

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

FLÁVIA NOVLOSKI

**ESTUDO DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS
EM MATERIAIS DA INDÚSTRIA AEROESPACIAL**

Joinville

2018

FLÁVIA NOVLOSKI

**ESTUDO DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS
EM MATERIAIS DA INDÚSTRIA AEROESPACIAL**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Talita Sauter Possamai

Joinville

2018

FLÁVIA NOVLOSKI

**ESTUDO DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS
EM MATERIAIS DA INDÚSTRIA AEROESPACIAL**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 04 de Julho de 2018.

Banca Examinadora:

Dra. Talita Sauter Possamai

Orientadora

Presidente

Dr. Kleber Vieira de Paiva

Membro

Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Renato Oba

Membro

Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Detecção de defeitos em materiais é uma área de extrema importância na indústria aeroespacial, uma vez que mesmo pequenas falhas podem gerar acidentes e destruição da estrutura como um todo. A termografia infravermelha, por se tratar de um método não destrutivo, possibilita um mapeamento térmico da superfície de qualquer objeto e, por consequência, a determinação das localizações dos defeitos do mesmo, ainda que a certa distância. Eliminando riscos para o sistema e operador. No presente trabalho é apresentado um estudo de uma metodologia preliminar, desenvolvida para análise de defeitos internos do tipo bolha em material cerâmico para diferentes emissividades da superfície. Como parte dos resultados encontrados, está a medição da emissividade de uma amostra cerâmica com e sem tinta emissiva na superfície medida, sendo 0,86 e 0,83 os valores de emissividade, respectivamente. Ainda, foram analisadas as curvas de temperatura para localização de defeitos e a variação mínima de temperatura para uma melhor visualização das falhas para o equipamento empregado.

Palavras-chave: Termografia infravermelha. Cerâmica. Emissividade. Curvas de temperatura.

ABSTRACT

Material defect detection is an area of extreme importance in the aerospace industry, since even minor failures can lead to accidents and destruction of the structure as a whole. Infrared thermography, as it is a non-destructive method, allows a thermal mapping of the surface of any object and, consequently, the determination of the locations of the defects, even from some distance. Which eliminates risks for the system and operator. In the present report, a study of a preliminary methodology is presented, developed for the analysis of internal defects of the bubble type in ceramic material for different emissivities of the surface. As part of the results, the emissivity of a ceramic sample with and without emissive ink on the evaluated surface were measured, with the values of emissivity, respectively, resulting in 0.86 and 0.83. In addition, the temperature curves for defect location and the minimum temperature variation were analyzed for a better visualization of the defects for the equipment used.

Keywords: Infrared thermography. Ceramics. Emissivity. Temperature curves.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de configuração geral de experimento para OST.....	15
Figura 2 - Espectro eletromagnético.....	22
Figura 3 - Energia infravermelha e distribuição através do espectro eletromagnético.	23
Figura 4 - Exemplos de emissividade.....	25
Figura 5 – Sequência de imagens térmicas e curva de decaimento de temperatura.	26
Figura 6 - Sequência de IRT para teste completo.....	27
Figura 7 - Curvas de detecção de falhas.	28
Figura 8 - Dimensões da amostra em mm.	29
Figura 9 - Modelo da amostra em SolidWorks®.....	30
Figura 10 - Vista lateral da bancada de testes.	30
Figura 11 – Vista frontal da bancada de testes.	31
Figura 12 - Esquema do experimento.....	32
Figura 13 - Amostra sem tinta em medição de emissividade.....	33
Figura 14 - Amostra pintada com tinta de alta emissividade.	34
Figura 15 - Posição do termopar.....	35
Figura 16 - FLIR0020 (21,4°C) e FLIR0028 (21,9°C).	36
Figura 17 - FLIR0021 (35,3°C) e FLIR0029 (33,6°C).	37
Figura 18 - FLIR0052 (25,6°C) e FLIR0030 (26,4°C).	37
Figura 19 - FLIR0053 (24,6°C) e FLIR0031 (24,9°C).	38
Figura 20 - FLIR0055 (23,5°C) e FLIR0032 (23,5°C).	38
Figura 21 - Linha horizontal de temperaturas.	39
Figura 22 - Perfil de temperatura na horizontal nas amostras durante resfriamento sem tinta (esquerda) e com tinta (direita).....	39
Figura 23 - Temperaturas centrais da amostra sem tinta para os testes de 1 minuto (esquerda) e 2 minutos (direita).	41
Figura 24 - FLIR0025 (38,7°C) e FLIR0042 (37,9°C).	41
Figura 25 - FLIR0026 (27,9°C) e FLIR0043 (27,9°C).	42
Figura 26 - FLIR0027 (26,1°C) e FLIR0044 (25,3°C).	42
Figura 27 - Linha vertical de temperaturas.....	43

Figura 28 - Perfil de temperatura na vertical para teste de 1 minuto nas amostras durante resfriamento sem tinta (esquerda) e com tinta (direita).	43
Figura 29 - Perfil de temperatura na horizontal para teste de 2 minutos nas amostras durante resfriamento sem tinta (esquerda) e com tinta (direita).	44
Figura 30 - Perfil de temperatura na vertical para teste de 2 minutos nas amostras durante resfriamento sem tinta (esquerda) e com tinta (direita).	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo de temperatura estimada pela câmera com mudança da emissividade.	32
Tabela 2 - Estimativa de emissividade para as amostras.....	34
Tabela 3 - Temperaturas indicadas pelo termopar no teste de 1 minuto.	40
Tabela 4 - Temperaturas do teste de 2 minutos.....	42
Tabela 5 - Variação de temperatura entre ponto central da foto e termopar para o teste de 1 minuto.....	45
Tabela 6 - Variação de temperatura entre ponto central da foto e termopar para o teste de 2 minutos.	45
Tabela 7 - Variação de temperatura entre ponto central da foto e temperatura ambiente para o teste de 1 minuto (18°C).....	46
Tabela 8 - Variação de temperatura entre ponto central da foto e temperatura ambiente para o teste de 2 minutos (18°C).	46

LISTA DE ABREVIATURAS

CARALL – Laminado de alumínio reforçado com carbono
CFRP – Polímero reforçado com fibras de carbono
CNR – *Contrast to Noise Ratio*
FMT – Termografia modulada em frequência
FPA – *Focal Plane Array*
FRML – Laminado de metal reforçado com fibra
GFRP – Polímero reforçado com fibras de vidro
GLARE – Laminado de metal e fibra de vidro reforçado com epóxi
HI – Interferometria holográfica
IR – Infravermelho
IRT – Termografia infravermelha
LIT – Termografia *lock-in*
LLT – Termografia de linha de laser
LPT – Termografia de pulso longo
LST – Termografia de ponto de laser
LT – Termografia modulada
MEV – Microscópio eletrônico de varredura
OST – Termografia opticamente simulada
PT – Termografia pulsada
SHT – Termografia de aquecimento em degrau
SNR – *Signal to Noise Ratio*

LISTA DE SÍMBOLOS

- c_0 – Velocidade da luz no vácuo = $2,99792458 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- E_b – Emitância total [W/m^2]
- $E_{\lambda,b}$ – Emitância espectral [$\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{sr}^{-1}$]
- h – Constante de Planck = $6,626076 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
- $I_{\lambda,b}$ – Emitância espectral [$\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{sr}^{-1}$]
- k – Constante de Boltzmann = $1,380658 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
- T – Temperatura [K]
- t – Tempo [s]
- z – Profundidade de defeito [m]
- α – Difusividade térmica [m^2/s]
- ε – Emissividade
- λ – Comprimento de onda [μm]
- σ – Constante de Stefan-Boltzmann = $5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVOS	12
2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. RADIAÇÃO	21
2.2. TERMOGRAFIA PULSADA EM MATERIAIS CERÂMICOS	26
3. METODOLOGIA	29
3.1. ESTIMATIVA DA EMISSIVIDADE DA AMOSTRA CERÂMICA E DA TINTA	33
3.2. MONTAGEM E METODOLOGIA DA MEDIÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DO DEFEITO	35
4. RESULTADOS	36
5. CONCLUSÃO	48
5.1. TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS	50

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo de defeitos em materiais com aplicação aeroespacial através de termografia. Os principais defeitos são causados por impacto, e há três tipos principais de impactos leves aos quais aeronaves estão sujeitas: chuva, granizo e aves. Estes podem ocorrer tanto em solo quanto em voo e os principais locais de estudo são para-brisas, turbinas, asas e cauda, por se tratarem de componentes voltados para a frente da aeronave. Ainda, durante uma chuva de granizo, uma parte da estrutura pode estar sujeita a múltiplos impactos e efeitos cumulativos também podem ser significantes (ABRATE, 2015).

Na indústria aeronáutica, os gastos e avarias causadas por colisão de pássaros, por exemplo, são frequentes e podem causar danos na estrutura da aeronave. Segundo Abrate (2015), de 1912 a 2002, colisões com aves foram responsáveis por pelo menos 55 acidentes fatais, matando 276 pessoas e destruindo 108 aeronaves civis. E por esta razão, tem-se dedicado mais esforço e atenção no avanço do desenvolvimento de modelos e abordagens matemáticas para simulação deste tipo de colisão em diferentes componentes aeronáuticos (ABRATE, 2015).

Dentre os materiais mais utilizados e estudados para aplicações aeroespaciais estão os metais, compósitos e cerâmicas. No caso dos compósitos, que possuem características de não homogeneidade e anisotropia, os defeitos possam ser provindos tanto ao rompimento das fibras, quanto à quebra da matriz ou à delaminação, o que faz com que os impactos estruturais possam não ser visuais. Ainda, o efeito de granizo na vida útil destes materiais, com relação à fadiga, e na força residual do painel sanduíche também são significantes, tornando extremamente importante entender onde e como ocorreu a falha, e onde e como ela irá se propagar (ANTONUCCI, 2014).

A termografia infravermelha possibilita um mapeamento térmico da superfície de qualquer objeto, mesmo com geometrias complexas, de forma remota e não invasiva, a partir da energia térmica irradiada por tal objeto na faixa eletromagnética infravermelha do detector. Desde o século passado a termografia infravermelha vem sendo utilizada, mas apenas após a introdução de conceitos de transferência de calor mais recentes ela pôde começar a ser usada de forma

quantitativa. Hoje em dia esta técnica já é reconhecida como uma técnica de inspeção de compósitos para aplicações aeroespaciais e está entre as técnicas padrão para a qualificação e certificação dos materiais (i.e. ISO 9712) (MEOLA, 2016). É uma técnica segura para ambos, o operador e o material, e também é rápida. Além disso, não há contato entre operador e a peça, o que garante que não haja contaminação e possibilita a inspeção mesmo que esta seja realizada há uma certa distância, eliminando possíveis perigos do ambiente para operador.

Já foi provado que a técnica é apropriada para análise de diversos materiais e que é muito efetiva em análise de compósitos pois permite a visualização de impactos internos. Sendo essa a maior dificuldade principalmente em termorrígidos, nos quais as falhas podem surgir internamente sem serem vistas na superfície externa (MEOLA, 2016).

No caso de materiais cerâmicos, os defeitos são normalmente gerados durante o estágio de prensagem devido a parâmetros incorretos do processo ou matérias-primas não controladas. Estes defeitos são geralmente caracterizados por delaminações, inclusão de materiais heterogêneos ou aglomerados, que diminuem a força estrutural.

Outros métodos de detecção de defeitos internos, como raio-X, são muito caros quando comparados com o baixo custo de produtos cerâmicos, o que faz com que a escolha por técnicas como termografia seja uma boa solução. Além do custo da utilização de IRT, que tem diminuído cada vez mais, esta já é uma metodologia aplicada em muitos setores da indústria e já se provou resultar em uma boa resolução e facilidade de operação. Segundo a literatura, para aplicações de termografia em cerâmicas, apenas delaminações relativamente grandes, entre 50-80mm, são detectadas em azulejos de cerâmica verde. No entanto, neste estágio o material já foi prensado, mas não está seco nem aquecido e, por isso, é totalmente reciclável. Assim, uma inspeção da produção neste momento pode trazer vantagens significativas no custo e tempo de fabricação do produto final como um todo (REVEL; ROCCHI, 2006).

1.1.OBJETIVOS

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo um estudo preliminar de uma metodologia para identificação de defeitos internos do tipo bolha através de análise termográfica em material cerâmico. Dentro deste escopo, os objetivos específicos são:

- a) Montagem e calibração de uma bancada de testes para medição termográfica de análises cerâmicas com defeitos interno;
- b) Medição da emissividade da superfície do material cerâmico analisado e de uma tinta emissiva;
- c) Análise do comportamento termográfico da amostra cerâmica com teste ativo e comparação entre amostra com e sem tinta emissiva.

