Outra maneira de se avaliar é a utilização do campo de visão instantâneo de medida MFOV, onde fornece o menor objeto que pode ter sua temperatura medida com exatidão a uma determinada distância. Raramente é declarada pelo fabricante, mas tipicamente igual ao IFOV multiplicado por um fator entre 3 e 5 (dependendo do modelo de equipamento). De modo, a garantir que o objeto esteja inteiramente dentro do campo de análise instantâneo e que pelo menos um dos pixels (sensores) seja completamente coberto pela radiação incidida pelo objeto alvo (ABNT NBR 15424, 2016; FLIR SYSTEMS, [s.d.]; LANZONI, 2015).

Além da resolução térmica, da resolução óptica e da geométrica da câmera termográfica, outros parâmetros relacionados ao equipamento devem ser considerados durante uma avaliação com a termografia por infravermelho, sendo eles: ângulo de observação, sensibilidade térmica e foco da câmera termográfica e; a amplitude térmica relacionada ao termograma.

Em relação ao ângulo de observação, avaliar superfícies em um valor baixo de ângulo pode aumentar os reflexos do ambiente e produzir um gradiente térmico aparente na imagem. As inspeções devem ser conduzidas o mais próximo possível dos ângulos normais (90°) em relação a superfície analisada. Como visto em Barreira (2004), a variação da emissividade para os não metais é baixa até o ângulo de 60°. Uma orientação prática é tentar ficar dentro de mais ou menos 45° em relação ao ângulo normal. A utilização de uma lente maior em termos angular pode ajudar a manter os ângulos normais durante as inspeções em grandes áreas, como, os tabuleiros da ponte (Figura 9) (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

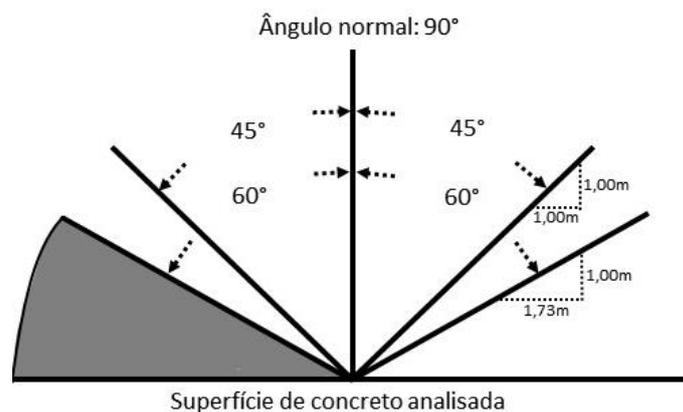


Figura 9 - Ângulos de observação para inspeção termográfica (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009)

Como um dos objetivos do estudo é avaliar o contraste térmico sob condições ambientes (termografia passiva), os valores de contraste desenvolvidos durante a avaliação são baixos (menores que 1°C). A escolha de uma câmera termográfica com sensibilidade térmica⁸ adequada é fundamental, pois este parâmetro afeta na capacidade de detecção. As câmeras termográficas disponíveis comercialmente são projetadas para detectar uma pequena diferença de temperatura (menor que 0,08°C), possibilitando uma maior precisão na identificação de defeitos, relacionados a este tipo de aplicação (as câmeras termográficas disponíveis comercialmente têm sensibilidades que variam de 0,020 °C a 0,150 °C (WATASE et al., 2015)) (CLARK; MCCANN; FORDE, 2003; FARRAG; YEHIA; QADDOUMI, 2016; WASHER, 2012).

Para permitir que valores baixos de contraste térmico sejam detectados, as câmeras devem estar devidamente focadas na superfície de inspeção. A colocação de um objeto regular, como uma ferramenta ou moeda, na superfície a ser inspecionada, pode ser usada para auxiliar no foco adequado da câmera (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

A configuração de amplitude térmica⁹ deve ser verificada e, caso não represente de fato os valores reais de temperatura, deve ser ajustada manualmente após o processamento da imagem

⁸ **Sensibilidade térmica** é a diferença de temperatura equivalente ao ruído (em inglês: “noise equivalent temperature difference” NETD).

NETD é a menor diferença de temperatura que se pode detectar, limitada pelo ruído interno do equipamento infravermelho a uma determinada temperatura. Geralmente obtida à temperatura de 30°C (ABNT NBR 15424, 2016, página 5).

⁹ **Amplitude térmica** (span) intervalo de temperaturas dentro da faixa de temperatura da câmera termográfica que é utilizada na imagem. A amplitude térmica pode ser expandida ou reduzida para melhorar o contraste da imagem (ABNT NBR 15424, 2016, página 1).

térmica, para permitir a correta interpretação. Isso pode exigir ajustes frequentes quando as temperaturas variam em uma estrutura.

De acordo com Farrag; Yehia; Qaddoumi (2016), a temperatura ambiente afeta a seleção da amplitude térmica. Estes autores relatam as faixas de temperatura necessárias para aprimorar a qualidade da imagem, mas que não afetam a detecção de defeitos. Existe uma tendência geral em que, faixas de temperatura são necessárias em momentos de menor temperatura, o que pode ser atribuído à interação térmica dependente do tempo entre os defeitos e o concreto. O oposto acontece para valores de maior temperatura. Por exemplo, neste estudo, as faixas de temperatura no mês de maio foram aproximadamente 6°C, onde é registrado a maior temperatura ambiente, enquanto em janeiro e fevereiro a diferença chegou a 14°C entre as temperaturas máximas e mínimas, onde foi registrado as menores temperaturas ambientes.

Em contrapartida, Washer et al. (2013) evidencia em seu estudo de campo que a configuração da amplitude térmica que não represente de fato as variações de temperatura associadas ao defeito, o mesmo não é indicado de forma clara na imagem térmica. Para uma mesma área, intradorso de uma ponte, é configurado diferentes amplitudes térmicas para a imagem térmica. A Figura 10 à esquerda, indica uma baixa amplitude de 2,1°C, onde é possível a identificação de forma clara de um defeito. Na Figura 10 à direita, é configurado uma maior amplitude de 10°C, onde o primeiro defeito não é evidenciado, mas outro defeito, próximo a borda, é indicado, onde o mesmo apresenta um contraste de $\pm 3,5^\circ\text{C}$ e, por conta da baixa amplitude na primeira imagem não é indicado. Os autores, recomendam valores de amplitude térmica para diferentes condições de exposição (com ou sem carga solar).

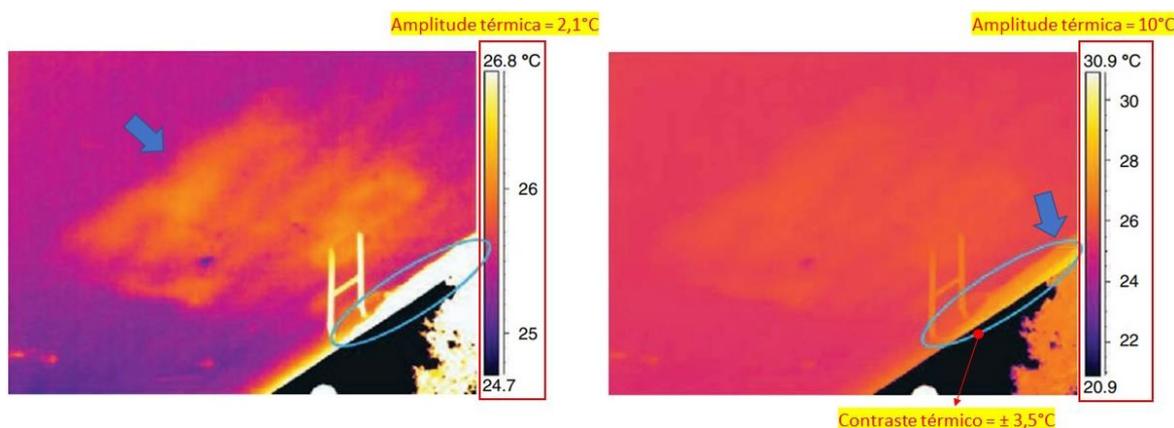


Figura 10 – Diferentes amplitudes térmicas selecionadas durante a análise da imagem térmica

Portanto, para se garantir a precisão dos termogramas e, conseqüentemente, a confiabilidade nas análises quantitativas e qualitativas com a termografia por infravermelho, é fundamental ter o conhecimento e mensurar as principais propriedades voltadas a câmera termográfica. Uma vez que, estas propriedades relatadas estão voltadas a área total capturada, a distância correta de medição em função do equipamento e entre outros fatores. Podendo-se avaliar antes da realização da inspeção, se o equipamento disponível está de acordo com que se pretende avaliar. Por exemplo, quando se tem grandes áreas para a avaliação, como é o caso das pontes de concreto, é importante durante a inspeção que, se tenha grandes áreas capturadas para que seja possível a comparação, mas se deve levar em consideração a precisão das imagens térmicas.

2.3 Avaliação de estruturas de concreto com o uso da termografia por infravermelho

A avaliação de estruturas de concreto com o uso da termografia por infravermelho pode ser baseada em dois princípios. O primeiro princípio é que, uma superfície emite energia na forma de radiação eletromagnética. E essa radiação pode ser medida utilizando a termografia por infravermelho e, fundamentada na Lei de Stefan Boltzmann, é encontrado os valores de temperatura da superfície. O segundo princípio é que, vazios ou defeitos afetam o fluxo de calor no interior do concreto, atuando como um isolante térmico, pois os mesmos são preenchidos com ar e/ou água. Sendo estes próximos à superfície, a termografia por infravermelho é capaz de detectar essas diferenças de temperatura entre o concreto íntegro (sem defeito) e o danificado (ACI 228.2R-13, 2013).

As diferenças (gradiente) de temperatura entre o concreto íntegro e o danificado (também conhecido por contraste térmico) podem ser criadas pela radiação solar direta, em algumas seções da estrutura, comumente, os componentes da superestrutura, como os tabuleiros de pontes (superfícies expostas a radiação solar direta), gerando uma forte força motriz para o desenvolvimento deste gradiente de temperatura e, não em outras condições climáticas adversas, como os componentes da mesoestrutura e da infraestrutura, como os pilares, o intradorso e os encontros (superfícies com limitada ou nenhuma exposição solar, sombreadas). Sendo que, a interpretação dos dados termográficos sob tais condições climáticas adversas, torna-se difícil e a precisão é reduzida (ACI 222R-01, 2001; WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

Logo, durante um dia típico de aquecimento do concreto pela radiação solar, a área de concreto danificada permanece mais quente em relação a área de concreto íntegra circundante (Figura 11 (B)). O oposto acontece durante uma noite típica de resfriamento, a área de concreto danificada é resfriada mais rapidamente do que a área de concreto íntegra circundante (Figura 11 (C)). Sendo as áreas

danificadas próximas a superfície do concreto, influenciam no gradiente de temperatura superficial, consequentemente, na emissão de radiação infravermelha da superfície, onde a termografia por infravermelho capta essa radiação e, as convertem em valores de temperatura. Em relação ao gradiente de temperatura da superfície do concreto, durante um período de 24 horas, há períodos de tempo aplicáveis de inspeção (período do dia e período da noite), quando há um gradiente mínimo de temperatura entre a área de concreto íntegro (linha azul) e a área de concreto danificado (linha vermelha) para que seja possível a identificação do defeito com a termografia por infravermelho (Figura 11 (A)) (HIASA; BIRGUL; CATBAS, 2017; MEHTA; MONTEIRO, 2014);

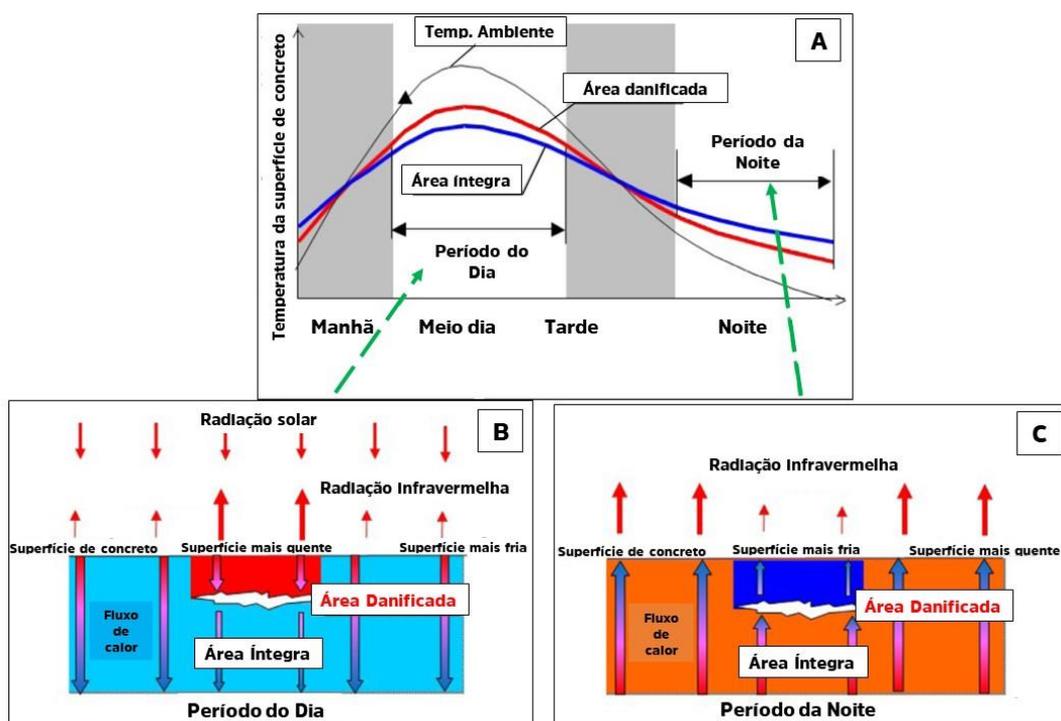


Figura 11 – Representação esquemática dos princípios básicos da termografia por infravermelho para a identificação de anomalias em concreto: (A) Períodos de tempo aplicáveis (período do dia e período da noite); (B) Dia típico de aquecimento; (C) Noite típica de resfriamento (HIASA; BIRGUL; CATBAS, 2017).

Quando o aquecimento radiante do sol está disponível, como é o caso dos tabuleiros de pontes, exposto à radiação solar direta, ocorre a transferência de calor por convecção, ou seja, a troca de calor do ar em torno do concreto e; a radiação, isto é, a energia emitida pelo sol e absorvida pelo concreto. A temperatura da superfície de concreto sob a radiação solar, em um dia quente, é de aproximadamente 50°C (AGGELIS et al., 2010). A transferência radiante de calor do sol resulta em um grande gradiente térmico no concreto (WASHER, 2012; WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

Desse modo, em um dia quente, os modos de fluxo de calor (convecção e radiação) tendem para o interior do concreto ($T_{ambiente} > T_{concreto}$), processo de aquecimento do tabuleiro, uma vez que o vazio, defeito ou anomalia não conduz bem o calor, as temperaturas acima do vazio serão maiores. O oposto acontece quando o calor flui para o lado de fora ($T_{concreto} > T_{ambiente}$), típico de uma noite fria, processo de resfriamento do tabuleiro, a região acima da superfície da anomalia permanece mais fria, ou seja, perde calor mais facilmente do que o concreto íntegro circundante, como apontado na Figura 12 (ACI 228.2R-13, 2013).

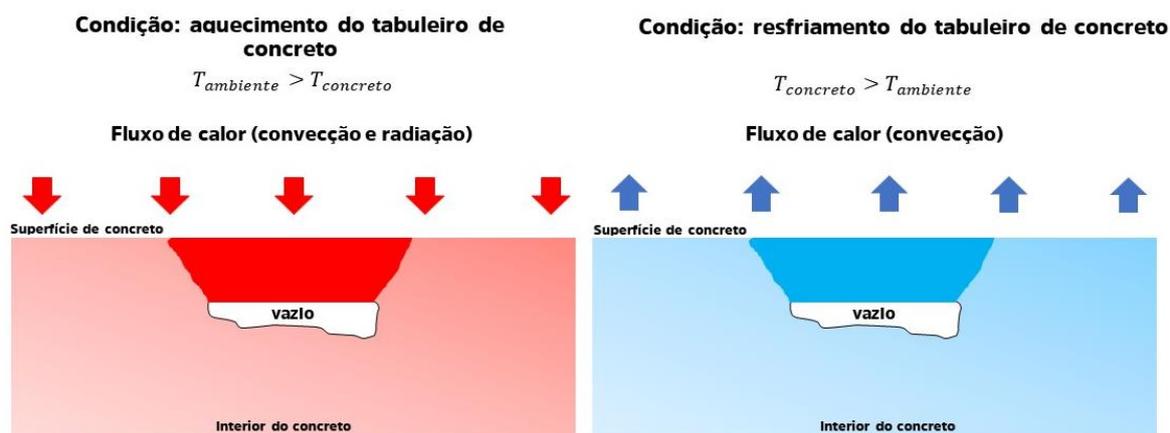


Figura 12 - Efeito do vazio, defeito ou anomalia na distribuição de temperatura do tabuleiro de concreto durante o fluxo de calor (Adaptado de ACI 228.2R-13, 2013).

Quando o aquecimento radiante do sol não está disponível, o processo de aquecimento e resfriamento dos componentes é por meio da transferência de calor por convecção. Por exemplo, à medida que as temperaturas diurnas aumentam, a temperatura do concreto também aumenta, embora esses aumentos sejam retardados em comparação com as mudanças na temperatura ambiente, devido à inércia térmica do concreto. A magnitude da mudança na temperatura ambiente que ocorre ao longo do tempo (dia ou noite) é o principal fator que influencia no desenvolvimento do contraste térmico do concreto. Sendo os contrastes térmicos desenvolvidos, muito menores do que aqueles que seriam impostos pelo aquecimento radiante do sol (WASHER et al., 2013; WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

Dois tipos de deteriorações na superfície de concreto são usualmente o foco da investigação da termografia por infravermelho, sendo elas: a fissuração do concreto causada pelo processo de corrosão de armaduras ¹⁰ e o descolamento entre materiais, por exemplo, o descolamento entre o

¹⁰ “Fissuração do concreto” causada pela corrosão de armaduras, conhecido também como “delaminação do concreto” (termo em inglês).

revestimento e o cobrimento (substrato) de concreto. Essas deteriorações no concreto resultam em grandes falhas planas orientadas paralelamente à superfície de concreto, onde a técnica de infravermelho, identifica os efeitos diferenciais de energia radiante entre as áreas (concreto íntegro e com defeito) sob dada condição de exposição (superfície de maior ou menor incidência solar) (ACI 222R-01, 2001; WASHER et al., 2015) (Figura 13).

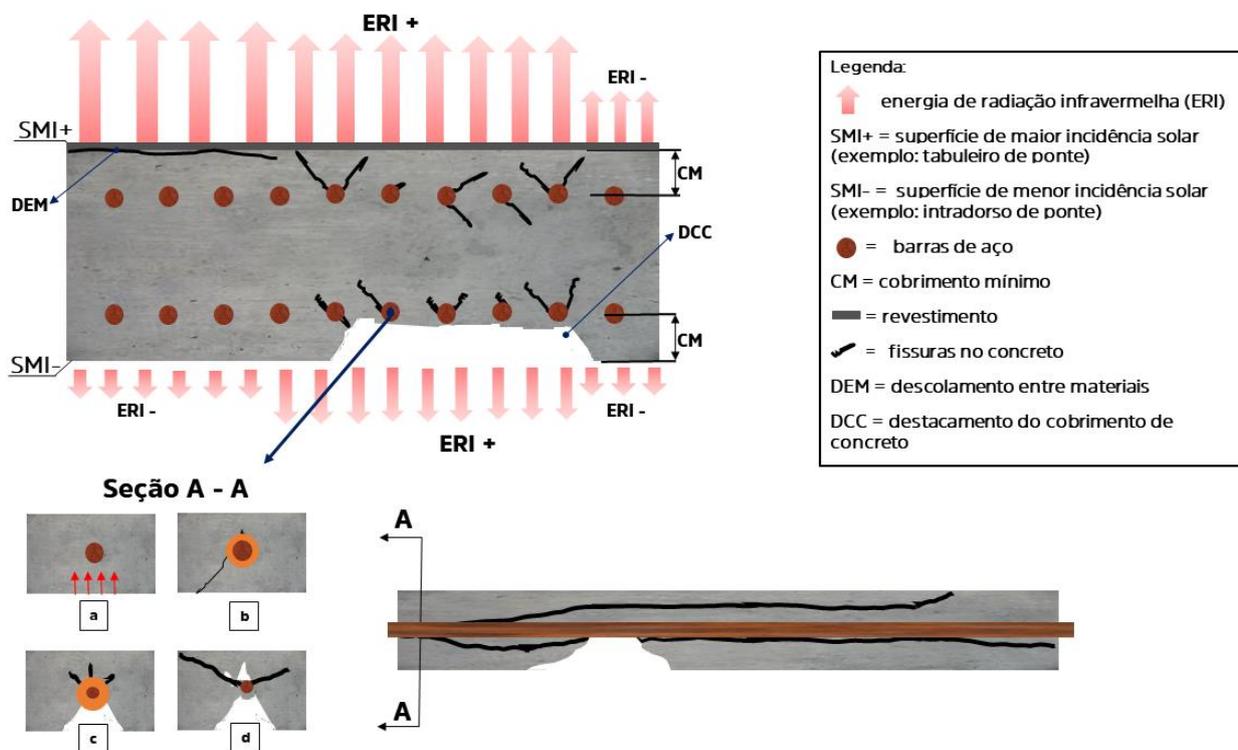


Figura 13 – Dois tipos de deteriorações na superfície de concreto investigadas por termografia por infravermelho: fissuração do concreto causada pelo processo de corrosão da armadura e descolamento entre materiais (Adaptado de WASHER et al., 2015).

No processo de corrosão das armaduras, na Figura 13 (Seção A -A) é ilustrado a deterioração progressiva deste processo, iniciando com a penetração de agentes agressivos (Figura 13 (a)), o início do processo de fissuração devida às forças de expansão dos produtos de corrosão (Figura 13 (b)) e, em um processo mais avançado, o destacamento do concreto e corrosão acentuada (Figura 13(c)), posteriormente, o destacamento acentuado e redução significativa da seção da armadura (Figura 13 (d)). A termografia por infravermelho sendo aplicada de forma correta, pode identificar as áreas em processo inicial de deterioração, onde o cobrimento de concreto pode não estar se destacando da estrutura e devendo ser reparado, minimizando, os riscos da estrutura e dos usuários e, o processo

“Delaminação do concreto” é a separação de planos de concreto, geralmente paralela à armadura, resultante das forças expansivas dos produtos de corrosão. É a forma mais importante de deterioração induzida pela corrosão da armadura (ACI 222R-01, 2001).

mais acentuado de deterioração (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009; SHAFFER, 1971 & CAIRONI, 1977).

Outra questão importante relacionada ao processo corrosivo de armaduras é que, quando a estrutura está danificada, a corrosão não só existe nas regiões que se mostram deterioradas visualmente, como também podem estar corroídas as regiões circundantes sem sinais visíveis de danos externos (PEDRIX, 1992).

Aggelis et al. (2010), verificou a possibilidade do uso da termografia por infravermelho para a caracterização de deteriorações, sem sinais visíveis, como o processo de fissuração resultante da corrosão de armaduras. Foi feita a investigação de fissuras verticais antes do seu rompimento na superfície (sem sinais visíveis de deterioração), a partir do aquecimento dos corpos de prova (termografia ativa). O autor ressalta a adoção de fissuras verticais para o estudo, pois trata-se do caso mais desfavorável (menor área de deterioração) em relação as fissuras horizontais paralelas à superfície (maior área de deterioração) e que, possivelmente seria mais facilitada a sua identificação. Durante a análise dos termogramas dentro do software adequado, utilizando-se de ferramentas de medição (área e linha) foi feito um esquema simples baseado na média das temperaturas em pontos (nós) das linhas verticais das malhas (temperatura média para o eixo longitudinal do corpo de prova), onde foi possível a identificação do processo de fissuração, sem sinais visíveis, pelos valores de temperatura, como também indicação da posição da fissura (Figura 14).

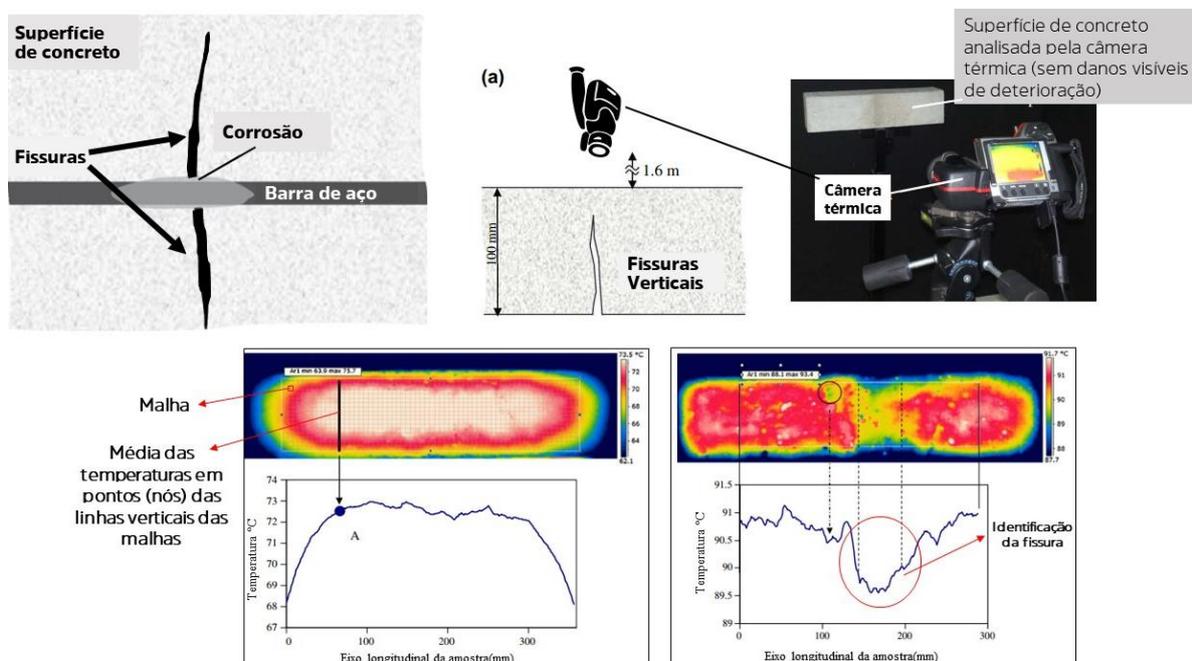


Figura 14 - Identificação do processo de fissuração, sem danos visíveis, pelos valores de temperatura média para o eixo longitudinal do corpo de prova.

Em Rocha; Póvoas (2019), utilizando da termografia por infravermelho, de forma passiva, como radiação solar e temperatura ambiente, para detecção de produtos de corrosão de armaduras em concreto armado, sem sinais visíveis, foi possível apenas em um estado avançado de deterioração (porcentagens de perda de massa maiores que 10%). Foi utilizado de corpos de prova de concreto com barras de aço, submetidas a um processo de corrosão acelerada de forma diferenciada. Na detecção de produtos de corrosão, a termografia infravermelha apresentou muitas limitações, além do estágio avançado de deterioração, foi necessário o período da manhã (período de aquecimento: das 9h00 às 12h00) e em barras de aço com pequenos cobrimentos (2,5cm), para a identificação dos produtos de corrosão no termograma. Um contraste térmico de 0,8°C foi necessário.

2.4 A influência das condições do defeito do concreto (tamanho e profundidade) no uso da termografia por infravermelho

Os vazios, defeitos ou anomalias interrompem o fluxo de calor, pois podem ser preenchidos com ar e/ou água, apresentando propriedades térmicas, como a condutividade térmica (k), diferentes do concreto (ar: $k = 0,024 W/m.°C$; água: $k = 0,60 W/m.°C$ e concreto $k = 1,60 W/m.°C$). Assim, sua presença afeta as propriedades de transferência térmica da estrutura de concreto, criando uma anomalia térmica nas distribuições de temperatura sobre fluxos de calor, resultando em gradientes de temperatura no termograma (HIASA; BIRGUL; CATBAS, 2017; MEHTA; MONTEIRO, 2014; ROCHA; PÓVOAS, 2019; VAGHEFI, 2011; WASHER, 2012).

Uma vez que a qualidade e a integridade do concreto influenciam na temperatura de superfície, vazios, defeitos ou anomalias podem ser desprezíveis, se eles forem muito pequenos em comparação à profundidade da estrutura ou, se eles estiverem localizados muito profundamente dentro do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Um defeito mais profundo tem menos influência na temperatura superficial resultante do que um defeito próximo à superfície (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009). Conforme o aumento da profundidade do defeito, torna-se mais difícil a detecção pela termografia por infravermelho (ACI 228.2R-13, 2013).

Uma revisão do estado da arte realizado por Rocha e Tavares (2017) sobre a utilização da termografia por infravermelho como teste não destrutivo para inspeção de pontes de concreto, mostra o quanto é problemático a detecção de defeitos no concreto levando em conta a profundidade, o tamanho (área do defeito) e o tempo de coleta de dados. Este estudo revela que quanto maior e mais superficial for a área do defeito, mais fácil é a sua detecção (Tabela 4).

Tabela 4 – Detecção de defeitos em relação a profundidade, o tamanho (área do defeito) e o tempo de coleta (ROCHA; TAVARES, 2017).

Autores	Profundidade do defeito (cm)	Área do Defeito (cm²)	Detecção	Tempo de Inspeção Recomendado
Sakagami e Kubo (2002)	2 - 3 - 5	100	SIM	termografia ativa
	10	100	SIM	
Maierhofer et al. (2006)	2 - 4 - 6 - 8	400	SIM	termografia ativa
	2 - 4 - 6 - 8	100	SIM	
Meola (2007)	1,5 a 7,0	12,5 a 78,5	SIM	termografia ativa
Abdel-Qader et al. (2007)	2,54 a 7,00	19,35 a 103,0	SIM	termografia ativa
	8,90 a 10,16	14,5 a 103,0	NÃO	
Yehia et al. (2007)	1,9 - 2,5 - 5,1	14,44 a 105,06	SIM	10h:00 às 15h:00
	5,6 - 10,1	14,44 a 105,06	NÃO	
Cheng, Cheng e Chiang (2008)	0,5 - 1 - 1,5 - 2 - 3	100	SIM	termografia ativa
		25	SIM	
Washer, Fenwick e Bolleni (2009)	5,1	900	SIM	5 a 7 horas*
Washer, Fenwick e Bolleni (2010)	7,6	900	SIM	7 a 9 horas*
	2,5	900	SIM	5 horas e 40 minutos*
Washer (2012)	12,7	900	SIM	Mais que 9 horas*
	2,5	900	NÃO	1 hora*
	5,1	900	NÃO	1 hora e 30 minutos*
Kee et al. (2012)	6,35	900	NÃO	2 horas*
		930,25	SIM	45 minutos*
		1860,50	SIM	3 horas e 45 minutos*
Gucunski et al. (2013)	6,35	3721	SIM	7 horas e 45 minutos*
		930,25	SIM	40 minutos*
		1860,5	NÃO	Meio-dia
Vaguefi et al. (2015)	5,1 - 7,6	deterioração real	SIM	meia dia
Watase et al. (2015)	1 - 2 - 3	900	SIM	Meio-dia
		900	SIM	meia noite
Alfredo-Cruz et al. (2015)	2,5 - 5,0 - 7,5	225	SIM	8h00 às 23h 00 Período noturno
Hiasa et al. (2016)	1,27 - 2,54 - 5,08	104,04	SIM	Período noturno
	7,62	104,04	NÃO	nenhum defeito foi visto a qualquer hora do dia

*Depois do nascer do sol

Outro estudo realizado por Hiasa; Birgul; Catbas (2017) também traz um resumo de resultados da literatura, onde é mostrado a relação entre a profundidade e o tamanho (área e espessura) da falha (defeito) detectada/não detectada. A partir desses gráficos, os autores indicam que a área de falha (Figura 15, à direita) parece ter mais impacto na detecção pela termografia por infravermelho do que a espessura da falha (Figura 15, à esquerda), uma vez que áreas maiores de falha foram detectadas, mesmo que estivessem localizadas em grandes profundidades (15cm), enquanto que para uma menor profundidade (3cm) e com espessura considerável (70mm), a falha não foi detectada.

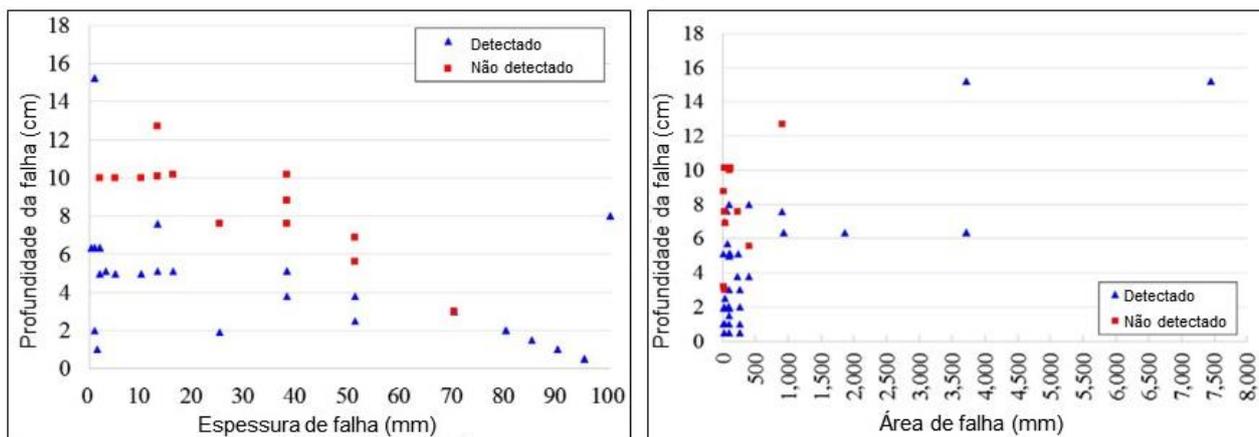


Figura 15 - Profundidade de falha (defeito) detectada/não detectada em relação ao seu tamanho (área e espessura). À direita: profundidade versus área de falha. À esquerda: profundidade versus espessura da falha (HIASA; BIRGUL; CATBAS, 2017).

Embora haja uma grande quantidade de pesquisas sobre a termografia por infravermelho para a detecção de defeitos em estruturas de concreto, elas têm sido conduzidas em diferentes condições, como mostrado na Tabela 4 e na Figura 15. E, devido a dados experimentais insuficientes, o efeito do tamanho da falha ainda não está totalmente esclarecido e, como esses fatores afetam na detecção da termografia por infravermelho. Além do efeito do tamanho da falha, a profundidade e o tempo de coleta de dados na detecção de defeitos, são ainda algumas das incógnitas a serem exploradas para a realização de inspeções em estruturas de concreto, através da termografia por infravermelho. Normas e pesquisas sugerem algumas recomendações quanto ao uso da tecnologia, mas não há um consenso definido, uma vez que muitas das investigações são contraditórias nesses pontos apresentados. É importante ressaltar que o método pode não ser confiável e consistente quando aplicado no campo sem a consideração cuidadosa de algumas condições.

2.5 A influência das condições ambientais no uso da termografia por infravermelho

Uma vez que o funcionamento da técnica da termografia por infravermelho na detecção de defeitos é embasado nas condições de fluxos de calor e, sua relação com o contraste térmico produzido (gradiente de temperatura entre o concreto íntegro e o danificado), sendo fortemente influenciado pelas condições ambientais que, intervém na obtenção e precisão dos resultados. É necessário um melhor entendimento das influências ambientais na detecção de defeitos usando a termografia por infravermelho, para apoiar seu uso. Tendo o conhecimento sobre quais condições ambientais específicas têm maior probabilidade de resultar em um alto nível de desempenho e quais condições ambientais devem resultar em baixo nível de desempenho, garantindo uma correta avaliação das condições das estruturas de concreto (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

Pelo fato de o uso da termografia por infravermelho para a detecção de defeitos no concreto necessitar de condições ambientais “adequadas”, como o aquecimento radiante do sol, pode-se tornar ineficaz se as condições não forem adequadas. As condições “adequadas” não são bem definidas, mas geralmente incluem mudanças suficientes no ambiente para produzir um gradiente de temperatura no concreto (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

Quando as variações da temperatura ambiente são menos pronunciadas, o contraste térmico desenvolvido no concreto é diminuído. Caso a temperatura ambiente permaneça constante, nenhum contraste térmico pode ser observado se o concreto permanecer em equilíbrio térmico com o seu ambiente circundante (WASHER, 2012). Essencialmente, há exigência de condições de fluxo de calor, resultantes de condições ambientais adequadas, necessárias para obtenção dos maiores valores de contraste térmico entre as regiões danificadas e íntegras da estrutura, conseqüentemente, a identificação de defeitos próximos a região da superfície. No entanto, mesmo com as condições adequadas de fluxo de calor, nem todos os defeitos são detectáveis (ACI 228.2R, 1998). Como visto, outros parâmetros influenciam no processo de medição, por exemplo, o tamanho (área e espessura) e a profundidade do defeito.

Quando as condições ambientais são adequadas, pode ser fácil a identificação do contraste térmico, uma vez que as áreas do concreto danificado podem desenvolver temperaturas de superfície de 1°C a 3°C superiores em relação ao concreto íntegro circundante (GUCUNSKI et al., 2012). Mas nem sempre durante uma inspeção de uma estrutura de concreto, dependendo das condições de exposição do elemento a ser inspecionado e do tempo da coleta de dados, tem-se as melhores condições para obtenção dos contrastes térmicos. Por isso é necessário ter o conhecimento do

contraste térmico ótimo, levando em consideração as condições impostas na estrutura de concreto para a identificação dos defeitos.

Hiasa; Birgül; Catbas (2017), a partir de seus próprios dados experimentais e estudo de outros autores, admite faixas de contraste térmico para a detecção ou não detecção de defeitos utilizando a termografia por infravermelho. A faixa improvável para a detecção de defeitos está dentro de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, uma faixa provável para a detecção de defeitos está entre $\pm 0,2$ a $0,4^{\circ}\text{C}$ e, uma faixa certamente provável para a detecção é qualquer valor acima de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$, como evidenciado na Figura 16. Apesar dos autores ressaltarem há necessidade de mais dados experimentais sob diferentes condições (experimentais e ambientais).

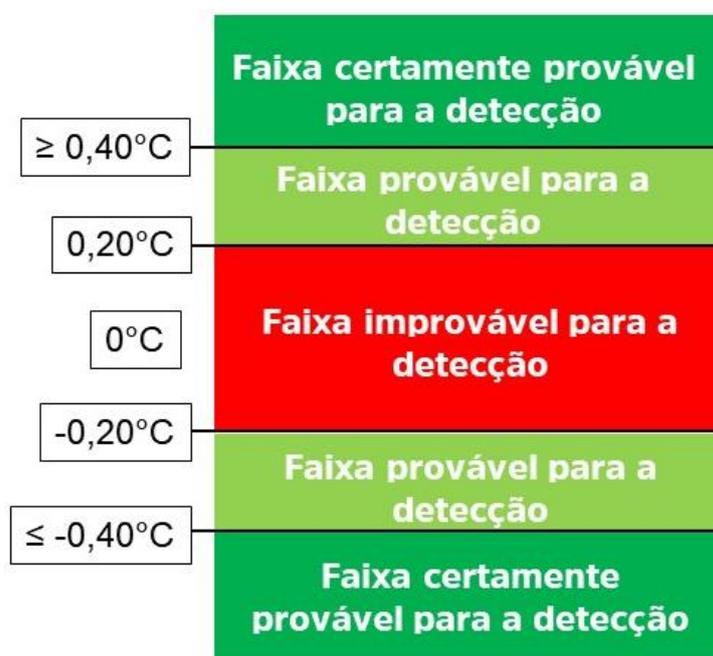


Figura 16 - Faixa de contraste térmico ΔT admitido para a detecção ou não detecção de defeitos utilizando a termografia por infravermelho (HIASA; BIRGÜL; CATBAS, 2017).

Segundo Weil, desde 1988, o método de teste, descrito pela ASTM D4788-03, têm sido o padrão de consenso, servindo de base para as investigações de pontes e pavimentações em todo o mundo (MALHOTRA; CARINO, 2003). Neste método de teste, as detecções são feitas através de um scanner infravermelho e um gravador de vídeo, montados em um veículo que trafega sobre a superfície a ser analisada, conforme ilustrado na Figura 17.



Figura 17 - Scanner infravermelho e o gravador de vídeo montados em um veículo (MALHOTRA; CARINO, 2003)

Neste método de teste padrão para uso da técnica do infravermelho (scanner) na identificação de deteriorações em tabuleiros de pontes de concreto, a ASTM D4788-03 (ASTM, 2013) apresenta algumas recomendações relacionadas as condições ambientais adequadas para o desenvolvimento de um gradiente mínimo de temperatura.

A ASTM D4788-03 (ASTM, 2013), recomenda que haja uma diferença de temperatura, ΔT , entre a área de concreto danificada e íntegra circundante de pelo menos $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na identificação de deteriorações em tabuleiros de pontes de concreto (com e sem camadas de asfalto¹¹) com o uso da tecnologia de infravermelho. Geralmente, um mínimo de 3 horas de radiação solar direta é suficiente para criar essa diferença de temperatura. Na época do inverno, onde o ΔT será inferior, são recomendados 4 horas de radiação solar direta e ventos inferiores a 24 km/h no concreto sem camada de asfalto e, 6 horas e ventos inferiores 24 km/h no concreto com camada de asfalto. Na Tabela 5, é mostrado um resumo dessas condições ambientais necessárias para o desenvolvimento do gradiente mínimo de temperatura para que seja possível a detecção de defeitos pela tecnologia de infravermelho.

¹¹ O método de teste pode ser usado em camadas de asfalto ou concreto com espessura limite de 100mm (ASTM D4788-03, 2013).

Tabela 5 - Condições ambientais necessárias para identificação de deteriorações em tabuleiros de pontes de concreto (com e sem camadas de asfalto) com o uso da tecnologia de infravermelho (desenvolvimento de um gradiente mínimo de temperatura para que seja possível a detecção), conforme a ASTM D4788-03 (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

Estação do ano	Radiação solar direta	Mudança na temperatura ambiente	Velocidade do vento	Limite de detecção ΔT	Observações
Verão	3 horas	Nenhuma especificação	< 50 Km/h	0,5°C	Superfície do tabuleiro seca pelo menos 24 horas antes do teste
Inverno	4 horas	11°C	< 24 Km/h	0,5°C	Temperatura ambiente > 0°C
Inverno, tabuleiro com camada de asfalto	6 horas	11°C	< 24 Km/h	0,5°C	Temperatura ambiente > 0°C

Para uma situação mais simples e difundida, como é o caso do método de teste em superfícies expostas a radiação solar, como os tabuleiros de ponte, outra recomendação é dada por Weil, sugerindo que o dia anterior a inspeção deve ser seco e com muito sol e que, o melhor contraste térmico é obtido duas ou três horas após o nascer do sol ou o pôr do sol, ambos são períodos de rápida transferência de calor (MALHOTRA; CARINO, 2003).

De acordo com a ACI 228.2R-13 (2013), o melhor momento para fazer levantamentos infravermelhos é logo após o nascer do sol ou meia hora a uma hora após o pôr do sol. Caso o teste for realizado muito tempo após uma mudança térmica, a superfície do concreto pode ficar saturada termicamente (equilíbrio térmico) de forma que as anomalias térmicas não são detectáveis. A quantidade de tempo necessária sob a radiação solar direta para desenvolver anomalias detectáveis difere para várias aplicações. Por exemplo em uma inspeção de tabuleiro de ponte, onde foram simuladas as falhas em um tabuleiro fabricado, Gucunski et al. (2012), alegou que um termograma feito 40 minutos após o nascer do sol (efeito do resfriamento noturno) proporciona mais clareza na identificação das anomalias do que um termograma capturado no mesmo local mas por volta do meio dia (efeito do aquecimento diurno). Os autores ressaltam que, um dos resultados mais interessantes deste estudo é que os termogramas obtidos usando o efeito de resfriamento noturno pode revelar defeitos com mais clareza do que aqueles obtidos a partir do efeito do aquecimento diurno, proposto pela ASTM D4788-03 (GUCUNSKI et al., 2012; KEE et al., 2012).

Outras recomendações sugeridas para minimizar o efeito das condições ambientais são: céu limpo, pois as nuvens reduzem a radiação solar durante o dia e refletem a radiação infravermelha a noite, retardando a transferência de calor na superfície de concreto e dificultando o processo de medição e; vento e umidade moderados, pois reduzem os gradientes de temperatura (ACI 228.2R-13, 2013; ASTM D4788-03, 2013).