2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

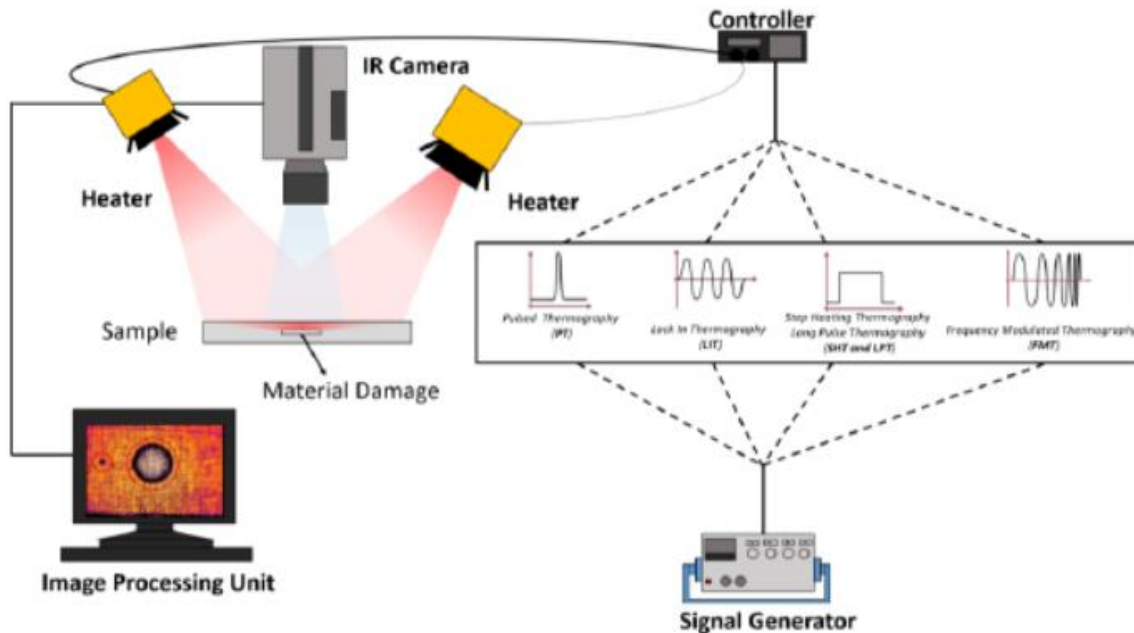
De acordo com Ciampa et al. (2018), termografia infravermelha (IRT) é uma técnica rápida, precisa e não destrutiva de avaliação que é amplamente utilizada para inspeção em grandes componentes aeroespaciais, tais como estruturas primárias e secundárias de aeronaves e helicópteros, partes de motores, componentes de veículos espaciais e seus subsistemas. A técnica pode ser aplicada à diferentes materiais, que incluem alumínio, compósitos e laminados híbridos fibra-metal, como laminado de metal e fibra de vidro reforçado com epóxi (GLARE) e laminado de alumínio reforçado com carbono (CARALL). Além disso, classifica-se a termografia entre passiva, ou estacionária, e ativa, ou não estacionária. IRT passiva é utilizada em materiais que não estão em equilíbrio térmico e tem diferença de temperatura com o ambiente no qual operam. IRT passiva, por sua vez, é melhor aplicada para carregamentos cíclicos, uma vez que o calor resultante permite variações de temperatura dependentes do tempo que podem ser monitoradas com a câmera infravermelha. Pode-se aplicar IRT passiva, por exemplo, quando se deseja monitorar a entrada de água em algum material ou sistema logo após o pouso da aeronave, o que se torna possível devido a significativa diferença de temperatura da aeronave e da água neste momento.

Para a aplicação de IRT ativa, por outro lado, há a necessidade de fontes externas de excitação, como radiação óptica (lâmpadas halogêneas e lasers), simulação eletromagnética (introdução de correntes parasitas e micro-ondas) e ondas mecânicas ultrassônicas, para geração de calor durante a análise. Por meio do avanço das ondas térmicas dentro da amostra por difusão, a taxa de difusão de calor pode ser utilizada na detecção e qualificação do defeito no material. Ou seja, as respostas dos gradientes de temperatura na superfície média são gravados e analisados pela câmera IR para gerar informação sobre a estrutura. Ainda, há diversas metodologias de IRT ativa utilizadas na indústria aeroespacial, cada uma com suas aplicações, vantagens e limitações e que são classificadas conforme o princípio físico e a fonte térmica envolvida. Dentre as classificações conforme princípio físico estão: radiação óptica, propagação de onda acústica ou ultrassônica,

radiação eletromagnética para materiais dielétricos e radiação termo-resistente e permitida por material para materiais compósitos (CIAMPA et al., 2018).

A termografia opticamente simulada (OST) é atualmente o método de termografia mais utilizado. E as OST mais comumente utilizadas para aplicação aeroespacial são: termografia pulsada (PT), termografia *lock-in* (LIT), termografia de aquecimento em degrau (SHT) e termografia de pulso longo (LPT), termografia modulada em frequência (FMT), termografia de ponto de laser (LST) e termografia de linha de laser (LLT). E estas são nomeadas de acordo com o tipo de fonte óptica externa empregada para a geração das ondas térmicas (CIAMPA et al., 2018). Um esquema de configuração geral para experimentação utilizando OST, incluindo desde a geração do sinal para aquecimento e a foto IR em si até a posição da amostra e o processamento final da imagem, pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Esquema de configuração geral de experimento para OST.



Fonte: Ciampa et al. (2018).

Os dados obtidos por OST são geralmente contaminados por diferentes perturbações como reflexões externas, variações nas propriedades ópticas da amostra e aquecimento não uniforme. Estas perturbações geram padrões anormais nas imagens e tornam a detecção de falhas mais

complexa. E por este motivo, técnicas de processamento de sinal tem sido desenvolvidas para reduzir estas perturbações e aprimorar a detecção de falhas por meio de termografia. Segundo Ciampa et al. (2018), a combinação de avançado tratamento de sinal garante que OST consiga avaliar diversos tipos de defeitos em materiais, incluindo falhas em interfaces entre substratos e seus revestimentos, corrosão, defeitos por fadigas em metais, descolamento e delaminação em compósitos. Outra conclusão dos autores, após o estudo realizado, é que termografia opticamente simulada não é muito sensível a defeitos muito internos e micro rachaduras com dimensões entre 10 micrômetros e alguns milímetros. E que entre as OST, termografia a laser é o melhor método para detecção de rachaduras perpendiculares a superfície da amostra (intralaminar), mesmo este método ainda sendo limitado a campos de aquecimento próximos.

Antucci et al. (2014) realizaram um estudo comparativo de técnicas não destrutivas utilizadas para identificar defeitos em laminados de fibra de carbono. As técnicas estudadas foram: ultra som, termografia e holografia. Foram realizados experimentos de impacto à baixa velocidade com fibras de carbono em matriz epóxi RTM6 de 400x400mm fabricados por infusão pulsada, com sequência de empilhamento [(0)/(90)/(+45)/(-45)]s e espessura de 2,5mm. A termografia infravermelha foi obtida por uma câmera do tipo SC500 MW InSub da FLIR®, quatro lâmpadas de homogêneo de 1kW e softwares de aquisição e processamento de dados. Os valores médios, mínimos e máximos para o comprimento dos três métodos foram consistentes entre si, principalmente para os valores mais altos de energia de impacto. Para termografia foram encontrados valores de diâmetro máximo de 14mm e mínimo de 7mm para impactos de 6J, 29 e 11mm para 10J e 41 e 18mm para 13J. E os dados obtidos foram comparados pelos autores com dados para fibra de vidro de espessura similar, como forma de validação.

Meola et al. (2016) testaram a tecnologia de termografia para 4 materiais compósitos: fibra de carbono com matriz epóxi de 2,4mm, fibra de vidro com matriz epóxi de 2,9mm, fibra de vidro em matriz de polipropileno de 3mm, fibra de vidro em matriz de polipropileno modificado de 3mm. Os testes foram feitos com câmera infravermelha (SC6000, FLIR®) com detector QWIP e uma lâmpada de halogênio de 1kW, executando primeiramente teste de impacto por pêndulo de ponta afiada, para danificar o material. Na análise das amostras, um variação maior de temperatura foi encontrada para as duas primeiras (por volta de 20K). E a partir disto e da resolução do equipamento (detector infravermelho e lentes) foi possível medir a área danificada da amostra ou material. Nos testes realizados pelos autores foi utilizada uma resolução de 3-3,7 pixels/mm e

foram medidos diâmetros nos eixos horizontal e vertical do dano, que variaram entre 7 e 30mm horizontalmente e 10 e 15 verticalmente. Por fim, Meola et al. (2016) concluíram que assinatura térmica gerada com os impactos fornece informações principalmente sobre as mudanças abruptas de temperatura nos momentos de quebra de fibras e que cores mais fracas indicam delaminação ou deformação plástica. Os resultados foram comparados com o esperado fisicamente e houve concordância. Os autores indicaram ainda que um próximo passo seria a medição da extensão do impacto, e não só da área impactada.

Li et al. (2016) utilizaram seis amostras para teste, que foram sujeitas a impactos de 24,7 J, 26,8 J, 23,7 J, 28,7 J, 31,6 J e 36,7 J e fizeram inspeções com um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e com o uso de termografia. O estudo dos danos devido à impactos de baixa velocidade foi realizado por meio tanto de experimentos como de simulação numérica. Através de experimentos os autores concluíram que termografia infravermelha pulsada é melhor para falhas por delaminação, especialmente para áreas maiores e não juntas, e termografia ultrassônica é melhor para pequenos defeitos como delaminação de articulações, quebra de matriz e rompimento da fibra. Concluíram ainda, que a combinação dos dois métodos melhora significativamente a capacidade de identificação e avaliação.

Revel e Rocchi (2006) tiveram como objetivo de estudo a detecção de pequenos defeitos (no máximo 30mm) em azulejo de cerâmica verde, ou seja, estágio da produção em que a cerâmica que já foi prensada mas não foi aquecida nem seca. O objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de métodos para a detecção destes defeitos em produções reais, como forma de possibilitar a determinação de limites e desempenho da técnica. No experimento realizado pelos autores, o primeiro passo foi a produção em laboratório de cerâmicas defeituosas, inserindo-se materiais heterogêneos no processo, como pedaços de plástico ou aglomerados de matéria prima. A localização e profundidade dos defeitos são conhecidas, assim como as dimensões, que variam de 5x5mm a 30x30mm. As dimensões da placa cerâmica, ou azulejo, de teste é de 325x325x10mm. As medições das falhas foram feitas por meio de termografia, utilizando-se uma câmera infravermelha de longo alcance (FLIR ThermaCAM™ S40) equipada com um FPA (*Focal Plane Array*) não resfriado de microbolômetros, sensíveis na faixa na faixa espectral de 7,5 a 13 μ m e caracterizada por uma precisão de medições de temperatura de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%$ de acordo com as especificações do fabricante. Revel e Rocchi (2006) realizaram as análises termográficas com o auxílio de aquecimento e resfriamento transientes e processamento de imagens para detectar,

localizar e destacar os defeitos. Concluíram que defeitos posicionados abaixo de aproximadamente 6mm da superfície não puderam ser detectados e que maior energia de aquecimento seria necessária para aumentar a profundidade de inspeção para as configurações de teste utilizadas. Porém, para análises dentro destes 6mm abaixo da superfície, para defeitos de até 5x5mm a identificação dos mesmos pode ser feita com nitidez. Ainda, defeitos de 15mm localizados a 6mm abaixo da superfície foram detectados com SNR (*Signal to Noise Ratio*) maior do que 25dB e CNR (*Contrast to Noise Ratio*) maior do que 4.

Sfarra et al. (2010) fizeram o estudo dos métodos de teste e avaliação não destrutiva de matérias, mais especificamente termografia infravermelha (IRT) e interferometria holográfica (HI) com aplicação em material cerâmico. Sendo que no caso da termografia, foram estudadas tanto a abordagem passiva, na qual as características do material são naturalmente a uma maior ou menor temperatura que o fundo, e ativa, em que é necessária a utilização de uma fonte externa de energia para produzir contraste térmico entre a característica de interesse e o fundo. A amostra de teste, azulejo cerâmico de 325x325mm², foi produzida em laboratório por uma indústria cerâmica por meio de inserção de defeitos como plástico, alumínio, madeira e esponja para simular delaminações e não homogeneidades. Os defeitos possuem diferentes tamanhos (entre 20x20mm² a 100x5mm²) posicionados em diferentes profundidades (de 4 a 8mm) e para uma melhor visualização dos mesmos, os experimentos para HI foram realizados após aplicação de uma lâmpada IR de 250W a aproximadamente 50cm de distância da amostra. Os resultados obtidos por Sfarra et al. (2010) foram satisfatórios, uma vez que todos os defeitos foram vistos nas imagens. Ainda, o plástico teve maior contraste nas imagens, seguido do lápis, esponja e por último o alumínio, que possui contraste bem fraco. Estes resultados estão de acordo com o esperado devido as propriedades térmicas dos materiais. Além disso, um defeito não fabricado, uma rachadura, foi detectado. Os autores concluíram também que a IRT possui grande sensibilidade na detecção de falhas em esponja na cerâmica, enquanto a HI mostra imagens mais nítidas para o alumínio.

Meola et al. (2008) realizaram estudo tendo como preocupação principal os problemas em pás de turbina a gás devido a núcleos residuais de cerâmica dentro das passagens de resfriamento, que podem ser geradas durante a fabricação das mesmas e que podem afetar fortemente o desempenho da turbina. O que faz com que técnicas não destrutivas, capazes de detectar até mesmo pequenos fragmentos de forma rápida e fácil seja extremamente importante. Os autores inspecionaram pás de três tipos diferentes, as quais foram produzidas por EMA S.p.A. (Itália) para

motores turbina. Foram utilizadas no estudo tanto termografia pulsada (PT) quanto termografia modulada (LT). Para os testes, foi utilizada a câmera SC3000 QWIP da FLIR® em conjunto com o software IRLockIn© para variação de parâmetros de medição como modulação de função de calor, frequência e taxa de aquisição. Os resultados dos autores foram demonstrados por imagens de fase, que são mais sensíveis a fatores como a não uniformidade de aquecimento e variação local da emissividade, permitindo uma melhor distinção da cerâmica residual em contraste com o fundo da pá. Ainda, os resultados obtidos por termografia infravermelha foram comparados com resultados para raio-X, observando-se uma concordância entre ambos. No entanto, mais fragmentos puderam ser detectados por IRT, uma vez que as imagens termográficas ficam guardadas no computador e podem ser retocadas via software para aumentar o contraste e possibilitar visualização de detalhes bem pequenos ou finos. Foi concluído também pelos autores que é possível identificar fragmentos muito pequenos de cerâmica com a utilização de termografia *lock-in* com aquecimento intensivo das pás e rápida amostragem a uma taxa de 60Hz, o que não é visto com radiografia. Por fim, ao variar a frequência de aquecimento da simulação também foi possível identificar outras anomalias não conhecidas das amostras, não apenas as cerâmicas residuais. O que é uma grande vantagem em termos de tempo total de testes e dos técnicos e operadores envolvidos.

Yasmina et al. (2013) realizou estudo tendo como foco um dos grandes desafios e grande objetivo para tanto a indústria aeronáutica quanto nuclear, a detecção de rachaduras abertas em componentes metálicos, que são altamente reflexivos, devido à baixa emissividade e por isso se tornam especialmente difíceis de serem testados. Para esses defeitos, abordagens mais convencionais de aquecimento ativo de grande área do objeto usando lâmpadas não é efetiva para a identificação das rachadura perpendiculares a superfície, que não tem efeito no fluxo de calor. Para resolver este problema, diversas técnicas de termografia infravermelha vem sendo desenvolvidas com diferentes tipos de excitações. No experimento realizado pelos autores um feixe de laser foi direcionado a um ponto circular e uniforme para aquecer a amostra próximo a rachadura na superfície. Os materiais utilizados incluíram esta fonte de aquecimento (laser diodo com comprimento de onda igual a 830nm e poder sintonizável entre 0,5-4W, um gerador de funções e uma câmera infravermelha Jade III, CEDIP, FLIR® que possui detectores sensíveis a uma variação no comprimento de onda na ordem de 3-5 μ m. A primeira amostra a ser estudada foi um placa metálica altamente reflexiva de 130x27x9mm³ de Inconel, na qual uma abertura vertical de fadiga

de $0,03 \times 9 \text{mm}^2$ foi criada artificialmente. A segunda amostra foi retirada de um motor turbina terrestre de geometria quase plana de $70 \times 55 \times 6 \text{mm}^3$ com cavidades esféricas finas. E a terceira, uma parte de um motor turbina feito com superliga a base de níquel, com geometria complexa e volume não homogêneo. As imagens resultantes da análise dos autores possuíam fortes perturbações devido à alta reflexividade das peças e ao coeficiente de emissividade da superfície, que varia bruscamente com a presença de rugosidades. Por isso, Yasmina et al. (2013) realizaram ainda um procedimento de análise baseado em cálculos Laplacianos seguidos de processamento de imagem para a extração de sinais vindos de perturbações extremamente pequenas. O procedimento se mostrou eficiente e os resultados dos experimentos mostraram que a detecção de rachaduras abertas é possível mesmo para superfícies ásperas ou altamente reflexivas e numa variedade grande de geometrias. Sendo importante ressaltar a importância da repetição de testes, em muitos processos de verificação industrial como estes, para definir um conjunto de parâmetros com antecedência e garantir que a detecção das imagens possa ser repetida e objetiva.

Anghel et al. (2010) tiveram como foco o estudo da aplicação de termografia ativa dos tipos *lock-in* e de pulso curto (ou *flash*) em materiais empregados em estruturas aeroespaciais. Os materiais incluem metais, plexiglas, compósitos, compósitos híbridos e sanduiches e os defeitos mais comuns dos mesmos, que são inclusões, perda de material, delaminação e defeito por impacto. Para os experimentos, os autores utilizaram câmera FLIR® A 40M, que possui uma boa resolução térmica. Primeiramente, foram avaliados defeitos em amostras metálicas, e para isso precisou-se de uma potente fonte de aquecimento e uma termografia de pulso curto. As amostras consistiram em uma placa de alumínio com 5 furos circulares de fundo plano com mesmo diâmetro e diferentes profundidades e uma placa sanduiche com nove furos circulares de fundo plano com mesmo diâmetro. Em ambos os casos utilizou-se uma frequência de aquisição na câmera de 50Hz e as fotos foram retiradas da face da placa não danificada. O método apresentou bons resultados e teve como vantagem adicional o curto tempo de aquecimento e análise. Em seguida foram realizados testes em materiais compósitos. A primeira amostra consistiu em uma placa de polímero reforçada com fibra de carbono (CFRP) de $300 \times 300 \text{mm}$ com delaminações e a segunda, em um polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) fabricado com inserções de folhas finas e sem atrito para simular delaminação. A amostra possui tamanho de $300 \times 300 \text{mm}$ e 10 camadas com espessura de $0,25 \text{mm}$ cada e espessura total de $2,5 \text{mm}$. Os defeitos são de tamanhos diferentes (3×3 , 5×5 , 7×7 , 10×10 e $15 \times 10 \text{mm}$) e foram inseridos em diferentes profundidades. Sendo que nenhuma pintura

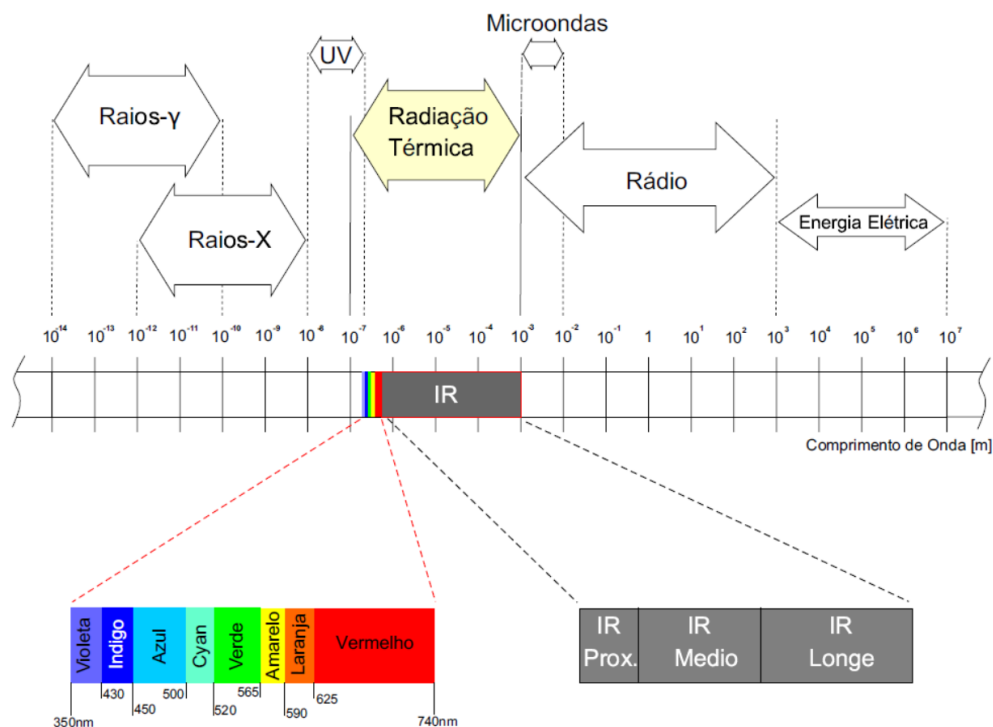
superficial foi utilizada. Ainda, diversas amostras de compósitos híbridos (laminados de metal reforçados com fibra, FRML) foram utilizadas, sendo elas formadas por 3 camadas de alumínio e 2 camadas de CFRP. Estas foram inspecionadas após realização de teste de impacto a baixa velocidade e foram pintadas de preto antes da análise. Por fim, foi inspecionada também uma placa do tipo sanduiche de 15x10x5cm com faces de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) com 4 camadas de espessura total de 2mm e núcleo de espuma de poliuretano de 46mm de espessura. Este tipo de amostra teve como principal foco, a análise de água no interior da material ou estrutura, e por isso, água fria foi injetada no espaço entre a face superior e o núcleo da mesma para a análise termográfica. Segundo os autores, os dados e imagens adquiridas pelos mesmos permitem a conclusão de que termografia infravermelha fornece informações bastante úteis e que podem ser utilizadas para: detecção de defeitos com avaliação de seu tamanho, posição e natureza, avaliação da extensão dos danos de impactos e condições do núcleo sob a superfície em estruturas sanduíches, compreensão do comportamento de camadas metálicas e de fibra e epóxi em compósito híbridos, entre outros. Por fim, dependendo da espessura da amostra e da difusividade térmica do material a ser testado, pode-se escolher o dispositivo de aquecimento apropriado e os parâmetros de testes correspondentes como comprimento do pulso ou tempo de aquisição.

Este trabalho foca no método de medição por IR ativa. Apesar de o uso de materiais cerâmicos ser limitado no setor aeroespacial, é importante para este estudo preliminar o emprego de um material e propriedades isotrópicos e com alta emissividade como os materiais cerâmicos.

2.1.RADIAÇÃO

Ao ser aquecido, um objeto irradia energia eletromagnética, que é relativa à sua temperatura. Os geradores de imagens térmicas podem então determinar a temperatura do objeto medindo a energia emitida pelo mesmo. Além disso, esta energia é irradiada em diferentes níveis do espectro de radiação eletromagnética, que inclui raio gama, raio-X, ultravioleta, visível, infravermelho e rádio, e é ilustrado na Figura 2. Para a maior parte dos equipamentos industriais, a energia irradiada utilizada para o mapeamento e cálculo das temperaturas é a energia infravermelha.

Figura 2 - Espectro eletromagnético.

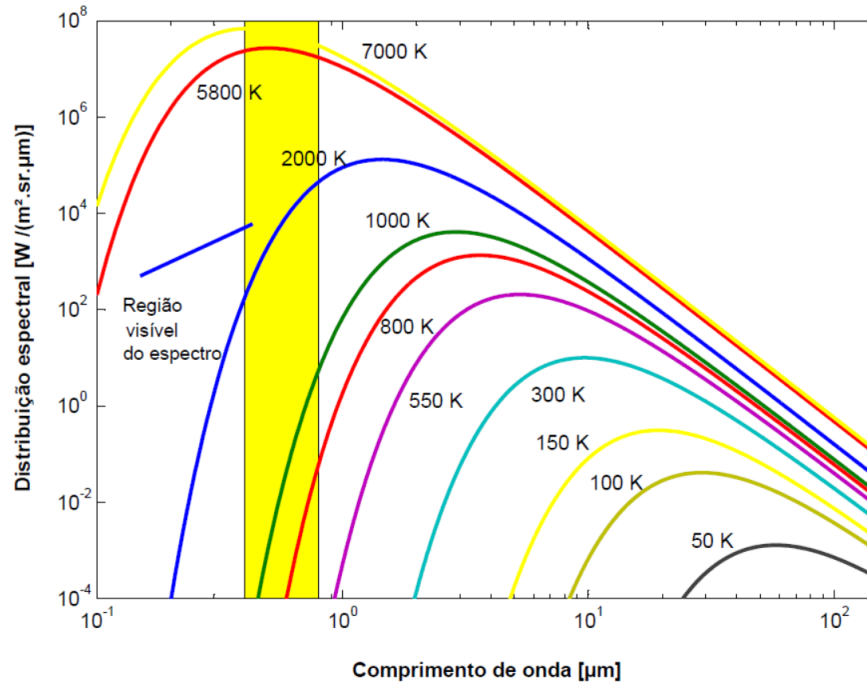


Fonte: Rodríguez (2010).