Em estudo realizado por Washer; Fenwick e Bolleni (2009), onde se desenvolveu diretrizes para inspeção de pontes de concreto com o uso da termografia por infravermelho, verificou-se o período útil para realização de uma inspeção com a tecnologia, levando em consideração: condição de exposição da superfície (exposta ao carregamento solar direto ou sombreada), condição de inspeção (diurna ou noturna), radiação solar direta, mudança na temperatura ambiente e velocidade do vento. E, todas essas considerações influentes na detecção, dependendo da profundidade do defeito. Neste estudo, é constatado que para superfícies expostas ao carregamento solar direto, como é o caso do método de teste da ASTM D4788, (2013), o maior contraste térmico, que aparece no termograma, é de aproximadamente 4 horas após o nascer do sol para um defeito de profundidade de 50,8 mm em relação a superfície de concreto. O período útil de duração da inspeção é de aproximadamente 6 horas. Caso a profundidade prevista seja de 76,2 mm em relação a superfície de concreto, a inspeção deve ser conduzida de 5 a 6 horas após o nascer do sol. O período útil de inspeção tem duração de 5 horas. Em geral, o vento reduz o efeito do aquecimento solar, conseqüentemente, os contrastes térmicos resultantes dos defeitos de superfície, sendo que, para velocidades mais baixas de vento resultam em melhores contrastes térmicos, podendo ser adotado uma velocidade média do vento inferior a 13 Km/h. Um resumo dessas diretrizes é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo das diretrizes para inspeção de pontes de concreto com o uso da termografia por infravermelho (Washer; Fenwick e Bolleni 2009) (continua).

Condição de exposição	Condição de inspeção	Radiação solar direta	Mudança na temperatura ambiente*	Velocidade do vento	Profundidade de detecção	Limite de detecção ΔT	Período útil de inspeção***
Superfícies expostas ao carregamento solar direto	Inspeção diurna	4 horas	Nenhuma especificação	< 12,9 Km/h (antes e durante a inspeção)	50,8 mm	1°C e 2°C	6 horas
Superfícies expostas ao carregamento solar direto	Inspeção diurna	5 a 6 horas	Nenhuma especificação	< 12,9 Km/h (antes e durante a inspeção)	76,2 mm	1°C e 2°C	5 horas

Tabela 6 – Resumo das diretrizes para inspeção de pontes de concreto com o uso da termografia por infravermelho (Washer; Fenwick e Bolleni 2009) (continuação).

Condição de exposição	Condição de inspeção	Radiação solar direta	Mudança na temperatura ambiente*	Velocidade do vento	Profundidade de detecção	Limite de detecção ΔT	Período útil de inspeção***
Superfícies sombreadas	Inspeção diurna	Nenhuma especificação	$\Delta T \geq 8^{\circ}C$	$\leq 16,1$ Km/h	50,8 mm	1°C e 2°C	8 horas
Superfícies sombreadas	Inspeção diurna	Nenhuma especificação	$\Delta T \geq 8^{\circ}C$	$\leq 16,1$ Km/h	76,2 mm	1°C e 2°C	4 horas
Superfícies sombreadas	Inspeção noturna	Nenhuma especificação	$\Delta T \geq - 8^{\circ}C^{**}$	$\leq 12,9$	50,8 mm	1°C e 2°C	9 horas
Superfícies sombreadas	Inspeção noturna	Nenhuma especificação	$\Delta T \geq - 8^{\circ}C^{**}$	$\leq 12,10$	76,2 mm	1°C e 2°C	7 horas

*Mudanças positivas de temperatura ambiente (dia) e mudanças negativas de temperatura ambiente (noite)

**O valor de mudança na temperatura ambiente medido é da temperatura mais alta à tarde até uma temperatura mais fria durante à noite.

***Os períodos de inspeção foram calculados com base nos limites de 1°C e 2°C.

Neste mesmo estudo, levando em consideração todos os fatores apresentados (Tabela 6), foram adotados dois valores de contrastes térmicos, 1 °C e 2 °C. Sendo que o primeiro valor de contraste térmico de 1°C, permite uma maior ordem de magnitude, levando em consideração a sensibilidade térmica da câmera (0,08°C). As câmeras industriais típicas têm sensibilidade térmica de 0,08°C (WASHER, 2012). Como regra prática, o contraste térmico deve ser cerca de 10 vezes a sensibilidade térmica da câmera infravermelha disponível (WATASE et al., 2015). O segundo valor de contraste térmico foi de 2°C, sendo 4 vezes o requisito mínimo da ASTM D4788-03 (2013), garantindo uma grande margem de segurança, sendo fundamental para as condições de campo, pois há “ruídos” nas imagens térmicas causados pela variação das propriedades do material na superfície do concreto, como manchas, remendos, faixas de rodagem, etc. (muito comum em tabuleiros de pontes) que contribuirão para dificultar a análise da imagem (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

Outro ponto a ser destacado neste estudo é o efeito do vento em diferentes condições de exposição da superfície (exposta ao carregamento solar direto ou sombreada). Na condição da superfície exposta ao carregamento solar direto, a temperatura da superfície de concreto normalmente é mais alta do que a temperatura do ambiente circundante, onde as altas velocidades do vento podem diminuir os efeitos do aquecimento radiante do sol e, portanto, reduzir os contrastes térmicos no

concreto. Em relação a superfície sem exposição à radiação solar (sombreada), durante o dia, a temperatura da superfície de concreto normalmente é menor do que a temperatura do ambiente circundante, em que o aumento da velocidade do vento pode acelerar a taxa de transferência de calor do ambiente para o concreto e, conseqüentemente, pode resultar em maiores valores de contrastes térmicos no concreto (WASHER et al., 2013; WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

Pesquisas em corpos de prova de concreto foram realizadas em condições brasileiras, no estado de Pernambuco, com o objetivo de avaliar a capacidade da termografia por infravermelho para a identificação de defeitos, levando em consideração a qualidade do concreto (diferentes relações água/cimento, 0,50 e 0,60), a profundidade do defeito (profundidades de 25,50 e 75 mm), a espessura do defeito (3, 6 e 12 mm) e, principalmente as condições ambientais e de exposição (superfície com ou sem exposição à radiação solar direta). As condições ambientais monitoradas foram temperatura ambiente e umidade relativa do ar (ROCHA; PÓVOAS, 2019a; ROCHA; PÓVOAS; SANTOS, 2018) . Na Tabela 7, é mostrado um resumo dos resultados obtidos, nestas pesquisas, das condições ambientais brasileiras necessárias para o desenvolvimento do gradiente de temperatura, para que seja possível a detecção de defeitos pela câmera térmica.

Tabela 7 - Condições ambientais brasileiras obtidas a partir dos resultados das pesquisas de Rocha; Póvoas (2019) e Rocha; Póvoas; Santos (2018) (continua).

Condição de exposição	Condição de inspeção	Mudança na temperatura ambiente	Profundidade de detecção	Limite de detecção ΔT	Período útil de inspeção
Superfícies expostas ao carregamento solar direto*	Inspeção diurna	Nenhuma especificação	25 mm***	Nenhuma especificação	9h às 13h
	Inspeção diurna	Nenhuma especificação	50 mm****	Nenhuma especificação	9h às 13h
	Inspeção noturna	Nenhuma especificação	25 mm***	Nenhuma especificação	Nenhuma especificação
	Inspeção noturna	Nenhuma especificação	50 mm****	Nenhuma especificação	Nenhuma especificação
Superfícies sombreadas**	Inspeção diurna	$\Delta T \geq 5,4^{\circ}\text{C}$	25 mm***	0,4°C (mínimo) e 1°C (máximo)	10h às 14h
	Inspeção diurna	$\Delta T \geq 5,4^{\circ}\text{C}$	50 mm****	0,4°C (mínimo) e 1°C (máximo)	10h às 14h

Tabela 7 - Condições ambientais brasileiras obtidas a partir dos resultados das pesquisas de Rocha; Póvoas (2019) e Rocha; Póvoas; Santos (2018) (continuação).

Condição de exposição	Condição de inspeção	Mudança na temperatura ambiente	Profundidade de detecção	Limite de detecção ΔT	Período útil de inspeção
Superfícies sombreadas**	Inspeção noturna	$\Delta T \geq 5,4^{\circ}\text{C}$	25 mm***	0,2°C (mínimo)	Nenhuma especificação
	Inspeção noturna	$\Delta T \geq 5,4^{\circ}\text{C}$	50 mm****	0,2°C (mínimo)	Nenhuma especificação

*Superfícies expostas ao carregamento solar direto: transferência de calor por radiação + transferência de calor por convecção

* Superfícies expostas ao carregamento solar direto apresentam valores mais altos de contraste térmico em comparação com as superfícies sombreadas.

**Superfícies sombreadas: transferência de calor por convecção.

***A detecção do defeito em uma profundidade de 25 mm foi possível para diferentes relações a/c do concreto (0,50 e 0,60).

****A detecção do defeito em uma profundidade de 50 mm foi possível apenas para a relação a/c de 0,50.

Os autores destacam que o local escolhido para os ensaios, Recife-PE, apresenta condições ambientais adequadas para o desenvolvimento dos gradientes de temperatura no concreto, onde a termografia por infravermelho tornou os defeitos visíveis tanto durante o dia quanto à noite.

Esta forte dependência das condições ambientais, característica muito particular de cada região e que, não podem ser controladas, dificulta a eficácia do método que varia significativamente, no momento em que a inspeção está sendo conduzida (tempo de coleta de dados). Certamente, as definições das recomendações de uso, como foi demonstrado em normas e pesquisas, são dificultadas, não tendo um consenso definido em relação as condições ambientais adequadas e o contraste térmico mínimo para a identificação de defeitos em estruturas de concreto com a termografia por infravermelho.

No caso do programa experimental de Farrag; Yehia; Qaddoumi (2016) feito em uma região de condições ambientais ideais (Emirados Árabes Unidos), onde há altas temperaturas ambiente (faixa de temperatura entre 24°C e 39°C), carga solar quase o ano todo, baixas velocidades do vento (faixa de velocidade do vento entre 6 Km/h e 19 Km/h) e baixas umidades relativas do ar (faixa de umidade entre 47 e 58%) registradas durante o período de monitoramento. O efeito dessas condições, como: temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade relativa do ar; podem ser minimizados, pois os corpos de prova de concreto com diferentes falhas simuladas, foram expostos a alta carga

solar, de pelo menos 12 horas de exposição diária, principal influência no desenvolvimento dos gradientes temperatura. Mesmo em condições ideais, foi feita a adoção de um contraste térmico de $0,8^{\circ}\text{C}$, (10 vezes a sensibilidade térmica da câmera utilizada, $0,08^{\circ}\text{C}$), sendo um valor superior em relação a determinação da ASTM D4788-03 (2013), nesta mesma condição. Os autores afirmam que este valor foi usado para detecção e julgamento confiável da existência do defeito.

Em contrapartida, no estudo de campo de Clark; Mccann; Forde, (2003) em pontes de concreto e alvenaria, com condições ambientais adversas, onde raramente há exposição solar e baixas temperaturas ambientes, foi possível a identificação de defeitos com a termografia por infravermelho. A diferença de temperatura entre as áreas danificadas e íntegras foi de aproximadamente $0,2 - 0,3^{\circ}\text{C}$. O autor ressalta que, o avanço nas tecnologias de infravermelho, possibilita a detecção de diferenças de temperaturas de $0,08^{\circ}\text{C}$ (valor da sensibilidade térmica da câmera utilizada).

2.6 A Influência das propriedades termofísicas do concreto no uso da termografia por infravermelho

As propriedades térmicas principais que, influenciam a transferência (ou fluxo) de calor e o desenvolvimento dos gradientes de temperatura, dentro de um material (resposta térmica de um material às mudanças de temperatura, inércia térmica), são: difusividade térmica, condutividade térmica e calor específico. Sendo essas propriedades térmicas, juntamente com outras propriedades termodinâmicas do material, como a densidade, influentes na avaliação da termografia por infravermelho.

Em conformidade com Rocha; Póvoas (2019a) e Rocha; Póvoas; Santos (2018), pode-se identificar mais facilmente defeitos com o uso da termografia por infravermelho em concreto com relação água/cimento mais baixa, maior densidade e resistência à compressão do que aquele com uma relação água/cimento mais alta. Os autores ressaltam que, quanto melhor a qualidade do concreto, mais eficaz se torna a técnica de infravermelho para a detecção de defeitos.

De acordo com Farrag; Yehia; Qaddoumi (2016), o concreto de alta resistência (maior valor de condutividade térmica e de densidade) e o concreto leve (menor valor de condutividade térmica e de densidade) apresentaram, respectivamente, maior e menor potencial de detecção de defeitos entre os quatro tipos de concreto analisados (concreto convencional, concreto de alta resistência, concreto leve e concreto autoadensável). O concreto convencional e o autoadensável, apresentaram aproximadamente os mesmos potenciais de detecção. Em relação ao resultado apresentado pelo

concreto de alta resistência, a alta fração de volume de agregados, onde os mesmos possuem maiores valores de condutividade térmica, demonstra maior influência no comportamento térmico global do concreto.

Em outros estudos, utilizou-se a termografia ativa, a partir do aquecimento dos corpos de prova de concreto com defeitos simulados, para a avaliação da qualidade do concreto, baseado nos gradientes de temperatura da superfície. Em Al-Hadhrami et al. (2012) variou-se a quantidade de cimento, a relação água/cimento e o tempo de vibração e, suas influências nos gradientes de temperatura da superfície, verificando a possibilidade do uso de imagens térmicas para o apontamento de uma estrutura de concreto com maior ou menor porosidade. Maierhofer; Arndt; Röllig (2007) utilizaram-se de curvas transientes (gradientes de temperatura da superfície versus tempo de resfriamento) para a verificação do maior ou menor grau de influência das características de sua composição, como teor de ar incorporado, porosidade dos agregados e densidade das armaduras. Além disso, as suas propriedades, como resistência à compressão, densidade e condutividade térmica, também foram utilizadas para a verificação dessas influências no desenvolvimento dos gradientes de temperatura da superfície.

Os estudos indicaram que, variações no traço e no processo de produção do concreto (mudanças nas propriedades do material, como densidade, e nas propriedades térmicas, como condutividade térmica), influenciam no comportamento dos gradientes de temperatura da superfície e, como resultado, no desempenho da técnica de infravermelho. Demonstrando ser imprescindível o conhecimento dessas propriedades do concreto, assim como dos fatores extrínsecos e intrínsecos que mais intervêm.

Em relação ao material, concreto, as propriedades térmicas dependem de uma série de fatores, dos quais podem ser destacados: o tipo de agregado, o tipo de cimento, a porosidade e o teor de umidade do concreto (BRITTEZ, 2011), conforme discutido no item 2.3 do capítulo 2.

A condição do concreto (seco ou úmido) e sua influência nas propriedades térmicas principais, durante a avaliação da termografia por infravermelho, também pode se tornar um parâmetro decisivo em relação a eficácia da técnica e o tempo útil de inspeção.

2.7 Os avanços no estudo da termografia por infravermelho para inspeção de estruturas de concreto – modelagem computacional

As pesquisas anteriores relacionadas a identificação de defeitos em estruturas de concreto com o uso da termografia por infravermelho, apresentaram inconsistências de implementações experimentais, como também incertezas associadas à sua utilização. Foram conduzidas com configurações experimentais e condições limitadas, uma falta de comparação das tecnologias por infravermelho disponíveis e, a adoção de diferentes parâmetros (por exemplo, tamanho e profundidade da falha). Pesquisas estão sendo direcionadas para a utilização dos resultados, de campo e de laboratório, como dados de entrada em um software, baseado no método dos elementos finitos, sendo possível a modelagem do comportamento físico do ensaio em diferentes condições de contorno, garantindo um maior domínio de análise e confiabilidade nos resultados obtidos, bem como, a otimização do custo, do processo e do tempo para a avaliação (HIASA; BIRGUL; CATBAS, 2017; HIASA; BIRGÜL; CATBAS, 2017).

De modo geral, os ensaios de campo e de laboratório com a termografia por infravermelho são conduzidos com corpos de prova e condições limitadas. Sendo uma das dificuldades para os ensaios em laboratório, a confecção dos corpos de prova, visto que esses corpos de prova se tornam relativamente grandes para simular pontes de concreto, por exemplo. Outro ponto é a quantidade de falhas de vários tamanhos, incorporando diversas profundidades e, conduzi-las nos ensaios em diferentes condições de contorno, tornando-se grande o número de experimentos que devem ser executados, o que demanda um trabalho extremamente demorado. Além disso, dado que os resultados da termografia por infravermelho dependem do momento de coleta de dados, o ensaio requer a obtenção de diversos fatores, tantos quanto possível para avaliar o efeito do tempo. O efeito do tempo pode depender da região, o que significa que depende das condições ambientais (HIASA; BIRGUL; CATBAS, 2017; HIASA; BIRGÜL; CATBAS, 2017).

A modelagem do fenômeno físico do ensaio possibilita durante a avaliação, adoção de diferentes condições de contorno, como de fluxo de calor aplicado (termografia ativa) ou a interação dos elementos de superfície com o ambiente circundante, por meio de fenômenos de transferência de calor, convecção e radiação (termografia passiva) e temperatura (KHAN et al., 2015), assim como, a possibilidade de alterações na geometria e na disposição, do corpo de prova e das falhas simuladas (Figura 18). Sendo possível, a exploração dos parâmetros sensíveis e a determinação dos limites para a utilização efetiva da termografia por infravermelho, como determinar qual tecnologia utilizar, quando e como implementar, sem muitos experimentos, tornando viável a avaliação. Depois que um

modelo e os dados experimentais), com o intuito de investigar os parâmetros críticos, como, tamanho (área, espessura e volume) e profundidade da falha, temperatura ambiente e condições de irradiância solar (diferentes estações). Além da avaliação dos contrastes térmicos necessários para a identificação do defeito. Vale destacar que, na modelagem mais de um fator relacionado as condições ambientais foram consideradas, possibilitando um maior domínio de análise, pois os efeitos de mais condições foram avaliados. Os resultados da modelagem foram consistentes com os testes de campo, onde foi concluído que, relacionado ao tamanho da falha, a sua área apresenta um maior impacto do que a espessura e o volume no contraste térmico desenvolvido. Caso a espessura da falha for a mesma, uma área de falha maior tende a um aumento no contraste térmico, melhorando assim a detecção do defeito pela termografia por infravermelho. Além disso, com o aumento da área de falha, o impacto da espessura também aumenta. Não há diferenças significativas nos contrastes térmicos dependendo da estação e da condição. A partir do estudo comparativo (teste de campo e modelagem) foram feitas algumas ressalvas, como, a identificação de defeitos de até 2,24 cm de profundidade, em qualquer período de tempo sob dada condição, exceto às 18 horas (ponto de mudança dos efeitos, do aquecimento diurno para o resfriamento noturno) onde foi observado baixos valores de contraste térmico. Presume-se que, uma área de falha maior que 400 cm², mesmo em uma profundidade de 5,08 cm pode ser identificado pela termografia por infravermelho, uma vez que os contrastes térmicos são consideráveis para a detecção (HIASA; BIRGUL; CATBAS, 2017).

Em um estudo posterior realizado pelos mesmos autores, a partir da modelagem e com a adoção de maiores intervalos, foi possível encontrar os valores de área e de espessura que aumentam ou diminuem os contrastes térmicos desenvolvidos, assim como, os valores que são convergidos. Os resultados concordaram com o estudo anterior e mostraram que, o efeito da espessura aumenta à medida que a área aumenta, entretanto, a espessura do defeito com 1 cm ou mais, foi convergido para um determinado valor de contraste térmico. A área do defeito de aproximadamente 40 cm x 40 cm, foi convergido para um determinado valor de contraste térmico (HIASA; BIRGÜL; CATBAS, 2017).

Também foi possível a modelagem da termografia ativa para a identificação de defeitos em estruturas de concreto. A partir de um modelo tridimensional de concreto com falhas artificiais em diferentes profundidades, foi induzido fluxos de calor (aquecimento e resfriamento) transiente, com duas lâmpadas halógenas, modeladas como objetos sólidos (fontes de calor) a uma determinada distância e ângulo, garantindo assim o aquecimento homogêneo da superfície de concreto. O fenômeno físico foi estabelecido para as transferências de calor, por radiação (calor transferido pelas lâmpadas), por convecção (ganho ou perda de calor das superfícies) e condução (fluxo de calor por

meio dos materiais), obtendo assim a distribuição de temperaturas da superfície (termogramas), conforme apresentado nos estudos de Cannas et al. (2012) e Tang et al. (2014).

No estudo de Cannas et al. (2012) os dados experimentais do laboratório correspondem com os dados da modelagem, sendo assim, possível a comparação de termogramas experimentais e modelados, de modo que se permite a identificação do defeito. Foi manifestado pelos autores, a possibilidade de realização de estudos paramétricos livres dos dados experimentais, garantindo uma avaliação de forma rápida e de baixo custo. Nos estudos paramétricos de Tang et al. (2014), onde foram avaliados o efeito da profundidade, da espessura e da orientação do defeito no desenvolvimento do contraste térmico da superfície do concreto. Foi destacado a partir dos resultados da modelagem, a otimização das condições experimentais e o melhor entendimento dos dados obtidos em laboratório, mostrando potencial competitivo, em comparação com outros métodos convencionais de ensaios não destrutivos.

Algumas das vantagens da modelagem computacional são as possibilidades de estimar a profundidade do defeito, o contraste térmico desenvolvido e a distribuição de temperaturas da superfície, ou seja, a obtenção de modelos de termogramas (Figura 19). Baseado em informações que podem ser obtidas, a partir de dados experimentais (como foi o caso do estudo de Rumbayan; Washer (2014), apresentado na Figura 19) ou até mesmo antes da realização de uma inspeção de campo, a partir de informações facilmente obtidas de localização e orientação de estruturas e condições climáticas relacionadas a inspeção. Fornecendo assim, informações sobre os períodos úteis e a seleção de câmeras térmicas com especificações adequadas para uma determinada aplicação sob dada condição. Como também podem ser utilizados para a interpretação dos dados, após a etapa de campo, para um processamento simples, preciso e confiável dos dados obtidos de termogramas, definindo critérios para o contraste térmico, por exemplo (HIASA; BIRGUL; CATBAS, 2017; HIASA; BIRGÜL; CATBAS, 2017; RUMBAYAN; WASHER, 2014).

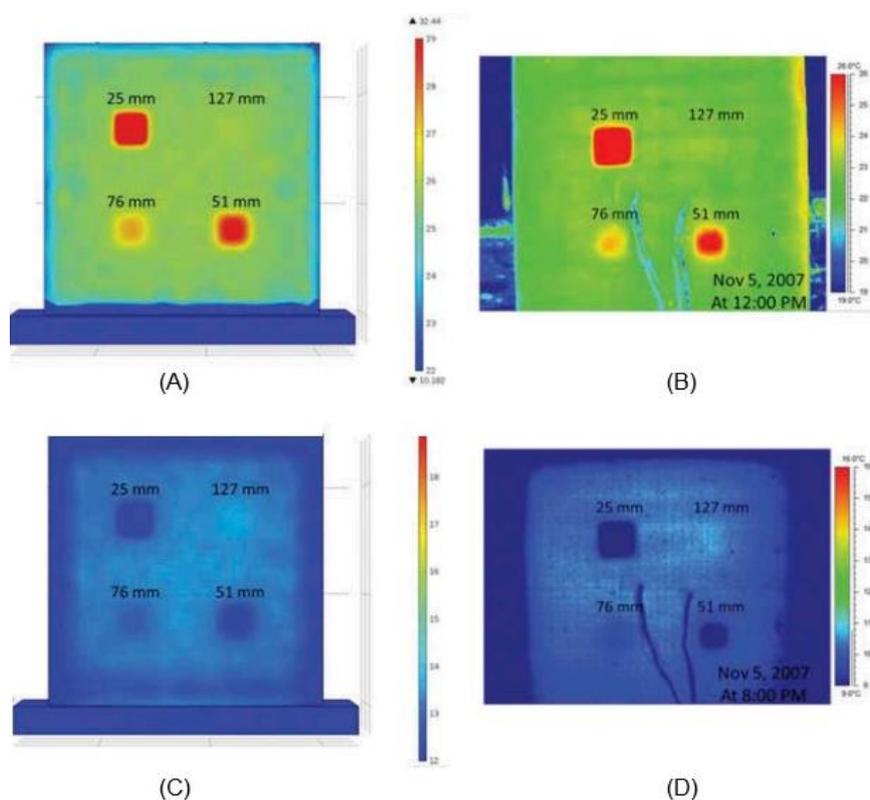


Figura 19 – Resultados obtidos a partir de modelagens computacionais (modelos de termogramas) (A) e (C) e, testes de campo (captura dos termogramas) (B) e (D), de um bloco de concreto armado com falhas artificiais simulados (RUMBAYAN; WASHER, 2014).

3. Programa experimental

O programa experimental terá como propósito avaliar o gradiente de temperatura da superfície do concreto, ao longo do tempo, a fim de se obter o gradiente mínimo de temperatura superficial, para que seja possível a identificação do defeito com o uso da termografia por infravermelho, sob dadas condições (propriedades térmicas dos materiais, objeto de análise, tamanho e profundidade do defeito, especificações do equipamento utilizado e ambientais). Como também a investigação dessas condições no gradiente de temperatura e a identificação dos períodos (janelas de tempo) aplicáveis para inspecionar um elemento de concreto com determinada condição de exposição.

Para o programa experimental, são definidas três categorias principais: método de construção dos corpos de prova, forma de monitoramento dos parâmetros e método de avaliação. Dentro dessas categorias são estabelecidas as atividades subsequentes, a serem executadas, para o cumprimento dos objetivos (cor vermelha) deste programa (Figura 20).

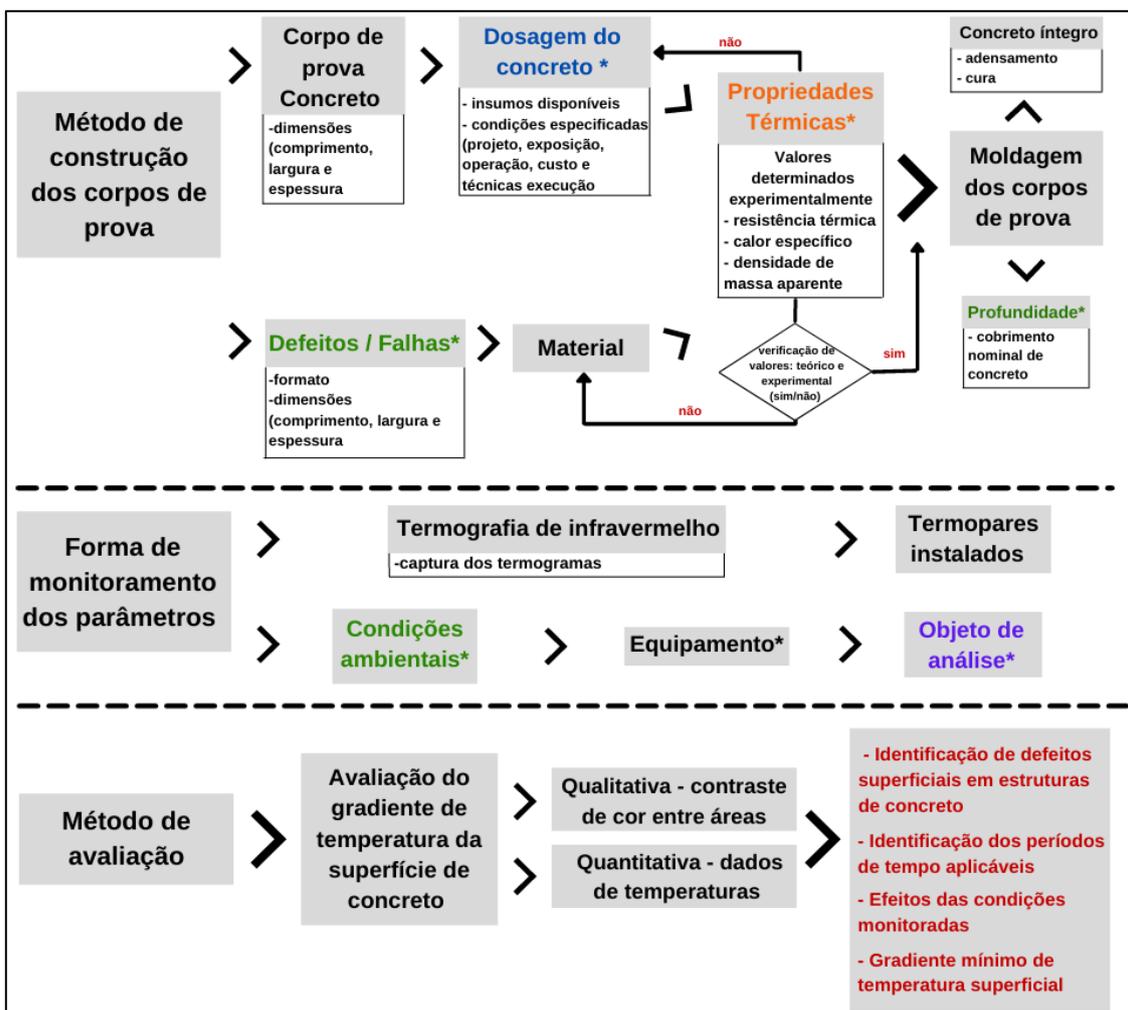


Figura 20 – Programa experimental: categorias principais e suas atividades subsequentes.

As atividades em destaque (com asterisco) da Figura 20, são algumas das condições (variáveis) que influenciam no uso da termografia por infravermelho para a identificação de defeitos em estruturas de concreto e, são mencionadas por outros autores, como mostrado na revisão bibliográfica do Capítulo 2. No presente programa experimental, algumas dessas condições são analisadas, como, profundidade, condições ambientais, equipamento e objeto de análise. Defeitos/falhas, dosagem do concreto e propriedades térmicas são condições fixas, necessárias para o cumprimento dos objetivos.

O detalhamento do programa laboratorial é apresentado nos itens a seguir.

3.1 Método de construção dos corpos de prova

Nesta etapa, foram confeccionados corpos de prova de concreto com falhas (defeitos) simuladas próximas a superfície.

As profundidades das falhas adotadas foram baseadas nos valores de cobrimento nominal de estruturas de concreto, conforme apresentado na ABNT NBR 6118 (2014)¹². Sendo os cobrimentos adotados, de 2,5 cm e de 4,5 cm, da norma. Também foi adotado o cobrimento de 1,0 cm, simulando um defeito superficial. Logo, as profundidades das falhas para a confecção dos corpos de prova de concreto foram: 1,0 cm (F1); 2,5 cm (F2) e 4,5 cm (F3).

Para a confecção dos corpos de prova de concreto, pode-se considerar a não utilização de armaduras, pois a avaliação do gradiente de temperatura superficial, será voltada para identificação de defeitos em função do cobrimento nominal de concreto, ou seja, defeitos superficiais. Utilizando-se da termografia ativa, foi verificado a baixa influência da armadura acima do defeito no gradiente de temperatura observado (MAIERHOFER; ARNDT; RÖLLIG, 2007)¹³.

¹²Para diferentes elementos (laje, viga/pilar e todos) e classes de agressividade ambiental, os cobrimentos nominais de estruturas de concreto (armado e protendido) apresentados na ABNT NBR 6118 (2014) são: 2,0 cm; 2,5 cm; 3,0 cm; 3,5 cm; 4,0 cm; 4,5 cm; 5,0 cm e 5,5 cm.

¹³Maierhofer; Arndt e Röllig (2007), utilizando-se do aquecimento de corpos de prova de concreto (termografia ativa) com diferentes densidades de armadura (baixa, média e alta), onde essas armaduras foram dispostas acima do defeito e, baseado na análise de dados quantitativos, como curvas transientes (temperatura da superfície em função do tempo de aquecimento) foi demonstrado uma baixa influência da densidade de armadura no contraste térmico observado, onde os mesmos apresentaram uma pequena diminuição de temperatura com o aumento da densidade.

Como o tamanho (espessura, área e volume) da falha influencia na detecção de defeitos pela termografia por infravermelho, foi feita a adoção das dimensões mínimas estudadas da literatura, relacionada a termografia passiva. Além disso, deve-se garantir uma escolha de espessura suficiente da falha para que, durante a concretagem dos corpos de prova, não se deforme e, que sua disposição esteja correta, paralela à superfície e com profundidade adotada, para que não haja erros e dificuldade na interpretação dos dados durante a avaliação. Para isso, foi adotado as dimensões das falhas como sendo: 100x100x10 (mm) e foi utilizado de aços guia para a localização correta das falhas, onde esses aços não causam quaisquer diferenças de temperatura na superfície (HIASA, 2016; WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009).

O material da falha é de poliestireno (valor teórico de condutividade térmica igual a $0,033 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$), próxima a condutividade térmica do ar localizado na deterioração do concreto (valor teórico de condutividade térmica igual a $0,0241 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$). De acordo com Cotič et al. (2015), não foram observadas diferenças significativas entre a evolução temporal da temperatura da superfície acima do poliestireno (falha artificial) e defeitos preenchidos com ar (“defeitos reais”). A falha artificial que apresenta condutividade térmica semelhante, pode ser considerada como um defeito real (HIASA; BIRGÜL; CATBAS, 2017).

No programa experimental, para uma maior confiabilidade nos resultados, foi feita a caracterização dos materiais referentes as suas propriedades termofísicas, como, condutividade térmica, calor específico, densidade e difusividade térmica, tanto do concreto, quanto da falha artificial de poliestireno, utilizados na confecção dos corpos de prova com falhas simuladas próximas a superfície. Os ensaios para caracterização das propriedades termofísicas foram realizados em parceria com o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O método utilizado e o detalhamento dos ensaios estão descritos no **APÊNDICE A**.

Como a presença de falhas, próximas umas às outras, aumenta a temperatura de referência (temperatura do concreto íntegro circundante, que é calculada como a temperatura média da superfície de concreto sem defeitos) e, conseqüentemente, produz um gradiente de temperatura experimental menor (COTIČ et al., 2015). Foi adotado uma falha por corpo de prova de concreto.

As dimensões dos corpos de prova adotadas devem fornecer massa térmica o suficiente para permitir o comportamento de uma grande estrutura de concreto a ser modelada, especificamente, para garantir que as mudanças de temperatura que ocorrem no corpo de prova fossem representativas

daquelas mudanças que ocorreriam em uma estrutura real (WASHER; FENWICK; BOLLENI, 2009). Desta forma, as dimensões dos corpos de prova de concreto adotadas foram: 60x60x20 (cm).

Foi adotada uma distância de 25 cm entre as extremidades, da falha e do corpo de prova de concreto. Com o intuito de proporcionar um certo confinamento da falha e do concreto, garantindo as características térmicas (inércia térmica) de uma estrutura real e, conseqüentemente, minimizar os efeitos da rápida transferência de calor entre o ar e a superfície de concreto (“efeitos de borda”), devido ao tamanho limitado do corpo de prova, influenciando na identificação de defeitos sob esta condição. Outro detalhe é que em uma situação real de um tabuleiro de ponte, por exemplo, pela área ser muito maior (praticamente infinita) em comparação com o corpo de prova a ser simulado, a transferência de calor por convecção entre o ar e a superfície de concreto, ocorre apenas a partir da superfície analisada. No caso do corpo de prova, esta mesma transferência de calor, além das áreas laterais, pode ocorrer na área oposta à analisada (AGGELIS et al., 2010; HIASA; BIRGUL; NECATI CATBAS, 2017).

Foram confeccionados 3 corpos de prova de concreto, sendo um para cada uma das profundidades das falhas (F1, F2 e F3). Um esquema ilustrativo do que foi descrito, é mostrado na Figura 21, apresentando as características geométricas dos corpos de prova de concreto e das falhas de poliestireno com suas respectivas profundidades.

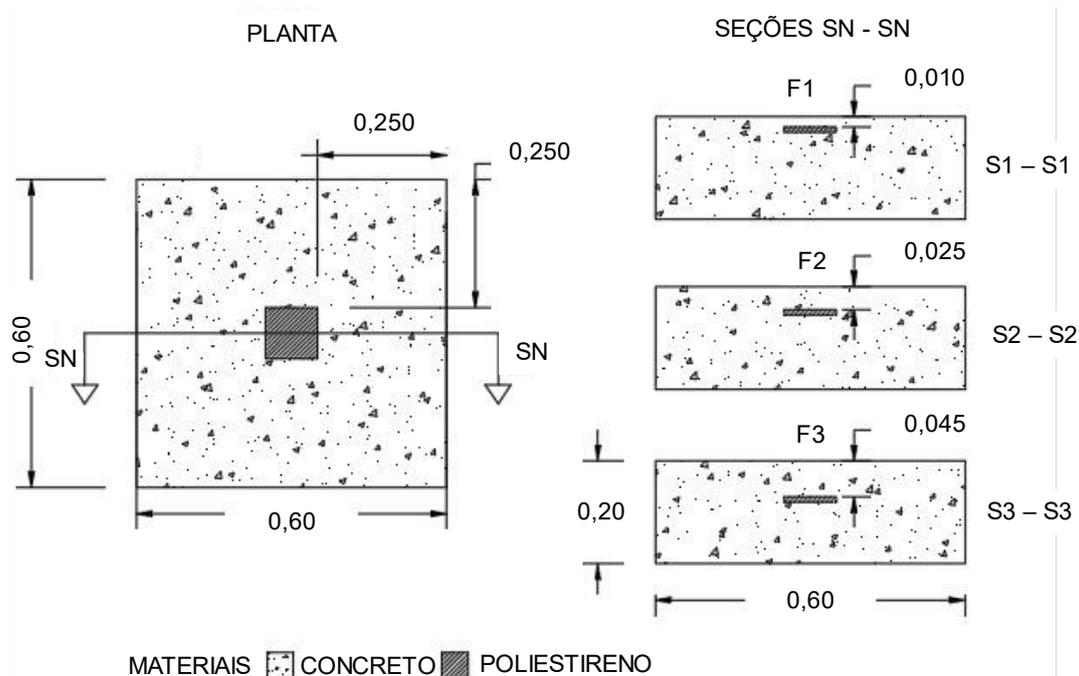


Figura 21 - Características geométricas dos corpos de prova de concreto e das falhas de poliestireno com suas respectivas profundidades – valores em metro.

Para o traço do concreto utilizado para a confecção dos corpos de prova, foi feito um breve estudo de dosagem, embasado nos insumos disponíveis e nas condições especificadas relacionadas, a exigência de projeto, exposição e operação, custo e técnicas de execução. Com o intuito de se garantir as mesmas condições do concreto de uma estrutura real em ambiente urbano. Na Figura 22, é apresentado as etapas deste estudo de dosagem, assim como os métodos utilizados, os ensaios de caracterização dos agregados (miúdos e graúdos) e as propriedades do concreto, no seu estado fresco e endurecido, executados, de acordo com as normas brasileiras.

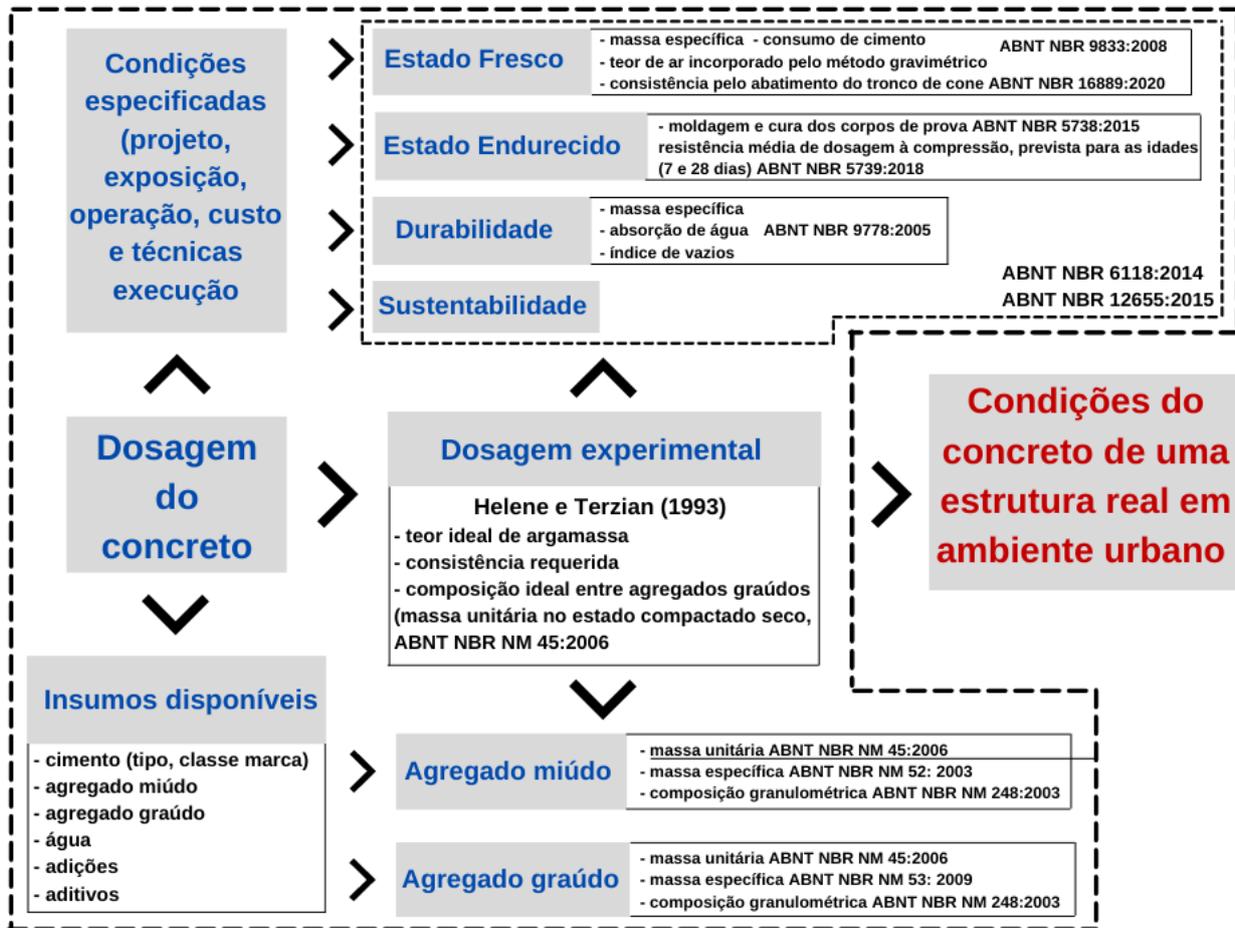


Figura 22 - Etapas do estudo de dosagem do concreto para a confecção dos corpos de prova.

Foi adotado para o concreto uma relação a/c menor 0,55 com classe de concreto C de 30, sendo de classe de agressividade ambiental II, moderada, no ambiente urbano e com risco de deterioração pequeno, conforme apresentado na ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014).

Um resumo das propriedades do concreto (estado fresco e endurecido) utilizado é apresentado na Tabela 8. O detalhamento das condições especificadas e as propriedades do concreto, como também a caracterização dos materiais utilizados está no **APÊNDICE B**.

Tabela 8 – Resumo das propriedades do concreto utilizado.

Propriedades do concreto no estado fresco		
Massa específica do concreto (kg/m ³)	Consumo de cimento em kg por m ³ de concreto	Teor de ar incorporado
2409,63	491,76	4,56%
Propriedades do concreto no estado endurecido		
Resistência média de dosagem do concreto à compressão, aos 28 dias (Mpa)	Absorção média de água após imersão	Índice de vazios médio
35,60 ± 1,41	6,3 ± 0,4 (%)	14,18 ± 0,76 (%)

Com a dosagem estabelecida, foi produzido o concreto em betoneira semifixa, sem a disposição de caçamba, com capacidade de 50 litros. O volume de concreto preparado foi de 25 litros por betonada, seguindo o procedimento de mistura de acordo com a ABNT NBR 12821 (ABNT, 2009). Para o volume total de concreto do corpo de prova, foi necessário 4 betonadas.

A moldagem dos corpos de prova de concreto foi realizada em 4 camadas, com adensamento manual, seguindo o procedimento da ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015). Foi utilizado gabaritos laterais para garantir a correta altura das camadas (5cm). A escarificação da superfície de concreto foi feita com objetivo de garantir boas condições de aderência entre camadas. Após a moldagem, foi feito o acabamento da superfície de concreto com uma desempenadeira. Os corpos de prova de concreto foram cobertos com lona plástica, evitando a perda de água (ABNT NBR 5738, 2015). O processo de moldagem e cura está apresentado na Figura 23.



Figura 23 – Processo de moldagem e cura dos corpos de prova de concreto: (a) preenchimento da primeira camada de concreto e esscarificação da superfície; (b) preenchimento da última camada de concreto (c) colocação da lona plástica.

Legenda: (1) gabaritos laterais; (2) forma de madeira; (3) concreto; (4) lona plástica.

Durante o processo de moldagem dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas próxima a superfície, foram moldados exemplares de corpos cilíndricos de concreto de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para avaliação da resistência à compressão aos 28 dias (os resultados estão apresentados no item 3.1.2).

Aos 7 dias de idade, foi retirada a fôrma de madeira, como também foi feito o acabamento da superfície de análise dos corpos de prova de concreto. O processo de acabamento da superfície de análise está apresentado na Figura 24.

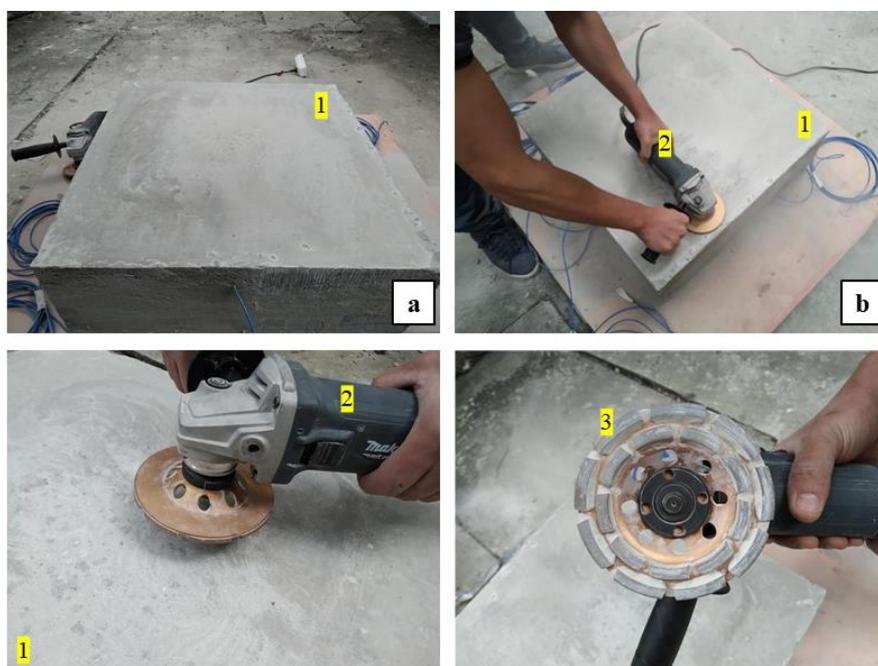


Figura 24 – Processo de acabamento da superfície de análise dos corpos de prova de concreto: (a) superfície de análise sem acabamento, com pontos de acúmulo de pasta (cimento e água) (b) superfície de análise em processo de acabamento com a lixadeira. Legenda: (1) superfície de concreto; (2) lixadeira angular; (3) disco desbaste diamantado segmentado.

O processo de monitoramento dos corpos de prova de concreto foi feito a partir da idade de 28 dias.

3.1.1 Propriedades térmicas

Os resultados das propriedades térmicas dos materiais utilizados (concreto e poliestireno expandido) na confecção dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas à superfície estão na Tabela 9. Os valores medidos em laboratório foram: calor específico, densidade de massa aparente e resistência térmica. Os demais valores (condutividade térmica, calor específico volumétrico e difusividade térmica) foram obtidos a partir dos resultados experimentais e relações (leis físicas) (Tabela 9 - 1). Foram utilizadas a ABNT NBR 15220-2 (2008) e os artigos estrangeiros (COTIČ et al., 2015; HIASA; BIRGÜL; CATBAS, 2017) como referência para a verificação dos valores obtidos em laboratório (Tabela 9 - 2) (ABNT, 2008).

Tabela 9 - Resultados das propriedades térmicas dos materiais utilizados (concreto e poliestireno expandido) na confecção dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas à superfície: (1) Valores medidos em laboratório; (2) Valores teóricos (continua).

(1) Valores medidos em laboratório de propriedades térmicas						
Amostra	Densidade de massa aparente (Kg/m ³)*	Condutividade Térmica (W/m.K)**	Calor Específico (J/Kg.K)*	Calor específico volumétrico - c.ρ (J/m ³ .K)**	Difusividade Térmica (cm ² /min) **	Resistência Térmica (m ² .K/W)*
Corpos de prova de Concreto (CP1 e CP2)	2415 ± 21,21	1,74 ± 0,01	1050 ± 42,43	2.535.300 ± 80185,91	0,4108 ± 0,0147	0,0280 ± 0,0005
Falha de Poliestireno Expandido - EPS	34,00	0,042	1400,00	47.600	0,5294	0,221
(2) Valores teóricos de propriedades térmicas						
Material	Densidade de massa aparente - ρ (Kg/m ³)	Condutividade térmica - k (W/m.K)	Calor específico - c (J/Kg.K)	Calor específico volumétrico - c.ρ (J/m ³ .K)	Difusividade térmica (m ² /s) *****	Referência
Concreto*** normal	2200 - 2400	1,75	1000	2.200.000 - 2.400.000 *****	0,44 - 0,48	ABNT NBR 15220-2:2008 (ABNT, 2005) - ANEXO B
Poliestireno expandido moldado	15 - 35	0,040	1420	21.300 - 49.700	0,48 - 1,13	
Concreto	2300,00	1,60	880,00	2.024.000 *****	0,47	HIASA; BIRGUL; CATBAS (2017)

Tabela 9 - Resultados das propriedades térmicas dos materiais utilizados (concreto e poliestireno expandido) na confecção dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas à superfície: (1) Valores medidos em laboratório; (2) Valores teóricos (continuação).

Concreto	-	1,60	-	2120000,00	0,45	COTIČ et al. (2015)
Poliestireno	-	0,04	-	35000,00	0,60	

*Determinação experimental

**Determinação a partir dos resultados experimentais e relações (leis físicas)

***Concreto (com agregados de pedra)

****Valor não informado no ANEXO da norma. A partir dos valores informados (ρ e c) foi feita a multiplicação e determinado os limites de calor específico volumétrico ($c \cdot \rho$) para que seja possível a comparação.

***** Valor não informado. A partir dos valores informados (k , ρ e c) foi feita a determinação da difusividade térmica

Considerando a ABNT NBR 15220-2 (2008), os valores obtidos experimentalmente estão de acordo e dentro dos limites estabelecidos ou próximo dos valores da norma para os dois materiais (concreto e poliestireno expandido) (ABNT, 2008).

Em relação aos artigos estrangeiros relacionados ao uso da termografia por infravermelho para avaliação de defeitos em estruturas de concreto, os valores adotados de propriedades térmicas estão abaixo dos valores obtidos em laboratório para os dois materiais.

A caracterização dos materiais utilizados (concreto e poliestireno expandido) por meio da determinação das propriedades termofísicas, pode proporcionar futuras análises com a utilização da modelagem do fenômeno físico do ensaio laboratorial, em softwares, baseado no método dos elementos finitos (conforme discutido no item 2.7). Assim a adoção de parâmetros de entrada, obtidos experimentalmente, sem a adoção de parâmetros teóricos.

3.1.2 Avaliação da qualidade do concreto produzido

Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos de concreto aos 28 dias, moldados durante a confecção dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas a superfície (profundidade da falha: 1,0 cm; 2,5 cm e 4,5 cm) estão na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto aos 28 dias, moldados durante o processo de confecção dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas a superfície (profundidade da falha: 1,0 cm; 2,5 cm e 4,5 cm).

Corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas a superfície	Resistência média do concreto à compressão, aos 28 dias (MPa)
1,0 cm	39,05 ± 3,26
2,5 cm	34,00 ± 0,24
4,5 cm	28,08 ± 0,85

Apesar de não ocorrer mudanças no traço do concreto utilizado e no processo de moldagem, os resultados de resistência média do concreto à compressão apresentam uma variação considerável. Adotando-se os valores dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas a superfície de 1,0 cm e de 4,5 (máximo e mínimo) 39,05 e 28,08, respectivamente, a variação percentual foi de aproximadamente 39%. Tal fato ocorre devido aos diferentes dias de moldagem, com diferentes condições ambientais e possíveis erros da mão de obra que possam ocorrer, durante todo o processo. Sendo imprescindível, o controle da qualidade do concreto produzido, por meio de ensaios.

Quanto melhor a qualidade do concreto, mais eficaz se torna a técnica de infravermelho para a detecção de defeitos. Considerando os resultados dos ensaios do concreto produzido para o corpo de prova com falha simulada a profundidade de 1,0 cm, há uma maior possibilidade de detecção da falha em relação aos demais concretos produzidos (corpos de prova de concreto com falhas simuladas a profundidades de 2,5 cm e 4,5 cm).

A resistência à compressão e porosidade influenciam as propriedades termofísicas do concreto. Comparando-se os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos de concreto moldados com falhas simuladas (Tabela 10) e os produzidos para o controle da qualidade de moldagem das amostras enviadas para a determinação experimental das propriedades termofísicas (Tabela 24, APÊNDICE A), observa-se maior variação entre os resultados. Portanto, a extração de testemunhos dos próprios corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas a superfície e os mesmos submetidos aos ensaios para a determinação das propriedades termofísicas, poderia proporcionar uma caracterização mais fidedigna.

3.2 A forma de monitoramento dos parâmetros

A etapa de monitoramento dos parâmetros foi realizada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), localizado na Cidade Universitária, na cidade de São Paulo. A localização dos corpos de prova de concreto com falha simulada está apresentada na Figura 25.

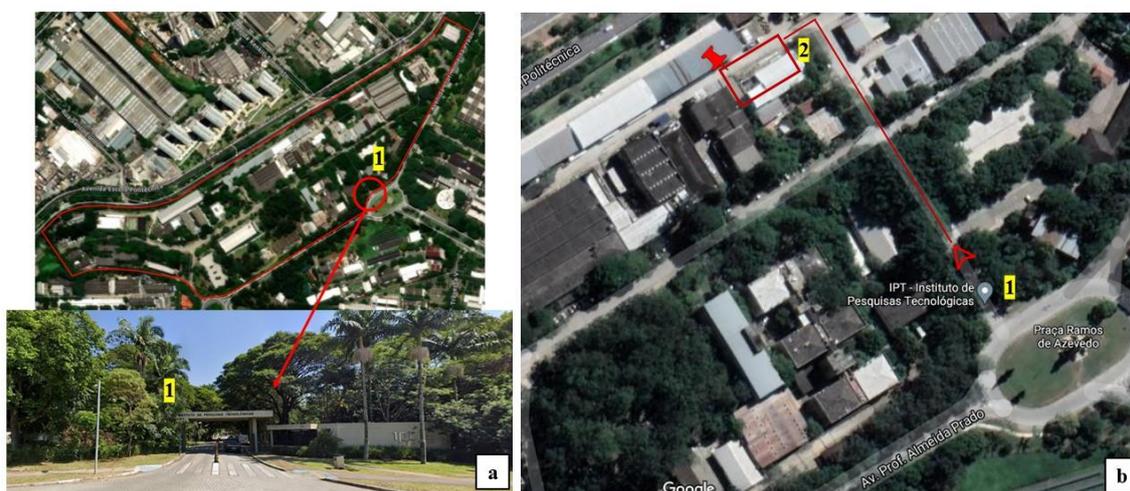


Figura 25 – Localização dos corpos de prova de concreto com falha simulada: (a) entrada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (coordenada: -23,55591°; -46,73558°); (b) entrada (ponto de referência) e o local dos corpos de prova de concreto com falha simulada (também conhecido como campo de envelhecimento do IPT).

Legenda: (1) entrada; (2) local dos corpos de prova de concreto com falha simulada (GOOGLE EARTH, 2021; GOOGLE MAPS, 2021).

Para o monitoramento do gradiente de temperatura superficial, ao longo do tempo, termogramas foram capturados dos corpos de prova de concreto, em um intervalo de 30 minutos, por um período, das 7h da manhã às 19h da noite. O período total de monitoramento foi de 6 dias.

Além da captura dos termogramas foram instalados termopares (Tipo K) nas falhas simuladas (2 termopares: 1 e 2) e, próximas a elas (3 termopares: 3, 4 e 5), como mais uma forma de monitorar o gradiente de temperatura superficial do concreto. Os pontos de instalação dos termopares para a medição da temperatura do concreto íntegro (cor azul) e com defeito (cor vermelha) estão indicados na Figura 26.

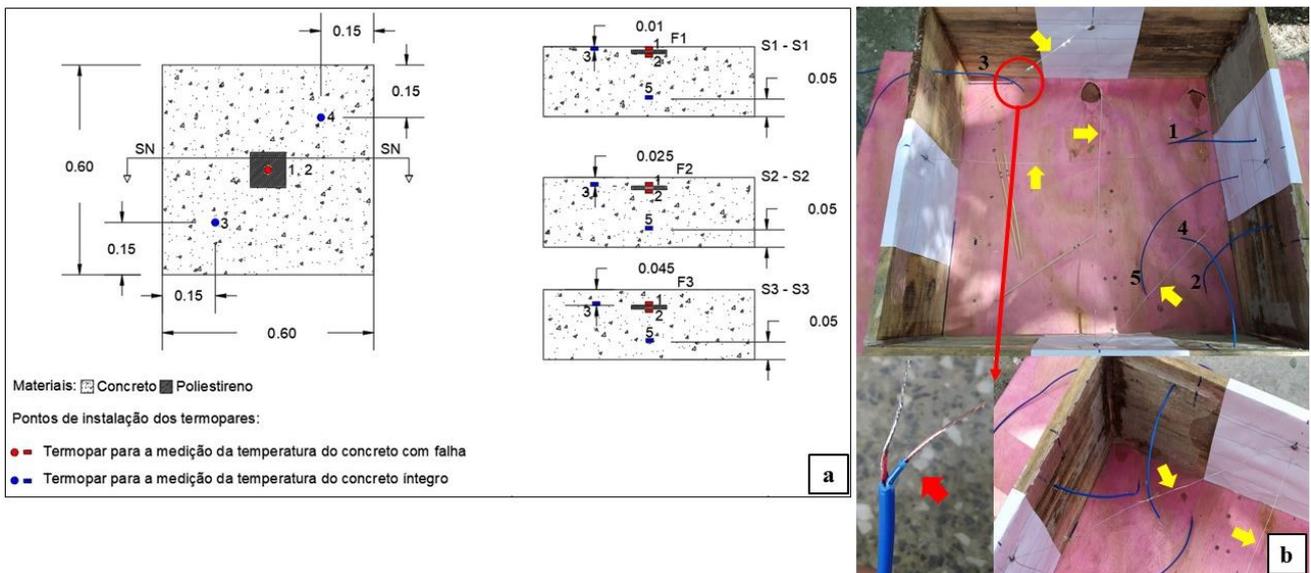


Figura 26 –Pontos de instalação dos termopares para a medição das temperaturas, do concreto íntegro e com defeito (falha simulada): (a) esquema; (b) execução: utilização de aços guia para o correto posicionamento dos termopares (indicação – seta na cor amarela) e termopar utilizado (indicação – seta na cor vermelha).

Algumas das condições ambientais que influenciam no gradiente de temperatura superficial, durante a medição com termografia por infravermelho, foram monitoradas, sendo elas: temperatura ambiente, umidade relativa do ar, tempo de exposição solar, velocidade do vento e precipitação total.

Durante o processo de medição, foram considerados alguns parâmetros relacionados a câmera térmica, sendo eles: resolução térmica (matriz de plano focal – FPA), faixa espectral e as especificações ópticas e geométricas da câmera termográfica (FOV, AFOV, IFOV e MFOV). Foram utilizadas três câmeras termográficas, a FLIR ONE Pro, INFIRAY C210 e a FLIR T620, onde as principais especificações estão detalhadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Câmeras térmicas utilizadas e suas principais especificações (continua).

Câmera térmica - FLIR ONE Pro	Especificações		Parâmetro de medição
	Resolução térmica	160 x 120 pixels	Radiação Infravermelha/ Distribuição de Temperatura Superficial
	Faixa de temperatura aplicada	0°C a 35°C	
	HFOV	55° ± 1°	
	VFOV	43° ± 1°	
	IFOV	6,0 mrad	
	Incerteza de medição de temperatura	± 5%	
	Faixa Espectral	8 μm a 14 μm	
	Tamanho do pixel	12 μm	
	Sensibilidade térmica	70 mK	
	Foco	Fixo de 15cm ao infinito	
	Fotômetro	Desligado/°C/°F. Resolução 0,1°C/0,1°F	
	Dimensões (L x A x P)	68mm x 34mm x 14mm	
	Peso	36,5g	
Câmera térmica - INFIRAY C210	Especificações		Parâmetro de medição
	Resolução térmica	256 x 192 pixels	Radiação Infravermelha/ Distribuição de Temperatura Superficial
	Faixa de temperatura operacional	-10°C a 50°C	
	HFOV	56°	
	VFOV	42,2°	
	IFOV	3,8 mrad	
	Incerteza de medição de temperatura	± 2%	
	Faixa Espectral	8 μm a 14 μm	
	Tipo de detector	FPA infravermelho não resfriado	
	Sensibilidade térmica - NETD	<50 mK	
	Foco	Sem foco	
	Resolução de medição de temperatura	0,1°C	
	Dimensões (L x A x P)	237mm x 75mm x 92mm	
	Peso	520g	

Tabela 11 – Câmeras térmicas utilizadas e suas principais especificações (continuação).

Câmera térmica - FLIR T620	Especificações	Parâmetro de medição
	Resolução térmica	640 x 480 pixels
	Faixa de temperatura operacional	- 40°C a 650°C
	HFOV	25°
	VFOV	19°
	IFOV	0,68 mrad
	Faixa Espectral	7,5 µm a 14 µm
	Tipo de detector	FPA infravermelho não resfriado
	Sensibilidade térmica - NETD	<40 mK
	Foco	Automático/manual
	Resolução de medição de temperatura	
	Dimensões (L x A x P)	143mm x 196mm x 94mm
	Peso	1300g



Radiação Infravermelha/
Distribuição de
Temperatura Superficial

Os parâmetros monitorados relacionados ao objeto de análise foram: emissividade da superfície e temperatura aparente refletida. A transmitância atmosférica não foi monitorada por se tratar de uma distância curta de medição e, a utilização de câmera de faixa espectral (8 a 14 µm), onde a atenuação atmosférica é mínima.

A emissividade e a temperatura aparente refletida foram determinadas por termogramas a cada 30 minutos durante o período de monitoramento. O detalhamento do método de medição destes parâmetros pode ser encontrado no **APÊNDICE C**, onde foi utilizado como base, as metodologias brasileiras apresentada na ABNT NBR 16969 (2021).

Um esquema do processo de medição e os materiais utilizados são apresentados na Figura 27.

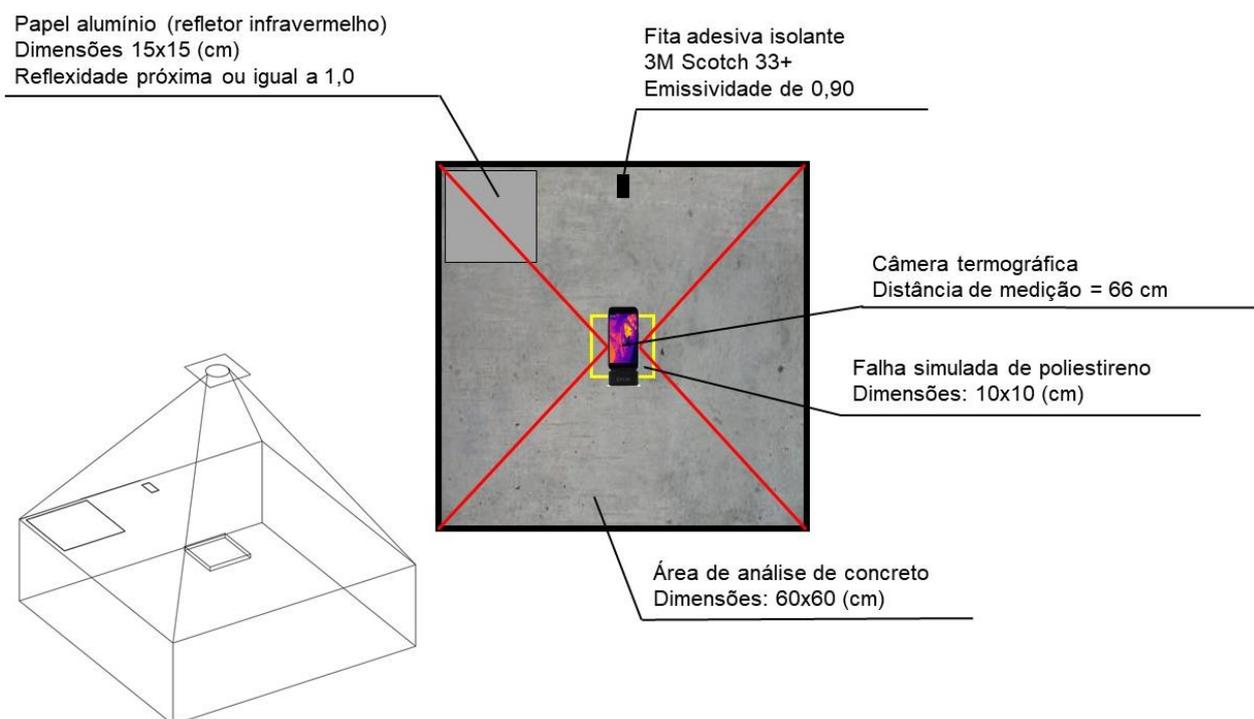


Figura 27 - Esquema do processo de medição e materiais utilizados.

3.3 O método de avaliação

O método de avaliação consiste no monitoramento do gradiente de temperatura da superfície dos corpos de prova de concreto sob dadas condições. Utilizando-se da termografia passiva como meio de estímulo (aquecimento solar diurno e o resfriamento noturno), não exigindo de outras fontes externas de estimulação.

A avaliação do gradiente de temperatura superficial do concreto será feita, tanto de forma qualitativa, quanto quantitativa. Em relação à forma qualitativa, será avaliado o contraste de cor entre áreas. E em relação à forma quantitativa, será avaliado os dados de temperatura e não as cores, entre a área de concreto íntegro e área de concreto danificado, obtendo-se o valor do gradiente de temperatura superficial ou contraste térmico dos corpos de prova de concreto (ΔT) ao longo do tempo (t).

Nesta avaliação, serão utilizados de softwares de exibição, análise, armazenamento de dados, manipulação e edição de imagens térmicas. Com estes softwares, é possível a realização do tratamento dos termogramas, por exemplo, selecionar a paleta de cores e ajustar amplitude térmica, para uma melhor interpretação visual, evidenciando as anomalias térmicas (áreas quentes e frias). Possibilita a utilização das ferramentas de medição (ponto e área) para a determinação ajustada das

áreas de medição. Assim como, a base para a entrada de dados do usuário, como distância, emissividade, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e temperatura aparente refletida (parâmetros de correção) para a obtenção com precisão dos valores de temperatura superficiais e, conseqüentemente, dos gradientes de temperatura superficiais.

4. Resultados e discussão

A partir da revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, foi feito um levantamento de fatores intervenientes no uso da termografia por infravermelho para a identificação de defeitos em estruturas de concreto. Para o programa experimental, alguns desses fatores (condições) foram selecionados para uma possível investigação. As condições fixas, como, dosagem do concreto, propriedades térmicas dos materiais utilizados e defeito (área e espessura) são necessárias para o cumprimento dos objetivos e foram detalhadas no capítulo anterior. Neste item, serão apresentados os resultados das condições variáveis, adotados no programa experimental da pesquisa. Estas condições e os seus respectivos itens investigados (preenchimento na cor cinza em destaque) estão sendo apresentados na Figura 28.

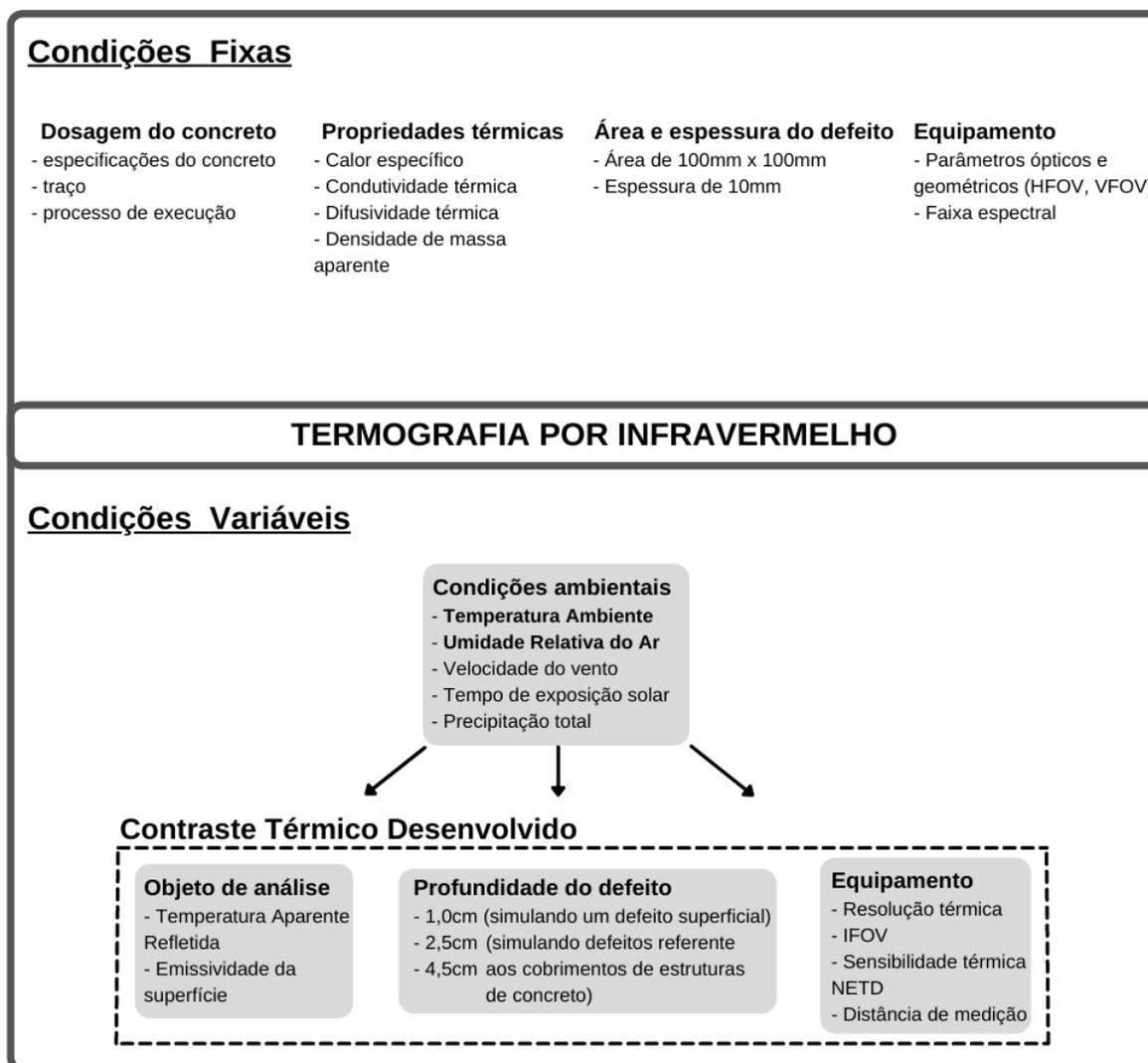


Figura 28 – Condições (fixas e variáveis) e os seus respectivos itens investigados selecionados no programa experimental da pesquisa.

As propriedades do objeto de análise, a profundidade do defeito e o equipamento foram investigadas em função da temperatura de superfície e do contraste térmico desenvolvido ao longo do tempo $\Delta T(t)$. O contraste térmico é uma abordagem quantitativa de análise de dados de temperatura da superfície, logo, um possível indicador de influência de cada condição na capacidade de detecção de defeitos no concreto utilizando a termografia por infravermelho.

Os valores de contraste térmico dependem significativamente do método pelo qual são obtidos (TRAN et al., 2017). Para esta abordagem, adotou-se o método de seleção de áreas (íntegra e com defeito) para obtenção do contraste térmico ΔT . São considerados as temperaturas médias da superfície dentro dos limites de uma área do defeito T_{def} e uma área de referência de fundo selecionada próxima ao defeito T_{con} , conforme ilustrado na Figura 29 (TRAN et al., 2017; VAGHEFI, 2013).

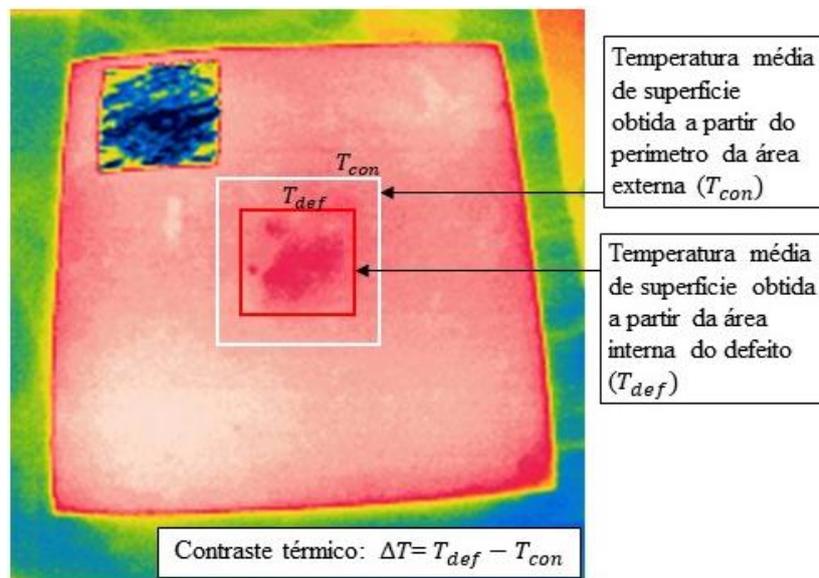


Figura 29 – Método para o cálculo do contraste térmico ΔT (TRAN et al., 2017)

A seleção destas áreas é feita de acordo com o tamanho do defeito, onde esta seleção desempenha um papel importante na análise do contraste térmico. Este método tem-se mostrado mais eficaz, pois diminui a variabilidade na seleção de apenas um ponto ou um grupo de três pontos (TRAN et al., 2017). Por mais que, reduza a influência da variabilidade, as áreas escolhidas ainda envolvem a escolha subjetiva, onde o perfil de temperatura ao longo de uma superfície varia consideravelmente devido ao aquecimento não uniforme da superfície (AHLBORN; BROOKS, 2015; BROWN; HAMILTON, 2007).

4.1 Condições variáveis

4.1.1 Objeto de análise

Para a verificação da influência das propriedades do objeto de análise, no processo de medição da temperatura da superfície de concreto com o uso da termografia por infravermelho, os parâmetros como: temperatura aparente refletida e emissividade da superfície foram monitorados. O monitoramento foi realizado a partir da captura de termogramas das superfícies dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas à superfície (profundidades das falhas: 1,0 cm; 2,5 cm e 4,5 cm). A captura dos termogramas foi realizada em intervalos de tempo de 30 minutos, por um período das 7h da manhã às 19h da noite. Foi adotado quatro dias de investigação, sendo classificados em dois dias quentes (maiores valores de temperatura ambiente) e dois dias frios (menores valores de temperatura ambiente). Os valores de temperatura ambiente (mínima, média e máxima) e de umidade relativa do ar (mínima, média e máxima), durante o período de monitoramento, dos quatro dias investigados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores de temperatura ambiente (mínima, média e máxima) e de umidade relativa do ar (mínima, média e máxima), durante o período de monitoramento, dos quatro dias investigados

Data	Temperatura Ambiente (°C)			Umidade Relativa do Ar (%)		
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
	24 de agosto	20,4	31,9	42,8	13,1	28,4
27 de agosto	16,0	19,0	21,0	79,0	85,0	96,0
09 de setembro	20,9	27,8	36,3	46,3	70,5	90,1
22 de setembro	16,2	20,8	29,3	34,6	48,8	59,7

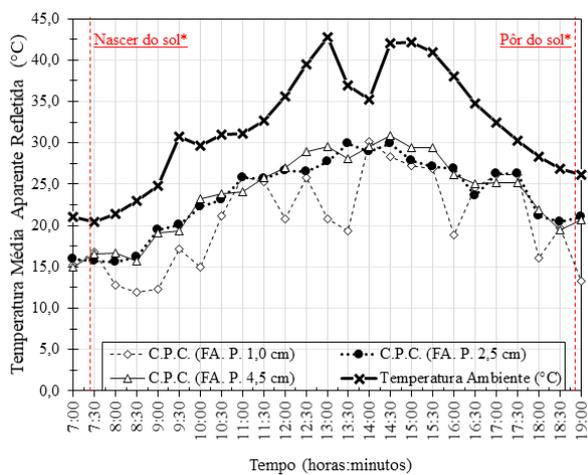
4.1.1.1 Temperatura aparente refletida

O ensaio de medição e compensação da temperatura aparente refletida tem o objetivo de verificar a influência do ambiente no processo de medição da temperatura superficial de um objeto, utilizando câmeras termográficas. O ensaio foi realizado nas superfícies dos 3 corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas à superfície. Foi utilizada a câmera termográfica FLIR ONE Pro com faixa espectral de 8 μm a 14 μm (especificações da câmera termográfica na Tabela 11 do

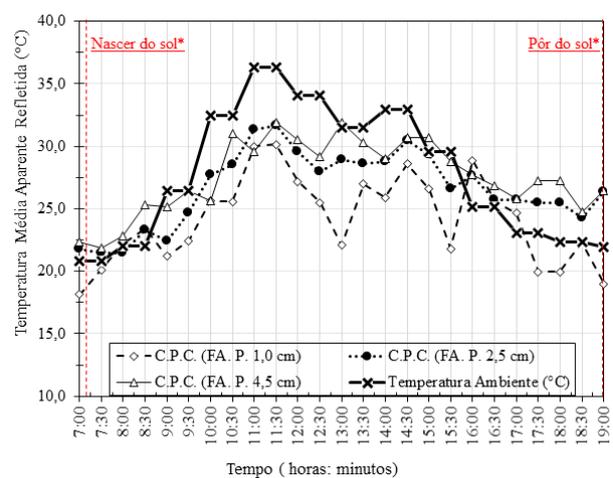
item 3.2). O detalhamento do método, os materiais utilizados, as condições de campo especificadas, como a distância de medição e os parâmetros de entrada adotados no software de imagens térmicas, para a obtenção da temperatura média aparente refletida, estão no APÊNDICE C.

Durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00) de um único dia, foram capturados um total de 75 termogramas para cada superfície de concreto analisada, ou seja, 3 termogramas a cada intervalo de tempo de 30 minutos em um total de 25 intervalos de tempo. Deste total, a cada 3 termogramas de um intervalo de tempo, foi calculado a média da temperatura aparente refletida, resultando em 25 pontos de medição ao longo do período de monitoramento para cada superfície de concreto analisada.

Os resultados do processo de medição da temperatura média aparente refletida das superfícies dos corpos de prova de concreto, durante o período de monitoramento, dos 4 dias de investigação, estão na Figura 30 (a); (b); (c); (d) e Tabela 13 Tabela 14.



(a)



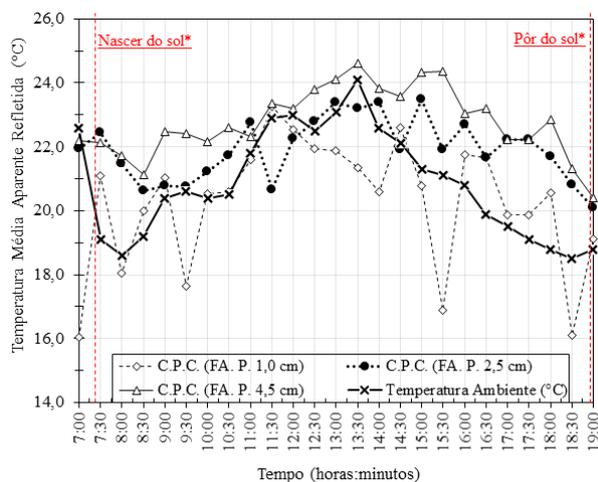
(b)

*Horário do nascer do sol: 07:24:56 *Horário do pôr do sol: 18:53:49 (SUNEARTH TOOLS.COM, 2021)

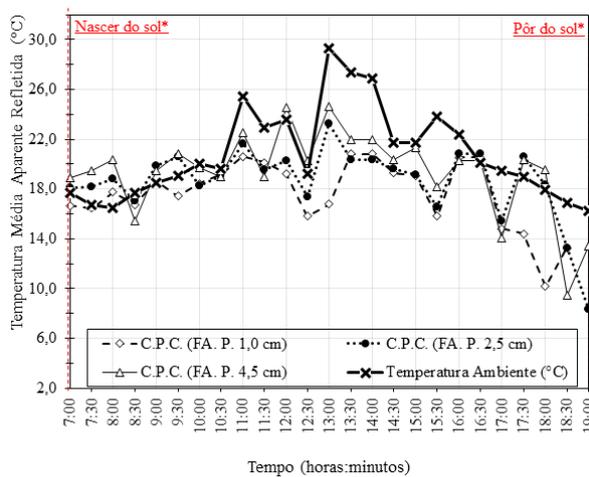
*Horário do nascer do sol: 07:09:37 *Horário do pôr do sol: 18:59:02 (SUNEARTH TOOLS.COM, 2021)

Figura 30 - Resultados do processo de medição da temperatura média aparente refletida das superfícies dos corpos de prova de concreto, durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00). Total de quatro dias de investigação: (a) 24 de agosto de 2021; (b) 09 de setembro de 2021; (c) 27 de agosto de 2021 (d) 22 de setembro de 2021. Legenda: C.P.C (FA. P. 1,0 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 1,0 cm); C.P.C (FA. P. 2,5 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 2,5 cm); C.P.C (FA. P. 4,5 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 4,5 cm)

(continua).



(c)



(d)

*Horário do nascer do sol: 07:22:14 *Horário do pôr do sol: 18:54:50 (SUNEARTH TOOLS.COM, 2021)

*Horário do nascer sol: 06:56:17 *Horário do pôr do sol: 19:03:09 (SUNEARTH TOOLS.COM, 2021)

Figura 30 - Resultados do processo de medição da temperatura média aparente refletida das superfícies dos corpos de prova de concreto, durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00). Total de quatro dias de investigação: (a) 24 de agosto de 2021; (b) 09 de setembro de 2021; (c) 27 de agosto de 2021 (d) 22 de setembro de 2021. Legenda: C.P.C (FA.

P. 1,0 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 1,0 cm); C.P.C (FA. P. 2,5 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 2,5 cm); C.P.C (FA. P. 4,5 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 4,5 cm) (continuação).

Tabela 13 - Resumo dos resultados do processo de medição da temperatura aparente refletida (mínima, média e máxima) das superfícies dos corpos de prova de concreto, durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00). Total de quatro dias de investigação (continua).

Data	Temperatura Ambiente (°C)		
	Mínima	Média	Máxima
24 de agosto de 2021	20,4 (7:30)	31,9	42,8 (13:00)
27 de agosto de 2021	16,0 (8:00 e 8:30)	19,0	21,0 (14:00 e 14:30)
09 de setembro de 2021	20,9 (7:00 e 7:30)	27,8	36,3 (11:00 e 11:30)
22 de setembro de 2021	16,2 (19:00)	20,8	29,3 (13:00)
C.P.C. (FA. P. 1,0 cm)			
Data	Temperatura Aparente Refletida (°C)		
	Mínima	Média	Máxima
24 de agosto de 2021	12,0 (8:30)	20,7	30,1 (14:00)
27 de agosto de 2021	16,1 (7:00 e 18:30)	20,3	23,3 (11:30)
09 de setembro de 2021	18,2 (7:00)	24,2	30,2 (11:30)
22 de setembro de 2021	10,2 (18:00)	17,6	20,8 (13:30 e 14:00)

Tabela 13 – Resumo dos resultados do processo de medição da temperatura aparente refletida (mínima, média e máxima) das superfícies dos corpos de prova de concreto, durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00). Total de quatro dias de investigação (continuação).

C.P.C. (FA. P. 2,5 cm)			
Data	Temperatura Aparente Refletida (°C)		
	Mínima	Média	Máxima
24 de agosto de 2021	15,6 (8:00)	23,6	29,9 (13:30 e 14:30)
27 de agosto de 2021	20,1 (19:00)	21,9	23,5 (15:00)
09 de setembro de 2021	21,4 (7:30)	26,6	31,6 (11:30)
22 de setembro de 2021	8,4 (19:00)	18,6	23,3 (13:00)
C.P.C. (FA. P. 4,5 cm)			
Data	Temperatura Aparente Refletida (°C)		
	Mínima	Média	Máxima
24 de agosto de 2021	15,0 (7:00)	23,8	30,9 (14:30)
27 de agosto de 2021	20,4 (19:00)	22,8	24,6 (13:30)
09 de setembro de 2021	21,8 (7:30)	27,6	31,9 (11:30 e 13:00)
22 de setembro de 2021	9,4 (18:30)	19,4	24,6 (12:00 e 13:00)

Os valores de temperatura média aparente refletida da superfície do corpo de prova de concreto com falha simulada a profundidade de 1,0 cm, apresentam maiores variações em comparação com as superfícies dos corpos de prova de concreto a profundidades de 2,5 cm e de 4,5 cm. Estas variações são expressas, principalmente na Figura 30 (a) (c). Tal fato ocorre devido as diferentes posições locais dos corpos de prova de concreto. Também foi observado as diferentes superfícies refletoras, ou seja, os refletores infravermelhos (papel alumínio) apresentam diferentes rugosidades, onde o refletor infravermelho da superfície do corpo de prova de concreto a profundidade de 1,0 cm, apresenta uma menor rugosidade do que as demais, alterando o seu modo de reflexão.

Considerando o comportamento ao longo do tempo (Figura 30) e os valores mínimos obtidos em um determinado instante de tempo (Tabela 13), da temperatura aparente refletida, observa-se a menor influência do ambiente nos períodos do início (7:00, 7:30, 8:00, 8:30) e do fim do dia (18:00, 18:30 e 19:00). Tal fato ocorre devido a menor exposição solar, ou seja, nos períodos próximos aos horários do nascer e do pôr do sol, observam-se baixas posições solares e menos favoráveis a radiação solar direta nas superfícies dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas, conforme demonstrado na Figura 31.

Levando em consideração o comportamento ao longo do tempo (Figura 30) e os valores máximos obtidos em um determinado instante de tempo (Tabela 13), da temperatura aparente refletida, observa-se a maior influência do ambiente nos períodos mais afastados dos horários de

nascer e pôr do sol (11:30, 12:00, 13:00, 13:30, 14:00, 14:30 e 15:00). Isso ocorre devido a maior exposição solar, ou seja, nestes períodos observam-se altas posições solares e favoráveis a radiação solar direta na superfície dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas, conforme demonstrado na Figura 31.