Todas as energias descritas na imagem anterior são emitidas na forma de ondas e viajam na velocidade da luz, sendo a única diferença entre elas a frequência. A grande maioria das medições infravermelhas de temperatura são realizadas entre 0,2 e 20 μ m. As câmeras infravermelhas conseguem detectar esta energia através de um sistema óptico que converte a energia IR em tensão elétrica que, após amplificação e processamento de sinal, é utilizada para a construção da imagem térmica.

Ainda, uma exemplificação de distribuição de energia por comprimento de onda para diferentes temperaturas de um corpo negro pode ser vista na Figura 3. Sendo conhecido como corpo negro, um objeto fictício cuja emissividade é máxima, ou seja, irradia a maior quantidade possível de energia para dada temperatura. É possível observar na distribuição de energia, que quanto maior a temperatura, maior o pico de energia e que o comprimento para o qual este pico ocorre decresce com o aumento da temperatura.

Figura 3 - Energia infravermelha e distribuição através do espectro eletromagnético.



Fonte: Maldague (2001).

É importante notar que apenas uma pequena faixa deste espectro é visível pelo olho humano, sendo esta faixa ilustrada na Figura 3. A lei por trás da distribuição mostrada na imagem é conhecida como Lei de Planck, e governa a emissão térmica. Esta lei é dada como:

$$I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc_0}{\lambda kT}\right) - 1 \right]} \quad (1)$$

Na qual:

$I_{\lambda,b}$ = emitância espectral em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$

λ = comprimento de onda em μm

T = temperatura ao qual emite radiação o corpo negro em K

h = constante de Planck = $6,626076 \times 10^{-34}$ J.s

k = constante de Boltzmann = $1,380658 \times 10^{-23}$ J.K⁻¹

c_0 = velocidade da luz no vácuo = $2,99792458 \times 10^8$ m.s⁻¹

A energia irradiada por um objeto tem dependência não só da temperatura, como mostrado anteriormente, mas também da sua emissividade. E a emitância espectral de um corpo negro, como derivação da Lei de Planck, pode ser escrita como:

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (2)$$

Onde as constantes de radiação são:

$$C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$$

$$C_2 = \frac{hc_0}{k} = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

A partir disto, integrando a equação (2) para os comprimentos de onda de zero a infinito, determina-se a emitância total de um corpo negro como:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3)$$

Sendo σ a constante de Stefan-Boltzmann, que possui valor de $5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, e a equação (3), conhecida como lei de Stefan-Boltzmann. A partir dela, e tendo a temperatura, pode-se calcular a radiação emitida por um corpo negro em todas as direções e sobre todos os comprimentos de ondas.

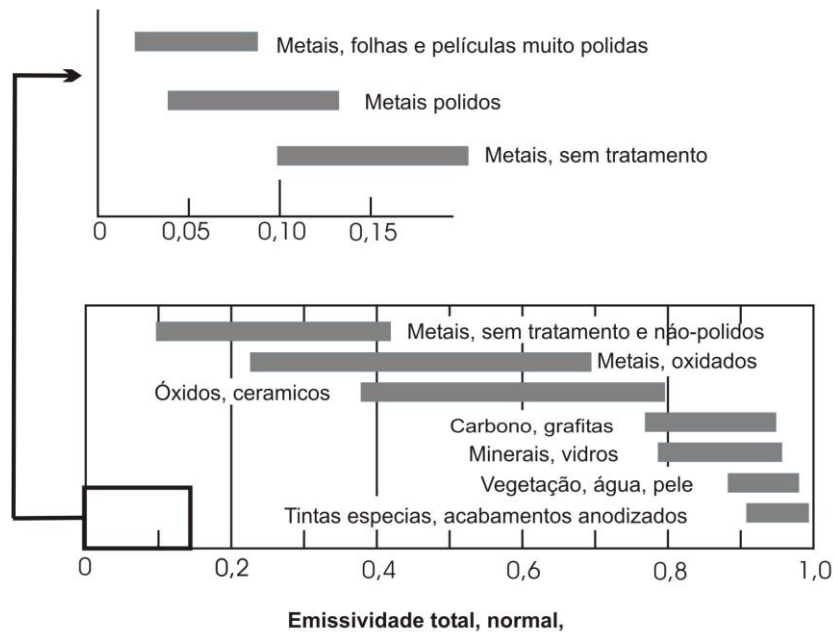
Em geral para corpos reais, a radiação espectral difere da distribuição de Planck e o corpo negro é utilizado como referência na capacidade de uma superfície real em emitir energia. O que é um parâmetro extremamente importante em uma análise de termografia infravermelha.

Outro parâmetro de grande importância é a emissividade, já citada anteriormente. A emissividade é definida como a razão entre a radiação emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro a uma mesma temperatura. Em experimentos termográficos, para a obtenção da temperatura a partir da energia irradiada do material ou objeto é necessário o conhecimento da emissividade do mesmo. Na prática esta pode ser obtida pela literatura do fabricante ou avaliações em laboratórios.

O principal motivo de não haver corpos com emissividade máxima, ou 1, é que parte da energia interna, quando se direcionando para a superfície, é refletida para dentro da mesma e nunca sairá por meio de radiação. Para fins de estudo, é definido então como emissividade do material, a razão entre a energia irradiada a dada temperatura pela energia que seria irradiada, a essa mesma temperatura, se o mesmo se trata-se de um corpo negro. Em outras palavras, emissividade é uma propriedade do objeto ou material que está relacionada com sua emissão de energia infravermelha.

Mesmo existindo direções preferenciais para a emissão, uma aproximação muito razoável e geralmente utilizada é que a emissão é difusa através da superfície, ou seja, possui intensidade igual em todas as direções de irradiação. Superfícies cerâmicas são comumente materiais difusos enquanto metais são comumente materiais especulares (com direções de irradiação preferenciais) Como exemplos de valores, são ilustrados na Figura 4 alguns valores de emissividade total (integrada ao longo de todo o espectro de emissão do corpo) para diferentes materiais. Para aplicações de IRT a emissividade do material precisa ser maior que 0,20.

Figura 4 - Exemplos de emissividade.



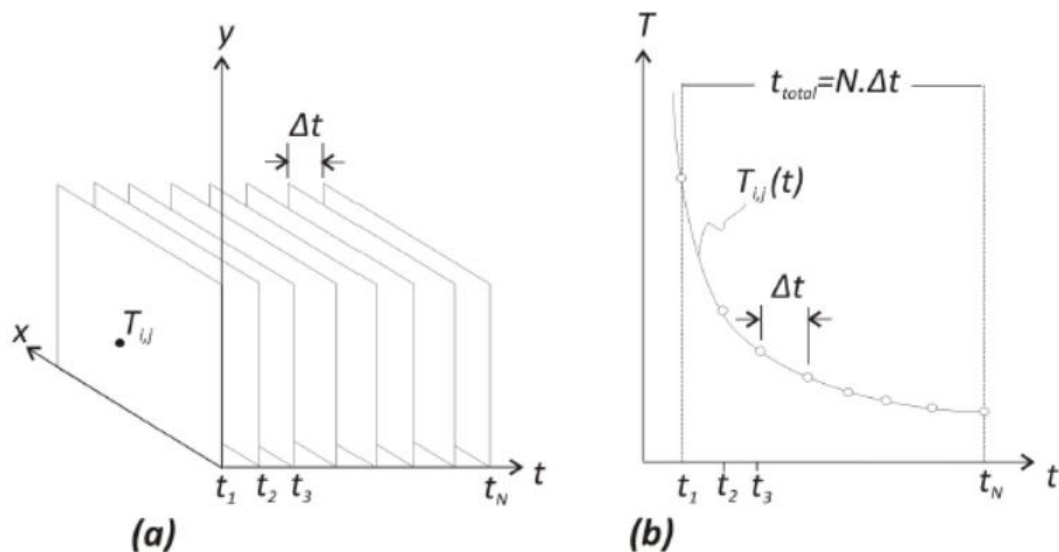
Fonte: Incropera e DeWitt (1992).

2.2. TERMOGRAFIA PULSADA EM MATERIAIS CERÂMICO

São considerados materiais cerâmicos, todos os materiais inorgânicos não metálicos, obtidos a partir de tratamento térmicos em temperaturas elevadas. E a principal condição para o uso de análise por termografia infravermelha é diferença entre a temperatura do sistema ou objeto observado e o ambiente externo. Com esta diferença e a consequente transferência de calor, consegue-se o contraste térmico que é detectado pela câmera. A troca de calor pode ser tanto a condução no interior do material, quanto convecção e radiação entra a superfície e o ambiente externo.

Ainda, a termografia infravermelha pulsada, foco do presente trabalho, tem como roteiro geral de aplicação o aquecimento por estimulação térmica da amostra e posterior análise do período de resfriamento. A mudança da temperatura da superfície de estudo é monitorada por IRT durante o processo de resfriamento e estas são utilizadas para a análise das falhas, por comparação com o resultado esperado para o material e o resultado encontrado no experimento. Na Figura 5 (a) é ilustrada a retirada de imagens termográficas de uma amostra sem defeitos durante o resfriamento em uma sequência por tempo total t_N . Na Figura 5 (b) é ilustrada a curva de decaimento de temperatura esperada neste mesmo período de tempo. A partir disto, qualquer falha no material pode então ser detectada, observando-se anomalias na curva de temperatura.

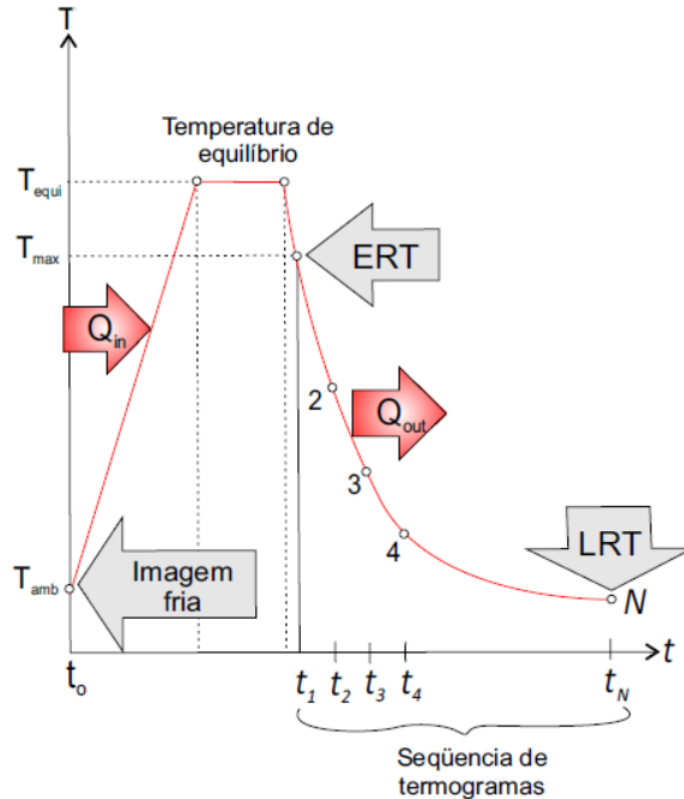
Figura 5 – Sequência de imagens térmicas e curva de decaimento de temperatura.



Fonte: Rodríguez (2010).

Para melhor entendimento do processo, uma sequência completa de termografias é esquematizada e ilustrada na Figura 6.

Figura 6 - Sequência de IRT para teste completo.



Fonte: Rodríguez (2010).