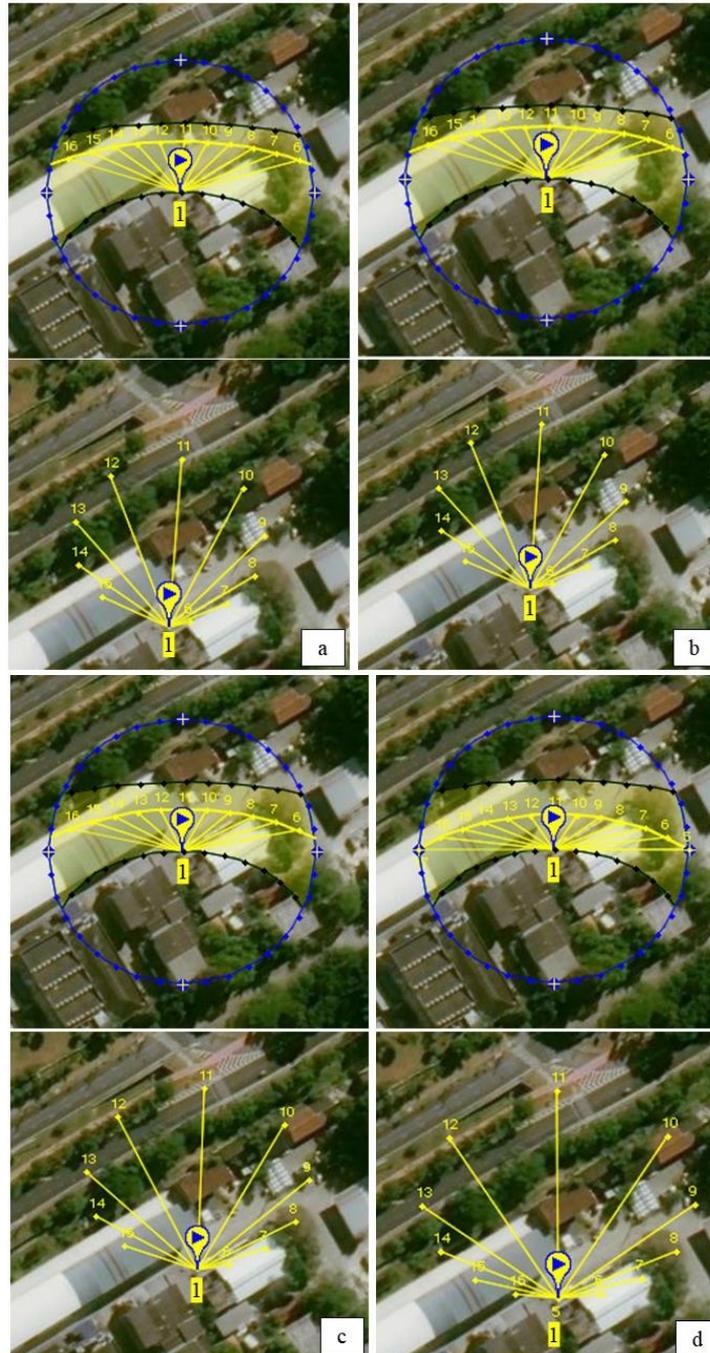


Figura 31 – Posição solar em relação ao local dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas (coordenada: -23,5557°; -46,7361°). Total de quatro dias de investigação: (a) 24 de agosto de 2021; (b) 27 de agosto de 2021; (c) 09 de setembro de 2021; (d) 22 de setembro de 2021. Legenda: (1) Posição dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas (SUNEARTH TOOLS.COM, 2021).

De acordo com os valores de temperatura aparente refletida, média e máxima, das superfícies dos corpos de prova de concreto (Tabela 13), os dias mais quentes (24 de agosto e 09 de setembro) apresentaram maiores valores, logo maior influência do ambiente em comparação aos dias mais frios (27 de agosto e 22 de setembro) durante todo o período de monitoramento. Isso ocorre devido aos dias mais quentes apresentarem períodos mais longos de radiação solar incidente sobre as superfícies dos corpos de prova.

Os maiores valores de temperatura aparente refletida (Tabela 13) podem ser resultantes das altas cargas solares sobre as superfícies dos corpos de prova de concreto. A ABNT NBR 16969 (2021), considera que erros na medição da temperatura aparente refletida, produzidos por uma fonte pontual de calor, como o sol, são difíceis de medir com exatidão e podem ser evitados em campo, alterando processos de medição, como a posição e o ângulo da câmera termográfica em relação a superfície do objeto analisado, como forma de proteção da radiação solar intensa (ABNT, 2021). Sendo responsabilidade do operador da câmera termográfica, durante uma inspeção, identificar as influências a fim de evitar que as mesmas sejam significativas.

Os valores medidos de temperatura ambiente no local dos corpos de prova de concreto apresentam um indicativo da maior ou menor influência do ambiente, pois é demonstrado no Figura 30 (a); (b); (c); (d), comportamento ao longo do tempo semelhante, em relação a temperatura ambiente e temperatura média aparente refletida. Os instantes de tempo, apresentados na Tabela 13, da temperatura aparente refletida, mínima e máxima, e de temperatura ambiente, mínima e máxima, são correspondentes. Sendo facilmente obtida, a temperatura ambiente deve ser utilizada como parâmetro para o inspetor na obtenção dos termogramas em campo para avaliar a influência do ambiente.

A partir dos valores obtidos de temperatura média aparente refletida das superfícies dos corpos de prova de concreto e de temperatura ambiente do local, foi feita a plotagem destes valores, como apresentado na Figura 32 (a) (b), para uma possível investigação do indicativo de correlação entre as variáveis (temperatura média aparente refletida versus temperatura ambiente). Os resultados indicam que, em um dia quente (24 de agosto), quanto maior a temperatura ambiente, maior a temperatura média aparente refletida, apresentando forte correlação linear para as superfícies dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas a profundidades de 2,5 cm e de 4,5 cm (valores de coeficientes de determinação R^2 : $R^2 = 0,83$ e $R^2 = 0,90$, respectivamente), conforme ilustrado na Figura 32 (a). Para um dia frio (22 de setembro) não se obteve correlação linear, com baixos valores de coeficientes de determinação, conforme ilustrado na Figura 32 (b).

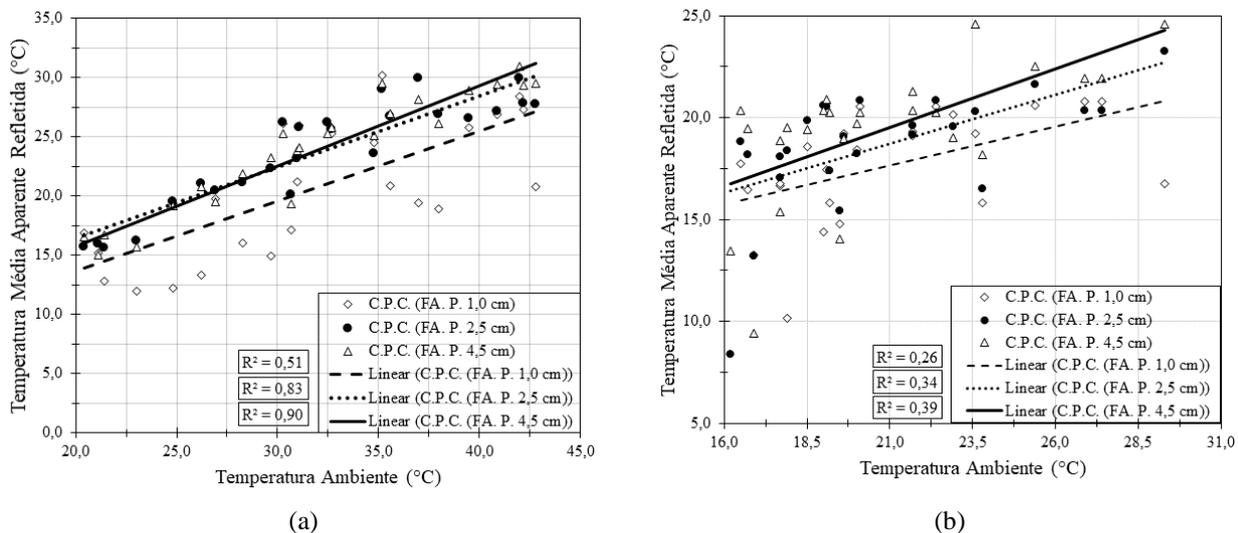


Figura 32 - Temperatura média aparente refletida versus temperatura ambiente. (a) 24 de agosto de 2021; (b) 22 de setembro de 2021.

Os menores valores de coeficiente de determinação para a superfície do corpo de prova com falha a profundidade de 1 cm em relação as demais superfícies, para as duas condições investigadas (quente ou frio), estão relacionadas as maiores variações nos valores de temperatura média aparente refletida da superfície.

4.1.1.2 Emissividade da superfície

O ensaio de medição e compensação da emissividade tem o intuito de determinar a capacidade de emissão da superfície de um objeto, utilizando câmeras termográficas, sendo um fator influente no processo de medição da temperatura de superfície. Foi realizado nas superfícies dos 3 corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas à superfície. Foi utilizada a câmera termográfica FLIR ONE Pro com faixa espectral de 8 μ m a 14 μ m (especificações da câmera termográfica na do Tabela 11 item 3.2). O método de medição, os instrumentos e materiais utilizados, as condições de campo especificadas (procedimento), as principais interferências no processo de medição e os parâmetros de entrada no software de imagens térmicas, para obtenção da emissividade da superfície, estão no APÊNDICE C.

Durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00) foram capturados termogramas das superfícies dos corpos de prova de concreto, em intervalos de tempo de 30 minutos, resultando em um total de 75 termogramas (sendo 25 termogramas para cada superfície analisada) em um único dia. Para cada termograma foi obtido o valor da emissividade da superfície de concreto.

Os resultados do processo de medição da emissividade das superfícies dos corpos de prova de concreto, durante o período de monitoramento, dos 4 dias de investigação, estão na Tabela 14. Para cada período monitorado (24 e 27 de agosto e 09 e 22 de setembro), foram extraídos os valores obtidos de emissividade, mínima, média e máxima, de um total de 25 pontos de medição, sendo também registrados, a temperatura da superfície do concreto¹⁴ e o horário. Sendo o valor da temperatura da superfície do concreto obtido com o próprio termograma tratado, ou seja, com a entrada dos parâmetros de medição ao longo do tempo no software de imagens térmicas.

Tabela 14 – Resumo dos resultados do processo de medição da emissividade (mínima, média e máxima) das superfícies dos corpos de prova de concreto, durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00). Total de quatro dias de investigação (continua).

Data	Temperatura Ambiente (°C)		
	Mínima	Média	Máxima
24 de agosto de 2021	20,4 (7:30)	31,9	42,8 (13:00)
27 de agosto de 2021	16,0 (8:00 e 8:30)	19,0	21,0 (14:00 e 14:30)
09 de setembro de 2021	20,9 (7:00 e 7:30)	27,8	36,3 (11:00 e 11:30)
22 de setembro de 2021	16,2 (19:00)	20,8	29,3 (13:00)
Superfície 1 - C.P.C. (FA. P. 1,0 cm)			
Data	Emissividade		
	Mínima	Média	Máxima
24 de agosto de 2021	0,74 (37,9°C* - 10:30**)	0,85 ± 0,05 (35,1°C ± 6,09°C ***)	0,92 (34,2°C* - 17:30**)
27 de agosto de 2021	0,79 (23,9°C* - 11:30**)	0,90 ± 0,04 (20,48°C ± 2,09°C***)	0,98 (20,4°C* - 12:30**)
09 de setembro de 2021	0,66 (32,1°C* - 10:00**)	0,82 ± 0,07 (31,09°C ± 3,96°C***)	0,99 (29,9°C* - 15:30**)
22 de setembro de 2021	0,61 (22,9°C* - 11:30**)	0,84 ± 0,08 (21,22°C ± 3,21°C***)	0,97 (15,8°C* - 08:00**)

¹⁴ A emissividade pode variar com a temperatura do objeto e com a faixa espectral da câmera termográfica utilizados para fazer as medições. Portanto, o valor da emissividade medido deve ser registrado com a temperatura do objeto e a faixa espectral da câmera termográfica (ABNT NBR 16485, 2016).

Tabela 14 – Resumo dos resultados do processo de medição da emissividade (mínima, média e máxima) das superfícies dos corpos de prova de concreto, durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00). Total de quatro dias de investigação (continuação).

Superfície 2 - C.P.C. (FA. P. 2,5 cm)			
Data	Emissividade		
	Mínima	Média	Máxima
24 de agosto de 2021	0,74 (23,8°C* - 09:00**)	0,85 ± 0,04 (36,0°C ± 7,43°C***)	0,91 (33,4°C* - 18:00**)
27 de agosto de 2021	0,73 (21,7°C* - 7:00**)	0,87 ± 0,05 (22,44°C ± 1,39°C***)	0,93 (21,2°C* - 19:00**)
09 de setembro de 2021	0,64 (35,1°C* - 10:00**)	0,81 ± 0,06 (32,46°C ± 4,10°C***)	0,92 (33,9°C* - 12:00** e 31,5°C* - 15:30**)
22 de setembro de 2021	0,55 (26,0°C* - 13:00**)	0,83 ± 0,09 (21,27°C ± 2,96°C***)	0,95 (19,3°C* - 09:00** e 20,8°C* e 11:00**)
Superfície 3 - C.P.C. (FA. P. 4,5 cm)			
Data	Emissividade		
	Mínima	Média	Máxima
24 de agosto de 2021	0,77 (27,9°C* - 09:00**)	0,86 ± 0,04 (35,6°C ± 6,98 °C***)	0,91 (23,8°C* - 08:30** e 33,2°C* - 18:00**)
27 de agosto de 2021	0,62 (23,4°C* - 12:00**)	0,88 ± 0,06 (23,02°C ± 1,36°C***)	0,94 (22°C* - 10:00** e 24,3°C* - 15:30**)
09 de setembro de 2021	0,62 (30,5°C* - 09:00**)	0,80 ± 0,07 (32,88°C ± 4,19°C***)	0,91 (35°C* - 12:00**)
22 de setembro de 2021	0,66 (22,3°C* - 11:30**)	0,85 ± 0,08 (20,77°C ± 2,78°C***)	0,98 (17,5°C* - 09:00**)

*Temperatura média da superfície de análise em relação a emissividade obtida

**Horário de obtenção da medição (emissividade)

***Temperatura média da superfície de análise durante todo o período de monitoramento (7:00 às 19:00)

Foram utilizadas a ABNT NBR 15220-2 (2008) e Incropera et al. (2008), como referências teóricas para a verificação dos valores obtidos em campo. A ABNT NBR 15220-2 (2008) estabelece os valores de emissividade da superfície de concreto aparente¹⁵ de 0,85 e 0,95. Incropera et al. (2008) determina uma faixa de valores de emissividade do concreto¹⁶ entre 0,88 a 0,93.

Considerando os valores obtidos em campo de emissividade média, das superfícies (superfície 1, superfície 2 e superfície 3) dos corpos de prova de concreto (Tabela 14), no mínimo, um período de monitoramento, atende ao valor de 0,85 estabelecido pela ABNT NBR 15220-2 (2008). Para a faixa de valores de emissividade do concreto estabelecido por Incropera et al. (2008), as superfícies 1 e 3, atendem em dois períodos de monitoramento. A superfície 2 atende em um único período de monitoramento. De modo geral, os valores de emissividade média das superfícies dos corpos de prova de concreto são coerentes com os valores teóricos.

¹⁵ Valores de emissividade para radiações a temperaturas comuns (ondas longas).

¹⁶ Faixa de valores de emissividade (normal ou hemisférica) total da superfície a uma temperatura de 300 K (≈ 27°C).

Vale ressaltar que, os valores de emissividade média obtidos em campo são resultantes de 25 pontos de medição ao longo do período de monitoramento. Os valores obtidos em campo de emissividade, mínima e máxima, apresentam variações consideráveis em relação aos valores de emissividade média. Sendo os valores obtidos em campo de emissividade mínima incoerentes com os valores teóricos. Em relação aos valores obtidos em campo de emissividade máxima, a superfície 1 atende uma referência teórica, no mínimo, um período. A superfície 2 atende uma referência teórica em três períodos. A superfície 3 atende uma referência teórica em dois períodos. Portanto, demonstra que, em uma situação de campo para o material concreto, o parâmetro de emissividade deve ser medido ao longo do tempo (mais de uma medição).

Durante o processo de medição da emissividade das superfícies dos corpos de prova de concreto, foi utilizado para todas as medições, a mesma câmera termográfica, logo, o mesmo comprimento de onda. O ângulo de observação foi o mesmo para todas as medições, 90° em relação a superfície de análise, sendo possível ocorrer pequenas variações do ângulo, devido ao operador da câmera termográfica. As condições ambientais do local não apresentam influência no processo de medição da emissividade. Portanto, erros de medição durante o processo possa ter influenciado nos diferentes valores de emissividade obtidas.

O método utilizado para a medição da emissividade de superfície requer uma diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura ambiente de, no mínimo, $\pm 10^{\circ}\text{C}$, sendo que a exatidão e a minimização dos erros da medida de emissividade, aumenta com a diferença de temperatura, onde a mesma deve-se manter estável (ABNT NBR 16969, 2021). Como pode ser observado na Figura 33, esta diferença entre a temperatura média das superfícies de análise e a temperatura ambiente, durante o período de monitoramento, dos 4 dias investigados, não foram atingidas. Os valores máximos obtidos de diferença de temperatura, para os dias 24 e 27 de agosto, 09 e 22 de setembro, foram $8,7^{\circ}\text{C}$, $6,3^{\circ}\text{C}$, $8,3^{\circ}\text{C}$, $3,2^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Os valores mínimos obtidos de diferença de temperatura, para os dias 24 e 27 de agosto, 09 e 22 de setembro, foram $-0,5^{\circ}\text{C}$, $1,4^{\circ}\text{C}$, $-1,0^{\circ}\text{C}$, $-4,8^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Estes valores, máximos e mínimos, foram obtidos em instantes de tempo, não se mantendo estável ao longo do período de monitoramento. Os valores da média obtidos de diferença de temperatura, para os dias 24 e 27 de agosto, 09 e 22 de setembro, foram $3,6^{\circ}\text{C}$, $3,5^{\circ}\text{C}$, $4,3^{\circ}\text{C}$, $0,4^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Estes valores podem representar de fato esta diferença de temperatura ao longo do tempo, apresentando menores valores em comparação com o mínimo estabelecido de 10°C . Portanto, sendo uma dificuldade encontrada em campo, durante o processo de medição da emissividade, de atingir e manter estável, o valor de 10°C de diferença de temperatura.

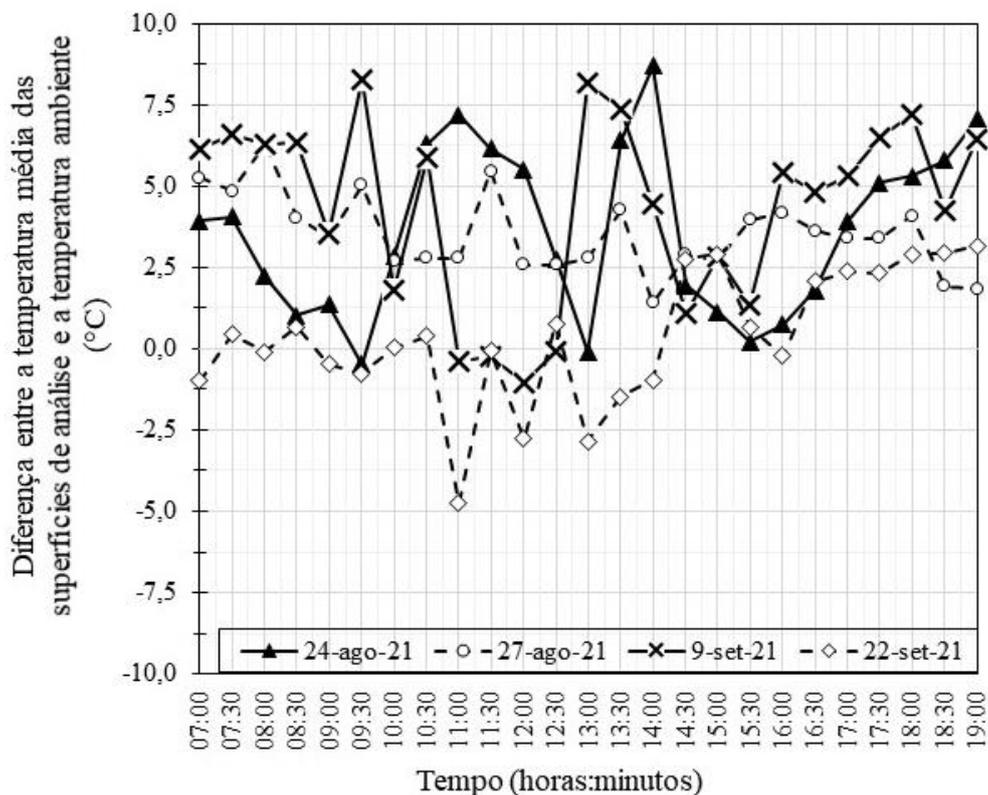


Figura 33 - Diferença entre a temperatura média das superfícies de análise e a temperatura ambiente, durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00). Total de quatro dias de investigação.

No método utilizado, antes mesmo do processo de medição da emissividade com a câmera termográfica, na colagem do material com emissividade conhecida (fita isolante), deve ser feita a conferência de mesma temperatura de superfície (superfície de análise a qual a emissividade deve ser determinada e superfície de colagem da fita). O aquecimento ou resfriamento não uniforme das superfícies dos corpos de prova de concreto, que foram possivelmente causados pelas condições ambientais do campo, dificultam o processo de medição, restringindo áreas cada vez menores de medição.

4.1.1.3 Influência das propriedades do objeto de análise

Após a obtenção das propriedades do objeto de análise (temperatura aparente refletida e emissividade da superfície) ao longo do período de monitoramento, foi avaliado a influência dessas propriedades, nas temperaturas de superfície, do concreto íntegro e do defeito, e no contraste térmico desenvolvido (indicador de capacidade de detecção). Para tal, foram selecionadas duas superfícies de análise dos corpos de prova de concreto em diferentes dias de investigação. Sendo a superfície do

corpo de prova de concreto com falha simulada a profundidade de 1,0 cm, investigada no dia 24 de agosto, categorizado como um dia quente, e a superfície do corpo de prova de concreto com falha simulada a profundidade de 2,5 cm, investigada no dia 22 de setembro, categorizado com um dia frio.

O software de imagens térmicas, se utiliza de um modelo teórico para a conversão da radiação infravermelha, captada pela câmera térmica, em dados de temperatura, de diferentes pontos da superfície. Alguns parâmetros devem ser medidos em campo e utilizados como dados de entrada no software, para a correta determinação dos valores de temperatura de superfície (conforme discutido no item 2.2.1). Para a avaliação da influência, do ambiente (temperatura aparente refletida) e da capacidade de emissão da superfície (emissividade) de concreto, foi feita a variação dos parâmetros de entrada do software e verificado as mudanças, tanto na temperatura de superfície do concreto e do defeito, quanto no contraste térmico desenvolvido (Figura 34).

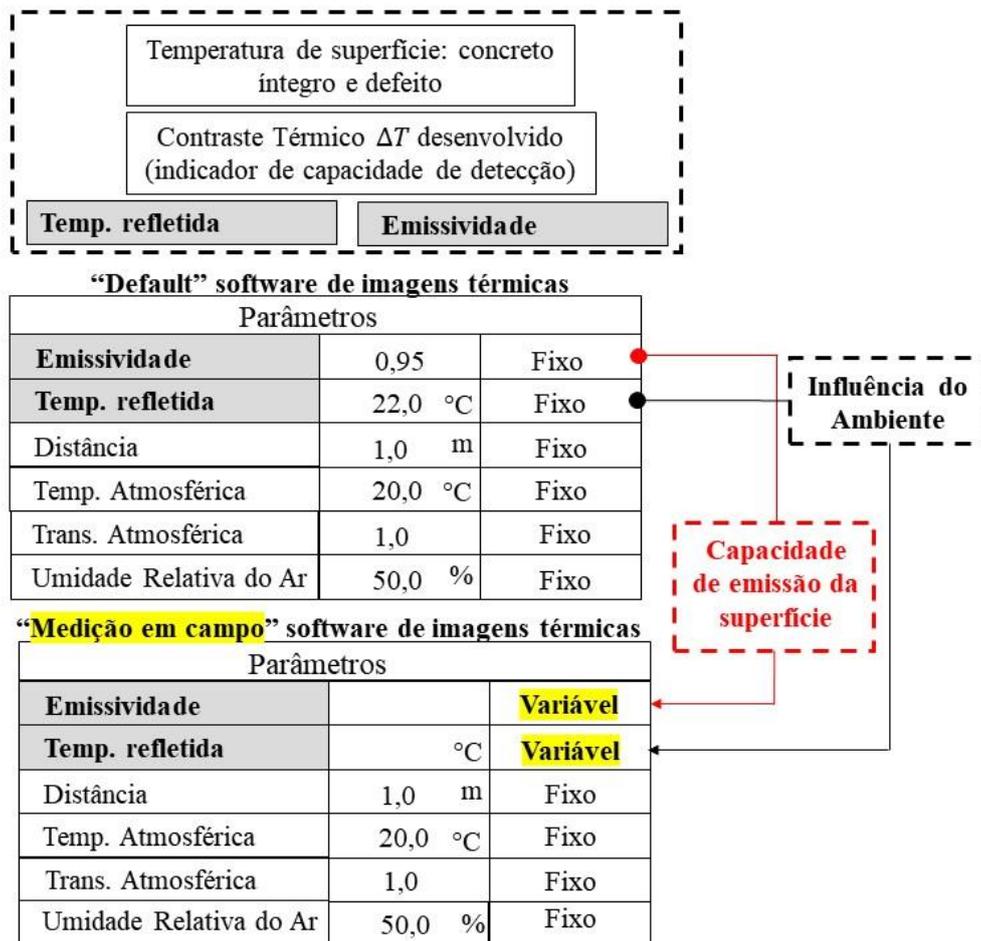
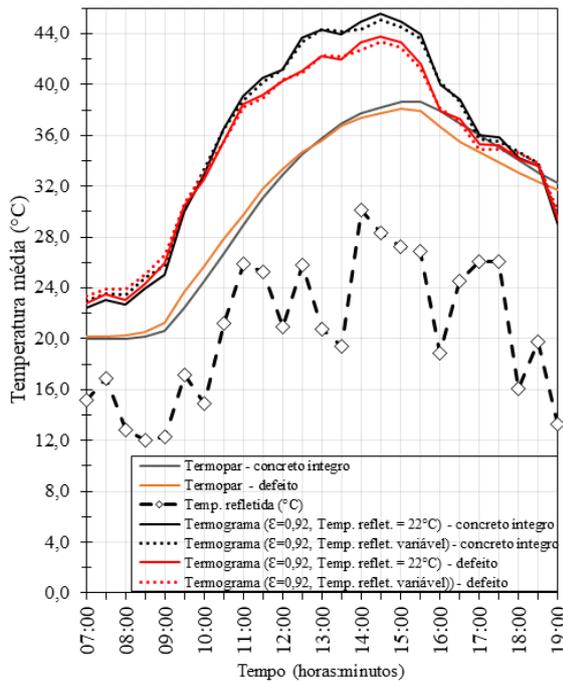
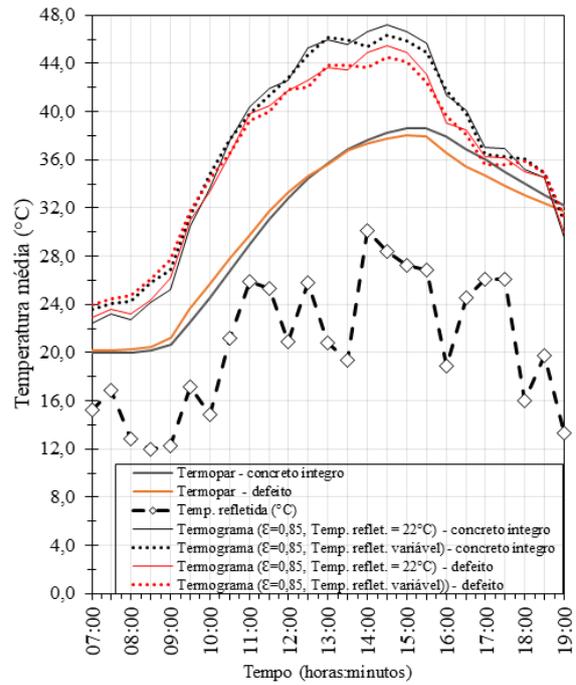


Figura 34 – Variação dos parâmetros de entrada no software de imagens térmicas para a avaliação da influência do ambiente (temperatura aparente refletida) e da capacidade de emissão da superfície (emissividade) nas temperaturas de superfície, do concreto íntegro e do defeito e no contraste térmico desenvolvido.

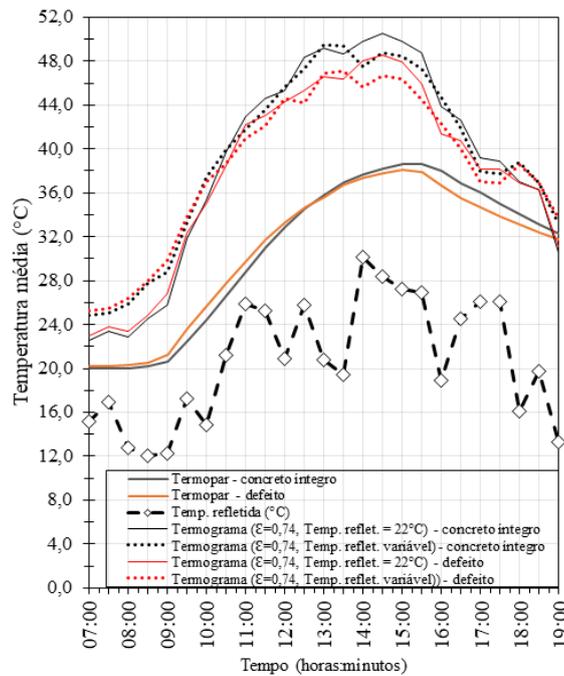
A variação dos parâmetros foi feita com base na medição em campo (período de monitoramento), correspondente ao dia investigado. Em relação a verificação da influência do ambiente, primeiramente, foi adotado um valor fixo, de referência, de temperatura aparente refletida (22°C, sendo o valor “default” do software de imagens térmicas) avaliados em relação a emissividade, mínima, média e máxima da superfície, obtida em campo. Depois, foram adotados os valores variáveis de temperatura média aparente refletida, medidos em campo, avaliados em relação aos mesmos valores de emissividade, mínima, média e máxima. Para os demais parâmetros de entrada (temperatura atmosférica, transmitância atmosférica e umidade relativa do ar) foram adotados os valores de referência do software de imagens térmicas. Além disso, foi utilizado da medição direta de temperatura, a partir da instalação de 4 pontos de termopares (2 termopares localizados no concreto íntegro e 2 termopares localizados no defeito, conforme indicado na Figura 26) e calculado os valores de temperatura média desses pontos, ao longo do período de monitoramento, para uma possível comparação com os valores obtidos nos termogramas. Os resultados das temperaturas médias, do concreto íntegro e do defeito, ao longo do período de monitoramento, obtidos a partir da variação dos parâmetros de entrada (temperatura aparente refletida e emissividade) do software de imagens térmicas e da medição direta dos termopares, em relação ao dia investigado, estão no Figura 35. Considerando, as temperaturas médias dos termogramas, do concreto íntegro e do defeito, ao longo do período de monitoramento, das superfícies analisadas, são menores, quando os valores obtidos a partir da medição em campo, da temperatura aparente refletida, ultrapassam o valor de referência (22°C). Indicando que, quanto maior a influência do ambiente (temperatura aparente refletida), menor a temperatura de superfície convertida pelo software de imagens térmica. Este comportamento demonstrado também é descrito pelo modelo teórico do item 2.2.1.



(a.1)

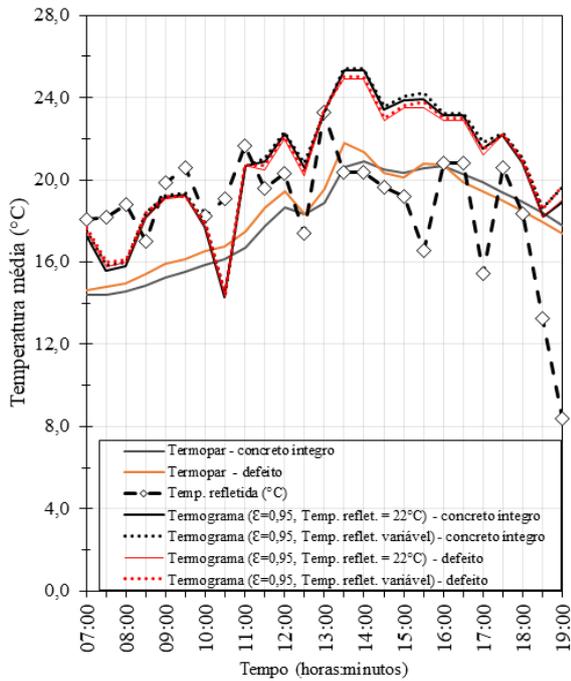


(a.2)

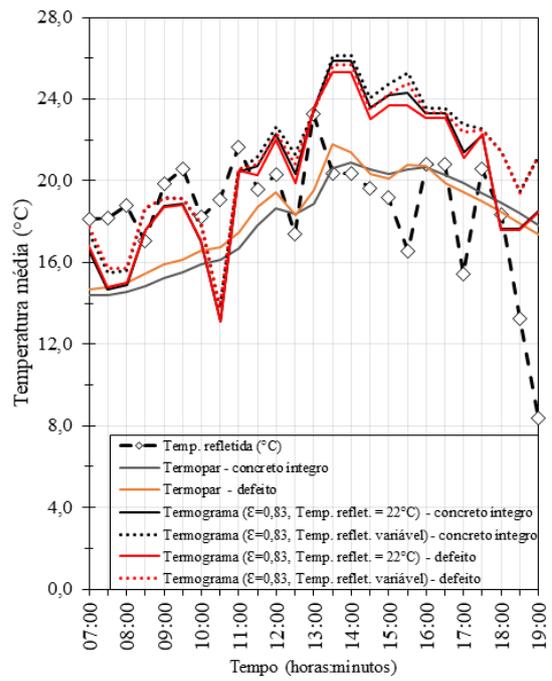


(a.3)

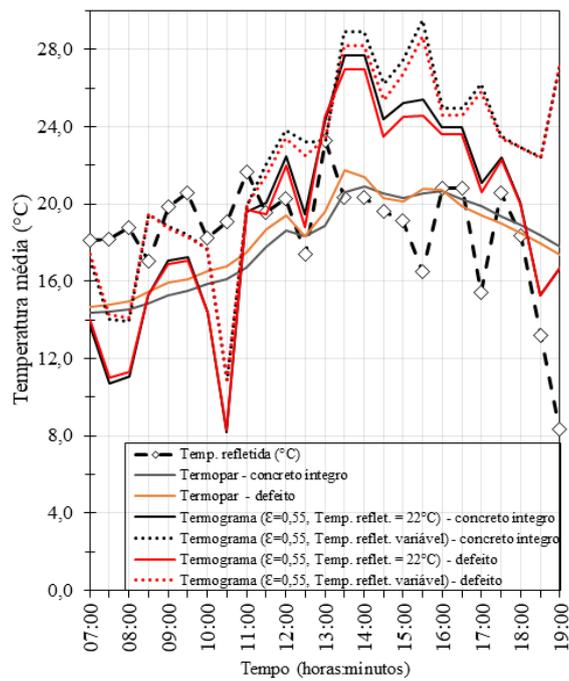
Figura 35 - Resultados das temperaturas médias, do concreto íntegro e do defeito, ao longo do período de monitoramento, obtidos a partir da variação dos parâmetros de entrada do software de imagens térmicas e da medição direta dos termopares, em relação ao dia investigado. 24 de agosto com a superfície do corpo de prova de concreto com falha simulada a 1,0 cm de profundidade: (a.1) emissividade máxima, obtida em campo, em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C) e variável (valores medidos em campo); (a.2) emissividade média em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C) e variável e (a.3) emissividade mínima em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C) e variável (continua).



(b.1)



(b.2)



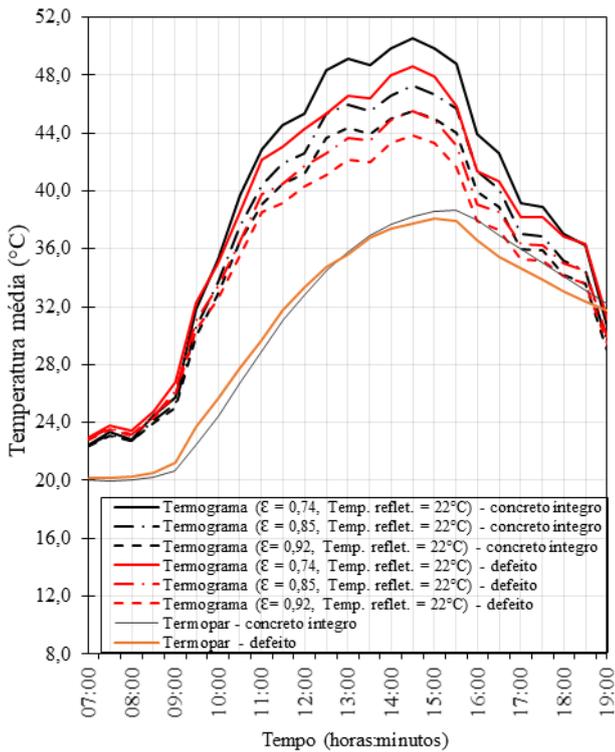
(b.3)

Figura 35 - Resultados das temperaturas médias, do concreto íntegro e do defeito, ao longo do período de monitoramento, obtidos a partir da variação dos parâmetros de entrada do software de imagens térmicas e da medição direta dos termopares, em relação ao dia investigado. 22 de setembro com a superfície do corpo de prova de concreto com falha simulada a 2,5 cm de profundidade: (b.1) emissividade máxima, obtida em campo, em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C) e variável (valores medidos em campo); (b.2) emissividade média em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C) e variável e (b.3) emissividade mínima em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C) e variável (continuação).

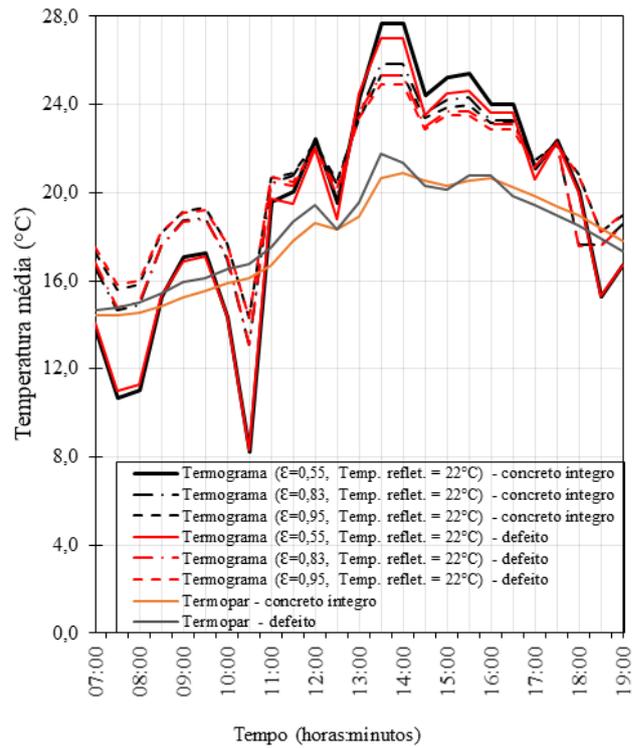
Considerando, as temperaturas médias dos termogramas, do concreto íntegro e do defeito, das superfícies analisadas, para os valores de emissividade máxima em relação as mudanças dos parâmetros de temperatura aparente refletida, de fixa para variável, apresentaram, ao longo do período de monitoramento, pouca variação (Figura 35 (a.1) e (b.1)). À medida que os valores de emissividade diminuíram, os valores de temperatura média dos termogramas apresentaram maiores variações ao longo do período de monitoramento em relação as mesmas mudanças dos parâmetros (Figura 35 (a.2) (a.3) (b.2) (b.3)). Tal fato indica que as duas propriedades do objeto de análise (emissividade e temperatura aparente refletida) estão relacionadas e influenciam nas temperaturas de superfície, onde o material com menor capacidade de emissão e, conseqüentemente, maior capacidade de reflexão (ou seja, menor valor de emissividade), efeito do ambiente, medido a partir do parâmetro de temperatura aparente refletida, é maior em comparação com a superfície de um material com alta emissividade (menor capacidade de reflexão).

As temperaturas médias, do concreto íntegro e do defeito, obtidas de forma direta a partir dos termopares, apresentaram comportamento semelhante, ao longo do período de monitoramento, em relação as temperaturas médias dos termogramas, para os dois dias investigados. Os menores valores de temperatura média dos termopares são devidos as diferentes localizações e quantidades de medição de temperaturas, ou seja, os termopares estão incorporados no concreto a uma certa profundidade em relação a sua falha (barreira física), com um número limitado de duas medições. Os termogramas são medições superficiais de temperatura com milhares de pontos de medição em sua superfície.

Em relação a verificação da capacidade de emissão da superfície (emissividade), foi adotado um valor fixo, de referência de temperatura aparente refletida (22°C) avaliados em relação aos valores de emissividade, mínima, média e máxima da superfície, obtida em campo, correspondente ao dia investigado. Para os demais parâmetros foram adotados os valores de referência do software de imagens térmicas. Também foi utilizado para verificação dos valores de temperatura, a medição direta de temperatura, a partir dos termopares, conforme descrito anteriormente. Os resultados das temperaturas médias, do concreto íntegro e do defeito, ao longo do período de monitoramento, obtidas a partir da variação do parâmetro de entrada de emissividade da superfície do software de imagens térmicas e da medição direta dos termopares em relação ao dia investigado estão no Figura 36. Considerando, as temperaturas médias dos termogramas, do concreto íntegro e do defeito, as mudanças nos valores de emissividade para a mesma temperatura aparente refletida (22°C) apresentaram variações significativas, ao longo do período de monitoramento, onde para menores valores de emissividade (maior capacidade de reflexão), maiores valores de temperatura média de superfície foram alcançados, para os dois dias investigados (Figura 36 (a) (b)).



(a)



(b)

Figura 36 - Resultados das temperaturas médias, do concreto íntegro e do defeito, ao longo do período de monitoramento, obtidas a partir da variação do parâmetro de entrada de emissividade da superfície do software de imagens térmicas e da medição direta dos termopares em relação ao dia investigado. Dois dias de investigação com duas superfícies analisadas. 24 de agosto com a superfície do corpo de prova de concreto com falha simulada a 1,0 cm de profundidade: (a) emissividade mínima, média e máxima, obtida em campo, em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C). 22 de setembro com a superfície do corpo de prova de concreto com falha simulada a 2,5 cm de profundidade: (b) emissividade mínima, média e máxima, obtida em campo, em relação a temperatura média aparente refletida, fixa (22°C).

Para avaliação conjunta da influência das propriedades do objeto na detecção de defeitos em estruturas de concreto com uso da termografia por infravermelho, o contraste térmico ao longo do tempo foi analisado. O método adotado para obtenção do contraste térmico está descrito no item 4. Os resultados do contraste térmico (mínimo, média e máximo), ao longo do período de monitoramento, das duas superfícies analisadas dos corpos de prova de concreto, para os dois dias investigados estão na Tabela 15. Considerando os dois dias investigados das duas superfícies analisadas, menores valores de emissividade (maior capacidade de reflexão) apresentam maiores valores de contraste térmico desenvolvidos.

Tabela 15 - Resultados do contraste térmico (mínimo, média e máximo), ao longo do período de monitoramento, das duas superfícies analisadas dos corpos de prova de concreto, para os 2 dias investigados.

Data	Superfície analisada	Emissividade	Temperatura Aparente Refletida (°C)	Contraste térmico ΔT (°C)		
				mínimo	média*	máximo
24 de agosto	Superfície 1 - C.P.C. (FA. P. 1,0 cm)	0,92	22,0	-0,4	0,5	1,2
		0,92	variável	-0,3	0,5	1,2
		0,85	22,0	-0,4	0,5	1,3
		0,85	variável	-0,4	0,5	1,2
		0,74	22,0	-0,4	0,6	1,4
		0,74	variável	-0,4	0,5	1,4
22 de setembro	Superfície 2 - C.P.C. (FA. P. 2,5 cm)	0,95	22,0	-0,2	0,1	0,4
		0,95	variável	-0,2	0,1	0,5
		0,83	22,0	-0,3	0,1	0,5
		0,83	variável	-0,3	0,1	0,5
		0,55	22,0	-0,5	0,2	0,8
		0,55	variável	-0,4	0,2	0,7

Em relação aos valores obtidos de contraste térmico da superfície 1 do dia 24 de agosto, a diferença máxima de contraste térmico é de 0,2°C com a variação do parâmetro de emissividade. Esta diferença corresponde ao valor mínimo de contraste térmico admitido para a detecção de defeitos com uso da termografia por infravermelho (conforme discutido no item 2.5). De acordo com os valores obtidos de contraste térmico da superfície 2 do dia 22 de setembro, a diferença máxima de contraste térmico é de 0,4°C com a variação do parâmetro de emissividade da superfície. Esta diferença corresponde ao valor de contraste térmico admitido para a faixa certamente provável para a detecção de defeitos com uso da termografia por infravermelho (conforme discutido no item 2.5). Levando em consideração, a variação do parâmetro de temperatura aparente refletida, a diferença máxima de contraste térmico é de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ para os dois dias investigados das duas superfícies analisadas. Tais fatos indicam que, a emissividade da superfície apresenta maior influência no contraste térmico desenvolvido do que a temperatura aparente refletida.