A primeira imagem captada é chamada imagem fria, que está indicada no tempo t_0 na Figura 6. E a sua principal utilidade para a termografia é a eliminação de sinais falsos por reflexão, podendo ser usada como base para comparação com as imagens seguintes. A próxima etapa do teste é o estabelecimento de equilíbrio térmico, que ocorre com a aplicação de estímulos térmicos, ou aquecimento do material, e é indicado na figura como T_{equi} . Após fim do aquecimento e do estabelecimento do equilíbrio, são retiradas imagens termográficas até que a amostra retorne à temperatura ambiente, que representa o passo final da sequência para termografia pulsada. Na qual o tempo total de inspeção é dependente da profundidade do defeito e da difusividade térmica do material, como indicado abaixo:

$$t \sim \frac{z^2}{\alpha} \quad (4)$$

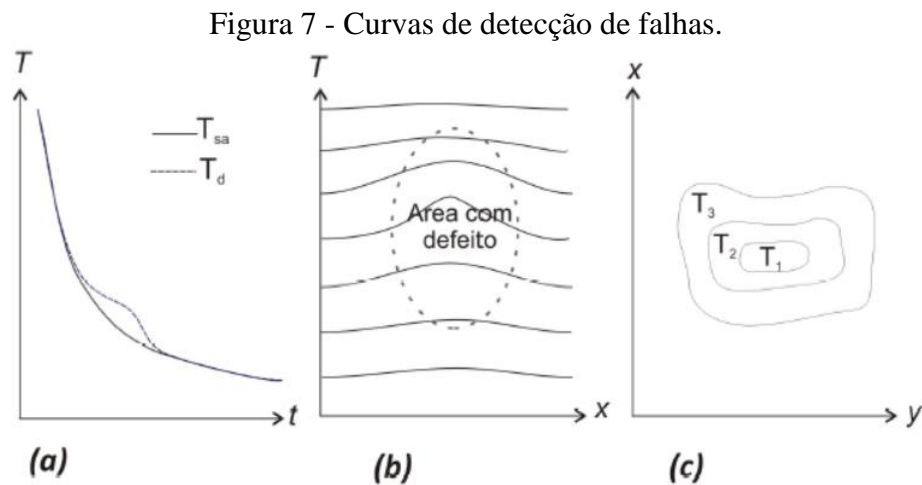
Onde:

z = profundidade do defeito [m]

α = difusividade térmica do material [m^2/s]

O que indica que para defeitos mais profundos é necessário mais tempo de observação e que para material com difusividade alta o tempo necessário diminui.

Com os dados obtidos pelos passos descritos anteriormente podem ser geradas curvas da evolução da temperatura, que permitem a identificação dos defeitos. Abaixo na Figura 7, são ilustrados os três principais tipos de curvas utilizadas para este tipo de análise, e são elas a curva de evolução da temperatura (a), os perfis de temperatura (b) e o contraste térmico (c).



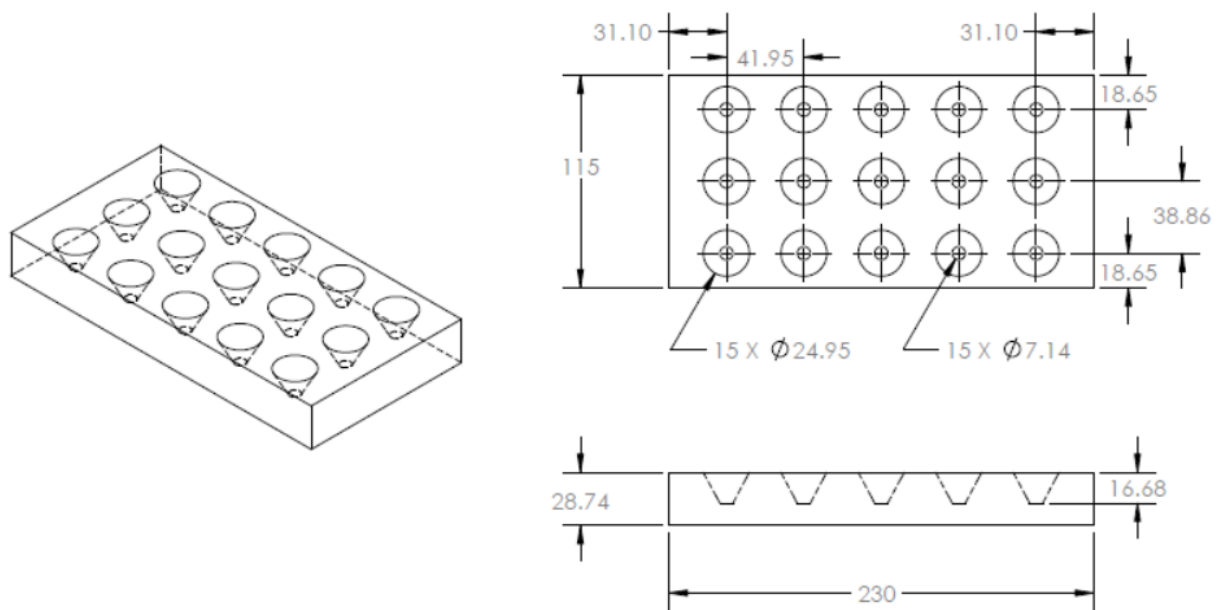
Fonte: Rodríguez (2010).

Na Figura 7 (a) é possível ver a diferença entre o comportamento esperado T_{sa} , ou área sã, para a amostra sem defeitos e T_d , o comportamento em caso de defeitos. Na Figura 7 (b) o gráfico indica a variação com a profundidade ao invés do tempo, e novamente é perceptível a área do defeito, como indicada na imagem.

3. METODOLOGIA

Como base para os testes e estudos realizados, foi utilizada uma amostra retangular plana de Alumina (óxido de alumínio, Al_2O_3) de dimensões 115x230x28,74mm com furos cônicos, de fundo plano, em apenas uma das faces e mantendo a face sem defeitos voltada para a câmera.

Figura 8 - Dimensões da amostra em mm.



Fonte: Autora (2018).

A peça foi modelada com o auxílio do software SolidWorks®, para uma melhor visualização da mesma e pode ser vista nas Figuras 8 e 9. Na Figura 8, acima, são descritos detalhes das dimensões da amostra, em mm.

Figura 9 - Modelo da amostra em SolidWorks®.



Fonte: Autora (2018).

O primeiro passo do estudo foi a identificação de uma distância ideal entre a câmera (FLIR® T450sc) e a amostra. Sendo ambas posicionadas em cima de uma bancada, de forma a mantê-las em uma mesma altura. A partir de algumas tentativas e observações do enquadramento e foco da imagem, foi encontrada como melhor distância entre a amostra e a câmera um valor 142,5cm. Com a definição das posições foram feitas marcações na mesa com fita preta para garantir que a amostra e a câmera estivessem sempre na mesma posição em todos os testes. A bancada, após os procedimentos descritos anteriormente pode ser vista nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Vista lateral da bancada de testes.



Fonte: Autora (2018).

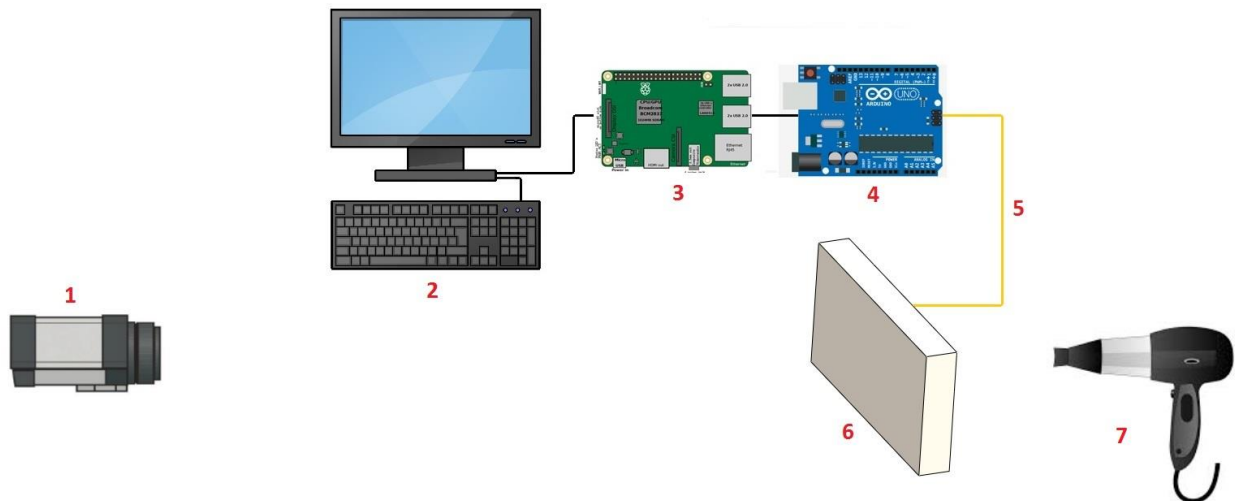
Figura 11 – Vista frontal da bancada de testes.



Fonte: Autora (2018).

Em seguida, para possibilitar a análise térmica da amostra e assim permitir o desenvolvimento de uma metodologia para a termografia, foi incluído um termopar do tipo K na mesa de testes e o aquecedor que será utilizado no aquecimento da mesma. Para que fosse possível a visualização e análise de dados vindo do termopar, foi necessária também a utilização de outros componentes, que são ilustrados no esquema da Figura 12. Note que diferentemente da técnica de termografia pulsada clássica, onde o estímulo térmico é realizado na superfície medida, aqui o estímulo térmico foi realizado na superfície traseira da amostra, enquanto a superfície frontal é a medida.

Figura 12 - Esquema do experimento.



Fonte: Autora (2018).

Na Figura 12, os componentes são ilustrados na seguinte ordem: câmera (1), monitor (2), Raspberry Pi 3 (3), Arduino Uno (4), termopar do tipo K (5), amostra cerâmica (6) e aquecedor (7).

A câmera infravermelha possibilita a estimativa de campos de temperatura em superfícies a partir da medição da intensidade radiativa captada pelo sensor da câmera. A interpretação da intensidade radiativa em temperatura depende de diversas variáveis prescritas no momento da estimativa. A variável com maior significância é a emissividade da superfície medida. Incertezas no valor da emissividade considerada afetam de forma significativa a estimativa da temperatura. A Tabela 1, abaixo, exemplifica a importância desta variável. Nela estão apresentados valores de estimativa de temperatura com a câmera infravermelha para a amostra com tinta de alta emissividade, no momento dos testes em que o termopar indicava $24,3^{\circ}\text{C}$, considerando diferentes emissividades para a superfície medida do material. A diferença causada na estimativa da temperatura da superfície com a emissividade errada se torna maior com a diferença entre a temperatura ambiente e a da superfície.

Tabela 1 – Comparativo de temperatura estimada pela câmera com mudança da emissividade.

Emissividade	Temperatura média estimada ($^{\circ}\text{C}$)	Diferença (%)
0,8	24,1	-0,82

0,85	24,4	0,41
0,9	24,7	1,65
0,95	25	1,23

Fonte: Autora (2018).

3.1.ESTIMATIVA DA EMISSIVIDADE DA AMOSTRA CERÂMICA E DA TINTA

Para a estimativa da emissividade da superfície a ser medida da amostra foi empregada uma fita isolante, por ser um material de emissividade conhecida ($\epsilon = 0,95$). A metodologia consiste em anexar um pedaço de fita isolante na superfície a ser medida e comparar a temperatura estimada pela câmera para a região com a fita e sem a fita. Devido ao equilíbrio térmico, ambas as regiões devem estar na mesma temperatura. Logo, uma diferença apontada pela câmera é na realidade uma diferença na emissividade entre as duas regiões. Ainda, para maior confiabilidade dos resultados, um termopar foi anexado em ambas as regiões para verificação da temperatura estimada pela câmera. A Figura 13 abaixo indica a montagem da medição de emissividade da amostra sem tinta, e na Figura 14, pode-se ver o caso para a amostra com tinta emissiva.

Figura 13 - Amostra sem tinta em medição de emissividade.



Fonte: Autora (2018).

Figura 14 - Amostra pintada com tinta de alta emissividade.



Fonte: Autora (2018).

Após três medições em imagens infravermelhas diferentes da mesma amostra, em temperaturas diferentes, foram encontrados valores bem similares para a emissividade da fita isolante. Um valor de 0,95, sendo esta a média das medidas.

A mesma metodologia foi empregada para a estimativa da emissividade da superfície cerâmica da amostra. Neste caso agora o resultado da imagem infravermelha foi comparada com a superfície ao lado do termopar. O valor médio de 0,83 para a cerâmica sem tinta foi encontrado, e de 0,86 para a cerâmica com a tinta. A Tabela 2 indica os valores estimados nas medições para a emissividade da amostra cerâmica e tinta emissiva.

Tabela 2 - Estimativa de emissividade para as amostras.

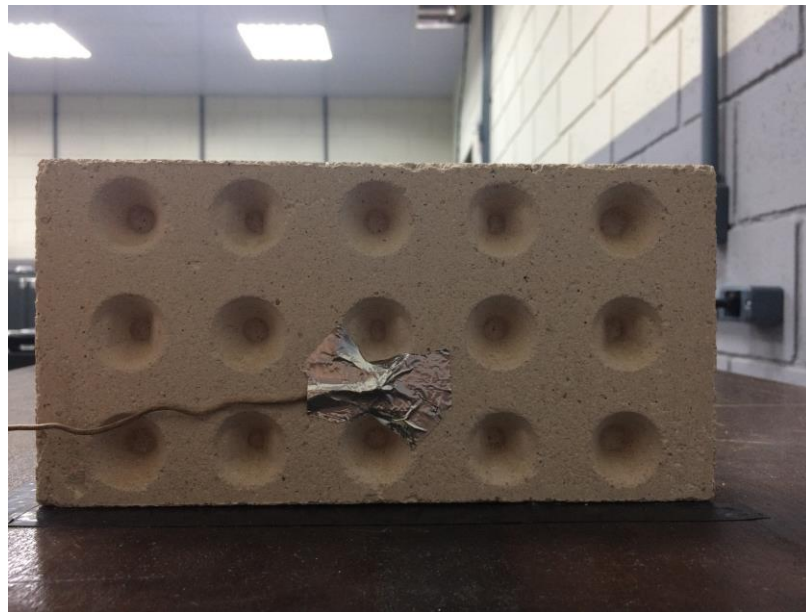
Termopar (°C)	Emissividade	
	Amostra cerâmica	Amostra cerâmica com tinta
23,9	0,84	0,88
24,2	0,83	0,86
24,3	0,83	0,83

Fonte: Autora (2018).

3.2.MONTAGEM E METODOLOGIA DA MEDIÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DO DEFEITO

Para a identificação de defeitos internos a câmera termográfica é usada para levantar o campo de temperaturas da superfície sem defeito da amostra. Um termopar foi posicionado na parte de trás da amostra, próximo ao centro, entre os furos. A localização do termopar é ilustrada na Figura 15 abaixo.

Figura 15 - Posição do termopar.



Fonte: Autora (2018).

Durante a medição da amostra original (sem tinta) foram identificados pontos quentes pela câmera na superfície medida pela câmera. Devido a amostra toda estar na mesma temperatura, estes pontos indicam uma não uniformidade na emissividade da superfície. Para a medição da profundidade do defeito esta não uniformidade pode levar a uma estimativa errônea dos resultados. Para evitar isso, uma tinta de alta emissividade foi empregada para uniformizar a emissividade da superfície medida.

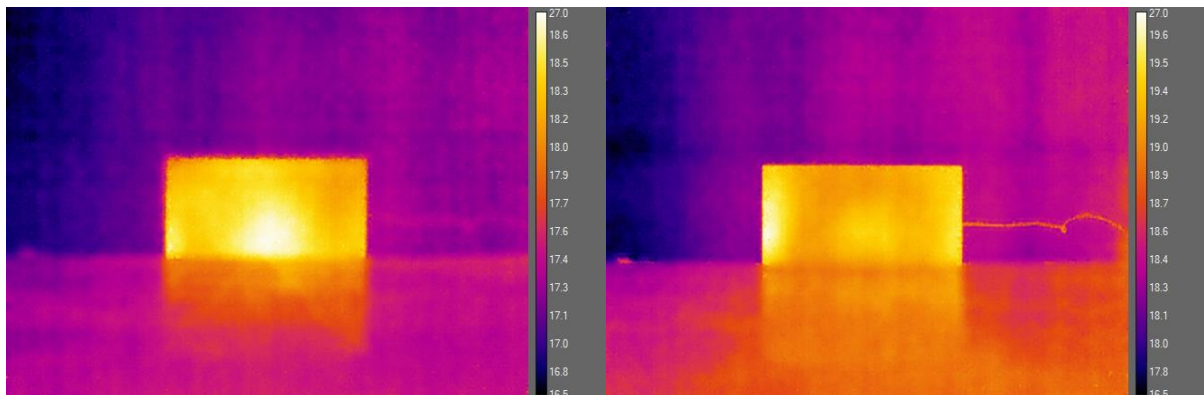
4. RESULTADOS

Foram realizados dois testes com cada tipo de amostra, um com 1 minuto de aquecimento e um com 2 minutos de aquecimento. Os resultados das imagens termográficas para as duas amostras podem ser vistas nas Figuras 16 a 20, para o teste de 1 minuto, e Figuras 24 a 26, para o teste de 2 minutos, nas quais os valores na escala de temperatura são dados em graus Celsius.

O aquecimento foi realizado com o auxílio de um aquecedor de potência 1000W, tensão de 127/220V e frequência 50-60Hz. Sendo que para o todos os aquecimentos, o aparelho foi direcionado para o furo central da peça.

Na Figura 16, ilustrada abaixo, as amostras encontravam-se à temperatura ambiente e nenhum tipo de aquecimento havia sido aplicado sobre as mesmas.

Figura 16 - FLIR0020 (21,4°C) e FLIR0028 (21,9°C).

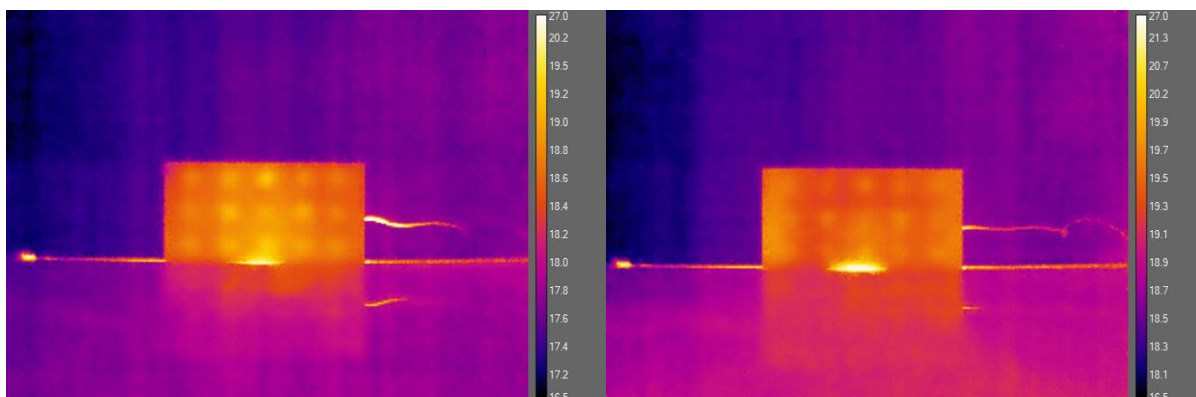


Fonte: Autora (2018).

No momento da retirada da foto na Figura 17, o aquecedor havia sido recém removido de trás da amostra, após 1 minuto de aquecimento, e para uma melhor análise foram retiradas fotos durante o período de resfriamento natural da mesma, que são ilustradas em sequência. A amostra sem tinta é ilustrada a esquerda em todas as figuras, e a amostra com tinta, a direita. As fotos foram

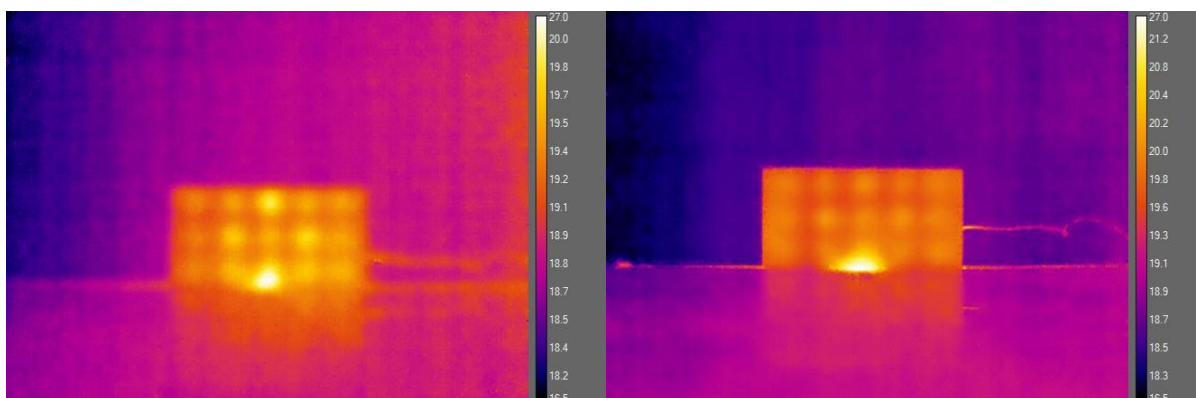
tiradas no momento que o termopar posicionada atrás da amostra indicava uma temperatura aproximada semelhante entre os dois testes durante o resfriamento.

Figura 17 - FLIR0021 (35,3°C) e FLIR0029 (33,6°C).



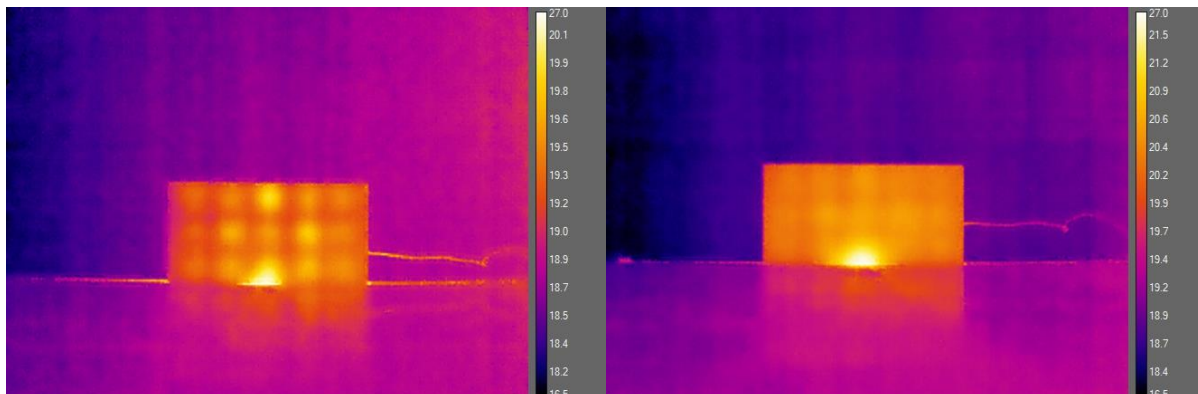
Fonte: Autora (2018).

Figura 18 - FLIR0052 (25,6°C) e FLIR0030 (26,4°C).



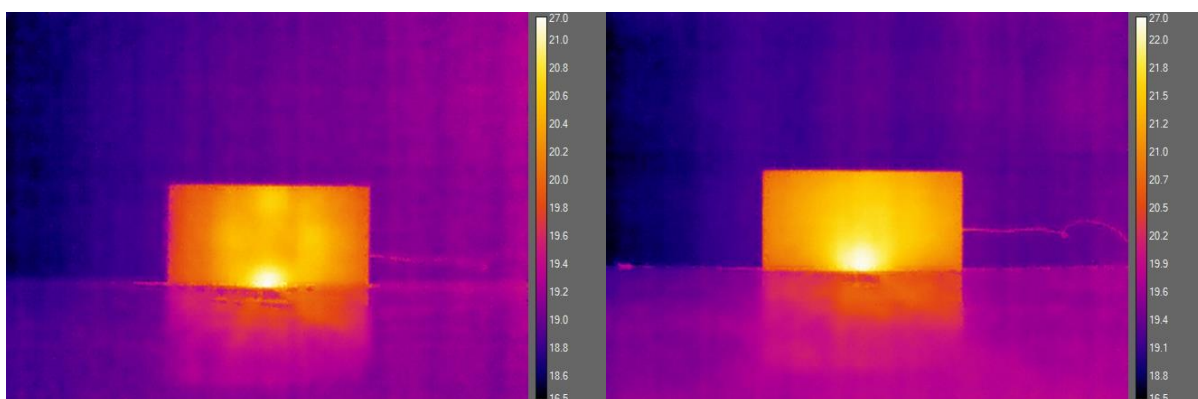
Fonte: Autora (2018).

Figura 19 - FLIR0053 (24,6°C) e FLIR0031 (24,9°C).



Fonte: Autora (2018).

Figura 20 - FLIR0055 (23,5°C) e FLIR0032 (23,5°C).