Os resultados obtidos em campo, desta pesquisa, concordaram com os testes em laboratório realizados por Souza (2010). Os autores perceberam que a temperatura aparente refletida apresenta baixa influência sobre o valor final da temperatura do objeto analisado. Por outro lado, a alteração da emissividade ocasionou variações significativas de temperaturas, o que torna o conhecimento desta variável imprescindível, principalmente em testes de materiais com características de baixa emissão de radiação, ou seja, alta reflexão (não é o caso do material, concreto).

Portanto, as propriedades do objeto de análise influenciam na capacidade de detecção de defeitos no concreto com uso da termografia por infravermelho, onde superfícies de concreto com alta emissividade (menor capacidade de reflexão) apresentam menor influência do ambiente (temperatura aparente refletida). As superfícies com baixa emissividade (maior capacidade de reflexão) apresentam maiores valores de temperatura média de superfície, do concreto íntegro e do defeito, e de contraste térmico desenvolvido. O parâmetro de emissividade da superfície apresenta uma maior influência na capacidade de detecção do que a temperatura aparente refletida.

4.1.2 Influência das condições do defeito do concreto

Sendo as condições do defeito do concreto (tamanho e profundidade) influentes na capacidade de detecção de defeitos pela termografia por infravermelho (conforme discutido no item 2.4), foi avaliado a influência dessas condições em relação as temperaturas de superfície, do concreto íntegro e defeito, e no contraste térmico desenvolvido (indicador de capacidade de detecção). As dimensões do defeito, área e espessura (100 mm x 100 mm x 10 mm), foram fixadas e três diferentes profundidades (1,0 cm; 2,5 cm e 4,5 cm), foram avaliadas, sendo a profundidade do defeito o principal objeto de estudo.

Durante o período de monitoramento (7:00 às 19:00), foram capturados termogramas das superfícies dos corpos de prova de concreto (superfície 1: C.P.C. FA. P. 1,0 cm; superfície 2: C.P.C. FA. P. 2,5 cm e superfície 3: C.P.C. FA. P. 4,5 cm), em intervalos de tempo de 30 minutos, resultando em um total de 75 termogramas (sendo 25 termogramas para cada superfície analisada) para um único dia investigado. Foi utilizado de 4 dias de investigação (24 e 27 de agosto e 09 e 22 de setembro). Para a captura dos termogramas, foi utilizada a câmera termográfica FLIR ONE Pro com faixa espectral de 8 μm a 14 μm (especificações da câmera termográfica na Tabela 11 do item 3.2). Para cada termograma, foi obtido os valores de temperatura média, do defeito e do concreto íntegro, e calculado o contraste térmico. O método para obtenção destes valores está demonstrado no item 4.

Os parâmetros de entrada adotados no software de imagens térmicas para avaliação da influência da profundidade do defeito na temperatura de superfície, do concreto íntegro e do defeito, e no contraste térmico desenvolvido, para os 4 dias de investigação estão na Tabela 16. Para cada dia de investigação, foram adotados os valores da média, de temperatura aparente refletida, de temperatura atmosférica e de umidade relativa do ar, durante o período de monitoramento. A distância de medição foi de 1 m e a transmitância atmosférica foi 1. Para os valores de emissividade das

superfícies de concreto, foram adotados os valores únicos de maior frequência em relação aos 4 dias de investigação, para cada superfície analisada, conforme demonstrado no Figura 37.

Tabela 16 – Parâmetros de entrada adotados no software de imagens térmicas para avaliação da influência da profundidade do defeito na temperatura de superfície, do concreto íntegro e do defeito e no contraste térmico desenvolvido, para os 4 dias de investigação (continua).

Data	Parâmetros de Entrada	Superfície 1 - C.P.C. (FA. P. 1,0 cm)	Superfície 2 - C.P.C. (FA. P. 2,5 cm)	Superfície 3 - C.P.C. (FA. P. 4,5 cm)
24 de agosto	Emissividade	0,91	0,91	0,90
	Temp. refletida (°C)	20,7	23,6	23,8
	Distância (m)	1,0	1,0	1,0
	Temp. atmosférica (°C)	31,9	31,9	31,9
	Trans. Atmosférica (°C)	1,0	1,0	1,0
	Umidade Relativa (%)	28,4	28,4	28,4
27 de agosto	Emissividade	0,91	0,91	0,90
	Temp. refletida (°C)	20,3	21,9	22,8
	Distância (m)	1,0	1,0	1,0
	Temp. atmosférica (°C)	19,0	19,0	19,0
	Trans. Atmosférica (°C)	1,0	1,0	1,0
	Umidade Relativa (%)	85,0	85,0	85,0
09 de setembro	Emissividade	0,91	0,91	0,90
	Temp. refletida (°C)	24,2	26,6	27,6
	Distância (m)	1,0	1,0	1,0
	Temp. atmosférica (°C)	27,8	27,8	27,8
	Trans. Atmosférica (°C)	1,0	1,0	1,0
	Umidade Relativa (%)	70,5	70,5	70,5

Tabela 16 – Parâmetros de entrada adotados no software de imagens térmicas para avaliação da influência da profundidade do defeito na temperatura de superfície, do concreto íntegro e do defeito e no contraste térmico desenvolvido, para os 4 dias de investigação (continuação).

Data	Parâmetros de Entrada	Superfície 1 - C.P.C. (FA. P. 1,0 cm)	Superfície 2 - C.P.C. (FA. P. 2,5 cm)	Superfície 3 - C.P.C. (FA. P. 4,5 cm)
22 de setembro	Emissividade	0,91	0,91	0,90
	Temp. refletida (°C)	17,6	18,6	19,4
	Distância (m)	1,0	1,0	1,0
	Temp. atmosférica (°C)	20,8	20,8	20,8
	Trans. Atmosférica (°C)	1,0	1,0	1,0
	Umidade Relativa (%)	48,8	48,8	48,8

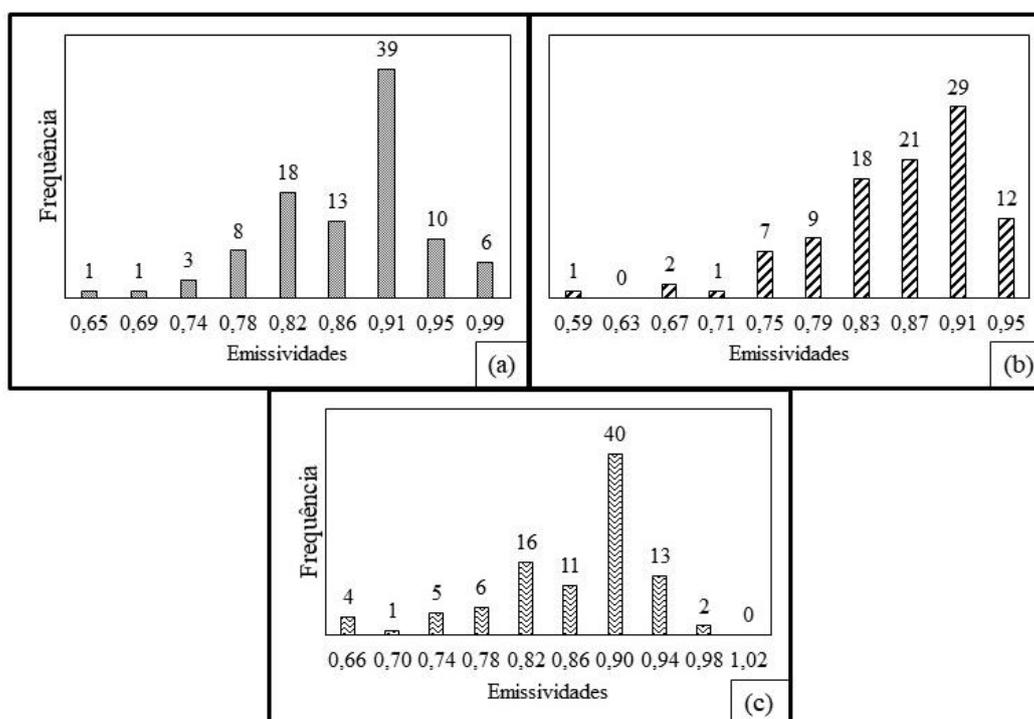


Figura 37 - Resultados de frequência dos valores de emissividade das superfícies de concreto em relação aos 4 dias de investigação. (a) Superfície 1: C.P.C (FA. P. 1,0 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 1,0 cm); (b) Superfície 2: C.P.C (FA. P. 2,5 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 2,5 cm); (c) Superfície 3: C.P.C (FA. P. 4,5 cm) – Corpo de prova de concreto (falha profundidade 4,5 cm).

Os resultados das temperaturas médias de superfície, do concreto íntegro e do defeito, e do contraste térmico desenvolvido, ao longo do período de monitoramento, em função das diferentes profundidades (1,0 cm; 2,5 cm e 4,5 cm) estão no Figura 38.

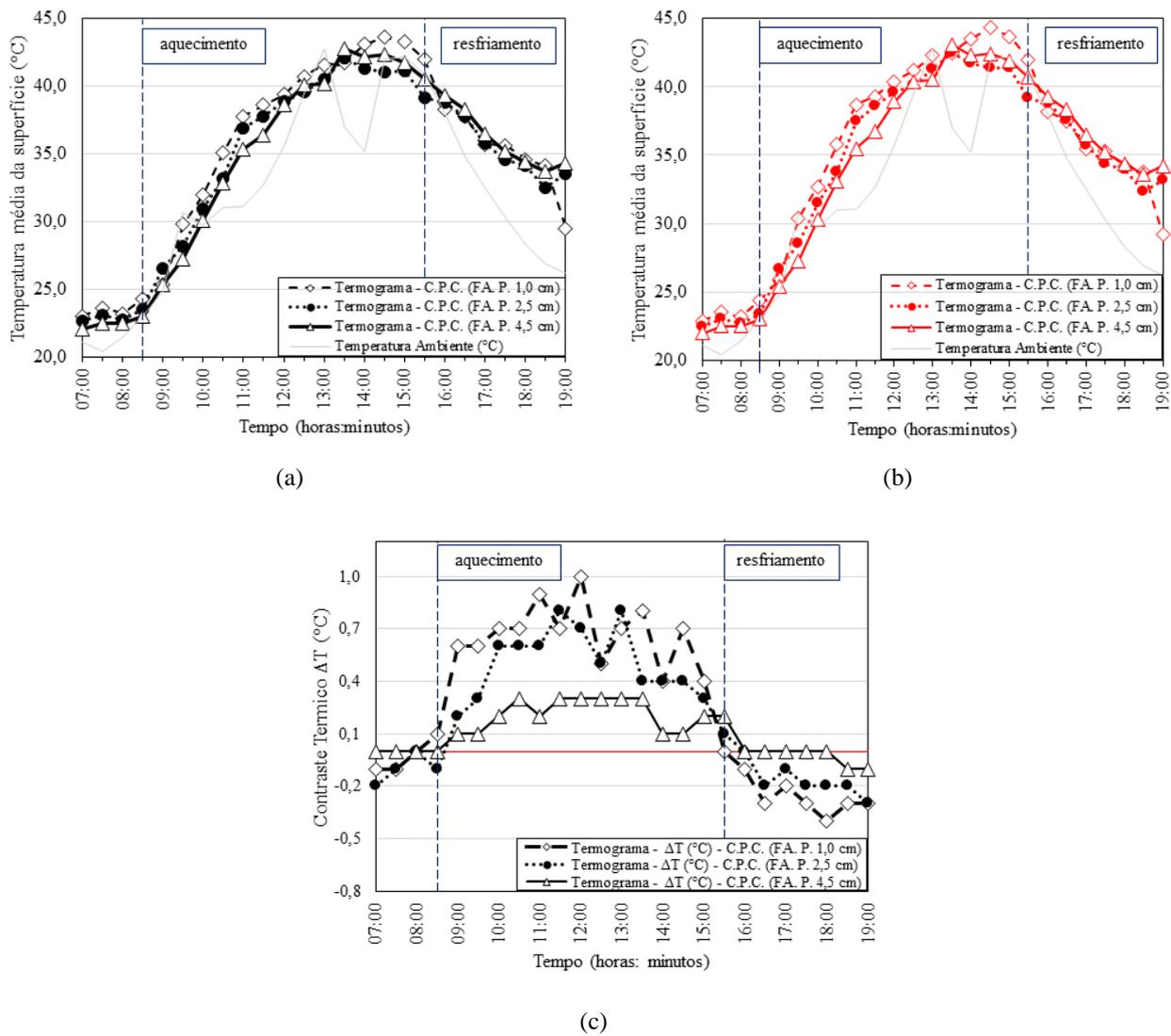


Figura 38 - Resultados das temperaturas médias de superfície, do concreto íntegro (a) e do defeito (b), e no contraste térmico desenvolvido (c), ao longo do período de monitoramento, em função das diferentes profundidades (1,0 cm; 2,5 cm e 4,5 cm). Dia de investigação: 24 de agosto de 2021.

Considerando os resultados das temperaturas médias dos termogramas do concreto íntegro e com defeito, maiores valores foram alcançados ao longo do período de monitoramento em relação a menor profundidade (1 cm). À medida que, maiores profundidades foram alcançadas (2,5 cm e 4,5 cm) menores valores de temperatura média de superfície foram desenvolvidas nos termogramas (Figura 38 (a) (b)). Estes resultados obtidos em campo concordaram com a revisão bibliográfica (conforme discutido no item 2.4), indicando que, um defeito mais profundo tem menos influência na temperatura superficial resultante do que um defeito próximo a superfície. Conforme o aumento da profundidade do defeito, torna-se mais difícil a detecção pela câmera termográfica. Este fato é evidenciado no Figura 38 (c) e Tabela 22, onde a menor profundidade estudada (1cm), foi resultante dos maiores valores de contraste térmico (maior capacidade de detecção), ao longo do período de

monitoramento. Com o aumento da profundidade do defeito (2,5 cm e 4,5 cm), menores valores de contraste térmico foram desenvolvidos (menor capacidade de detecção).

Um resumo dos resultados de contraste térmico (mínimo, média e máximo) das superfícies analisadas dos corpos de prova de concreto, em função da profundidade do defeito, dos 4 dias investigados, estão na Tabela 17.

Tabela 17 - – Resumo dos resultados de contraste térmico (mínimo, média e máximo) das superfícies analisadas dos corpos de prova de concreto, em função da profundidade do defeito, dos 4 dias investigados.

Data	Profundidade do defeito (cm)	Contraste térmico ΔT (°C)		
		mínimo	média*	máximo
24 de agosto	1,0	-0,40	0,44	1,00
	2,5	-0,30	0,33	0,80
	4,5	-0,10	0,13	0,30
27 de agosto	1,0	-0,20	0,08	0,20
	2,5	-0,10	0,04	0,10
	4,5	-0,10	0,03	0,10
09 de setembro	1,0	-0,40	0,30	0,80
	2,5	-0,30	0,22	0,70
	4,5	-0,10	0,08	0,30
22 de setembro	1,0	-0,20	0,124	0,60
	2,5	-0,20	0,128	0,50
	4,5	-0,10	0,04	0,20

Em relação aos valores obtidos, em campo, de contraste térmico dos 4 dias investigados, a diferença máxima de contraste térmico é de 0,70°C com a variação da profundidade do defeito (1,0 cm; 2,5 cm e 4,5 cm), encontrada no dia 24 de agosto. Esta é uma grande diferença, indicando uma alta influência da profundidade do defeito na capacidade de detecção pela termografia por infravermelho.

Os diferentes valores de contrastes térmicos que indicam a maior ou menor capacidade de detecção pela câmera termográfica, também podem ser representados por variações de cores nos termogramas, tornando-se mais nítidas essas variações quanto maior o contraste térmico obtido, sendo assim fácil a detecção apenas com uma abordagem qualitativa do usuário. Os defeitos superficiais são facilmente detectados como pontos quentes ou frios nos termogramas, pois maiores contrastes térmicos são desenvolvidos. Assim que, a profundidade aumenta, torna-se mais difícil a detecção, ou seja, os contrastes de cores não são nítidos, devido a menores valores de contrastes

térmicos. A Figura 39 apresenta os contrastes de cores obtidos nos termogramas, em intervalos de tempo, durante o período de monitoramento, em função da profundidade do defeito.

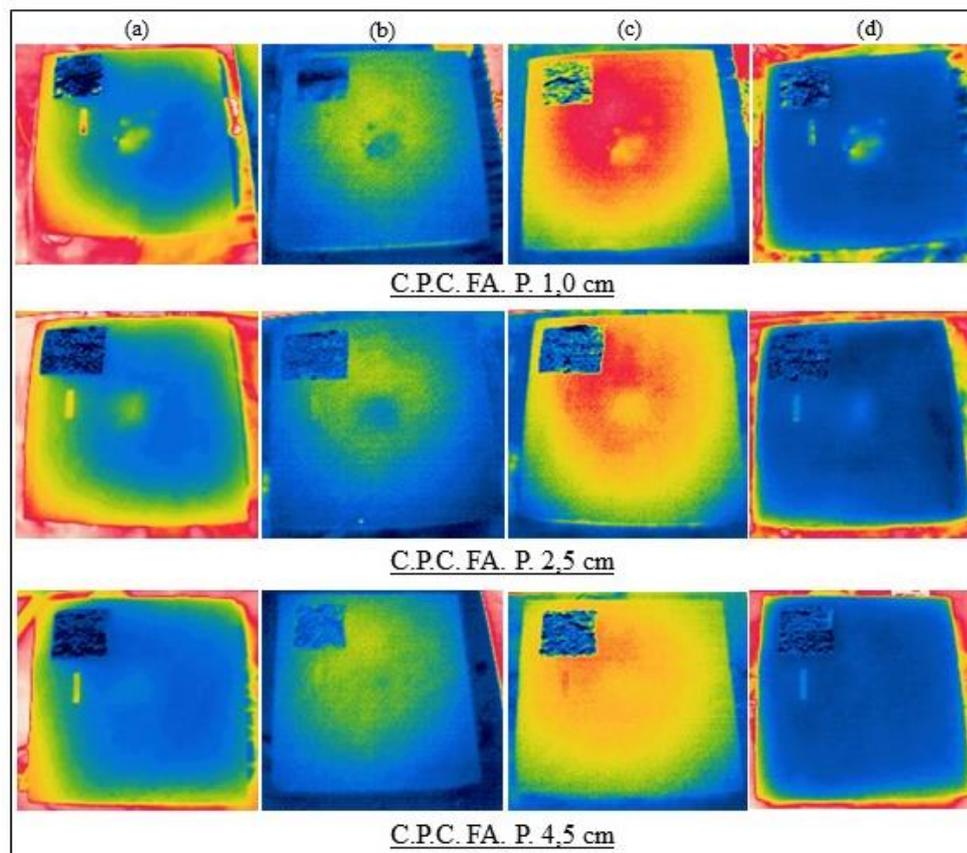


Figura 39 – Contrastes de cores obtidos nos termogramas, em intervalos de tempo, durante o período de monitoramento, em função da profundidade do defeito. Os dias e os intervalos de tempo investigados são: (a) 24 de agosto, às 12:00; (b) 27 de agosto, às 7:00; (c) 09 de setembro às 19:00 e (d) 22 de setembro, às 11:00

4.1.3 Equipamento

A utilização de diferentes câmeras térmicas durante o período de monitoramento nas superfícies dos corpos de prova de concreto, tem como objetivo verificar a influência das propriedades do equipamento no contraste térmico obtido, logo, avaliar o desempenho das câmeras térmicas na identificação de defeitos no concreto. Este desempenho foi avaliado em função do contraste térmico obtido (indicador de capacidade de detecção), da profundidade do defeito detectado, do período útil para a identificação do defeito e da distância de medição. Foram utilizadas 3 câmeras térmicas, suas principais especificações técnicas e os parâmetros considerados na investigação estão na Tabela 18 (para informações completas das especificações técnicas das câmeras térmicas vide Tabela 11 do item 3.2).

Tabela 18 - Câmeras térmicas utilizadas, durante o período de monitoramento, nas superfícies dos corpos de prova de concreto, suas principais especificações técnicas e os parâmetros considerados na investigação.

Câmera térmica	Distância de medição (m)	FOV	IFOV (mrad)	Resolução térmica (pixels)	Área total capturada (m ²) *	Sensibilidade Térmica (mK)	Faixa Espectral
FLIR ONE Pro	1,0	55° x 43°	6,0	19.200 (160x120)	1,04 m x 0,79 m = = 0,82	70	8 μm a 14 μm
	2,0				2,08 m x 1,58 m = = 3,28		
INFIRAY C210	1,0	56° x 42,2°	3,8	49.152 (256x192)	1,06 m x 0,77 m = = 0,82	< 50	8 μm a 14 μm
	2,0				2,12 m x 1,54 m = = 3,28		
FLIR T620	1,0	25° x 19°	0,68	307.200 (640x480)	0,44 m x 0,33 m = = 0,15	< 40	7,5 μm a 14 μm
	2,0				0,89 m x 0,67 m = = 0,59		

*Cálculo da área total capturada (Equação 25)

Considerando as propriedades ópticas e geométricas das câmeras térmicas, FLIR ONE Pro e INFIRAY C210, apresentam semelhanças em relação ao campo de visão FOV, logo, as mesmas áreas totais de captura do termograma a uma certa distância de medição. A câmera térmica FLIR T620 apresenta um menor campo de visão FOV para uma mesma distância de medição, ou seja, menor área total de captura do termograma em relação as outras câmeras térmicas analisadas. Em relação aos valores do campo de visão instantâneo IFOV das câmeras térmicas, são distintos e diminuem da FLIR ONE Pro para a FLIR T620, isto significa uma maior precisão na determinação da temperatura aparente de superfície por píxel, ou seja, menor área ou objeto que pode ser detectado a uma mesma distância de medição. As resoluções térmicas das câmeras termográficas também representam uma maior precisão na determinação da temperatura aparente de superfície, pois quanto maior for este valor, mais pontos de medição são feitos para uma mesma distância e campo de visão. Os valores de sensibilidade térmica das câmeras termográficas são baixos e asseguram-se a maior capacidade de detecção, pois os valores de contrastes térmicos desenvolvidos sob condições ambientes (termografia passiva) são baixos (menores que 1°C). As faixas espectrais das câmeras térmicas estão dentro das janelas atmosféricas, nos quais a atenuação atmosférica é mínima. Estas faixas espectrais infravermelhas correspondem a classificação de infravermelho de ondas longas, baseado nos limites espectrais de detectores infravermelho, conforme determina a ABNT NBR 15424 (2016).

Levando em conta a área de interesse de 0,36 m² (0,6 m x 0,6 m) das superfícies dos corpos de prova de concreto, a área total capturada pela câmera termográfica FLIR T620 a uma distância de medição de 1 m, não corresponde a área de interesse, sendo uma área de captura menor. As demais câmeras térmicas correspondem a área de interesse em relação a área total capturada a uma distância de 1 m. A vista disso, para avaliação do desempenho das câmeras térmicas, primeiramente, foram avaliadas as câmeras térmicas, FLIR ONE Pro e INFIRAY C210, a uma distância de medição de 1 m. E, posteriormente, as três câmeras térmicas foram avaliadas a uma distância de medição de 2 m.

Os critérios de captura dos termogramas das superfícies dos corpos de prova de concreto, assim como os parâmetros de entrada adotados no software de imagens térmicas são os mesmos que os utilizados no item anterior (4.1.2).

Durante a análise dos termogramas, utilizou-se das duas abordagens, quantitativa (contraste térmico) e qualitativa (contraste de cor), para as determinações, da profundidade do defeito detectado ou não detectado e do período útil para a identificação do defeito. Nestas análises, adotaram-se as faixas de contraste térmico para a detecção ou não detecção de defeitos utilizando a termografia por infravermelho, admitidas por Hiasa; Birgül; Catbas (2017) (Figura 16 da revisão bibliográfica). Dado que, o modelo proposto se ajustou aos resultados experimentais e as análises obtidas, desta pesquisa. Os desempenhos das câmeras térmicas também foram avaliados em relação a este modelo.

Um resumo dos resultados do contraste térmico (mínimo, média e máximo), da profundidade do defeito detectado e do período útil para identificação do defeito, em função das câmeras térmicas utilizadas, estão na Tabela 19.

Tabela 19 – Resumo dos resultados do contraste térmico (mínimo, média e máximo), da profundidade do defeito detectado e do período útil para a identificação do defeito, em função das câmeras térmicas utilizadas.

(a) FLIR ONE Pro e INFIRAY C210 a uma distância de medição de 1 m.

Data	Câmara térmica	Profundidade do defeito (cm)	Contraste térmico ΔT (°C)			Detecção	Período útil para a identificação do defeito
			mínimo	média	máximo		
24 de agosto	FLIR ONE Pro	1,0	-0,40	0,44	1,00	Sim	9 horas (9:00 às 15:00, 16:30 e 17:30 às 19:00)
		2,5	-0,30	0,33	0,80	Sim	6,5 horas (9:30 às 15:00 e 19:00)
		4,5	-0,10	0,13	0,30	Sim	3 horas (10:30 e 11:30 às 13:30)
	INFIRAY C210	1,0	-0,50	0,50	1,40	Sim	10 horas (9:00 às 14:30 e 16:00 às 19:00)
		2,5	-0,30	0,40	1,00	Sim	7,5 horas (9:30 às 14:30 e 17:30 às 19:00)
		4,5	-0,10	0,13	0,30	Sim	1,5 horas (10:30, 11:00 e 13:30)
27 de agosto	FLIR ONE Pro	1,0	-0,20	0,08	0,20	Não	-
		2,5	-0,10	0,04	0,10	Não	-
		4,5	-0,10	0,03	0,10	Não	-
	INFIRAY C210	1,0	-0,30	0,14	0,30	Sim	2 horas (7:00, 11:30, 13:30 e 19:00)
		2,5	-0,20	0,10	0,20	Não	-
		4,5	-0,10	0,04	0,20	Não	-
09 de setembro	FLIR ONE Pro	1,0	-0,40	0,30	0,80	Sim	7 horas (9:00 às 11:00, 13:00, 13:30 e 15:30 às 18:30)
		2,5	-0,30	0,22	0,70	Sim	3,5 horas (9:30 às 11:30, 13:00 e 16:00)
		4,5	-0,10	0,08	0,30	Sim	0,5 hora (10:30)
	INFIRAY C210	1,0	-0,50	0,37	1,10	Sim	8 horas (9:30 às 11:30, 12:30 às 13:30 e 15:30 às 19:00)
		2,5	-0,40	0,32	0,90	Sim	7,5 horas (9:30 às 11:30, 13:00 às 14:00 e 16:00 às 19:00)
		4,5	-0,20	0,13	0,30	Sim	2 horas (10:00 às 12:00)
22 de setembro	FLIR ONE Pro	1,0	-0,20	0,12	0,60	Sim	1,5 horas (11:00, 13:00 e 13:30)
		2,5	-0,20	0,13	0,50	Sim	2 horas (11:00, 12:00, 13:00 e 13:30)
		4,5	-0,10	0,04	0,20	Não	-
	INFIRAY C210	1,0	-0,20	0,15	0,70	Sim	1,5 horas (11:00, 13:00 e 13:30)
		2,5	-0,20	0,12	0,50	Sim	0,5 hora (13:00)
		4,5	-0,10	0,03	0,20	Não	-

(b) As três câmeras térmicas a uma distância de medição de 2 m.

Data	Câmera térmica	Profundidade do defeito (cm)	Contraste térmico ΔT (°C)			Detecção	Período útil para identificação do defeito
			mínimo	média*	máximo		
22 de setembro	FLIR ONE Pro	1,0	-0,20	0,13	0,60	Sim	1 hora (11:30 e 13:30)
		2,5	-0,10	0,06	0,20	Não	-
		4,5	0,00	0,02	0,10	Não	-
	INFIRAY C210	1,0	-0,20	0,17	0,50	Sim	1 hora (11:30 e 13:30)
		2,5	-0,10	0,10	0,30	Sim	1 hora (11:30 e 13:30)
		4,5	-0,10	0,02	0,10	Não	-
	FLIR T620	1,0	-0,20	0,13	0,40	Sim	1 hora (11:30 e 13:30)
		2,5	-0,20	0,12	0,30	Sim	1 hora (11:30 e 13:30)
		4,5	-0,10	0,05	0,10	Não	-
11 de novembro	FLIR ONE Pro	1,0	0,00	0,00	0,00	Não	-
		2,5	0,00	0,00	0,00	Não	-
		4,5	0,00	0,00	0,00	Não	-
	INFIRAY C210	1,0	-0,10	0,08	0,10	Não	-
		2,5	-0,10	0,04	0,10	Não	-
		4,5	0,00	0,02	0,10	Não	-
	FLIR T620	1,0	-0,20	0,07	0,10	Não	-
		2,5	-0,20	0,05	0,10	Não	-
		4,5	0,00	0,01	0,10	Não	-
17 de novembro	FLIR ONE Pro	1,0	-0,30	0,31	1,00	Sim	5,0 horas (11:00, 11:30, 13:00 às 15:30 e 17:00 às 18:30)
		2,5	-0,30	0,26	1,00	Sim	4 horas (12:00 às 15:30 e 18:30)
		4,5	-0,10	0,10	0,30	Sim	0,5 hora (12:00)
	INFIRAY C210	1,0	-0,30	0,28	1,20	Sim	3 horas (11:00 às 13:00, 16:30 e 17:30)
		2,5	-0,10	0,32	1,00	Sim	2,5 horas (11:00 às 13:00 e 16:30)
		4,5	0,00	0,10	0,40	Sim	0,5 hora (12:00)
	FLIR T620	1,0	-0,40	0,52	1,60	Sim	5 horas (10:30 às 14:30 e 17:00 às 17:30)
		2,5	-0,20	0,30	1,00	Sim	4 horas (10:30 às 14:30)
		4,5	-0,10	0,12	0,50	Sim	1 hora (13:00 às 14:00)

Em relação aos resultados das câmeras térmicas, FLIR ONE Pro e INFIRAY C210, a uma distância de medição de 1 m (Tabela 19 (a)), a câmera térmica INFIRAY C210 apresenta um melhor desempenho na identificação de defeitos no concreto, pois maiores valores, de contrastes térmicos e de períodos úteis, foram obtidos, principalmente nos dias mais favoráveis (os dias classificados como quentes, 24 de agosto e 09 de setembro) para o uso da termografia por infravermelho. Tal fato é devido a maior resolução térmica da câmera termográfica INFIRAY C210, cerca de 2,56 vezes maior em comparação com a câmera termográfica FLIR ONE Pro, ou seja, uma maior quantidade de pontos

de determinação da temperatura aparente de superfície a uma mesma distância de medição. Além da menor sensibilidade térmica da câmera termográfica INFIRAY C210, cerca de 1,4 vezes menor, tendo uma maior precisão de medição de temperatura. Os dias menos favoráveis (os dias classificados como frios, 27 de agosto e 22 de setembro) para o uso da termografia por infravermelho, apresentaram baixos desempenhos para ambas as câmeras térmicas a uma distância de medição de 1m. No dia 27 de agosto, não foi possível a identificação do defeito pela câmera FLIR ONE Pro, durante o período de monitoramento. A câmera térmica INFIRAY C210, neste mesmo dia, identificou apenas o defeito mais superficial (1 cm de profundidade) em um curto período de tempo (2 horas). No dia 22 de setembro, a câmera térmica FLIR ONE Pro, identificou apenas o defeito de 1 cm de profundidade em um curto período de tempo (2 horas), enquanto, a câmera térmica INFIRAY C210, identificou duas profundidades de defeito (1 cm e 2,5 cm), mas também em curtos períodos de tempo (1,5 horas e 0,5 hora, respectivamente).

Considerando os resultados das três câmeras térmicas a uma distância de medição de 2 m (Tabela 19 (b)), para o dia mais favorável, 17 de novembro, onde a temperatura ambiente máxima foi de 42,5 °C (para informações completas das condições ambientais vide Tabela 12 do item 4.1.1.), a câmera térmica FLIR T620 apresenta um melhor desempenho na identificação de defeitos no concreto, pois maiores valores de contrastes térmicos foram obtidos. Neste dia, os períodos úteis para identificação do defeito foram praticamente os mesmos em relação as câmeras térmicas, FLIR ONE Pro e FLIR T620, apresentando uma diferença de 0,5 hora para a profundidade do defeito de 4,5 cm. Em relação a câmera térmica INFIRAY C210, maiores diferenças de períodos úteis para identificação do defeito foram observadas em comparação com as outras câmeras térmicas. Tal fato foi devido a problemas durante o processo de medição, onde em alguns intervalos de tempo, os valores de temperatura aparente da superfície dos termogramas divergiram, sendo os mesmos descartados. O melhor desempenho da câmera térmica FLIR T620 em relação as demais, é devido a maior resolução térmica e a menor área total capturada a uma mesma distância de medição (2 m), resultando em uma quantidade maior de pontos de medição de temperatura aparente de superfície. Além da menor sensibilidade térmica proporcionada pela câmera. Os dias menos favoráveis, (os dias classificados como frios, 22 de setembro e 11 de novembro), para o uso da termografia por infravermelho, apresentaram baixos desempenhos para as três câmeras térmicas a uma distância de 2 m. No dia 22 de setembro, a câmera térmica FLIR ONE Pro, identificou apenas o defeito de 1 cm de profundidade em um curto período de tempo (1 hora), enquanto que, as câmeras térmicas, INFIRAY C210 e FLIR T620, identificaram duas profundidades de defeito (1cm e 2,5 cm), mas também em um curto período de tempo de 1 hora. No dia 11 de novembro, menores valores de contrastes térmicos foram

desenvolvidos, não sendo possível a identificação de defeitos pelas três câmeras térmicas, durante todo o período de monitoramento.

De modo geral, as três profundidades do defeito investigadas foram detectadas pelas câmeras térmicas em diferentes distâncias de medição (1 m e 2 m) e sob dadas condições ambientes, apresentando uma maior dificuldade de detecção ou menor desempenho das câmeras térmicas, quanto maior a profundidade do defeito e menor temperatura ambiente (dia categorizado como frio), pois menores valores de contrastes térmicos e curtos períodos úteis, foram obtidos, conforme os resultados apresentados na Tabela 19 (a) e (b). A câmera térmica com maior resolução térmica e menor sensibilidade térmica apresentou um melhor desempenho em um dia favorável (dia categorizado como quente) para o uso da termografia por infravermelho.

Como visto, os resultados experimentais e as análises obtidas nesta pesquisa se ajustaram ao modelo de faixas de contraste térmico admitidos para a detecção ou não de defeitos com uso da termografia por infravermelho proposto por Hiasa; Birgül; Catbas (2017). Os diferentes desempenhos das câmeras térmicas, durante o período de monitoramento, conforme apresentado na Tabela 19, foram avaliados em relação a este modelo. Os resultados da avaliação da capacidade de detecção (faixa certamente provável e faixa provável) ou não (faixa improvável) de defeitos nas superfícies dos corpos de prova de concreto, em função das câmeras utilizadas, segundo o modelo proposto por Hiasa; Birgül; Catbas (2017), estão na Figura 40.

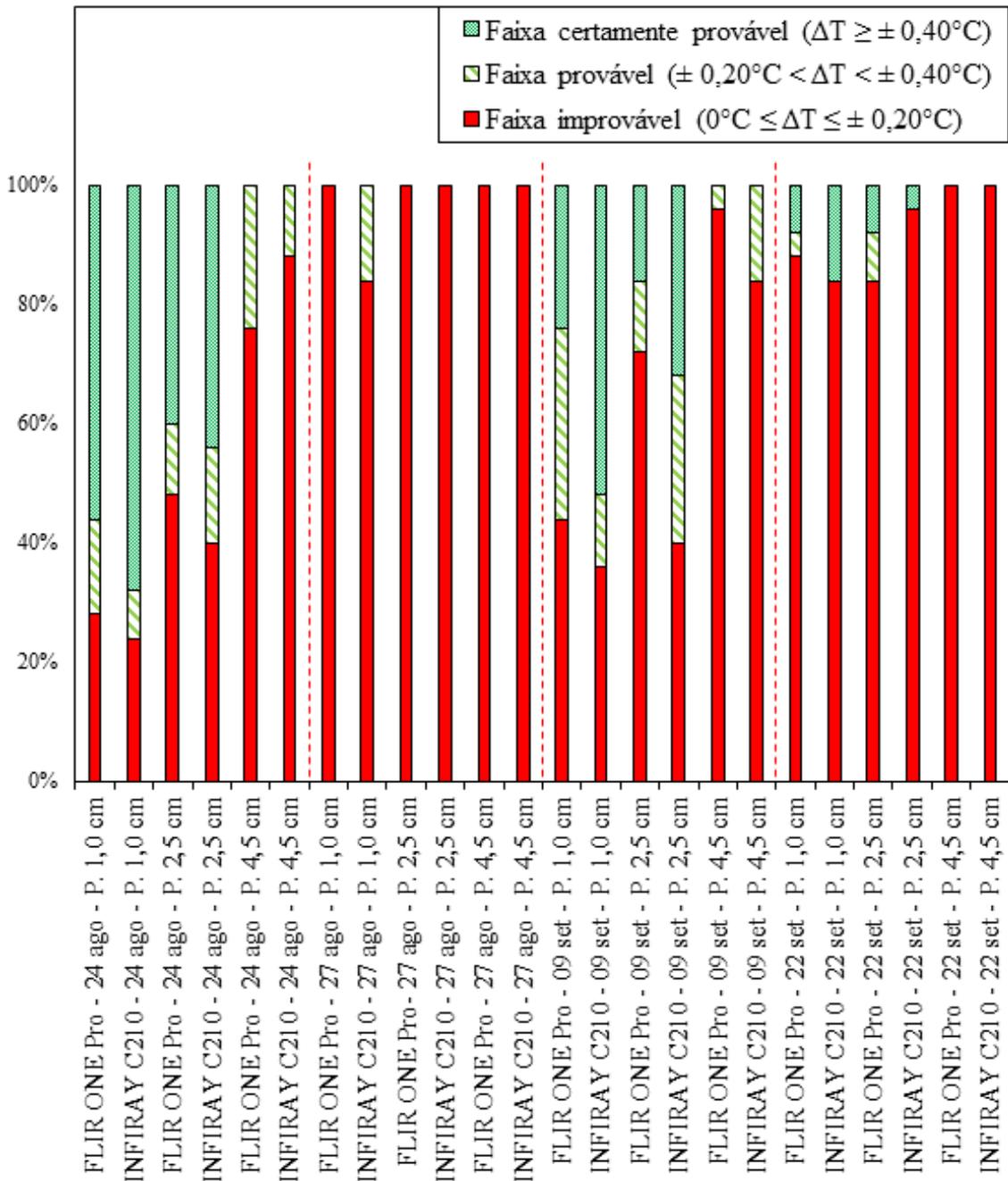


Figura 40 - Resultados da capacidade de detecção (faixa certamente provável e faixa provável) ou não (faixa improvável) de defeitos nas superfícies dos corpos de prova de concreto, em função das câmeras térmicas utilizadas, segundo o modelo proposto por Hiasa; Birgül; Catbas (2017). (a) FLIR ONE Pro e INFIRAY C210 a uma distância de medição de 1 m (continua).

(b) As três câmeras térmicas a uma distância de medição de 2 m.

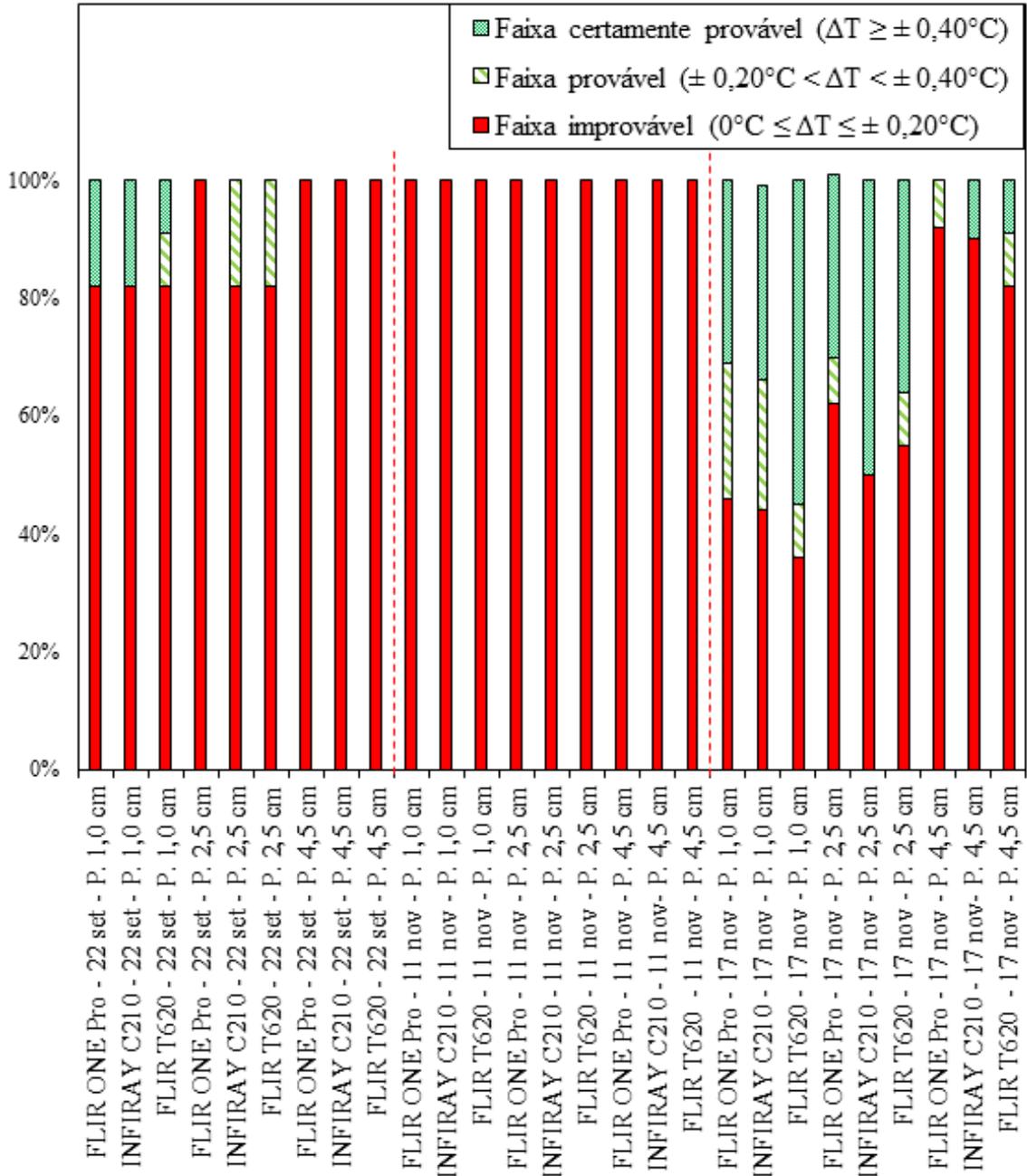


Figura 40 - Resultados da capacidade de detecção (faixa certamente provável e faixa provável) ou não (faixa improvável) de defeitos nas superfícies dos corpos de prova de concreto, em função das câmeras térmicas utilizadas, segundo o modelo proposto por Hiasa; Birgül; Catbas (2017). (b) As três câmeras térmicas a uma distância de medição de 2 m (continuação).

Em relação aos resultados das câmeras térmicas, FLIR ONE Pro e INFIRAY C210, a uma distância de medição de 1 m (Figura 40 (a)), no dia 24 de agosto, para um defeito superficial (1 cm de profundidade), a capacidade de detecção foi acima dos 70% para as duas câmeras térmicas, durante o período de monitoramento. A capacidade de detecção diminuiu com o aumento da profundidade do

defeito, sendo de 52% para a câmera térmica FLIR ONE Pro e de 60% para a câmera térmica INFIRAY C210, isto corresponde a um aumento de 15% na capacidade de detecção com a câmera térmica INFIRAY C210, em relação a profundidade do defeito de 2,5 cm. Para o defeito mais profundo (4,5 cm), a capacidade de detecção diminuiu para as duas câmeras térmicas, sendo de 24% para a câmera térmica FLIR ONE Pro e de 12% para a câmera térmica INFIRAY C210. Neste caso, vale destacar que, a câmera térmica FLIR ONE Pro apresentou o dobro da capacidade de detecção em relação a INFIRAY C210 para um defeito mais profundo. No dia 9 de setembro, as mesmas tendências são observadas, em relação a diminuição da capacidade de detecção com o aumento da profundidade do defeito, e o melhor desempenho da câmera térmica INFIRAY C210. Neste caso, o melhor desempenho da câmera térmica INFIRAY C210 foi para as 3 profundidades dos defeitos em comparação com a câmera térmica FLIR ONE Pro. Os percentuais de capacidade de detecção foram menores em comparação com o dia 24 de agosto. Sendo a capacidade de detecção de aproximadamente 60%, durante o período de monitoramento, para as duas câmeras térmicas em relação a um defeito superficial. Para um defeito com profundidade de 2,5 cm, a câmera térmica INFIRAY C210 também apresentou capacidade de detecção de 60%, tendo 14% a mais de capacidade de detecção em relação com a câmera térmica FLIR ONE Pro, com sua capacidade de detecção de aproximadamente 30%, durante o período do monitoramento. Levando em consideração o defeito mais profundo, a câmera térmica INFIRAY C210 apresentou capacidade de detecção de 16%, sendo 3 vezes superior a capacidade de detecção da câmera térmica FLIR ONE Pro, de 4%, durante o período de monitoramento. Os dias 27 de agosto e 22 de setembro, na maioria das profundidades de defeito investigadas, não apresentaram capacidade de detecção para as duas câmeras térmicas, sendo os menores percentuais de capacidade de detecção, não superiores a 16%.