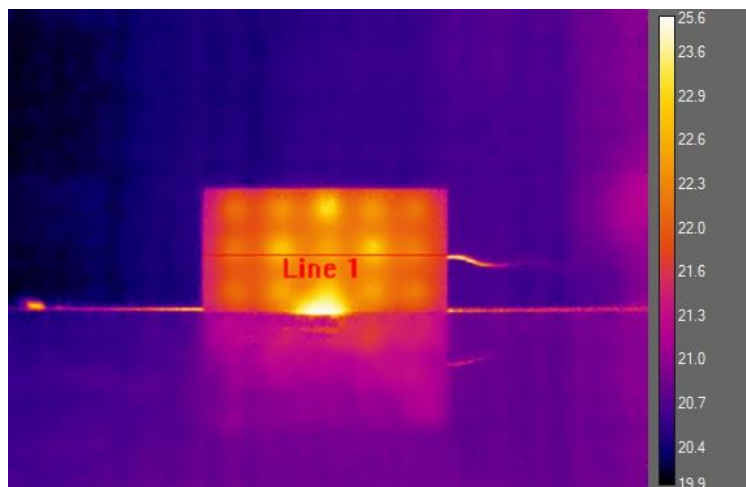


Fonte: Autora (2018).

Como pode-se observar, o aquecimento foi o suficiente para que todos os furos se tornassem nítidos e distinguíveis em algum momento durante o resfriamento monitorado das amostras. Porém, notou-se que os resultados apresentados no teste da amostra com a tinta emissiva, mais uniforme, na realidade parece ter uma maior dificuldade em identificar os defeitos internos do que os resultados apresentados pela amostra sem tinta.

Em seguida, os valores de temperatura na linha horizontal central das amostras foram extraídos, com ajuda de dados gerados pelo software da própria câmera, como ilustrado no exemplo da Figura 21.

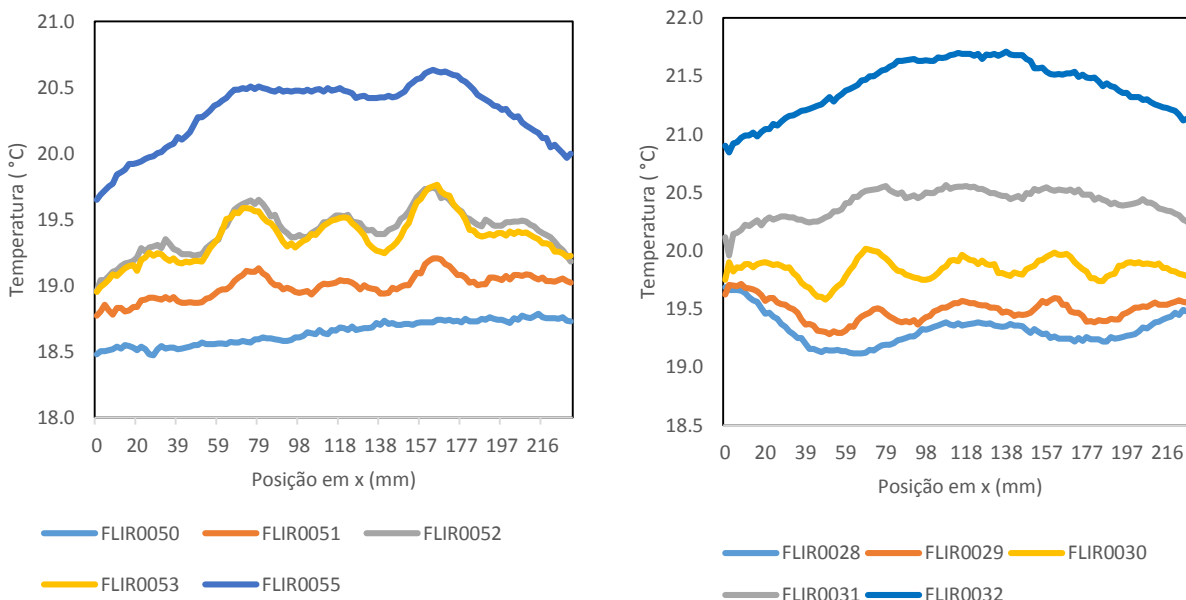
Figura 21 - Linha horizontal de temperaturas.



Fonte: Autora (2018).

A partir destes dados, foram geradas curvas de temperaturas tanto para o caso com tinta quanto sem tinta. Os gráficos para resfriamento após teste de 1 minuto podem ser vistos na Figura 22, nas quais a posição no eixo x foi considerada como zero no ponto mais à esquerda da amostra.

Figura 22 - Perfil de temperatura na horizontal nas amostras durante resfriamento sem tinta (esquerda) e com tinta (direita).



Fonte: Autora (2018).

Durante todas as etapas de teste foram realizadas medições da parte central da amostra, com o termopar. E as medições relativas aos momentos da retirada das fotos anteriores são indicadas na Tabela 3. Na qual a etapa 1 representa os testes da amostra sem a tinta e a etapa 2, após a pintura. A indicação do código das fotos pode ser identificado na tabela abaixo, com a referente temperatura da superfície traseira de cada amostra, onde o aquecimento foi realizado. A primeira foto de cada coluna da Tabela 3 indica o momento frio (foto anterior ao aquecimento da amostra, para comparação). Nota-se que enquanto a temperatura da superfície traseira da amostra decai após cessar o aquecimento e iniciar o resfriamento, a temperatura da superfície frontal da amostra, a qual é medida pela câmera IR, cresce, enquanto calor é conduzido pela amostra cerâmica e é perdido por radiação e convecção através das superfícies.

Tabela 3 - Temperaturas indicadas pelo termopar no teste de 1 minuto.

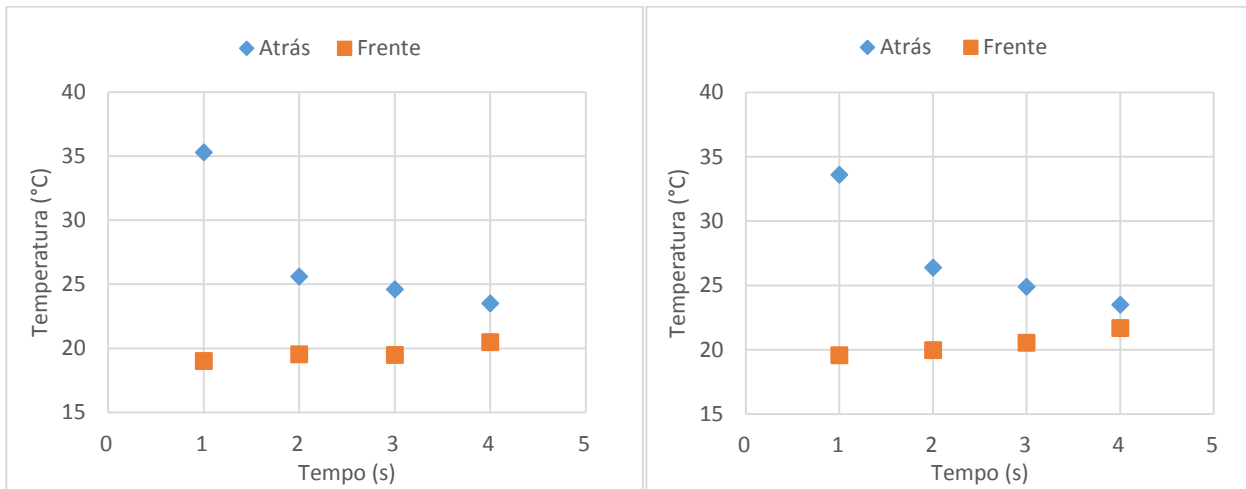
Amostra sem tinta	Temperatura (°C)	Amostra com tinta	Temperatura (°C)
FLIR0020	21,4	FLIR0028	21,9
FLIR0021	35,3	FLIR0029	33,6
FLIR0052	25,6	FLIR0030	26,4
FLIR0053	24,6	FLIR0031	24,9
FLIR0055	23,5	FLIR0032	23,5

Fonte: Autora (2018).

A diferença de temperatura entre as temperaturas medidas pelo termopar, na superfície traseira, e pela câmera, na superfície frontal, durante testes (resfriamento da amostra) é mostrada na Figura 23 para a amostra sem tinta, nos testes de 1 e 2 minutos.

É interessante notar que a temperatura da superfície frontal da amostra com tinta e sem tinta é similar durante os testes, indicando que a emissividade das amostras é de fato semelhante (0,84 e 0,86).

Figura 23 - Temperaturas centrais da amostra sem tinta para os testes de 1 minuto (esquerda) e 2 minutos (direita).

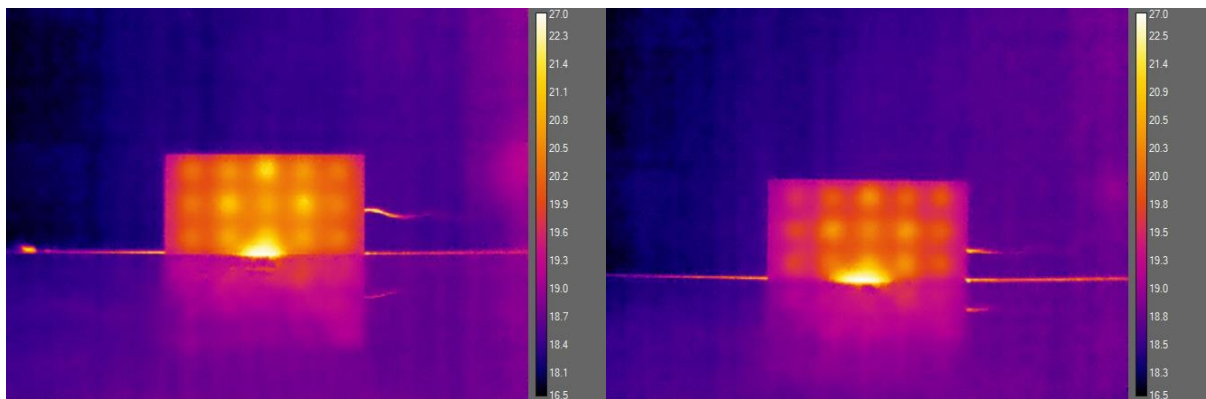


Fonte: Autora (2018).

Também é importante notar que na figura com os perfis de temperatura horizontal, Figura 22, é possível identificar três defeitos centrais, porém perde-se a percepção dos três defeitos claramente mais rapidamente na amostra com tinta.

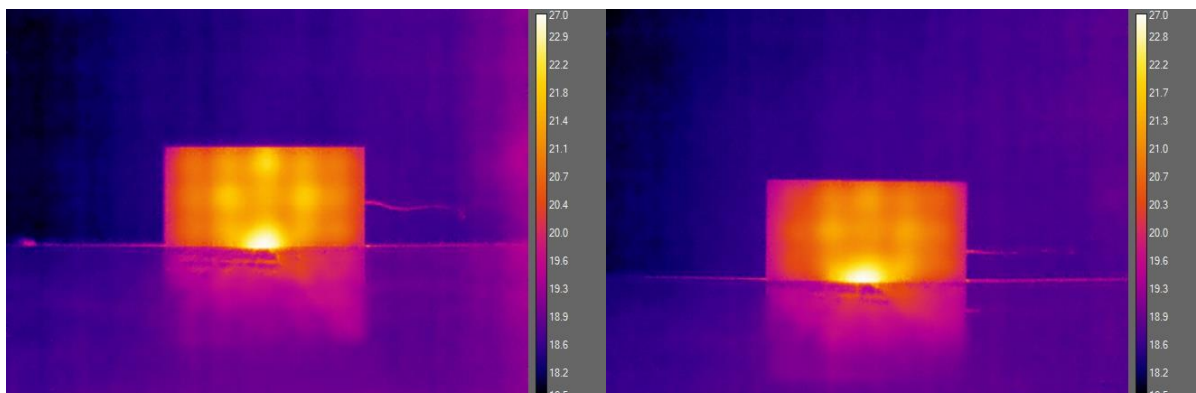
Ainda, repetiu-se os testes aquecendo por 2 minutos, ao invés de 1 minuto, utilizando também a potência 1. Sendo os resultados dos mapas termográficos da mesma ilustrados nas Figuras 24, 25 e 26.

Figura 24 - FLIR0025 (38,7°C) e FLIR0042 (37,9°C).