Considerando os resultados das três câmeras térmicas, FLIR ONE Pro, INFIRAY C210 e FLIR T620, a uma distância de medição de 2 m (Figura 40 (b)), no dia 22 de setembro para um defeito superficial, a capacidade de detecção foi de 18% para as três câmeras térmicas. Para um defeito com profundidade de 2,5 cm, as câmeras térmicas INFIRAY C210 e FLIR T620 apresentaram a mesma capacidade de detecção do defeito superficial (18%). A câmera térmica FLIR ONE Pro para esta profundidade do defeito (2,5 cm), não apresentou capacidade de detecção. Para um defeito mais profundo (4,5 cm), as três câmeras térmicas não apresentaram capacidade de detecção para este dia. Em relação ao dia 11 de novembro, na maioria das profundidades de defeito investigadas, não apresentaram capacidade de detecção para as três câmeras térmicas. No dia 17 de novembro, para um defeito superficial (1 cm de profundidade), a capacidade de detecção foi acima dos 50% para as três câmeras térmicas, durante o período de monitoramento. A câmera térmica FLIR T620 apresentou a maior capacidade de detecção para este defeito, sendo de 64%. A capacidade de detecção diminuiu

com o aumento da profundidade do defeito, sendo de 39% para a câmera térmica FLIR ONE Pro, 50% para a câmera térmica INFIRAY C210 e 45% para a câmera térmica FLIR T620, em relação a profundidade do defeito de 2,5 cm. Para o defeito mais profundo (4,5 cm), a capacidade de detecção diminuiu para as três câmeras térmicas, sendo de 8% para a câmera térmica FLIR ONE Pro, de 10% para a câmera térmica INFIRAY C210 e 18% para a câmera térmica FLIR T620.

De modo geral, a mesma tendência é observada para as duas distâncias de medição (1 m e 2 m), com diferentes equipamentos utilizados, tendo a diminuição da capacidade de detecção com o aumento da profundidade do defeito. Os dias mais favoráveis (dias classificados como quentes) para uso da termografia por infravermelho, são resultantes dos maiores percentuais de capacidade de detecção das câmeras térmicas. A câmera termográfica com maior resolução térmica e menor sensibilidade térmica apresentou a maior capacidade de detecção durante todo o período do monitoramento.

4.1.4 Condições ambientais

Levando em consideração as condições ambientais no processo de medição da termografia por infravermelho, primeiramente, foi apresentada uma forma de classificação dos dias investigados, como meio de orientar sobre a amplitude do contraste térmico desenvolvido, voltada as condições ambientais, logo, verificar o maior ou menor nível de desempenho da inspeção termográfica. Posteriormente, foi detalhado o processo físico de aquecimento e resfriamento do concreto, sob dadas condições de exposição da estrutura. Com o intuito de elucidar os princípios básicos de avaliação de defeitos em estruturas de concreto com o uso da termografia por infravermelho. Também foi investigado os períodos (janelas de tempo) aplicáveis para inspecionar um determinado elemento de concreto sob dadas condições de exposição, identificando as condições ambientais adequadas para o uso da técnica infravermelha no material, concreto. A forma de classificação, o detalhamento do processo físico e a investigação dos períodos aplicáveis estão embasadas na revisão bibliográfica (itens 2.3 e 2.5 do capítulo 2) e nos dados experimentais obtidos.

À vista disso, algumas condições ambientais foram monitoradas, como, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação e radiação solar. Um resumo das condições ambientais monitoradas, durante o período de monitoramento (das 7:00 às 19:00), dos dias investigados estão na Tabela 20.

Tabela 20 – Condições ambientais monitoradas, durante o período de monitoramento (das 7:00 às 19:00), dos dias investigados.

Data	Temperatura Ambiente (°C)			Umidade Relativa do Ar (%)			Vento, velocidade (Km/h)		Vento, rajada máxima (Km/h)	Precipitação Total (mm)
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Média	Máxima		
24 de agosto	20,4	31,9	42,8	13,1	28,4	50,3	0,7	4,0	12,6 (horário: 14:00)	0
27 de agosto	16,0	19,0	21,0	79,0	85,0	96,0	2,8	9,9	14,2 (horário: 14:00)	0
09 de setembro	20,9	27,8	36,3	46,3	70,5	90,1	1,6	13,7	15,3 (horário: 12:00)	1,3 (horário: 16:00 - 1,2; horário: 19:00 - 0,1)
22 de setembro	16,2	20,8	29,3	34,6	48,8	59,7	3,3	7,2	19,6 (horário: 12:00)	0
11 de novembro	16,0	18,2	19,8	83,0	90,3	97,2	1,8	5,0	13,7 (horário: 11:00)	6,9 (horário: 15:00 às 19:00)
17 de novembro	18,6	32,7	42,5	26,1	39,9	68,8	1,9	9,9	15,84 (horário:11:00)	0

4.1.4.1 Forma de classificação dos dias investigados

Foi feita a classificação dos dias investigados em relação a estação do ano, condição de inspeção, dia e condição de exposição da superfície da estrutura. As informações dos períodos da estação do ano foram facilmente coletadas por dados da rede, disponíveis pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG). De acordo com o período de monitoramento (das 7:00 às 19:00), a condição de inspeção é diurna para todos os dias investigados. Foi feita a classificação de dia, quente ou frio, baseado nos valores de temperatura ambiente, apresentados na Tabela 20. E, a condição de exposição da superfície da estrutura, expostas a radiação solar direta ou baixa exposição solar direta (sombreadas), foi feita de forma qualitativa pelo inspetor, durante o período de monitoramento, das superfícies dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas. Os resultados, desta classificação, dos dias investigados estão na Tabela 21.

Tabela 21 – Classificação dos dias investigados em relação a condição de inspeção, a estação do ano, o dia e a condição de exposição da superfície da estrutura.

Data	Condição de inspeção	Estação do ano	Dia	Condição de exposição da superfície da estrutura
24 de agosto		Inverno		
09 de setembro	Inspeção diurna	Inverno	Quente	Expostas a radiação solar direta
17 de novembro		Primavera		
27 de agosto		Inverno		
22 de setembro	Inspeção diurna	Inverno / Primavera	Frio	baixa exposição solar direta (sombreadas)
11 de novembro		Primavera		

O intuito desta classificação, é nortear o inspetor, em um planejamento e durante uma avaliação de uma determinada superfície de concreto com o uso da termografia por infravermelho, sobre a amplitude do contraste térmico desenvolvido (indicador de capacidade de detecção de defeitos), voltada as condições ambientais.

Levando em consideração a estação do ano, Washer; Fenwick; Bolleni (2009), relata que, dias mais longos (tempo maior de exposição solar), como no verão, fornece maior contraste térmico do que em dias mais curtos (tempo menor de exposição solar), como no inverno.

Para os dias investigados, utilizou-se da ferramenta Sunrise Sunset Calendar para projeção dos dados do tempo de exposição solar, ou seja, a diferença dos horários, do nascer e do pôr do sol. Os dados de entrada do usuário para a coleta desses dados são: localização (importante a verificação da coordenada, latitude e longitude do local informado) e ano de interesse. A partir dos dados dos horários diários foi feito os cálculos dos horários médios mensais, do nascer e do pôr do sol, e calculado suas diferenças. Os resultados do tempo médio mensal de exposição solar para o ano de 2021 (ano do monitoramento) em relação a localização (no caso, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT) estão no Figura 41.

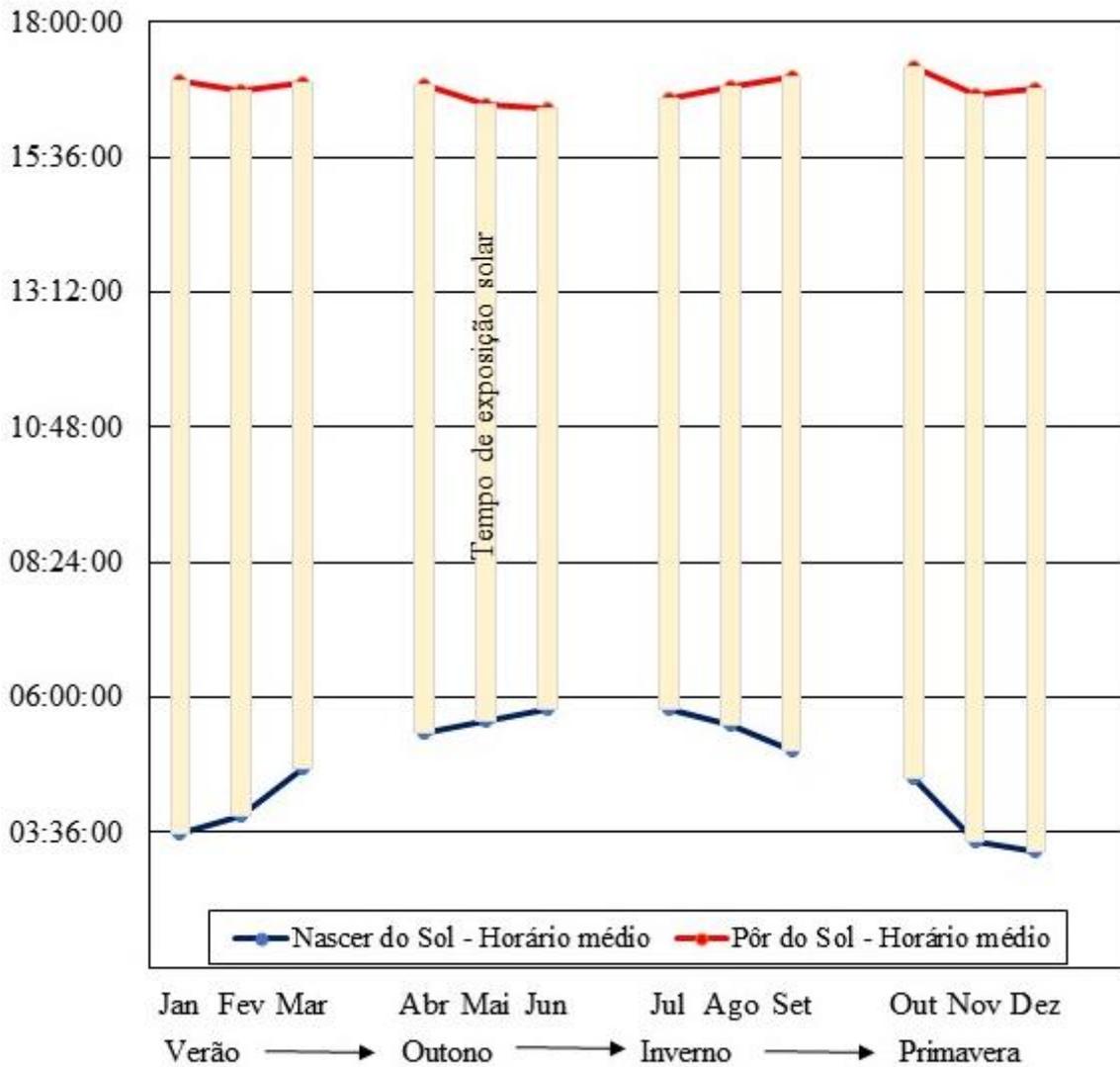


Figura 41 - Resultados do tempo médio mensal de exposição solar para o ano de 2021 (ano do monitoramento) em relação a localização (no caso, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT) (SUNEARTH TOOLS.COM, 2021).

Como pode ser visto na Figura 41, para as estações do ano, verão, outono, inverno e primavera, têm-se diferentes períodos de exposição solar, sendo que, o verão e a primavera apresentam períodos maiores de exposição solar em comparação com o outono e o inverno, logo, uma probabilidade maior de desempenho da inspeção termográfica.

Os resultados do tempo de exposição solar, para os dias investigados, em relação a estação do ano estão na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados do tempo de exposição solar, para os dias investigados, em relação a estação do ano (SUNEARTH TOOLS.COM, 2021).

Data	Estação do ano	Horário diário		Tempo de exposição solar
		Nascer do sol	Pôr do sol	
24 de agosto	Inverno	05:24:57	16:53:49	11:28:52
27 de agosto		05:22:14	16:54:51	11:32:37
09 de setembro		05:09:38	16:59:03	11:49:25
22 de setembro	Inverno/Primavera*	04:56:17	17:03:10	12:06:53
11 de novembro	Primavera	03:15:30	16:26:51	13:11:21
17 de novembro		03:13:22	16:30:53	13:17:31

* 22 de setembro é o dia de transição do inverno para a primavera (em 22 de setembro de 2021, às 16:21 é o fim do inverno e o início da primavera).

De acordo com a Tabela 22, voltada para os dias investigados, e a Figura 41, relacionada ao ano do monitoramento (2021), a primavera apresenta períodos maiores de exposição solar em comparação com o inverno.

Além do tempo de exposição solar que está relacionada a estação do ano, é necessário a classificação de dia, quente (maiores valores de temperatura ambiente) ou frio (menores valores de temperatura ambiente) e a condição de exposição da superfície da estrutura. A temperatura da superfície de concreto sobre a exposição solar direta, em um dia quente, é de aproximadamente 50°C. A transferência radiante de calor do sol resulta em um grande gradiente térmico no concreto. Quando o aquecimento radiante do sol não está disponível, a magnitude da mudança na temperatura ambiente que ocorre ao longo do tempo (dia ou noite) é o principal fator que influencia no desenvolvimento do contraste térmico do concreto. Sendo os contrastes térmicos desenvolvidos, muito menores do que aqueles que seriam impostos pelo aquecimento radiante do sol (conforme discutido no item 2.3 da revisão bibliográfica).

Com base nos dados experimentais obtidos, os dias mais quentes (24 de agosto, 09 de setembro e 17 de novembro) desenvolveram os maiores valores, de contrastes térmicos e de períodos úteis para a identificação do defeito, onde as superfícies dos corpos de prova de concreto, em grande parte do dia, estavam expostas ao carregamento solar direto. Em contrapartida, os dias mais frios (27 de agosto, 22 de setembro e 11 de novembro) desenvolveram os menores valores, de contrastes

térmicos e de períodos úteis para identificação do defeito, sendo as superfícies dos corpos de prova de concreto com baixa ou nenhuma exposição solar direta (sombreadas).

Com base nesta classificação adotada para os dias investigados, a seguir, será feito o detalhamento dos processos físicos de aquecimento e resfriamento do concreto em relação aos dois grupos claramente classificados (Tabela 21), como forma de esclarecer o funcionamento da técnica da termografia por infravermelho na detecção de defeitos no concreto, sob dadas condições ambientais e de exposição.

4.1.4.2 Detalhamento dos processos físicos de aquecimento e resfriamento das estruturas de concreto

Este item tem o intuito de detalhar os processos físicos de aquecimento e resfriamento das estruturas de concreto, sob dadas condições ambientais e de exposição. As condições ambientais investigadas são em relação aos dias, quente ou frio, e as diferentes condições de exposição da superfície da estrutura, expostas a radiação solar direta ou baixa exposição solar direta (sombreadas). Como visto, estas diferentes condições estão relacionadas com menor ou maior amplitude do contraste térmico desenvolvido e do período útil para identificação do defeito, sendo assim, resultantes no nível de desempenho da inspeção termográfica na detecção de defeitos em estruturas de concreto.

Durante um período de 24 horas, há processos de aquecimento e resfriamento das estruturas de concreto, sob condições ambientais e de exposição. Em relação ao período de monitoramento adotado (das 7:00 às 19:00), dispondo de um total de 12 horas de inspeção termográfica sobre as superfícies dos corpos de prova de concreto, foi possível abranger estes dois processos. Tal fato é indicado com base na medição direta das temperaturas, a partir dos termopares instalados no interior dos corpos de prova de concreto. Os resultados das temperaturas, do concreto íntegro e defeito, obtidas de forma direta a partir dos termopares, durante um período de 24 horas de monitoramento, sob dadas condições ambientais e de exposição estão na Figura . Levando em consideração, o período de monitoramento (das 7:00 às 19:00), o seu início corresponde ao resfriamento do concreto, proveniente dos menores valores de temperatura ambiente, durante o período noturno, em comparação com os maiores valores de temperatura, do concreto íntegro e defeito. Com o nascer do sol (exposição solar), os valores de temperatura ambiente, durante o período diurno, aumentam, gradativamente, dando início ao processo de aquecimento do concreto. No decorrer do período de monitoramento, com o pôr do sol (menor exposição solar), os valores de temperatura ambiente

diminuem, dando início, novamente, ao processo de resfriamento. Nestes casos, utilizou-se do parâmetro de temperatura ambiente para explicar as mudanças nos processos físicos, de aquecimento e resfriamento, do concreto, devido a facilidade do monitoramento deste parâmetro em campo. Tendo outras condições ambientais, como radiação solar, precipitação, vento e outras, responsáveis por estas mudanças térmicas.

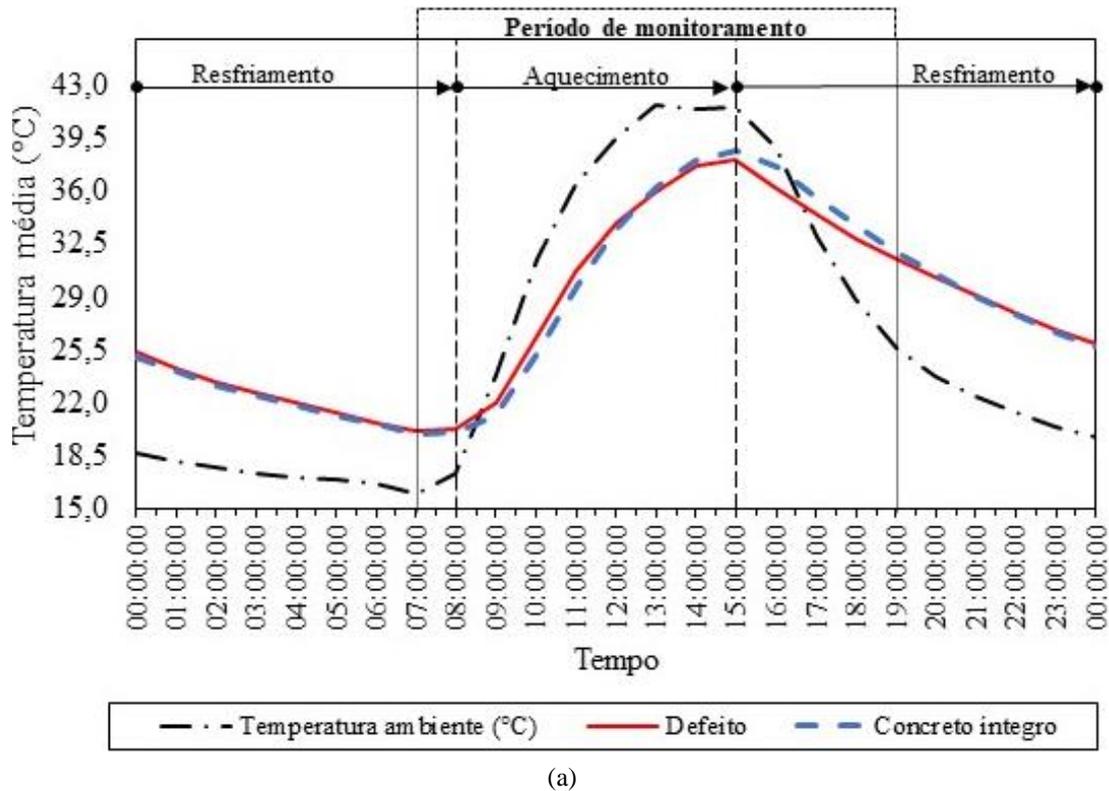
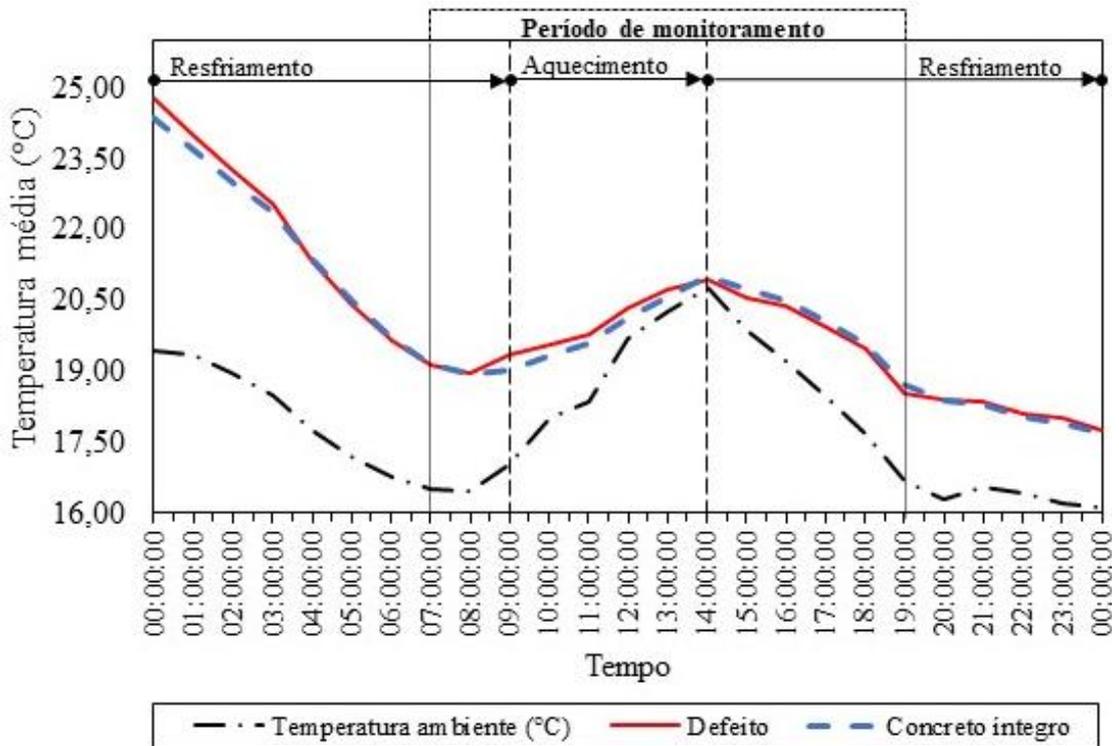
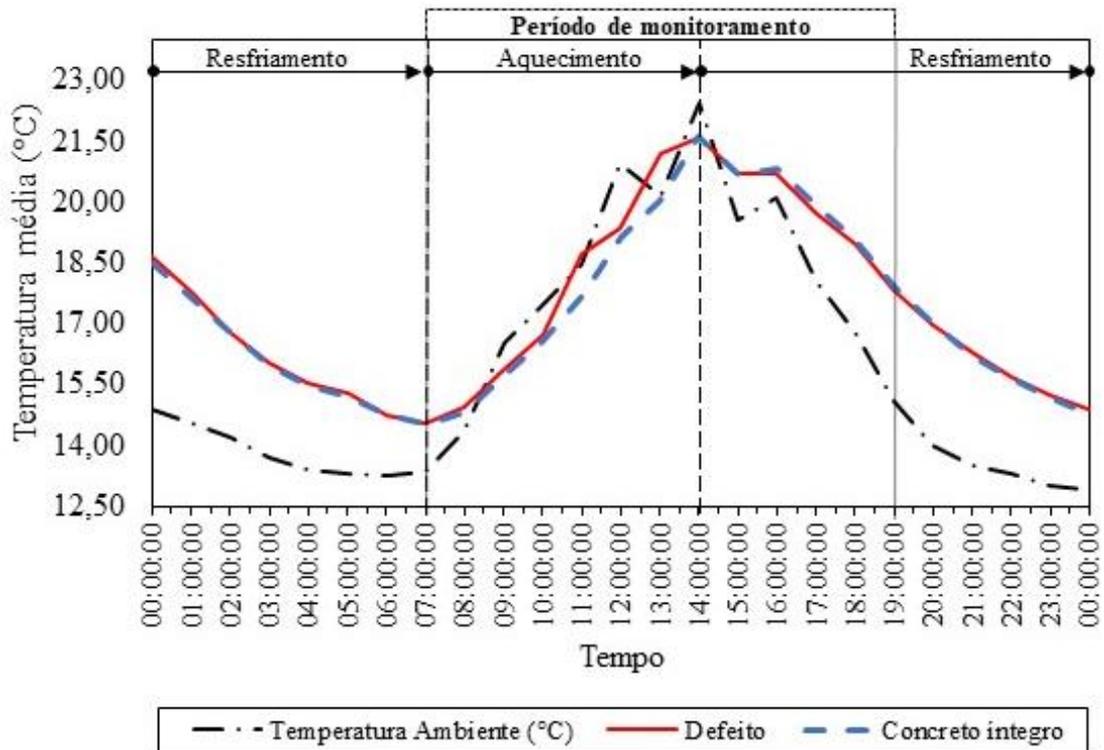


Figura 42 - Resultados das temperaturas, do concreto íntegro e defeito, obtidas de forma direta a partir dos termopares, durante um período de 24 horas de monitoramento, sob dadas condições ambientais e de exposição. (a) Dia quente e superfície exposta a radiação solar direta (24 de agosto); (b) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (27 de agosto) e (c) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (22 de setembro) (continua).



(b)



(c)

Figura 42 - Resultados das temperaturas, do concreto íntegro e defeito, obtidas de forma direta a partir dos termopares, durante um período de 24 horas de monitoramento, sob dadas condições ambientais e de exposição. (a) Dia quente e superfície exposta a radiação solar direta (24 de agosto); (b) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (27 de agosto) e (c) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (22 de setembro) (continuação).

Levando em consideração, a medição direta de temperatura a partir dos termopares, as temperaturas médias, do concreto íntegro e defeito, no interior do concreto, são maiores sobre a exposição solar direta, em um dia quente (Figura (a)), com valores de temperatura de aproximadamente 38°C, em comparação com as temperaturas médias, do concreto íntegro e defeito, sobre baixa exposição solar direta, em um dia frio (Figura (b) e (c)), com valores de temperatura em torno de 22°C a 25°C.

Os processos físicos de aquecimento e resfriamento das estruturas de concreto, conseqüentemente, as mudanças no sentido de fluxo de calor da estrutura, provocam diferentes condições nas temperaturas, da superfície e do interior do concreto. Levando em consideração as temperaturas de superfície, a qual a termografia por infravermelho avalia, há três diferentes condições de temperatura de superfície entre o concreto íntegro T_c e o defeito T_d em relação a um determinado processo físico (resfriamento, equilíbrio térmico ou aquecimento), sendo elas: a temperatura do concreto íntegro maior que a temperatura do defeito ($T_c > T_d$) para o processo de resfriamento, a temperatura do concreto íntegro igual a temperatura do defeito ($T_c = T_d$) em condição de equilíbrio térmico ou a temperatura do defeito maior que a temperatura do concreto íntegro ($T_d > T_c$) para o processo de aquecimento. Tais condições de temperatura de superfície para os diferentes processos físicos, podem ser evidenciadas com base nos dados obtidos em campo, onde foi feito a delimitação dos processos físicos com base nos valores de temperatura de superfície ao longo do tempo (análise quantitativa) e nos contrastes ou não de cores das imagens (análise qualitativa). Os resultados da delimitação dos processos físicos, resfriamento (1), equilíbrio térmico (2) e aquecimento (3), a partir dos valores das temperaturas médias de superfície, do concreto íntegro e defeito, e dos contrastes ou não de cores, obtidas a partir da captura dos termogramas, durante o período de monitoramento, sob diferentes condições ambientais e de exposição, estão na Figura 43.

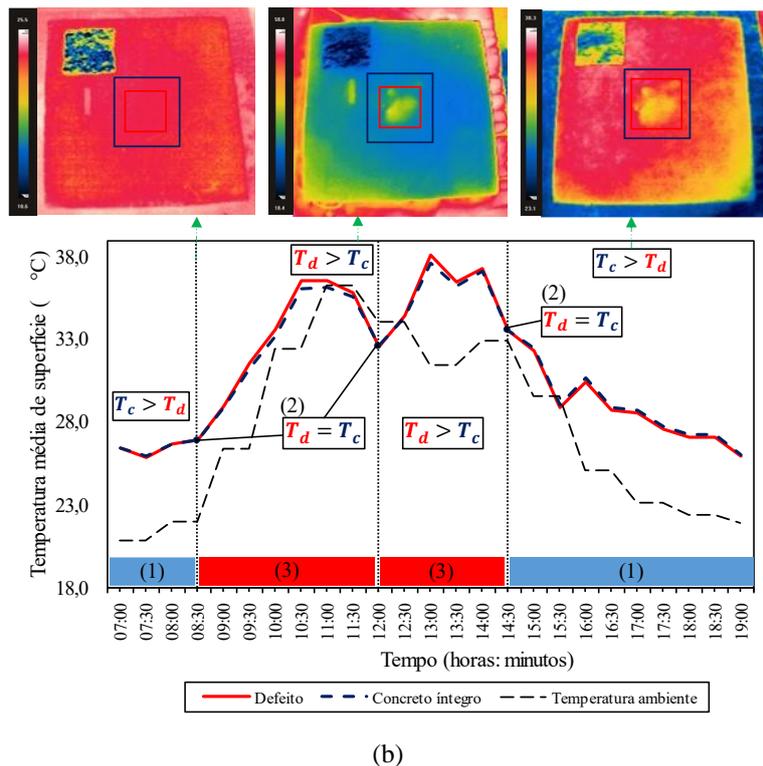
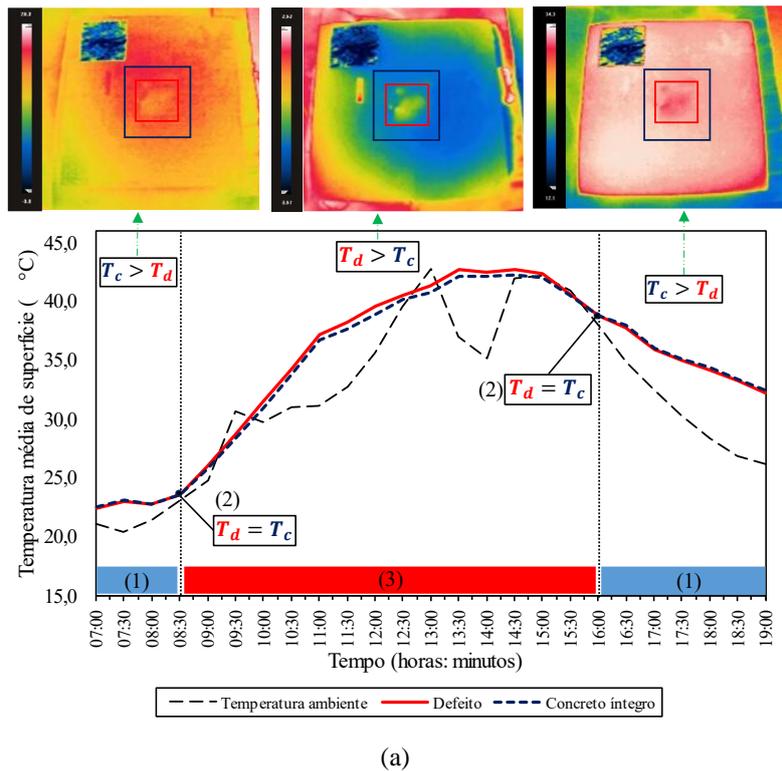
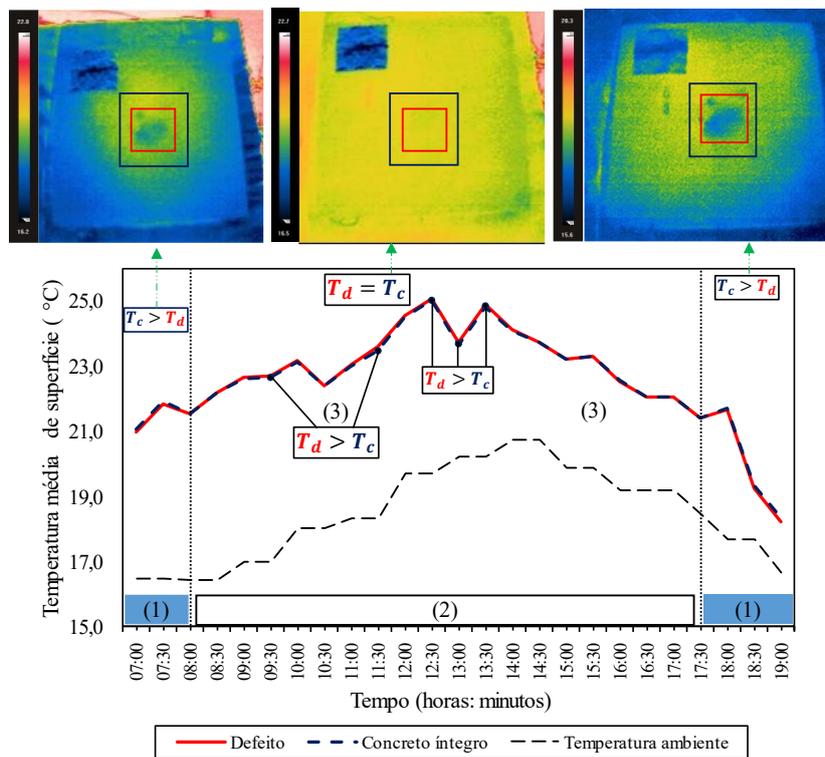
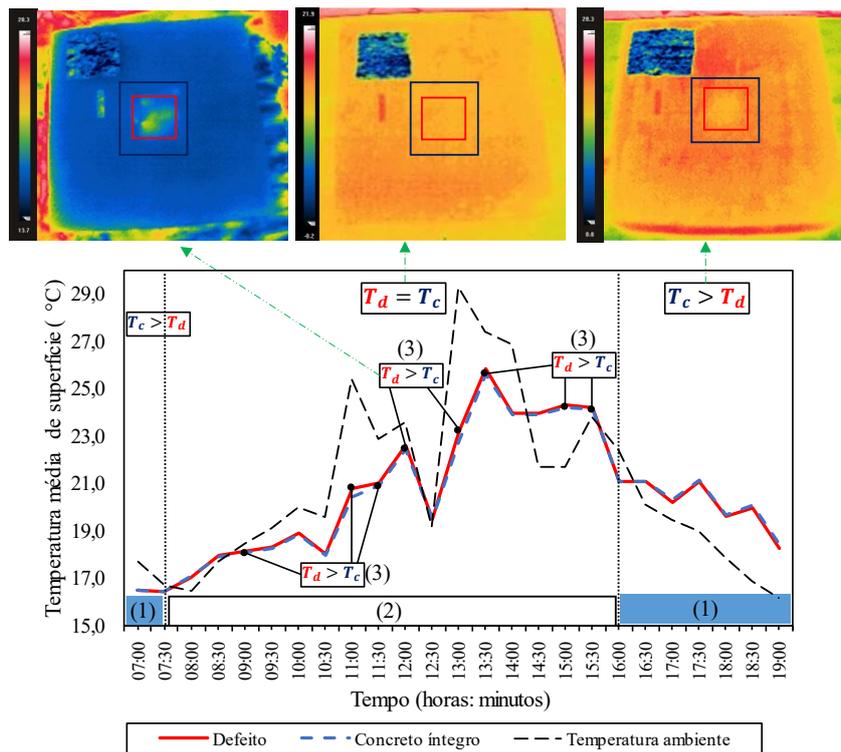


Figura 43 - Resultados da delineação dos processos físicos, resfriamento (1), equilíbrio térmico (2) e aquecimento (3), a partir das temperaturas médias de superfície, do concreto íntegro e defeito, e dos contrastes ou não de cores, obtidas a partir da captura dos termogramas, durante o período de monitoramento, sob diferentes condições ambientais e de exposição. a) Dia quente e superfície exposta a radiação solar direta (24 de agosto); (b) Dia quente e superfície exposta a radiação solar direta (09 de setembro); (c) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (27 de agosto) e (d) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (22 de setembro) (continua).



(c)



(d)

Figura 43 - Resultados da delineação dos processos físicos, resfriamento (1), equilíbrio térmico (2) e aquecimento (3), a partir das temperaturas médias de superfície, do concreto íntegro e defeito, e dos contrastes ou não de cores, obtidas a partir da captura dos termogramas, durante o período de monitoramento, sob diferentes condições ambientais e de exposição. (c) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (27 de agosto) e (d) Dia frio e superfície com baixa exposição solar direta (22 de setembro) (continuação).

Como evidenciado na Figura 43 (a), (b), (c) e (d), as condições de temperatura de superfície para os processos de aquecimento ou resfriamento, ou seja, sobre condições de fluxo de calor, resultantes de contrastes, térmicos (diferença dos dados de temperatura média de superfície ao longo do tempo, linha contínua e tracejada) ou de cor (imagens térmicas), conseqüentemente, a possibilidade da identificação do defeito no concreto.

Para o processo de aquecimento são desenvolvidos contrastes térmicos positivos, o oposto acontece para o processo de resfriamento. A termografia por infravermelho é capaz de detectar as diferenças de temperatura entre o concreto íntegro e defeito (contraste térmico), logo, a detecção do defeito, dependendo da amplitude do contraste térmico desenvolvido, que está relacionado com as condições do processo de medição, como as condições ambientais e de exposição. Em relação as condições ambientais e de exposição, os dois dias quentes investigados, com grande parte do período de monitoramento sobre a exposição solar direta, apresentaram períodos longos sobre fluxos de calor (aquecimento e resfriamento) (Figura 43 (a) e (b)), tendo uma maior possibilidade para a identificação do defeito, ou seja, maiores valores de contrastes térmicos foram desenvolvidos. Em contrapartida, os dias frios, com baixa exposição solar, foram identificados longos períodos sobre equilíbrio térmico, sem a possibilidade da identificação do defeito no concreto, logo, menores valores de contrastes térmicos foram desenvolvidos (Figura 43 (c) e (d)).

Como visto, o contraste térmico desenvolvido, sendo positivo ou negativo, é determinado a partir das mudanças no sentido de fluxo de calor no interior da estrutura de concreto (aquecimento ou resfriamento), apresentando diferentes condições de temperatura de superfície entre o concreto íntegro e defeito, para que seja possível a detecção do defeito ($T_d > T_c$ ou $T_c > T_d$). As diferentes condições de temperatura de superfície, são derivadas das distintas propriedades termofísicas entre o concreto íntegro e defeito, sob mudanças térmicas. Sobre a condição do processo de aquecimento da estrutura de concreto, foi visto que, a temperatura do defeito permanece mais quente que a temperatura do concreto íntegro, logo, é desenvolvido contraste térmico positivo. Para o entendimento deste processo, considere o fluxo de calor por condução no interior da estrutura de concreto, sob as mesmas condições. Sendo a condutividade térmica do concreto íntegro ($1,74 W/m.K$) muito maior que a condutividade térmica do defeito ($0,042 W/m.K$), aproximadamente 41 vezes superior, conforme as determinações experimentais das propriedades termofísicas dos materiais utilizados, concreto e poliestireno expandido (defeito artificial), para a confecção dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas (item 3.1.1). Esta maior condutividade térmica do concreto possibilita a melhor condução do calor pelo concreto íntegro do que pelo defeito, conseqüentemente, menores valores de temperatura de superfície são desenvolvidos na região sem o

defeito, influenciando na quantidade de radiação infravermelha emitida pela superfície entre as diferentes regiões (Figura 44 (a)). Enquanto, o processo de aquecimento há ganho de energia térmica (calor) por parte da estrutura de concreto. No processo inverso, resfriamento, há perda de energia térmica da estrutura de concreto para o ambiente. Sendo o calor específico volumétrico $\rho \cdot c$ (também conhecido por capacidade calorífica volumétrica), a propriedade que mede a capacidade dos materiais em armazenar energia térmica (conforme abordado no item 2.3.3. do Capítulo 2). A capacidade calorífica do concreto íntegro ($2.535.300 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$) é muito maior, aproximadamente 53 vezes superior, a capacidade calorífica do defeito artificial ($47.600 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$), conforme as determinações experimentais das propriedades termofísicas dos materiais utilizados (item 3.1.1). Sendo assim, o concreto íntegro apresenta menor capacidade de perder calor, ou seja, maior armazenamento da energia térmica em relação ao defeito, consequentemente, maiores valores de temperatura de superfície são desenvolvidos na região do concreto íntegro, influenciando na quantidade de radiação infravermelha emitida pela superfície entre as diferentes regiões (Figura 44 (b)).

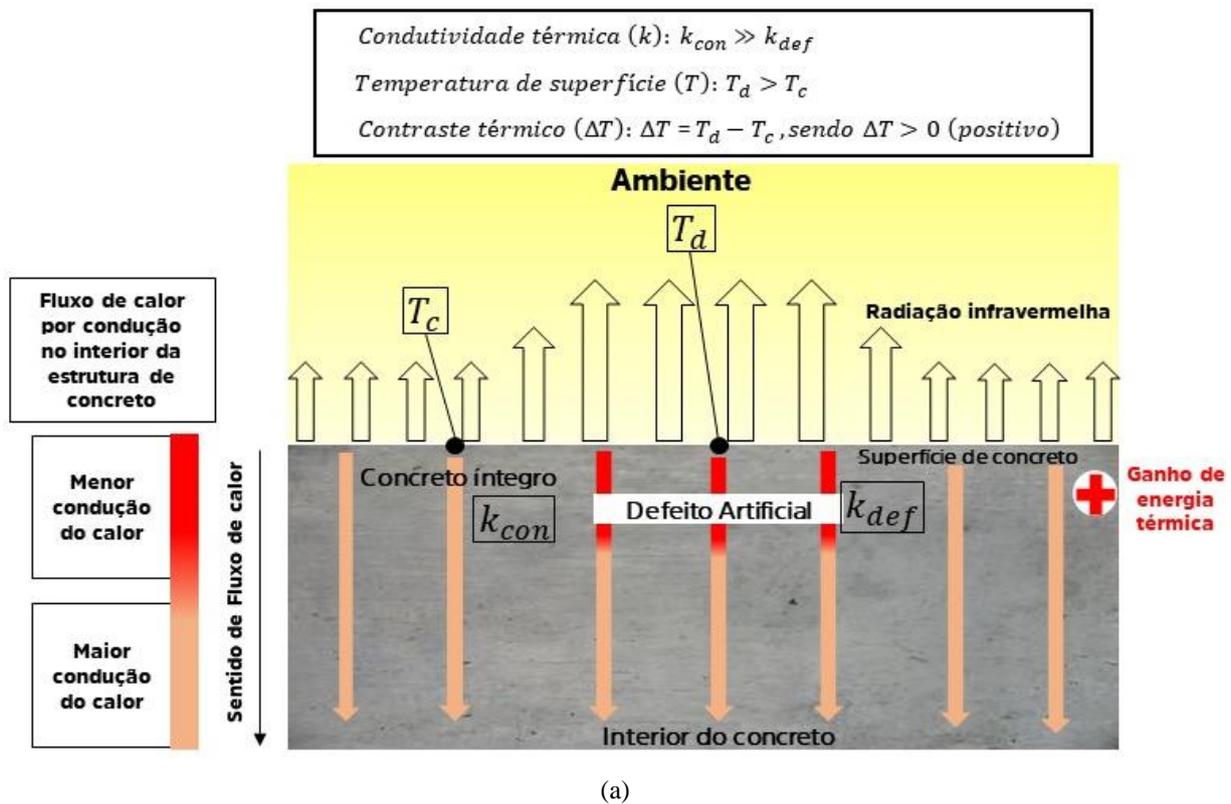


Figura 44 – Mudanças no sentido de fluxo de calor no interior da estrutura de concreto (aquecimento ou resfriamento), para que seja possível a identificação do defeito: (a) Condição do processo de aquecimento; (b) Condição do processo de resfriamento (continua).

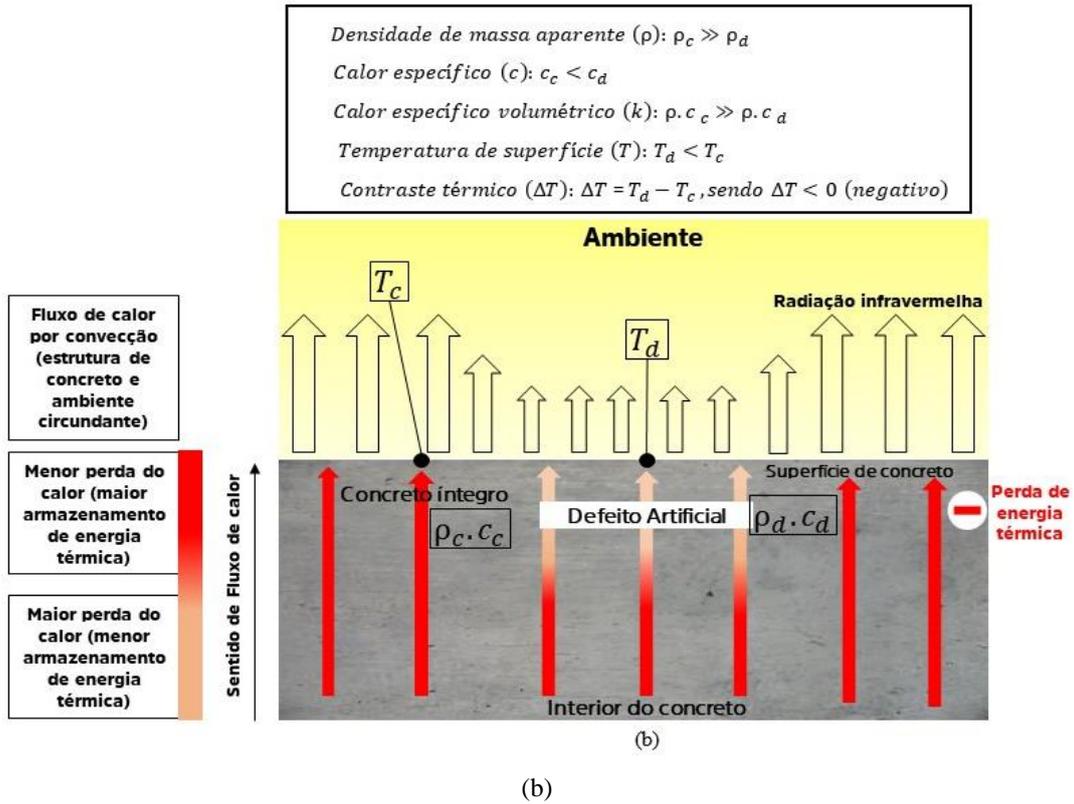


Figura 44 – Mudanças no sentido de fluxo de calor no interior da estrutura de concreto (aquecimento ou resfriamento), para que seja possível a identificação do defeito: (a) Condição do processo de aquecimento; (b) Condição do processo de resfriamento (continuação).

Conclusões

O programa experimental investigou a temperatura da superfície e o contraste térmico do concreto, ao longo do tempo, sob dadas condições monitoradas. Sendo elas, fixas (dosagem do concreto, propriedades térmicas dos materiais utilizados e tamanho, área e espessura, do defeito) e variáveis (objeto de análise: temperatura aparente refletida e emissividade da superfície, profundidade do defeito, especificações do equipamento utilizado, distância de medição e condições ambientais). Para tal, foram confeccionados três corpos de prova de concreto com falhas simuladas a profundidades: 1,0 cm (simulando um defeito superficial), 2,5 cm e 4,5 cm (valores de cobrimento nominal de estruturas de concreto, admitidos pela ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014)). Foi utilizado termografia passiva como meio de estímulo (o aquecimento solar diurno e o resfriamento noturno). O monitoramento ocorreu durante um período de 12 horas (das 7:00 às 19 horas), a partir da captura de termogramas com 3 câmeras térmicas de diferentes especificações técnicas, e termopares instalados no interior dos corpos de prova de concreto. Em softwares comerciais de análise de imagens térmicas, foi feita a avaliação, tanto de forma qualitativa (contraste de cor entre as diferentes áreas, concreto íntegro e defeito) e quantitativa (dados de temperatura). A partir dos resultados do programa experimental, os seguintes pontos podem ser concluídos:

- Os dados obtidos de forma experimental e teórica das propriedades termofísicas (calor específico, calor específico volumétrico, condutividade térmica, difusividade térmica e densidade de massa aparente) dos materiais utilizados (concreto e poliestireno expandido), estão dentro dos limites estabelecidos e de acordo com a norma brasileira, a ABNT NBR 15220-2 (ABNT, 2008). Sendo os métodos adotados para a caracterização desses materiais eficazes;
- Os diferentes dias de moldagem, com condições ambientais distintas e possíveis erros da mão de obra que possam ocorrer, durante todo o processo, proporcionaram variações consideráveis nos resultados das propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido para avaliação de sua qualidade. Sendo as mesmas influentes nas propriedades termofísicas, a extração de testemunhos dos próprios corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas a superfície e os mesmos submetidos aos ensaios de determinação das propriedades, poderia proporcionar uma caracterização do concreto mais fidedigna;
- O método refletor de medição e compensação da temperatura aparente refletida, descrito no ANEXO C da ABNT NBR 16969 (ABNT, 2021), apresentou uma alternativa eficaz em campo de verificar a influência do ambiente no processo de medição da temperatura

superficial do concreto, utilizando câmeras termográficas. Com procedimentos simples e executáveis para uma tarefa de campo, como uma inspeção de estrutura de concreto, e materiais facilmente disponíveis para a confecção do refletor infravermelho;

- A rugosidade do refletor infravermelho (papel alumínio) deve ser semelhante a superfície de concreto analisada, pois o acabamento da superfície, altera o seu modo de reflexão, logo, influencia na medição da temperatura aparente refletida;
- Os períodos de menor exposição solar (próximos ao nascer e pôr do sol), com baixas posições solares e superfícies menos favoráveis a exposição solar direta, apresentaram os menores valores de temperatura aparente refletida, logo, a menor influência do ambiente durante estes períodos;
- Os períodos de maior exposição solar (mais afastados do nascer e do pôr do sol), com altas posições solares e superfícies favoráveis a exposição solar direta, apresentaram os maiores valores de temperatura aparente refletida, logo, a maior influência do ambiente durante estes períodos;
- Os dias quentes apresentaram maiores valores de temperatura aparente refletida, logo, maior influência do ambiente em comparação com os dias frios;
- Correlacionando a temperatura ambiente com a temperatura aparente refletida, verifica-se uma forte correlação linear. Quanto maior a temperatura ambiente, maior a temperatura aparente refletida (influência do ambiente). Para a verificação da influência do ambiente, durante a obtenção dos termogramas em campo, o inspetor deve-se utilizar do parâmetro de temperatura ambiente;
- O método da emissividade conhecida para a medição e compensação da capacidade de emissão da superfície, descrito no ANEXO B da ABNT NBR 16969 (ABNT, 2021), apresentou uma alternativa eficaz em campo de determinar emissividade da superfície de concreto, utilizando câmeras termográficas. Com procedimentos simples e executáveis para uma tarefa de campo, como uma inspeção de estrutura de concreto, e materiais facilmente disponíveis, no caso, uma fita isolante com valor conhecido e uma alta emissividade.
- Os resultados demonstraram que, em uma situação de campo para o material concreto, o parâmetro de emissividade da superfície deve ser medido ao longo do tempo (mais de uma medição), valor médio;
- Acredita-se que, as condições ambientais do local, influentes nas distribuições de temperatura dentro e na superfície de concreto, possa ter a maior influência no processo de medição da emissividade da superfície. O aquecimento ou resfriamento não uniforme das superfícies de

concreto, também causados pelas condições ambientais do local, dificultam o processo de obtenção da emissividade, restringindo áreas cada vez menores de medição;

- A diferença, mínima e estável, de temperatura entre o ambiente e a superfície analisada, de $\pm 10^{\circ}\text{C}$, conforme especificado na ABNT NBR 16969 (ABNT, 2021), pode ser uma dificuldade encontrada em campo, durante o processo de medição da emissividade da superfície de concreto, aumentando assim os erros de medição;
- A alteração do parâmetro de temperatura aparente refletida ocasionou baixas variações nos valores de temperatura de superfície (concreto íntegro e defeito), convertidas pelo software de imagens térmicas, em relação a um material com alta capacidade de emissão. À medida que, a capacidade de emissão foi diminuída, o parâmetro de temperatura aparente refletida apresentou maiores variações nos valores de temperatura de superfície. Ou seja, maior influência do ambiente (temperatura aparente refletida) para um material com alta capacidade de reflexão (não sendo o caso do material, concreto);
- A alteração do parâmetro de emissividade da superfície ocasionou variações significativas nos valores de temperatura de superfície (concreto íntegro e defeito), convertidas pelo software de imagens térmicas, em relação a uma mesma temperatura aparente refletida. Quanto menor o valor de emissividade, ou seja, maior capacidade de reflexão, para uma mesma temperatura aparente refletida, maiores as temperaturas de superfície alcançadas. O conhecimento deste parâmetro torna-se imprescindível, principalmente em testes de materiais com características de baixa emissão de radiação, ou seja, alta reflexão, (não sendo o caso do material, concreto).
- As propriedades do objeto de análise influenciaram na capacidade de detecção de defeitos no concreto com uso da termografia por infravermelho, medidos a partir do contraste térmico (indicador de capacidade de detecção). O parâmetro de emissividade da superfície apresentou uma maior influência na capacidade de detecção de defeitos do que a temperatura aparente refletida.
- A alteração da profundidade do defeito ocasionou variações na temperatura de superfície (concreto íntegro e defeito). Maiores valores de temperatura de superfície foram desenvolvidos nos termogramas em relação a menor profundidade adotada (1,0 cm). À medida que, maiores profundidades foram alcançadas (2,5 cm e 4,5 cm) menores valores de temperatura de superfície foram desenvolvidos nos termogramas. Os dados experimentais concordaram com a revisão bibliográfica, indicando que, um defeito mais profundo tem menos influência na temperatura superficial resultante do que um defeito próximo a superfície;

- A menor profundidade do defeito adotada (1,0 cm) foi resultante dos maiores valores de contraste térmico, logo, uma maior nitidez no contraste de cor (concreto íntegro e defeito) dos termogramas foram encontradas (maior capacidade de detecção) em comparação com as demais profundidades adotadas (2,5 cm e 4,5 cm), onde menores valores de contraste térmico foram desenvolvidos e uma menor nitidez no contraste de cor foi alcançada (menor capacidade de detecção). Os dados experimentais concordaram com a revisão bibliográfica, indicando que, o aumento da profundidade do defeito, torna-se mais difícil a detecção pela câmera termográfica;
- O modelo de faixas de contraste térmico para a detecção ou não de defeitos no concreto utilizando a termografia por infravermelho, proposto por Hiasa; Birgül; Catbas (2017) (Figura 16 da revisão bibliográfica) concordaram com os dados experimentais e as análises obtidas, deste programa experimental. O contraste térmico mínimo deve ser superior $\pm 0,2$ °C para que seja possível a detecção do defeito no concreto com a câmera termográfica;
- As três profundidades do defeito investigadas foram detectadas pelas câmeras térmicas em diferentes distâncias de medição (1 m e 2 m) e sob dadas condições ambientes e de exposição da superfície, apresentando uma diminuição da capacidade de detecção e menor desempenho das câmeras térmicas, quanto maior a profundidade do defeito e menor temperatura ambiente, pois menores valores de contrastes térmicos e curtos períodos úteis, foram obtidos;
- A câmera térmica com maior resolução térmica e menor sensibilidade térmica apresentou a maior capacidade de detecção e um melhor desempenho na identificação de defeitos no concreto, em função do contraste térmico obtido, da profundidade do defeito detectado e do período útil para detecção do defeito, principalmente nos dias mais favoráveis (os dias quentes);
- Os dias menos favoráveis (os dias frios) apresentaram menor capacidade de detecção e baixo desempenho na identificação de defeitos no concreto para diferentes câmeras térmicas a uma mesma distância de medição;
- As diferentes condições (ambientais e de exposição da superfície) estão relacionadas com menor ou maior amplitude do contraste térmico desenvolvido e do período útil para identificação do defeito, sendo assim, resultantes no nível de desempenho da inspeção termográfica na detecção de defeitos em estruturas de concreto;
- Os dias mais quentes desenvolveram os maiores valores, de contrastes térmicos e de períodos úteis (longos períodos sobre fluxos de calor, aquecimento ou resfriamento) para a identificação do defeito, onde as superfícies dos corpos de prova de concreto, em grande parte do dia, estavam expostas ao carregamento solar direto. Em contrapartida, os dias mais frios

desenvolveram os menores valores, de contrastes térmicos e de períodos úteis para identificação do defeito (longos períodos sobre equilíbrio térmico), sendo as superfícies dos corpos de prova de concreto com baixa ou nenhuma exposição solar direta (sombreadas).

Para concluir, fundamentado na revisão bibliográfica e nos dados obtidos do programa experimental, é proposto uma ferramenta de análise visual, o Diagrama de Ishikawa (também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito, Espinha de Peixe ou ainda Diagrama 6M), com o intuito de organizar, categorizar e orientar, de forma clara e simples, as principais causas que influenciam de forma direta no uso da termografia por infravermelho para inspeção de estruturas de concreto. A partir de um processo a ser cumprido, foi utilizado das 6 causas já pré-estabelecidas, visto que, os fatores intervenientes na aplicação da técnica por infravermelho em estruturas de concreto, ajustaram-se a esta categorização. Nesta ilustração não há sua respectiva ordenação em relação a níveis de importância, todas as causas influenciam em maior ou menor nível durante todo o processo. Foi feita a descrição dos subníveis, como forma de elucidar esta categorização. O Diagrama de Ishikawa proposto é apresentado na Figura 45:

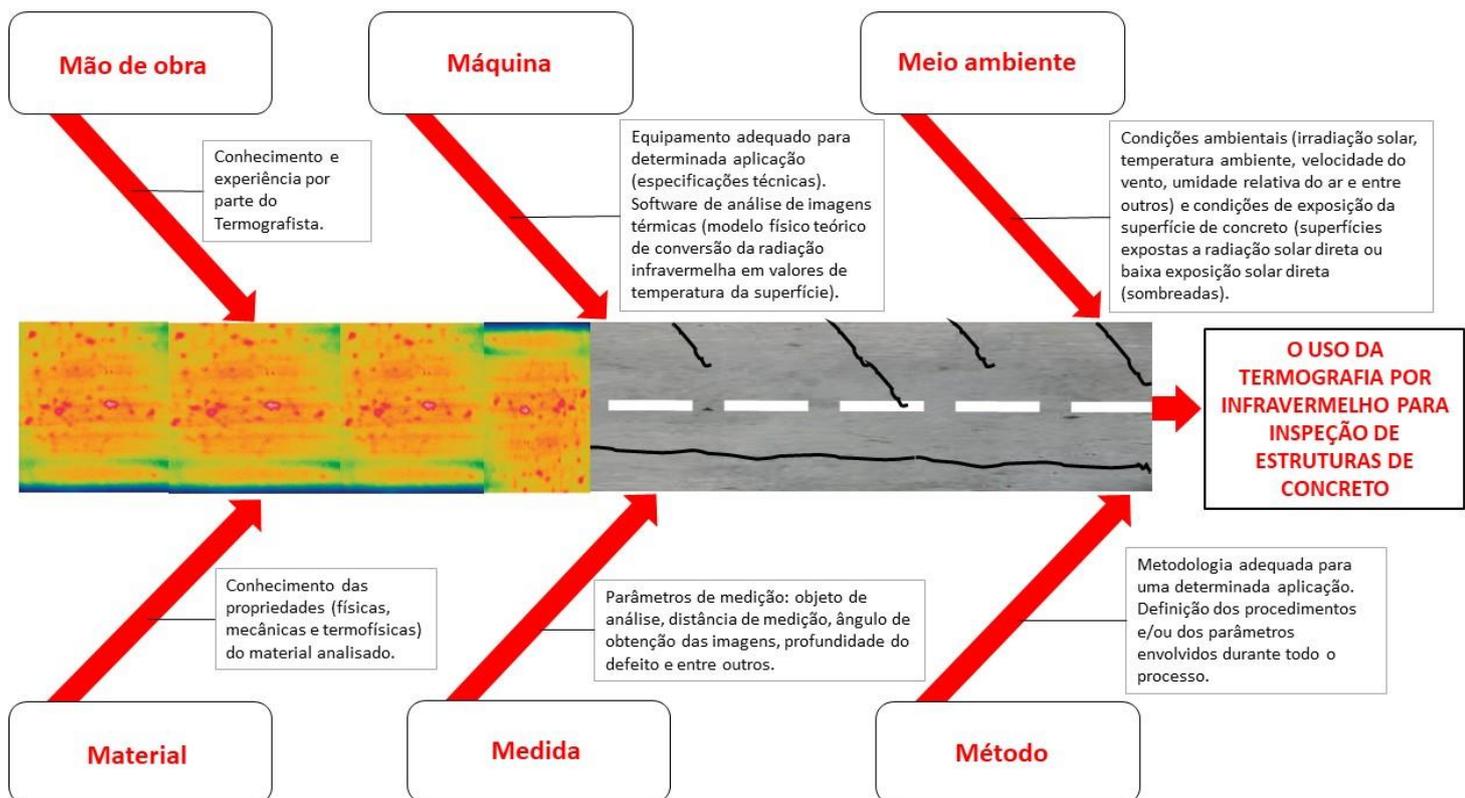


Figura 45 - Diagrama de Ishikawa: organização e categorização das causas (baseado nos 6M) em relação ao uso da termografia por infravermelho para inspeção de estruturas de concreto (processo).

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **ABNT NBR 9452**: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **ABNT NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **ABNT NBR 12818**: Concreto — Determinação da difusividade térmica — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **ABNT NBR 12820**: Concreto endurecido — Determinação da condutividade térmica — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **ABNT NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **ABNT NBR 15220-4**: Desempenho térmico de edificações Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **ABNT NBR 15220-5**: Desempenho térmico de edificações Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2005

_____. **ABNT NBR 15424**: Ensaios não destrutivos — Termografia — Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **ABNT NBR 16230**: Inspeção de estruturas de concreto — Qualificação e certificação de pessoal — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **ABNT NBR 16969**: Ensaios não destrutivos — Termografia infravermelha — Princípios gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **ABNT NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

_____. **ABNT NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **ABNT NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service** (ACI 201.1R-08). ACI Committee 201. Detroit, USA, 2008.

_____. **Protection of Metals in Concrete Against Corrosion** (ACI 222R-01. **222R-01**). ACI Committee 222. Detroit, USA, 2001.

_____. **Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures** (ACI 228.2R. **228.2R-98**). ACI Committee 228. Detroit, USA, 1998.

_____. Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures (ACI 228.2R-13). ACI Committee 228. Detroit, USA, 2013.

AGGELIS, D. G. et al. Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 10, p. 1888–1897, 2010.

AHLBORN, T. M.; BROOKS, C. N. Evaluation of bridge decks using non-destructive evaluation (NDE) at near highway speeds for effective asset management. **Michigan Department of Transportation Michigan (MDOT)**. Michigan Technological University, 2015.

AL-HADHRAMI, L. M. et al. Assessing concrete density using infrared thermographic (IRT) images. **Infrared Physics & Technology**, v. 55, n. 5, p. 442–448, 2012.

ANDRADE, R. P. DE. Uso da termografia infravermelha embarcada em drone como ferramenta para a inspeção de patologias em revestimentos aderidos de fachada. 2020. Dissertação (Mestrado) - Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D4788-03**: Standard test method for detecting delaminations in bridge decks using infrared thermography. ASTM International, 2013.

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

BARREIRA, E. **Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higratérmico dos edifícios**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2004.

BRITEZ, C. A. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas**. 2011. Tese (Doutorado) - Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2011.

BROWN, J. R.; HAMILTON, H. R. Heating methods and detection limits for infrared thermography inspection of fiber-reinforced polymer composites. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 5, p. 481- 490, 2007.

CANNAS, B. et al. Modeling of active infrared thermography for defect detection in concrete structures. Excerpt from the **Proceedings** of the 2012 COMSOL Conference in Milan, 2012.

CLARK, M. R.; MCCANN, D. M.; FORDE, M. C. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. **NDT & E International**, Structural Faults and Repair. v. 36, n. 4, p. 265–275, 2003.

COTIČ, P. et al. Determination of the applicability and limits of void and delamination detection in concrete structures using infrared thermography. **NDT & E International**, v. 74, p. 87–93, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias**. 2 ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2004.

FARRAG, S.; YEHA, S.; QADDOUMI, N. Investigation of mix-variation effect on defect-detection ability using infrared thermography as a nondestructive evaluation technique. **Journal of Bridge Engineering**, v. 21, n. 3, p. 04015055, 2016.

FLIR SYSTEMS. **User's manual FLIR Exx series**. [s.l: s.n.], 2010.

FLIR SYSTEMS. **The ultimate infrared handbook for r&d professionals**. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T559243/T559243_EN.pdf > Acesso em: 15 junho de 2021.

GOOGLE EARTH. Localização do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Disponível em: https://google-earth.gosur.com/?gclid=Cj0KCQjw0K-HBhDDARIsAFJ6UGiy7Qc51-LA2JIrEB7K9uN922msjLycGhk3siBKWXY13b2FhnkDoEwaAqsBEALw_wcB&ll=-23.55614798608164,-46.73737920000002&z=15.943010095515742&t=satellite > Acesso em: 12 jul. 2021.

GOOGLE MAPS. Localização do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Disponível em: <https://www.google.com/maps/place/IPT+-+Instituto+de+Pesquisas+Tecnol%C3%B3gicas/@-23.5568168,-46.7369402,718m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x94ce56111f23979f:0x4efc1ff99667559c!8m2!3d-23.5568211!4d-46.7347484> >. Acesso em: 12 jul. 2021.

GUCUNSKI, N. et al. **Nondestructive testing to identify concrete bridge deck deterioration**. Strategic Highway Research Program. Report (Report S2 - R06A - RR - 1). Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2012. p. 22771.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília, DF: Senai, 1992.

HIASA, S. **Investigation of infrared thermography for subsurface damage detection of concrete structures**. 2016. Dissertation (Doctor) - College of engineering and computer science, University of Central Florida, 2016.

HIASA, S.; BIRGUL, R.; CATBAS, F. N. Investigation of effective utilization of infrared thermography (IRT) through advanced finite element modeling. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 295–309, 2017.

HIASA, S.; BIRGÜL, R.; CATBAS, N. Effect of Defect Size on Subsurface Defect Detectability and Defect Depth Estimation for Concrete Structures by Infrared Thermography. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 36, 2017.

HIASA, S.; BIRGUL, R.; NECATI CATBAS, F. A data processing methodology for infrared thermography images of concrete bridges. **Computers & Structures**, v. 190, p. 205–218, 2017.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Sexta Edição ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KEE, S.-H. et al. Nondestructive Bridge Deck Testing with Air-Coupled Impact-Echo and Infrared Thermography. **Journal of Bridge Engineering**, v. 17, n. 6, p. 928–939, 2012.

KHAN, F. et al. Modeling and experimental implementation of infrared thermography on concrete masonry structures. **Infrared Physics & Technology**, v. 69, p. 228–237, 2015.

LANZONI, D. (ED.). **Infrared Thermography: Electrical and Industrial Applications**. [s.l: s.n.], 2010.

MAIERHOFER, CH.; ARNDT, R.; RÖLLIG, M. Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography. **Infrared Physics & Technology**, v. 49, n. 3, p. 213–217, 2007.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. Second Edition. Boca Raton; London; New York Washington, D.C.: CRC Press LLC, 2003. Chapter 15, p. 15-1 - 15-3.

Souza, G. T. Utilização de imagens em infravermelho para análise térmica de componentes construtivos. 2010. Dissertação (Iniciação científica) - Programa Institucional de bolsas de iniciação científica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª Edição. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2014. Capítulo 11, p. 474 - 476.

MOURA, L. M. **Desenvolvimento de um protótipo de equipamento de placa quente protegida**. 1993. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós-graduação em engenharia mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

PINTO, P. R. F. **Medição de propriedades térmicas pelo método fluximétrico - desenvolvimento de equipamento**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós-graduação em engenharia urbana e ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015.

ROCHA, J. H. A.; PÓVOAS, Y. V. Detección De Delaminaciones En Puentes De Concreto Armado Usando Termografía Infrarroja. **Revista ingeniería de construcción**, v. 34, n. 1, p. 55–64, 2019a.

ROCHA, J. H. A.; PÓVOAS, Y. V. Detecção de corrosão em concreto armado com termografia infravermelha e ultrassom. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 3, p. 53–68, 2019b.

ROCHA, J. H. A.; PÓVOAS, Y. V.; SANTOS, C. F. Detection of Delaminations in Sunlight-Unexposed Concrete Elements of Bridges Using Infrared Thermography. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 38, n. 1, p. 8, 2018.

ROCHA, J. H. A.; TAVARES, Y. V. P. A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte. **Revista ALCONPAT**, v. 7, n. 3, p. 200–214, 2017.

RUMBAYAN, R.; WASHER, G. A. Modeling of environmental effects on thermal detection of subsurface damage in concrete. **Research Nondestructive Evaluation**, 25: 4, p. 235 - 252, 2014.

SANTOS, L. et al. As diferentes visões sobre a termografia no sistema elétrico de furnas e as ações adotadas para buscar a convergência entre elas, com a máxima operacionalidade, produtividade e confiabilidade do sistema. **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)**, 2005.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo (SP): Pini, 1998.

SUNEARTH TOOLS.COM. SunEarth Tools.com Ferramentas para designers e consumidores de energia solar. Disponível em: <https://www.sunearthtools.com/> >. Acesso em: 8 jul. 2021.

TANG, Z. 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.

TELEDYNE FLIR. FLIR lança gerador de imagens térmicas Recon V UltraLite. Disponível em: <https://www.flir.com.br/news/government--defense-news/flir-launches-recon-v-ultralite-thermal-monocular/> >. Acesso em: 15 jun. 2021.

TELEDYNE FLIR. FLIR apresenta a próxima geração de câmeras termográficas para todas as condições climáticas em veículos autônomos. Disponível em: <https://www.flir.com.br/news/camera-cores--components-news/all-weather-thermal-cameras-coming-to-a-self-driving-car-near-you/> >. Acesso em: 15 jun. 2021a.

TELEDYNE FLIR. FLIR lança sua primeira câmera não refrigerada de detecção de gás metano. Disponível em: <https://www.flir.com.br/news/press-releases/flir-launches-its-first-uncooled-methane-gas-detection-camera/> >. Acesso em: 15 jun. 2021b.

TELEDYNE FLIR. **O Eclipse Lunar Visualizado em Câmera Termográfica**. Disponível em: <https://www.flir.com.br/discover/rd-science/lunar-eclipse-when-viewed-in-thermal/> >. Acesso em: 15 jun. 2021c.

TELEDYNE FLIR. Pesquisadores estudam as geleiras em degelo usando imagens térmicas obtidas por drones. Disponível em: <https://www.flir.com.br/discover/rd-science/researchers-study-retreating-glaciers-using-thermal-drone-imagery/> >. Acesso em: 15 jun. 2021a.

TELEDYNE FLIR. A FLIR Systems anuncia câmeras termográficas modificadas específicas para triagem de temperatura elevada da pele. Disponível em: <https://www.flir.com.br/news/public-safety-transportation-news/flir-systems-announces-modified-thermal-cameras-specified-for-elevated-skin-temperature-screening/> >. Acesso em: 15 jun. 2021b.

TRAN, Q. H. et al. Effects of ambient temperature and relative humidity on subsurface defect detection in concrete structures by active thermal imaging. **Sensors**, v. 17, n. 8, p. 1718, 2017.

VAGHEFI, K. Application of thermal ir imagery for concrete bridge inspection. p. 13, 2011.

VAGHEFI, K. **Infrared thermography enhancements for concrete bridge evaluation**. 2013. Dissertation (Doctor) - Department of civil and environmental engineering - Michigan Technological University, 2013.

VOLLMER, M.; MOLLMANN, K.-P. **Infrared Thermal Imaging**. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.

VOTORANTIM CIMENTOS BRASIL S.A. Ficha de informações de segurança de produtos químicos – FISPQ – Revisão nº00 06/01/2020 produto: cimento portland, 2020. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/wp-content/uploads/2017/11/fispq-cimento-rev-00-2020.pdf>

WASHER, G. Advances in the use of thermographic imaging for the condition assessment of bridges. **Bridge Structures** 8, p. 81 - 90, 2012.

WASHER, G. et al. Guidelines for Thermographic Inspection of Concrete Bridge Components in Shaded Conditions. **Transportation Research Record**, v. 2360, n. 1, p. 13–20, 2013.

WASHER, G. et al. Field Testing of Hand-Held Infrared Thermography. **Phase II TPF-5(247) Interim Report**. Department of Civil and Environmental Engineering: University of Missouri-Columbia, 2015.

WASHER, G.; FENWICK, R.; BOLLENI, N. Development of Hand-Held Thermographic Inspection Technologies. **Organizational Results Research Report**. University of Missouri - Columbia; Missouri Department of Transportation, 2009.

WATASE, A. et al. Practical identification of favorable time windows for infrared thermography for concrete bridge evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 1016–1030, 2015.

WASHER, G.; FENWICK, R.; BOLLENI, N. Development of Hand-Held Thermographic Inspection Technologies. **Organizational Results Research Report**. University of Missouri - Columbia; Missouri Department of Transportation, 2009.

Apêndice A – Determinação das propriedades termofísicas dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova

Foi feita a determinação experimental das propriedades termofísicas, como, resistência térmica, calor específico e densidade de massa aparente dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas próximas a superfície. A condutividade térmica, calor específico volumétrico e difusividade térmica foram determinadas a partir dos resultados obtidos experimentalmente e de relações (leis físicas).

Os ensaios foram realizados em parceria com o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os ensaios realizados, os elementos ensaiados e as metodologias utilizadas para a determinação das propriedades termofísicas dos materiais, concreto e falha de poliestireno expandido, estão detalhados na Tabela 23.

Tabela 23 - Ensaio realizados, elementos ensaiados e as metodologias utilizadas para a determinação das propriedades termofísicas dos materiais (concreto e falha de poliestireno expandido)

Ensaio	Elemento ensaiado	Metodologia utilizada
Resistência térmica	Corpos de prova prismáticos: concreto (dimensões nominais: 100mm x 100mm x 10mm) e falha de poliestireno expandido (dimensões nominais: 100mm x 10mm x 10 mm)	ISO 8301:1991/AMD 1:2010 e ABNT NBR 15220 – 5:2005 (ABNT, 2005)
Calor específico		ABNT NBR 12817:2012 (ABNT, 2012)
Densidade		ABNT NBR 13280:2005 (ABNT, 2005) e ABNT NBR 13440:2013 (ABNT, 2013)

Como mostrado na Tabela 23, os ensaios das propriedades termofísicas dos materiais foram realizados de forma individualizada em relação ao elemento ensaiado, com dois corpos de prova de concreto¹⁷ prismáticos (CP1 e CP2) com dimensões nominais de 100mm x 100mm x 50mm (Figura 46 (b)), e uma amostra de falha de poliestireno expandido (EPS) com dimensões nominais de 100 mm x 100mm x 10mm (Figura 46 (c)). Essas dimensões foram determinadas em conformidade com o CB3E.

¹⁷ As especificações e as propriedades do concreto nos estados, fresco e endurecido, estão no **APÊNDICE B**.

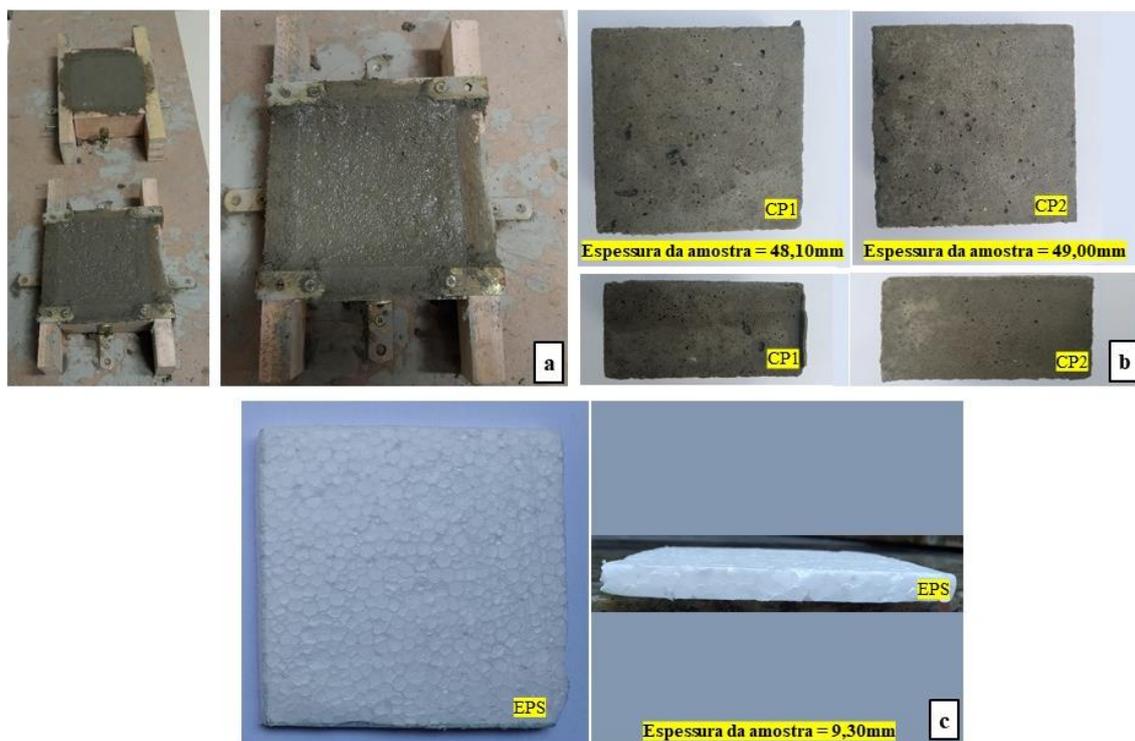


Figura 46 - Elementos utilizados para a realização dos ensaios das propriedades termofísicas: (a) moldagem dos corpos de prova de concreto (b) corpos de prova de concreto (CP1 e CP2) e (c) folha de poliestireno expandido (EPS).

A moldagem dos corpos de prova de concreto prismáticos foi feita de acordo com a ABNT NBR 5738 (2015). O adensamento foi manual devido a classe de consistência do concreto utilizado, S100 (Abatimento em mm: $100 \leq A < 160$). Para a determinação do número de camadas, assim como da quantidade de golpes, adotou-se a dimensão básica (d) mínima de 100mm, com uma única camada e 75 golpes para o adensamento manual. Os corpos de prova de concreto prismáticos foram curados em câmara úmida até a idade de 28 dias para os ensaios (Figura 46 (a)).

Para o controle da qualidade do concreto produzido foram moldados corpos de prova cilíndricos (dimensões: 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) seguindo os mesmos procedimentos de moldagem. No caso dos corpos de prova cilíndricos devido a altura de 200mm, o adensamento foi realizado em 4 camadas de 75 golpes, garantindo as mesmas condições dos corpos de prova prismáticos. Os corpos de prova cilíndricos foram curados em câmara úmida até a idade de 28 dias, onde a partir desta idade foram realizados os ensaios de resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios, como forma de obter os parâmetros (resistência mecânica, porosidade e idade) relacionando com as propriedades termofísicas obtidas experimentalmente (Tabela 24).

Tabela 24 - Resultados de resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios de corpos de prova cilíndricos de concreto aos 28 dias

Resistência do concreto à compressão, aos 28 dias (Mpa)	Resistência média do concreto à compressão, aos 28 dias (Mpa)	Absorção de água após imersão (sem fervura)	Absorção média de água após imersão	Índice de vazios	Índice de vazios médio
41,807	44,058 ± 2,251	5,5%	5,42 ± 0,03 (%)	12,43%	12,38 ± 0,04 (%)
46,308		5,4%		12,34%	

O detalhamento da determinação das propriedades termofísicas, experimental e teórica, dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de concreto com falhas simuladas, é apresentado nos itens a seguir.

Determinação da resistência térmica

O método de ensaio foi utilizando técnicas fluximétricas para medir a resistência térmica em regime estacionário, através de corpos de prova na forma de placas planas (no caso, prismáticos de base quadrada) (Figura 46 (b) e (c)), podendo-se deduzir por cálculo a condutividade térmica caso o material seja considerado homogêneo, conforme a ABNT NBR 15220-5 (ABNT, 2005)¹⁸.

Em relação ao fenômeno físico do ensaio, inicialmente, deve-se estabelecer uma condição inicial isotérmica em toda a espessura do corpo de prova (equilíbrio térmico). O princípio do método de medição da resistência térmica consiste na aplicação de uma densidade de fluxo de calor constante (regime estacionário), estabelecido pelo gradiente de temperatura ($\Delta T = T_2 - T_1$) nas faces do corpo de prova em condições estáveis (distribuição de temperaturas uniformes nas faces, superfícies isotérmicas), a partir do uso de placas, quente e fria (temperaturas: $T_2 > T_1$), até o sistema atingir uma condição de equilíbrio térmico. Esse fluxo de calor constante atravessa o corpo de prova e, através da zona central de medição, ou seja, com a utilização de um fluxímetro superior, registra-se o fluxo de calor que entra e, um fluxímetro inferior, registra-se o fluxo de calor que sai, podendo-se obter o gradiente de temperatura das faces (Figura 47).

¹⁸ A ABNT NBR 15220-5 (2005) é baseada na ISO 8301:1991.

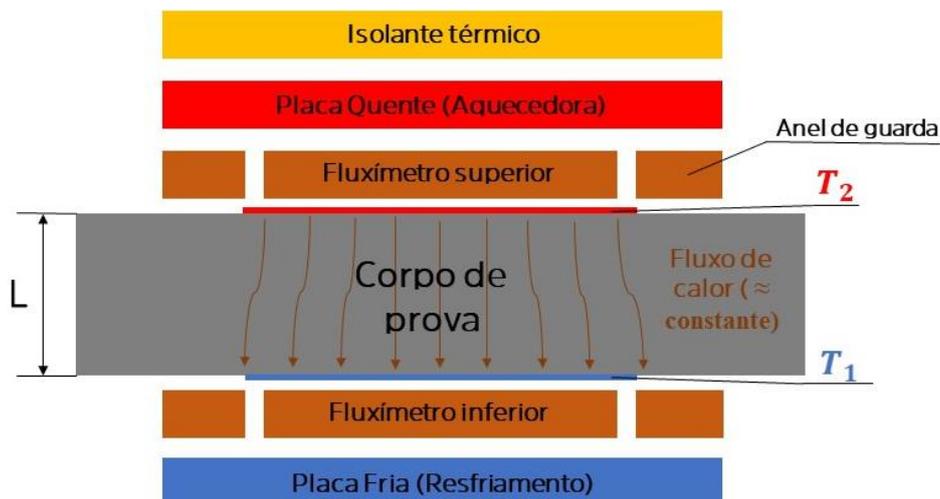


Figura 47 - Princípio do método de medição da resistência térmica

A partir de experiências e de literaturas normativas, o tempo para obtenção do regime estacionário utilizando o método fluximétrico é de aproximadamente 2 horas (PINTO, 2015) e, durante este tempo a distribuição de umidade pode-se alterar, modificando o valor das propriedades térmicas, como a condutividade térmica no material (MOURA, 1993). Logo, para a aplicação do método algumas restrições são necessárias. A ABNT NBR 15220-5 (2005) considera que o método é aplicável quando as transferências de umidade (redistribuição e absorção) forem desprezíveis (ABNT, 2005). Desta maneira, os ensaios foram realizados em estado seco para os corpos de prova.

O ensaio foi realizado empregando o equipamento fabricado pela LaserComp, modelo FOX 300. Foi adotado a configuração (b) de ensaio, sendo o dispositivo fluximétrico (placa aquecedora, dois fluxímetros, um corpo de prova e uma placa de resfriamento) disposto de forma simétrica. O empilhamento do dispositivo fluximétrico foi na horizontal e com o fluxo de calor na vertical (Figura 47) (ABNT NBR 15220-5, 2005).

Para a diminuição de erros de medição, devido a perturbações ocasionadas pelo ambiente, como a sua interferência convectiva, o ensaio foi realizado em ambiente controlado, com temperatura média do ensaio de 25°C. Além disso, foram utilizados um isolamento térmico, minimizando o efeito do ambiente externo, e um anel de guarda para evitar fugas laterais (Figura 47).

A resistência térmica é obtida no regime estacionário, de acordo com o modelo dado pela Equação a seguir:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{q/A}$$

Esta equação é o resultado da aplicação da Lei de Fourier ao problema de condução unidimensional, em regime estacionário, em meio plano. Onde R é a resistência térmica ($m^2 \cdot \frac{K}{W}$), q é o fluxo de calor médio medidos pelos fluxímetros 1 e 2 (W), T_1 e T_2 são as temperaturas médias nas superfícies do corpo de prova (K) e A é a área perpendicular ao sentido de fluxo de calor (m^2).

Considerando que as amostras são homogêneas e, a partir dos resultados de resistência térmica e das espessuras reais dos elementos ensaiados, foi possível obter os resultados de condutividade térmica, conforme a Equação a seguir:

$$k = \frac{L}{R}$$

Onde k é a condutividade térmica ($W/m.K$) e L é a espessura do corpo de prova (m).

Os resultados de resistência térmica e de condutividade térmica dos elementos ensaiados (corpos de prova: concreto, CP1 e CP2, e poliestireno expandido EPS) estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados de resistência térmica e de condutividade térmica dos elementos ensaiados

Ensaio	Corpos de prova	Espessura da amostra (mm)	Resistência térmica ($m^2.K/W$)	Condutividade Térmica ($W/m.K$)**
1	Concreto - CP1	48,10	0,028	1,740
2	Concreto - CP2	49,00	0,028	1,730
3	Falha de Poliestireno Expandido - EPS	9,30	0,221	0,042

Apêndice B - Estudo de dosagem do concreto utilizado para a confecção dos corpos de prova

Foi feito um breve estudo de dosagem para a formulação do concreto utilizado para a confecção dos corpos de prova, embasado nos insumos disponíveis (cimento, agregado miúdo e agregado graúdo) e nas condições especificadas relacionadas, a exigência de projeto, condições de exposição e operação, custo e técnicas de execução. Todas essas condições especificadas se referem as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, de durabilidade e de sustentabilidade, com o intuito de se garantir as mesmas condições do concreto de uma estrutura real em ambiente urbano. As normas utilizadas para se assegurar destas condições foram: ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015), ABNT NBR 12655 (ABNT, 2015) e ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014).

As especificações do concreto para o estudo de dosagem estão sendo detalhados na Tabela 26:

Tabela 26 - Especificações do concreto para o estudo de dosagem (continua).

Crítérios	Itens	Definições
Projeto	Resistência característica do concreto à compressão, aos 28 dias (Fck) - MPa	30
	Condição de preparo do concreto	A
	Desvio padrão de dosagem (Sd) - MPa	4,00
	Resistência média de dosagem do concreto à compressão, prevista para a idade de 28 dias (Fcm*) - MPa	36,6
	Elementos estruturais em que o concreto será aplicado	Laje, viga e pilar
Condição de exposição e operação, durabilidade e sustentabilidade	Classe de agressividade ambiental	II
	Agressividade	Moderada
	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Urbano
	Risco de deterioração da estrutura	Pequeno
	Relação água/cimento (em função da durabilidade da estrutura)	$\leq 0,55$
Execução	Classe de concreto	$C \geq 30$
	Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto - Kg/m ³	≥ 280
	Classe de consistência (Abatimento adotado - mm)	S100 ($100 \leq A <$
	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto	160)
	Idade de ruptura dos corpos de prova - dias	28
	Estimativa de perda de argamassa nos processos executivos (sistema de transporte e lançamento do concreto)	2 a 4%

Tabela 25 - Especificações do concreto para o estudo de dosagem (continuação).

Crítérios	Itens	Definições
		CP II F – 32
	Cimento (tipo, classe e fabricante)	VOTORANTIM CIMENTOS
		Média,
	Areia (Tipo, DMC** e fabricante)	DMC=4,75 e CONSTRUSAC
Custo - Insumos disponíveis		Brita granítica
	Brita (tipo, DMC** e fabricante)	B0, DMC = 12,5mm e CONSTRUSAC
		Brita granítica
	Brita (tipo, DMC** e fabricante)	B1, DMC = 19,0mm e CONSTRUSAC

* $F_{cm} = F_{ck} + 1,65 \cdot S_d$

**Dimensão máxima característica dos agregados, miúdo e graúdo, utilizados (DMC)

Atribuído as especificações do concreto, foi utilizado da metodologia experimental de dosagem, para a formulação do traço em massa (kg/kg): 1: a: p: a/c (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: água/cimento), onde o roteiro prático pode ser encontrado de forma aprofundada em Helene; Terzian (1993).

Basicamente, no roteiro prático para a dosagem de concretos estruturais, determinando-se os materiais utilizados (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água) para a composição do concreto, deve-se estabelecer o teor ideal de argamassa da mistura, sendo o mínimo possível. Para isso, é feito a variação do teor de argamassa (de 2 em 2%) para um traço de concreto em massa, previamente, estabelecido de 1:m (onde m é a soma de agregado miúdo e agregado graúdo, geralmente é utilizado 1:5), determinando-se a proporção adequada de argamassa por tentativas e observações práticas.

Após a determinação do teor ideal de argamassa na mistura do concreto, varia-se a relação a/c para a obtenção da consistência requerida pelo abatimento do tronco de cone, de acordo com a ABNT NBR 16889 (ABNT, 2020).

A mistura inicial na betoneira foi feita, utilizando-se o traço unitário de 1:5, estabelecendo a proporção adequada de argamassa de 61%. A relação a/c inicial foi de 0,55 (a/c máxima determinada de acordo com as especificações para o estudo de dosagem). Este valor de a/c para o concreto utilizado, apresentou-se abatimento de tronco de cone de $15 \mp 10 \text{ mm}$, sendo necessário o aumento da quantidade de água.

Foi feita uma nova mistura na betoneira, utilizando-se o traço unitário de 1:3,5¹⁹ com o mesmo teor de argamassa seca de 61%. Foi utilizado de um aditivo redutor de água (Tipo 2 – RA2, ADVA[®] CAST 525) com a incorporação de 0,45% sobre a massa de cimento (mínimo estabelecido pelo fabricante) e uma relação a/c de 0,40. O abatimento do tronco de cone foi de $160 \mp 10 \text{ mm}$, atendendo aos critérios estabelecidos para o estudo de dosagem.

Concluindo-se, estas etapas (teor ideal de argamassa e consistência requerida) em relação as propriedades do concreto no estado fresco, foi feito a determinação da massa específica, do consumo de cimento e do teor de ar incorporado pelo método gravimétrico, de acordo com a ABNT NBR 9833 (ABNT, 2008) (Tabela 27).

Tabela 27 - Propriedades do concreto no estado fresco.

Massa Específica do concreto no Estado Fresco (kg/m³)	Consumo de cimento em kg por m³ de concreto	Teor de ar incorporado
2409,63	491,76	4,56%

Para o ensaio de resistência à compressão, foi feita a moldagem de 3 corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, e a cura feita em câmara úmida, para a obtenção das resistências, máxima e média de dosagem e característica do concreto à compressão, na idade de 28 dias, conforme os procedimentos da ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015). Foi utilizada uma prensa universal Solotest de 100tf. A velocidade de aplicação de pressão foi igual a 0,45 Mpa/s, seguindo as recomendações da ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018) (Tabela 28).

¹⁹ No caso do traço unitário 1:5 (1:m), não foi possível a obtenção da resistência média de dosagem do concreto à compressão para a idade de 28 dias, sendo necessário o aumento do consumo de cimento, adotando-se o traço unitário de 1:3,5.

Tabela 28 - Propriedades do concreto no estado endurecido.

Resistência de dosagem do concreto à compressão, aos 28 dias (MPa)	Resistência máxima de dosagem do concreto à compressão, aos 28 dias (MPa)	Resistência média de dosagem do concreto à compressão, aos 28 dias (MPa)	Resistência característica do concreto à compressão, aos 28 dias (MPa)
33,93			
35,50	37,38	35,60 ± 1,41	29,01
37,39			

Com o intuito de verificar a porosidade acessível à água da matriz. Foi feita a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica real para o concreto endurecido. O ensaio foi realizado com 2 corpos de prova cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, aos 28 dias, seguindo as recomendações da ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005). Os corpos de prova foram imersos em água por 72 horas (sem fervura), onde sua massa saturada (superfície seca) foi determinada. Logo, utilizando-se de balança hidrostática, sua massa imersa foi determinada. Então, foram secos a 105°C por 72 horas e sua massa seca foi medida. A absorção de água foi calculada pela diferença entre massa saturada e seca, em valores percentuais em relação à massa seca. O índice de vazios foi calculado pela diferença entre massa saturada e seca, em valores percentuais em relação a diferença entre massa saturada e imersa. A massa específica real foi calculada a partir da massa seca em relação a diferença entre a massa seca e imersa (Tabela 29).

Tabela 29 - Resultados da Absorção de água após imersão (sem fervura), índice de vazios e massa específica real de corpos de prova cilíndricos de concreto

Absorção de água após imersão (sem fervura)	Absorção média de água após imersão	Índice de vazios	Índice de vazios médio	Massa específica real média (g/cm ³)
6,7%	6,3 ± 0,4 (%)	14,94%	14,18 ± 0,76 (%)	2,62 ± 0,02
5,9%		13,42%		

Especificações dos materiais utilizados no concreto

Cimento

A massa específica do Cimento Portland (CP II F – 32) utilizado para a composição do concreto foi obtida através do procedimento de ensaio, descrito na ABNT NBR 16605 (ABNT, 2017).

O resultado da massa específica para o cimento foi de 2,94 g/cm³, conforme especificado pelo fabricante VOTORANTIM CIMENTOS BRASIL S.A. (2020) (intervalo de massa específica para o Cimento Portland admitida 2,80 g/cm³ a 3,20 g/cm³).

Agregado miúdo

O agregado miúdo foi caracterizado pelas determinações, da massa unitária, da massa específica e da composição granulométrica, respectivamente, segundo as normas brasileiras, ABNT NBR NM 45 (2006); ABNT NBR NM 52 (ABNT, 2003); ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Massa unitária

A massa unitária do agregado miúdo, em estado compactado seco, utilizado para a composição do concreto foi obtida através do procedimento de ensaio, descrito na ABNT NBR NM 45 (ABNT, 2006).

O resultado da massa unitária, em estado compactado seco, para o agregado miúdo foi de 1603,92 kg/m³.

Massa específica

A massa específica do agregado miúdo utilizado para a composição do concreto foi obtida através do procedimento de ensaio, descrito na ABNT NBR NM 52 (ABNT, 2003).

Os resultados da massa específica nas condições, seco, saturado superfície seca e aparente, para o agregado miúdo são apresentados na Tabela 30 - .

Tabela 30 - Resultados da massa específica nas condições, seco, saturado superfície seca e aparente, para o agregado miúdo

Agregado Miúdo	Massa específica aparente do agregado na condição seca (g/cm ³)	Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)
Areia média	2,28	2,31	2,36

Composição granulométrica

Foi feita a determinação da composição granulométrica do agregado miúdo e a sua representação por meio das curvas de distribuição dos grãos do agregado determinadas pelo ensaio de granulometria através do peneiramento com agitação mecânica e sedimentação, descrito na ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003). A partir da curva de distribuição de partícula foi feita a determinação da dimensão máxima característica (DMC) e do módulo de finura (MF) do agregado miúdo (Figura 48).

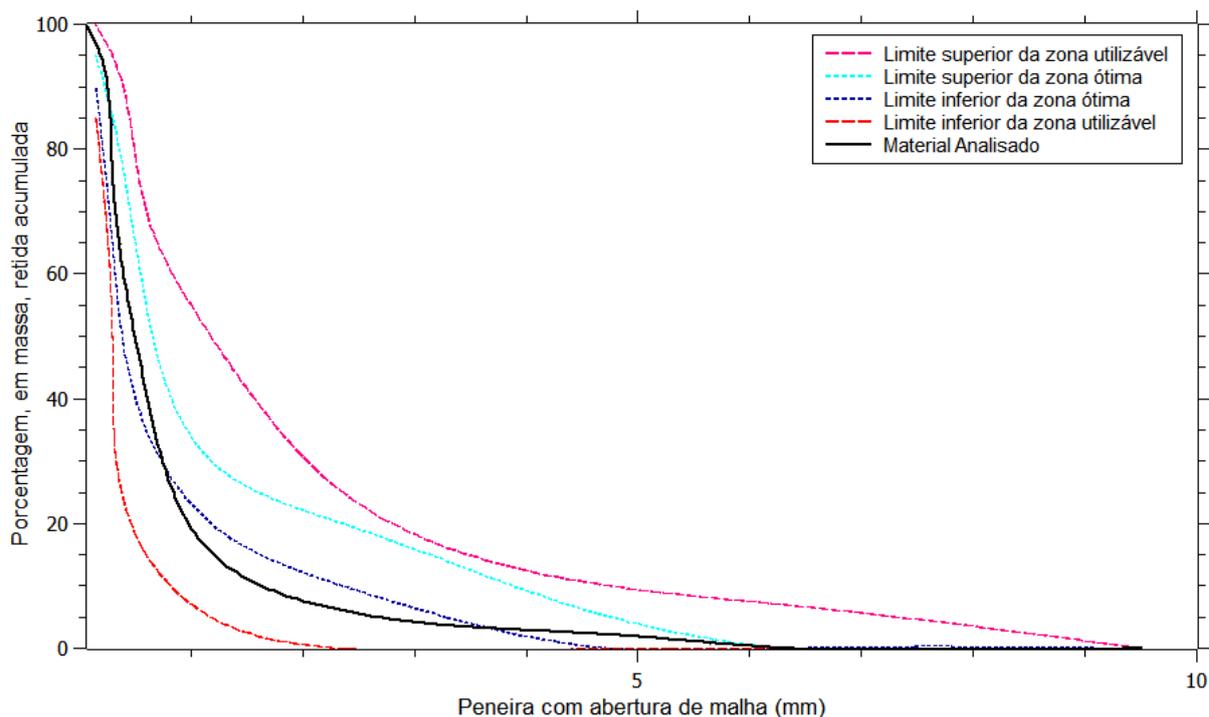


Figura 48 - Composição Granulométrica do agregado miúdo (DMC=4,75mm e MF=3,39).

Os limites apresentados no Figura 48, refere-se a zona granulométrica correspondente ao agregado miúdo analisado que deve ser atendida, conforme a norma de especificação de agregados para concreto, a ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005).

Agregados graúdos

Os agregados graúdos foram caracterizados pelas determinações, da massa unitária, da massa específica e da composição granulométrica, respectivamente, segundo as normas (ABNT NBR NM 45, 2006; ABNT NBR NM 53, 2009; ABNT NBR NM 248, 2003).

Para a formulação do concreto foi feita a mistura entre dois agregados graúdos e, a utilização dos valores de massa unitária para a determinação da composição ideal entre eles.

Massa unitária

A massa unitária dos agregados graúdos, em estado compactado seco, utilizados para a composição do concreto foi obtida através do procedimento de ensaio, descrito na ABNT NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Os resultados da massa unitária, em estado compactado seco, para as britas graníticas, B0 e B1, foram, respectivamente: 1579,41 e 1594,12 (kg/m³).

Massa específica

A massa específica dos agregados graúdos utilizados para a composição do concreto foi obtida através do procedimento de ensaio, descrito na ABNT NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Os resultados da massa específica nas condições, seco, saturado superfície seca e aparente, para as britas graníticas, B0 e B1, são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Resultados da massa específica nas condições, seco, saturado superfície seca e aparente, para as britas graníticas, B0 e B1.

Agregados Graúdos	Massa específica do agregado na condição seca (g/cm ³)	Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)
Brita Granítica B0	2,77	2,72	2,69
Brita Granítica B1	2,83	2,78	2,75

Composição granulométrica

Foi feita a determinação da composição granulométrica dos agregados graúdos e a sua representação por meio das curvas de distribuição dos grãos do agregado determinadas pelo ensaio de granulometria através do peneiramento com agitação mecânica e sedimentação, descrito na ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003). A partir da curva de distribuição de partícula foi feita a determinação da dimensão máxima característica (DMC) e do módulo de finura (MF) dos agregados graúdos (Figura 49 e Figura 50).

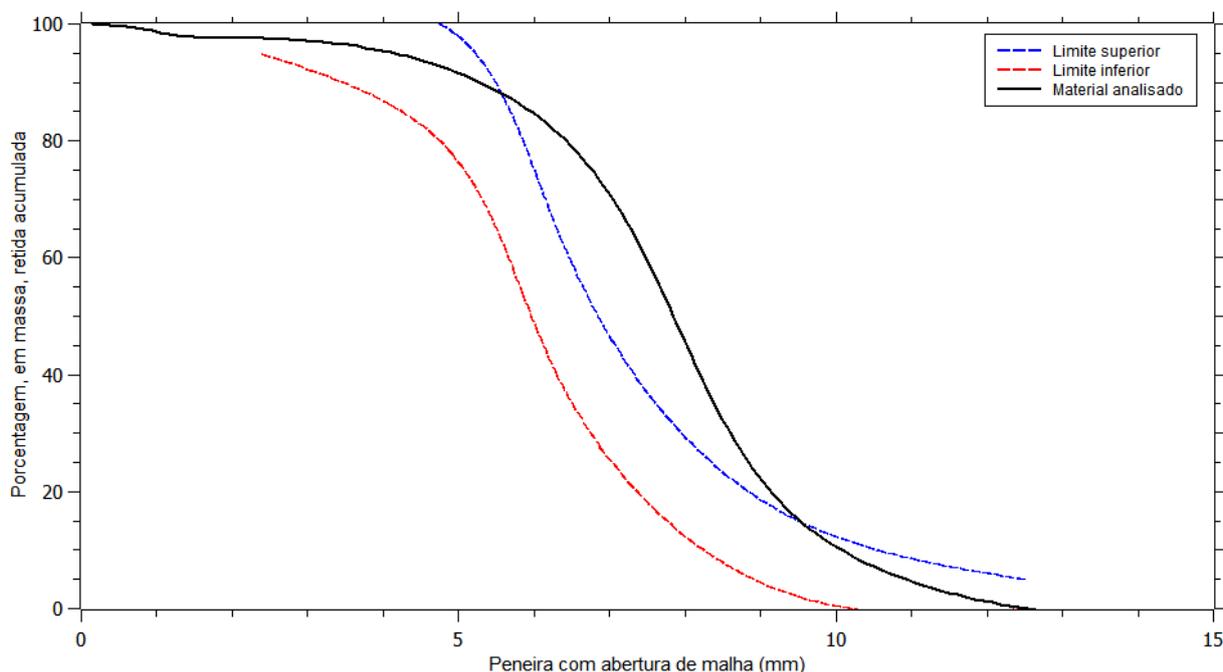


Figura 49 - Composição Granulométrica da Brita 0 (DMC=12,5mm e MF=5,04).

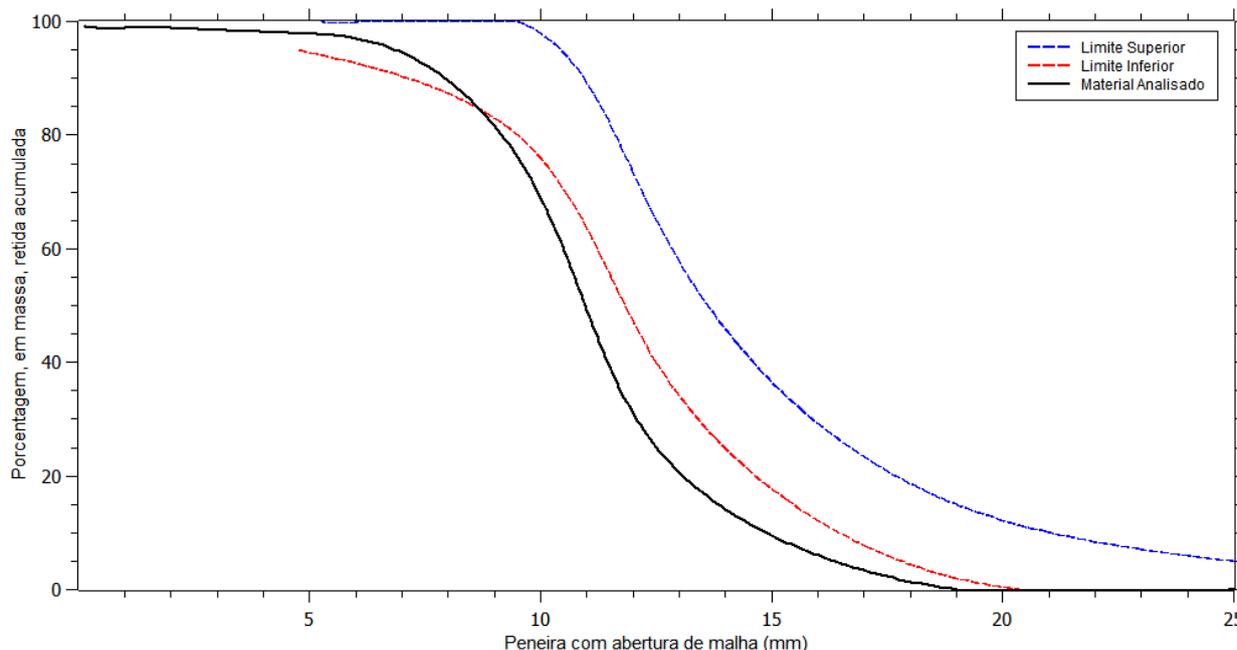


Figura 50 - Composição Granulométrica da Brita 1 (DMC=19mm e MF=5,70).

Os limites (inferior e superior) apresentados nas Figura 49 e Figura 50, refere-se a zona granulométrica correspondente ao agregado graúdo analisado que deve ser atendida, conforme a norma de especificação de agregados para concreto, a ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005).

Mistura de agregados graúdos

A mistura de agregados graúdos tem a finalidade de diminuir o custo do concreto e, pode ser obtido de modo prático e simples, sem a necessidade de complicados cálculos ou difíceis traçados de curvas granulométricas (HELENE; TERZIAN, 1993).

Para a determinação da mistura ou composição “ideal” entre os agregados, é feita a variação das porcentagens de composição dos agregados graúdos, no caso, as britas graníticas, B0 e B1 (coluna 1) e, a verificação de sua massa unitária (coluna 6), conforme o procedimento descrito por Helene; Terzian (1993) (Tabela 32).

Tabela 32 - Determinação da composição "ideal" entre as britas graníticas B0 e B1, a partir da massa unitária no estado compactado seco

Varição das Porcentagens de composição entre os agregados	Quantidade de B1 (Kg)	Quantidade de B0 (Kg)	Acréscimo de B0 para obter a composição desejada (Kg)	Massa total do recipiente (agregado + tara) (Kg)	Massa unitária no estado compactado seco (Kg/m³) *
100% B1	16,26	0,00	0,00	22,83	1594,12
90%B1 e 10%B0	14,63	1,61	0,00	22,77	1588,24
70%B1 e 30%B0	11,38	4,83	0,11	22,88	1599,02
100% B0	16,11	0,00	0,00	22,68	1579,41
80%B0 e 20%B1	12,89	3,25	0,35	23,06	1616,67
70%B0 e 30%B1	11,28	4,88	0,98	23,71	1680,39
60%B0 e 40%B1**	9,67	6,50	0,75	23,73	1682,35
50%B0 e 50%B1	8,05	8,13	0,18	22,93	1603,92

* A massa unitária dos agregados graúdos (B0 e B1), em estado compactado seco, utilizados para a composição "ideal" foi obtida através do procedimento de ensaio, descrito na ABNT NBR NM 45 (2006).

** Composição "ideal" entre os agregados

Apêndice C – Metodologias utilizadas para obtenção dos parâmetros de medição

Para a obtenção dos parâmetros de medição como a emissividade da superfície do objeto (ϵ) e a temperatura aparente refletida (T_{ref}), foi utilizado das metodologias apresentadas em normas brasileiras. Na Tabela 33, é apresentado as metodologias brasileiras aplicadas para cada um dos parâmetros de medição que, influenciam de forma direta na precisão da temperatura de superfície do objeto analisado.

Tabela 33 - Metodologias brasileiras aplicadas para a obtenção dos parâmetros de medição

Simbologia utilizada	Descrição	Metodologia Correspondente
ϵ	Emissividade da superfície do objeto (0 a 1)	ABNT NBR 16969: 2021 Ensaios não destrutivos – Termografia Infravermelha – Princípios Gerais (ANEXO B - Emissividade)
T_{ref}	Temperatura das fontes de objetos de reflexão ou temperatura aparente refletida	ABNT NBR 16969: 2021 Ensaios não destrutivos – Termografia Infravermelha – Princípios Gerais (ANEXO C – Temperatura Aparente Refletida)

Nos próximos itens, foram feitas descrições detalhadas dos processos de medição, abordados nas metodologias brasileiras, assim como, informações adicionais presentes em outras literaturas, como, Andrade (2020) e FLIR SYSTEMS (2010).

Temperatura aparente refletida

Em relação a medição e a compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas, a ABNT NBR 16969 apresenta dois métodos de ensaio (o método direto e o método refletor). Esses métodos podem ser utilizados em campo ou em laboratório, utilizando materiais facilmente disponíveis (ABNT, 2021).

No caso em questão, foi escolhido o método refletor para obtenção da temperatura aparente refletida. Além da norma brasileira, foram utilizadas como base outras literaturas como Andrade (2020) e FLIR Systems (2010) para o correto procedimento do método refletor, onde as mesmas apresentam procedimentos semelhantes às da norma.

O método proposto assume que a refletância do refletor infravermelho utilizado é igual ou próxima a 1 ($\epsilon_{ref} \approx 1$), ou seja, toda a radiação proveniente do ambiente é quase ou totalmente refletida, obtendo-se o valor máximo da reflexão do ambiente (Figura 51).

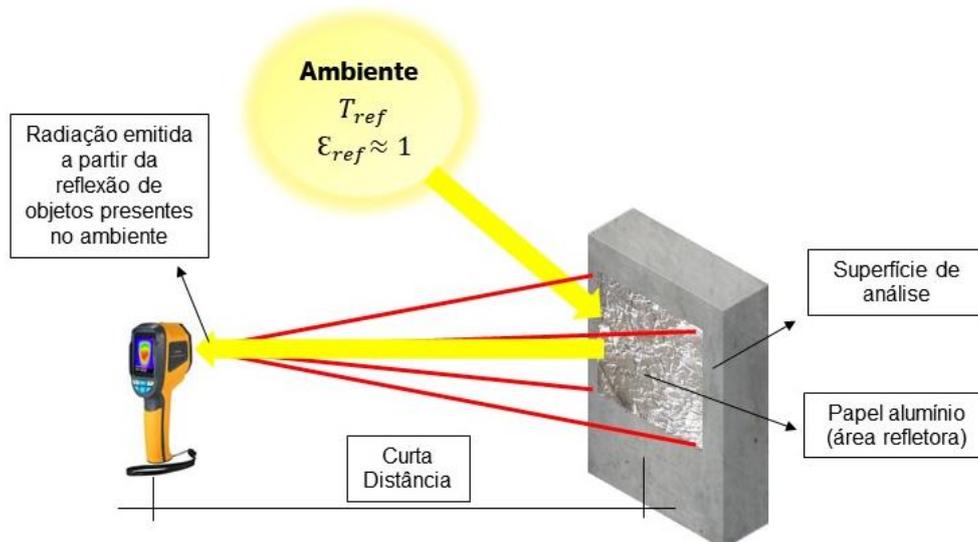


Figura 51 – Método refletor

Foi utilizado como refletor infravermelho, um papel alumínio (com dimensões de 15x15 cm)²⁰, previamente amassado e depois estendido, colocado sobre um pedaço de papelão, com o lado brilhante para cima. O procedimento de amassar o papel alumínio é necessário para que a superfície do papel alumínio tenha rugosidade, garantindo que a reflexão ocorra de forma difusa, ou seja, apresentando características similares à superfície analisada, no caso, a superfície de concreto, durante todo o processo de medição (ABNT NBR 16969, 2021) (Figura 52 (a)).

²⁰ As dimensões adotadas do papel alumínio (refletor infravermelho) foram em relação a área de análise (no caso, a área de análise com dimensões de 60 cm x 60 cm), de modo que, o refletor infravermelho não influencia-se na obtenção dos termogramas.

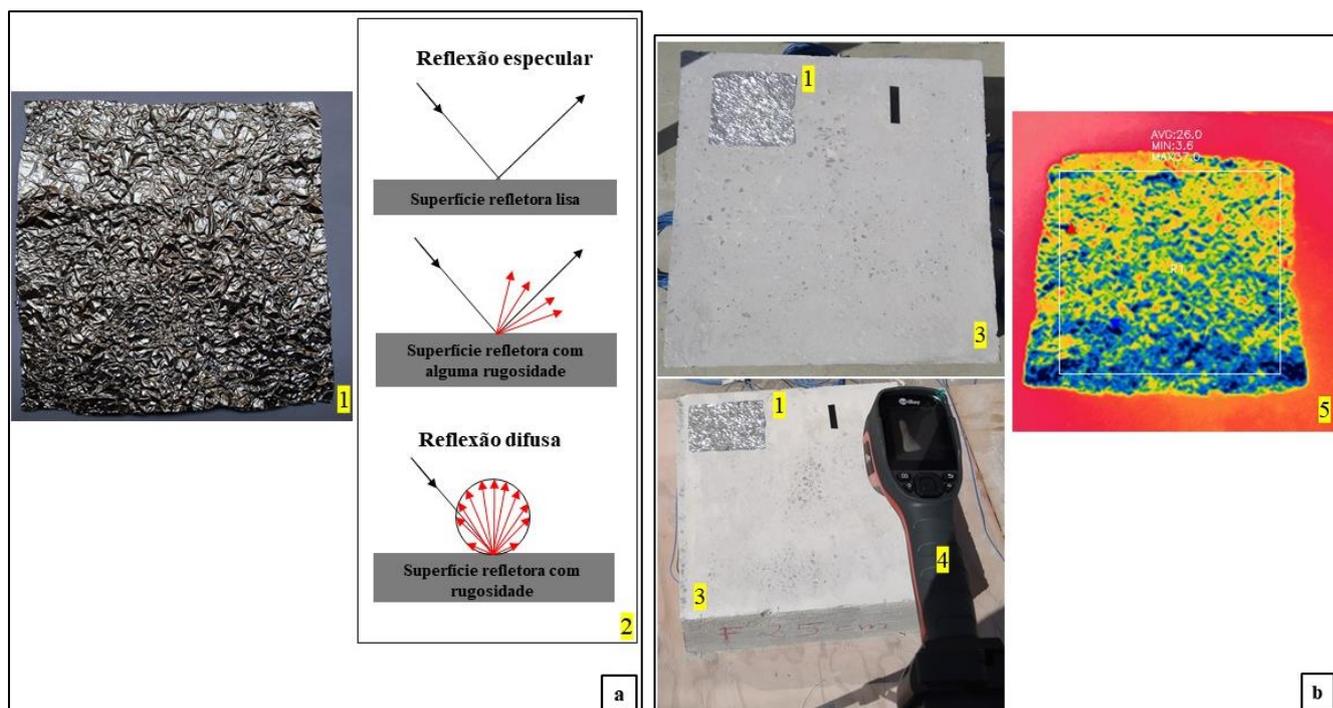


Figura 52 - Processo de medição em campo da Temperatura Aparente Refletida (T_{ref}) pelo método refletor: (a) refletor infravermelho utilizado e modos de reflexão de acordo com a rugosidade da superfície; (b) refletor infravermelho colado sobre a superfície de análise e câmera termográfica a curta distância, de modo que toda a área refletora esteja inteiramente contida nos termogramas. Legenda: (1) papel alumínio; (2) modos de reflexão: especular e difusa; (3) superfície de concreto analisada; (4) câmera termográfica; (5) termograma capturado.

Após a confecção do refletor infravermelho, o mesmo é colado sobre a superfície de análise e feito a captura dos termogramas com a câmera termográfica, a curta distância, de modo que toda a folha com a superfície metálica (área refletora) esteja inteiramente contida nos termogramas capturados. Deve-se capturar, no mínimo, três termogramas após contagem de 10 segundos (ABNT NBR 16969, 2021; ANDRADE, 2020) (Figura 52 (b)).

Em seguida a etapa de campo (coleta dos termogramas), no software de análise de imagens térmicas, é ajustado os valores de distância para 0 metros, de emissividade para $\mathcal{E} = 1$, de temperatura ambiente e de umidade relativa do ar (condições ambientais em função do local). Com a ferramenta de medição (ponto ou área) é obtido a temperatura aparente refletida da área refletora. O mesmo procedimento é feito para os demais termogramas e a média da temperatura aparente refletida é calculada (Figura 53).

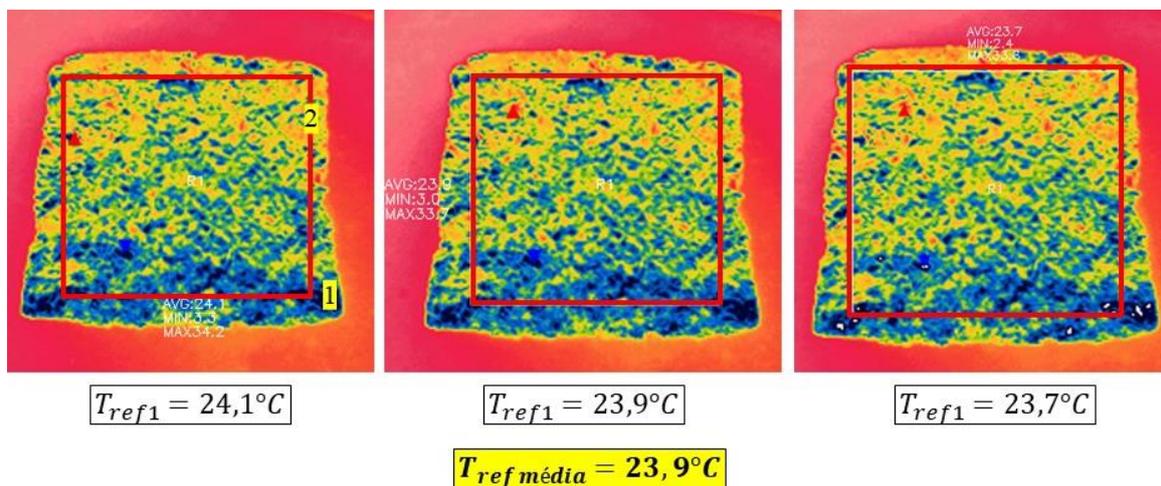


Figura 53 - Processo de medição da Temperatura Aparente Refletida (T_{ref}) no software de imagens térmicas: Média da temperatura aparente refletida dos termogramas capturados ($T_{ref\ média}$). Legenda: (1) papel alumínio (área refletora); (2) ferramenta de medição de área.

Emissividade da superfície

Em relação a medição e a compensação da emissividade de superfície utilizando câmeras termográficas, a ABNT NBR 16969: apresenta dois métodos de ensaio (o método do termômetro de contato e o método da emissividade conhecida). Esses métodos podem ser utilizados em campo ou em laboratório, utilizando materiais facilmente disponíveis. Para ambos os métodos são válidos somente objetos opacos na faixa espectral da câmera termográfica utilizada (ABNT, 2021).

No caso em questão, foi escolhido o método da emissividade conhecida para obtenção da emissividade da superfície. Além da norma brasileira, foram utilizadas como base outras literaturas como Andrade (2020) e FLIR SYSTEMS (2010) para o correto procedimento do método da emissividade conhecida, onde as mesmas apresentam procedimentos semelhantes às da norma.

O método proposto necessita que o material utilizado como referência de emissividade (no caso, uma fita adesiva isolante) possua um valor conhecido e com alta emissividade, preferencialmente maior que 0,9. Durante o processo de medição com a câmera termográfica, as diferentes superfícies analisadas (no caso, as superfícies, da fita adesiva isolante e do concreto), com diferentes emissividades, possuam a mesma temperatura de superfície (Figura 54).

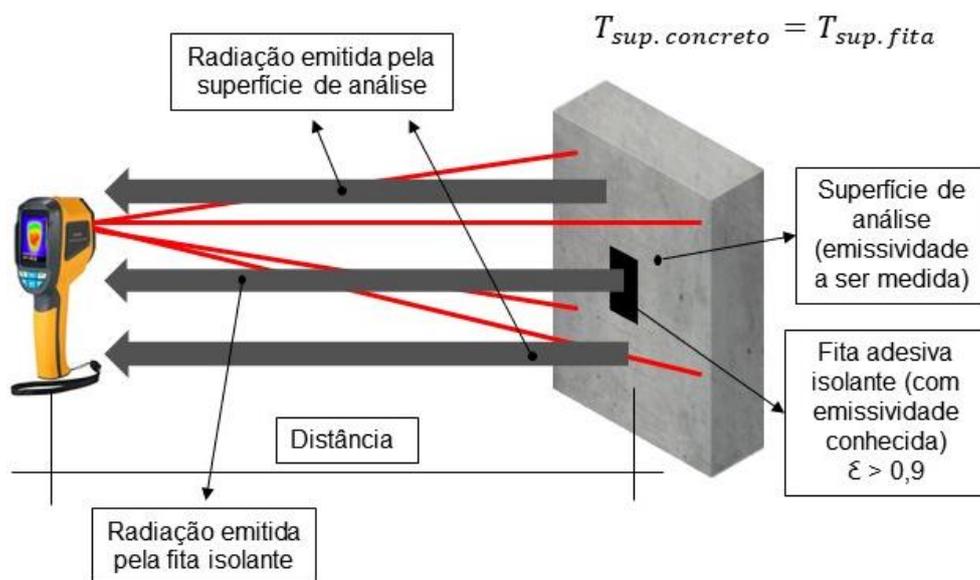


Figura 54 – Método da emissividade conhecida

Foi utilizado fita adesiva isolante 3M Scotch 33+ com emissividade de 0,90, com maior emissividade comercialmente encontrada e disponível, conforme descrito por Andrade (2020). As dimensões do material utilizado como referência (emissividade conhecida) devem ser suficientes para atender as resoluções de medida (como IFOV e MFOV) da câmera termográfica.

Antes da colagem da fita adesiva isolante deve ser verificado que, ambas as superfícies (superfície de análise escolhida e superfície de colagem da fita) apresentem a mesma temperatura. Esta conferência pode ser feita com a própria câmera térmica. Deste modo, a fita adesiva isolante pode ser colada sobre a superfície de análise, a qual a emissividade deve ser medida. Após a colagem é necessário aguardar um pequeno período para estabilização da temperatura da fita isolante com a temperatura da superfície na qual a fita se encontra aderida. Logo após o período esperado, é realizado a captura da superfície com a câmera termográfica, no qual seja possível observar ambas as superfícies (superfície da fita isolante e a superfície de análise escolhida). Para isso deve-se posicionar a câmera termográfica a uma distância adequada do objeto de análise (ABNT NBR 16969, 2021; ANDRADE, 2020) (Figura 55).

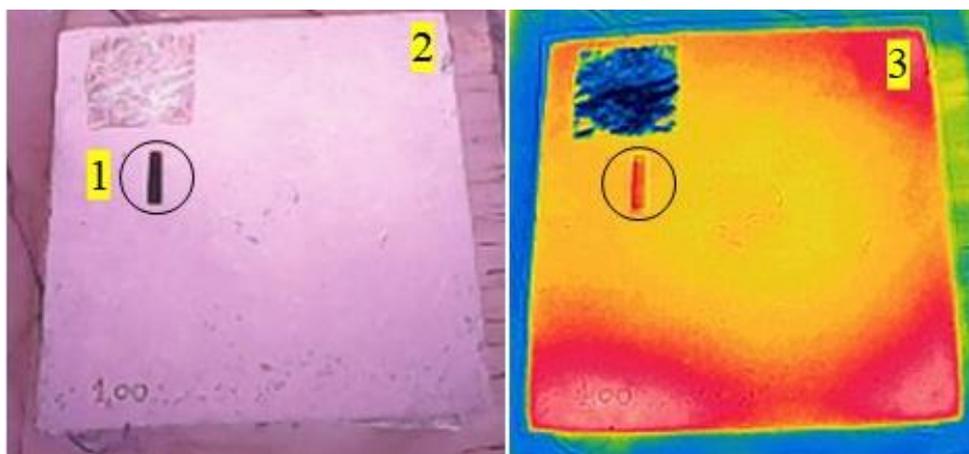


Figura 55 – Processo de medição em campo da emissividade da superfície (ϵ) pelo método da emissividade conhecida: material utilizado como referência de emissividade, colado sobre a superfície de análise, onde é feito a captura do termograma a curta distância de medição. Legenda: (1) fita adesiva isolante; (2) superfície de concreto analisada; (3) termograma capturado.

Em seguida a etapa de campo (coleta dos termogramas), no software de análise de imagens térmicas, é ajustado os valores de distância (distância igual a 1 metro), temperatura aparente refletida (variável de acordo com a condição do ambiente em função do tempo, o processo de medição da temperatura aparente refletida é descrita no item anterior), temperatura ambiente, umidade relativa do ar (variável de acordo com as condições ambientais do local em função do tempo) e emissividade conhecida da fita isolante. Com a ferramenta de medição (ponto ou área) é determinado a área de medição sobre a superfície da fita isolante na qual é obtida o valor de temperatura média em função da emissividade conhecida da fita.

Dispondo da temperatura média de superfície com emissividade conhecida, é definido nova área com a ferramenta de medição e, obtido a temperatura média da superfície adjacente (superfície na qual não se encontra a fita e, a emissividade deve ser medida). Nesta nova área, devido a diferença de emissividades (emissividade conhecida da fita e emissividade da superfície de análise), a temperatura medida se encontra diferente. Como este método assume que as temperaturas médias da superfície da fita (com emissividade conhecida) e da superfície de análise são as mesmas, são realizados ajustes na emissividade até que as temperaturas entre a superfície da fita e a superfície de análise se igualem. Após os devidos ajustes relacionados a mesma temperatura para as duas superfícies é encontrado o valor de emissividade da superfície de análise.

A norma sugere a repetição do método de no mínimo três vezes (três termogramas para uma mesma superfície de análise) e, utilizar a média para obter o valor correto de emissividade de superfície.

Durante a realização do ensaio, algumas recomendações são sugeridas pela ABNT NBR 16969 (ABNT, 2021), para minimizar possíveis erros de medição, sendo eles:

- I. Diferença de temperatura da superfície de análise (superfície onde a emissividade deve ser medida) e da temperatura ambiente, de no mínimo, 10°C;
- II. Medição e consideração da temperatura aparente refletida, principalmente para objetos com baixa emissividade (emissividade menor que 0,5), onde têm maior probabilidade de erro;
- III. Ajuste correto do foco para a precisão dos resultados dos termogramas obtidos da superfície de análise.

Anexo – Relatórios dos ensaios das propriedades termofísicas



CB3E
centro brasileiro de eficiência energética em edificações

Núcleo de Medição:
Depto de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
88040-900 Florianópolis / SC Brasil
Fone: (48) 3721-7709 Fax: (48) 3721-7615
www.cb3e.ufsc.br



Florianópolis, 26 de junho de 2021

De: Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E)
Para: Leandro Barioni do Nascimento

Assunto: Relatório ensaios de propriedades térmicas

Os ensaios foram realizados no Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E), Universidade Federal de Santa Catarina. O ensaio de Densidade de Massa Aparente segue as Normas Técnicas ABNT NBR 13280 e ABNT 13440. O ensaio de Calor Específico segue a Norma ABNT NBR 12817.

Resultados dos Ensaios

Data Ensaio: 22/06/2021
Num. Ensaio: 0628/2021
Cliente: Leandro Barioni do Nascimento

Ensaio	Descrição	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (J/(kg.K))
1	Concreto CP1	2430	1020
2	Concreto CP2	2400	1080
3	EPS	34	1400



CB3E
centro brasileiro de eficiência energética em edificações

Núcleo de Medição:
Depto de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
88040-900 Florianópolis / SC Brasil
Fone: (48) 3721-7709 Fax: (48) 3721-7615
www.cb3e.ufsc.br



Florianópolis, 26 de junho de 2021

Temperatura média do Ensaio: 25 °C
Incerteza estimada ensaio Densidade: 2 %, intervalo de confiança 95%
Incerteza estimada ensaio Calor Específico: 6 %, intervalo de confiança 95%

OBS: Em cumprimentos às normas da UFSC, não é permitido a utilização para fins de propaganda e comerciais, sob qualquer forma ou meio de difusão.



Prof. Saulo Gúths

Prof. Saulo Gúths - email: saulo@Lmpt.ufsc.br
Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC



CB3E
centro brasileiro de eficiência energética em edificações

Núcleo de Medição:
Depto de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
88040-900 Florianópolis / SC Brasil
Fone: (48) 3721-7709 Fax: (48) 3721-7615
www.cb3e.ufsc.br



Florianópolis, 26 de junho de 2021

De: Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E)
Para: Leandro Barioni do Nascimento

Assunto: Relatório ensaios de condutividade térmica

Os ensaios de condutividade foram realizados no Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E), Universidade Federal de Santa Catarina, baseado na Norma Técnica ISO 8301:2010 – “*Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus* empregando o equipamento fabricado pela LaserComp, modelo FOX 300.

A Figura 1 mostra um esquema do dispositivo:

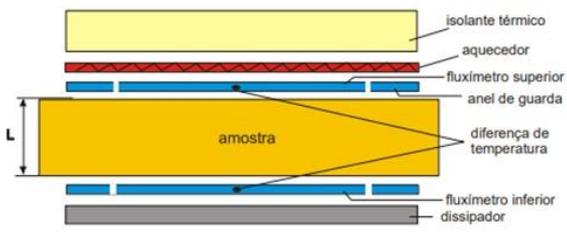


Figura 1 - Princípio do método de medição da resistência térmica



CB3E
centro brasileiro de eficiência energética em edificações

Núcleo de Medição:
Depto de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
88040-900 Florianópolis / SC Brasil
Fone: (48) 3721-7709 Fax: (48) 3721-7615
www.cb3e.ufsc.br



Florianópolis, 26 de junho de 2021

A resistência térmica é determinada a partir da lei de Fourier:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{q}{A}\right)}$$

onde R é a resistência térmica (m² K/W), q é o fluxo de calor médio medido pelos fluxímetros 1 e 2 (W) e T₁ e T₂ as temperaturas médias nas superfícies das amostras.

Considerando que a amostra é homogênea, é possível determinar a **condutividade térmica** do material (λ):

$$\lambda = \frac{L}{R}$$

onde λ é a condutividade térmica (W/m K) e L é a espessura da amostra (m). é apresentado igualmente o Índice Clo, relacionado com a resistência térmica do material.

 CB3E centro brasileiro de eficiência energética em edificações	Núcleo de Medição: Depto de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina 88040-900 Florianópolis / SC Brasil Fone: (48) 3721-7709 Fax: (48) 3721-7615 www.cb3e.ufsc.br		 CB3E centro brasileiro de eficiência energética em edificações	Núcleo de Medição: Depto de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina 88040-900 Florianópolis / SC Brasil Fone: (48) 3721-7709 Fax: (48) 3721-7615 www.cb3e.ufsc.br																	
Florianópolis, 26 de junho de 2021			Florianópolis, 26 de junho de 2021																		
<u>Resultados dos Ensaios</u>			<i>OBS: Em cumprimentos às normas da UFSC, não é permitido a utilização para fins de propaganda e comerciais, sob qualquer forma ou meio de difusão.</i>																		
Data Ensaio: 23/06/2021 Num. Ensaio: 0626/2021 Cliente: Leandro Barioni do Nascimento			 <hr/> Prof. Saulo Güths																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ensaio</th> <th>Descrição</th> <th>Espessura Amostra (mm)</th> <th>Condutividade Térmica (λ) (W/mK)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Concreto CP1</td> <td>48.1</td> <td>1.740</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Concreto CP2</td> <td>49.0</td> <td>1.730</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>EPS</td> <td>9.3</td> <td>0.042</td> </tr> </tbody> </table>			Ensaio	Descrição	Espessura Amostra (mm)	Condutividade Térmica (λ) (W/mK)	1	Concreto CP1	48.1	1.740	2	Concreto CP2	49.0	1.730	3	EPS	9.3	0.042	Prof. Saulo Güths Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina Rua Roberto Sampaio Gonzaga, 01 88040-900 Florianópolis / SC email: saulo@Lmpt.ufsc.br		
Ensaio	Descrição	Espessura Amostra (mm)	Condutividade Térmica (λ) (W/mK)																		
1	Concreto CP1	48.1	1.740																		
2	Concreto CP2	49.0	1.730																		
3	EPS	9.3	0.042																		
Dimensão das amostras: 100 x 100 mm Temperatura média do Ensaio: 25 °C Incerteza estimada de cada ensaio: 4 %, intervalo de confiança 95%																					