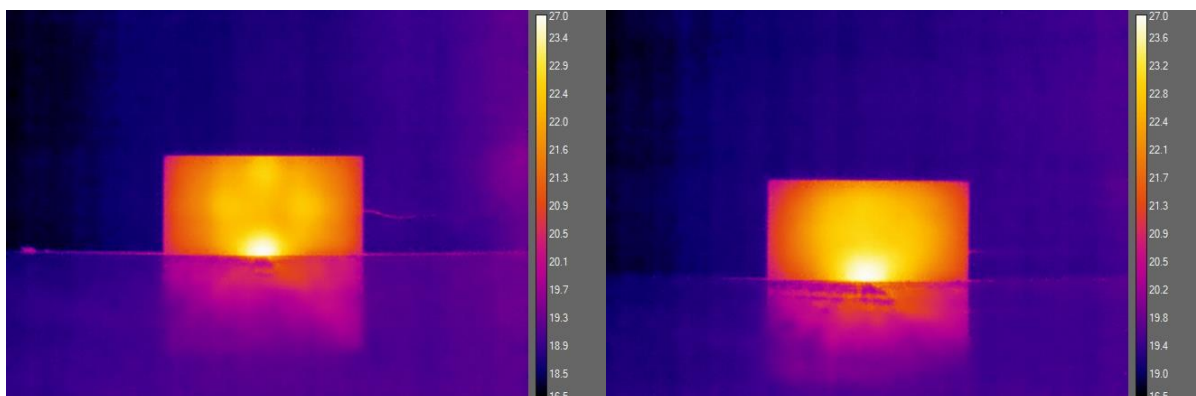
Fonte: Autora (2018).

Figura 25 - FLIR0026 (27,9°C) e FLIR0043 (27,9°C).



Fonte: Autora (2018).

Figura 26 - FLIR0027 (26,1°C) e FLIR0044 (25,3°C).



Fonte: Autora (2018).

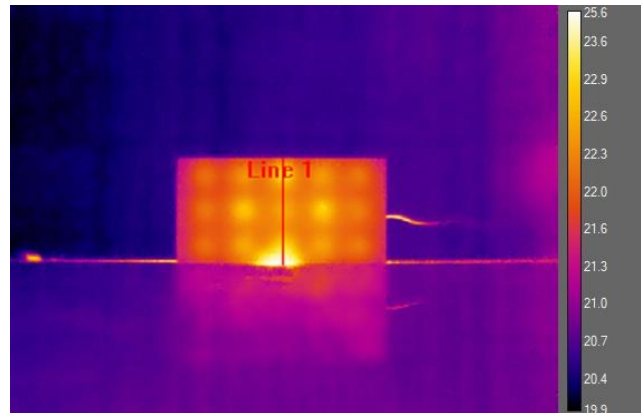
Tabela 4 - Temperaturas do teste de 2 minutos.

Amostra sem tinta	Temperatura (°C)	Amostra com tinta	Temperatura (°C)
FLIR0025	38,7	FLIR0042	37,9
FLIR0026	27,9	FLIR0043	27,9
FLIR0027	26,1	FLIR0044	25,3

Fonte: Autora (2018).

Ainda, foram obtidos os dados da linha central vertical da amostra, como ilustrado no exemplo da Figura 27.

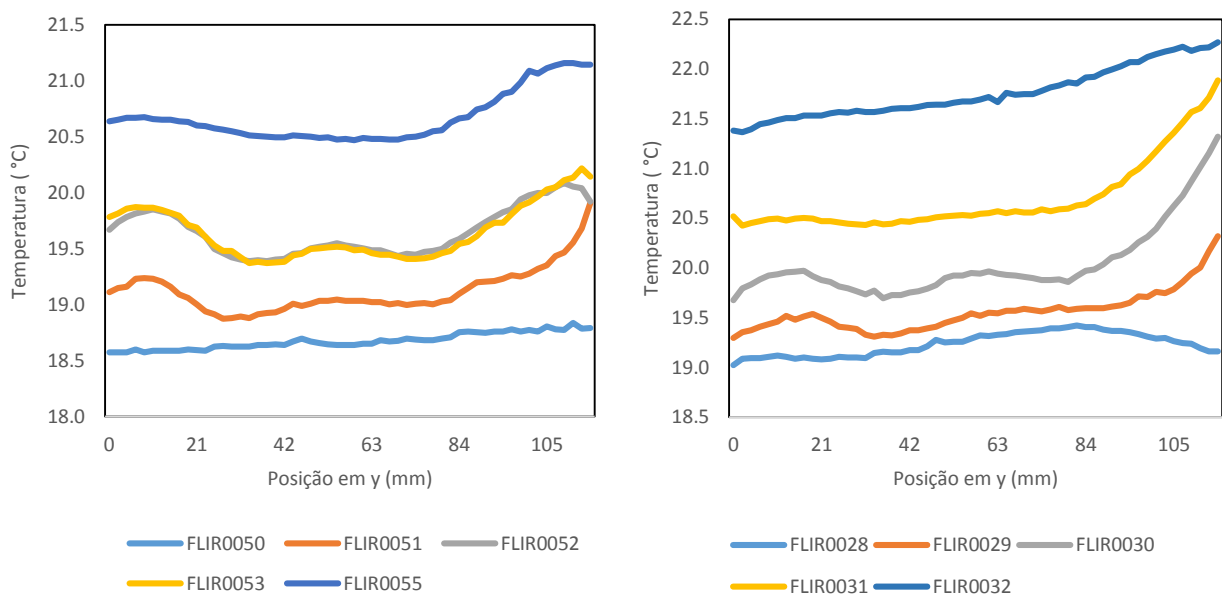
Figura 27 - Linha vertical de temperaturas.



Fonte: Autora (2018).

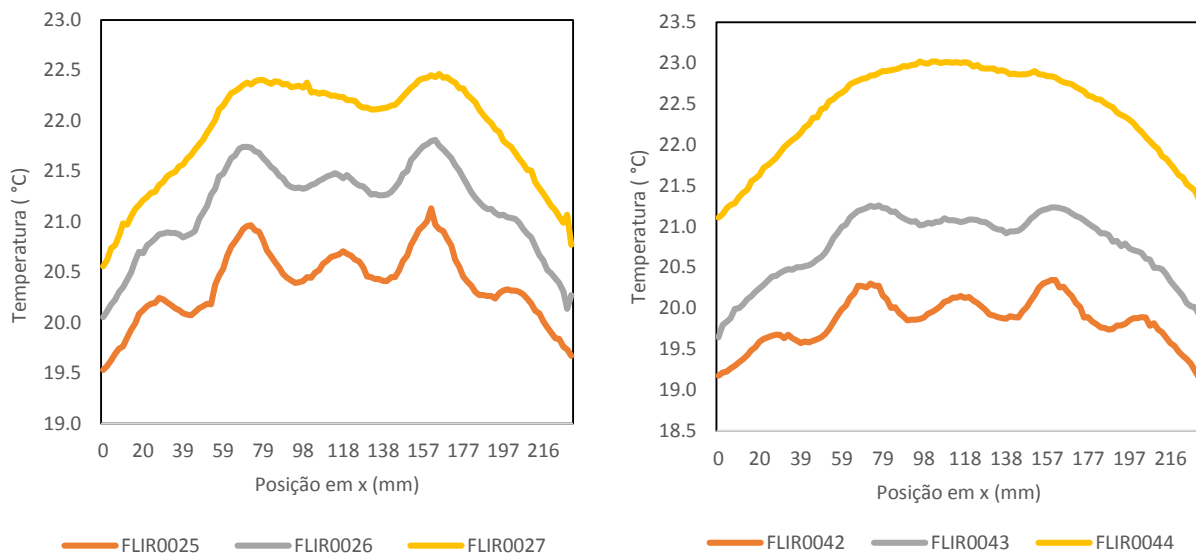
Os resultados de temperatura para o aquecimento são mostrados nos gráficos a seguir, nos quais a posição em y é considerada como zero no ponto mais alto da amostra. Percebe-se que a sensibilidade na identificação dos três furos pelo qual a linha vertical passa é menor do que na linha horizontal. Isso ocorreu principalmente devido a existência de um ponto quente no testes devido a reflexão da radiação térmica pela mesa onde a amostra está apoiada, no central da figura, identificada nas Figuras 28 e 30 no final do eixo horizontal como um aumento de temperatura.

Figura 28 - Perfil de temperatura na vertical para teste de 1 minuto nas amostras durante resfriamento sem tinta (esquerda) e com tinta (direita).



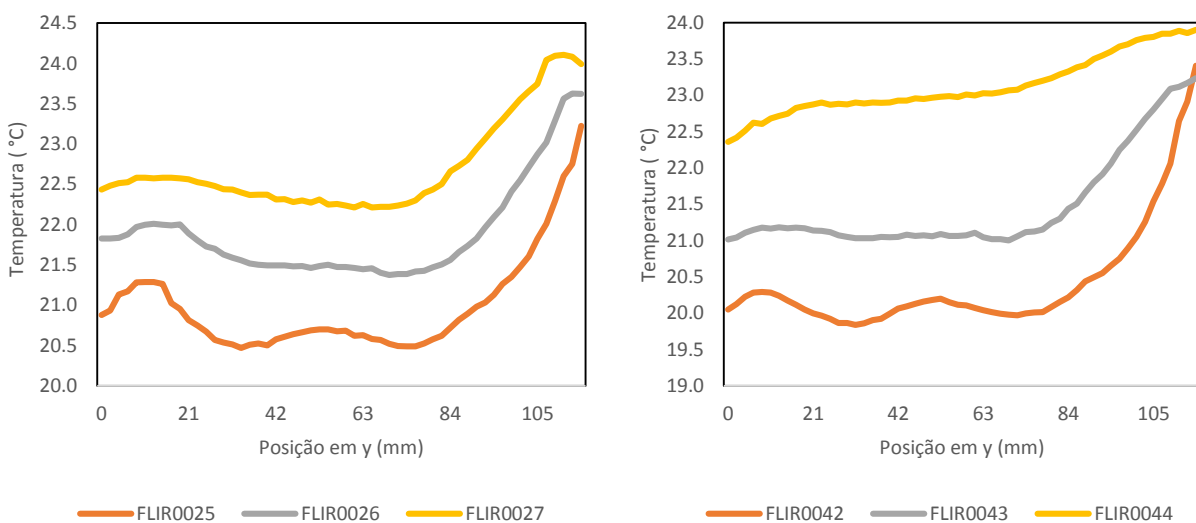
Fonte: Autora (2018).

Figura 29 - Perfil de temperatura na horizontal para teste de 2 minutos nas amostras durante resfriamento sem tinta (esquerda) e com tinta (direita).



Fonte: Autora (2018).

Figura 30 - Perfil de temperatura na vertical para teste de 2 minutos nas amostras durante resfriamento sem tinta (esquerda) e com tinta (direita).



Fonte: Autora (2018).

A diferença numérica da diferença entre a temperatura central de cada amostra, retirada dos dados da imagem termográfica, e a temperatura medida no termopar, localizado na parte de trás da amostra está apresentada nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Variação de temperatura entre ponto central da foto e termopar para o teste de 1 minuto.

Sem tinta	ΔT (°C)	Com tinta	ΔT (°C)
FLIR0051	-18,5	FLIR0029	-14,0
FLIR0052	-6,1	FLIR0030	-6,4
FLIR0053	-5,1	FLIR0031	-4,3
FLIR0055	-3,0	FLIR0032	-1,8

Fonte: Autora (2018).

Tabela 6 - Variação de temperatura entre ponto central da foto e termopar para o teste de 2 minutos.

Sem tinta	ΔT (°C)	Com tinta	ΔT (°C)
FLIR0025	-18,0	FLIR0042	-17,8
FLIR0026	-6,4	FLIR0043	-6,8
FLIR0027	-3,9	FLIR0044	-2,3

Fonte: Autora (2018).

É possível notar que nos momentos da foto FLIR0055 e FLIR0032 as diferenças se encontram nos mínimos relativos para cada caso. O que faz sentido fisicamente, uma vez que ambas as fotos foram retiradas durante resfriamento após teste de 1 minuto, que foi o menor período de aquecimento, e são as últimas fotos retiradas após o tempo aguardado para resfriamento, ou seja, houve tempo o suficiente para que o calor fosse transferido da parte de trás para a parte frontal.

Por fim, comparou-se a temperatura central de cada foto com a temperatura ambiente do laboratório de testes, que foi considerada como 18°C. Os resultados nas variações de temperatura são mostrados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Variação de temperatura entre ponto central da foto e temperatura ambiente para o teste de 1 minuto (18°C).

Sem tinta	ΔT (°C)	Com tinta	ΔT (°C)
FLIR0051	1,0	FLIR0029	1,6
FLIR0052	1,5	FLIR0030	2,0
FLIR0053	1,5	FLIR0031	2,6
FLIR0055	2,5	FLIR0032	3,7

Fonte: Autora (2018).

Tabela 8 - Variação de temperatura entre ponto central da foto e temperatura ambiente para o teste de 2 minutos (18°C).

Sem tinta	ΔT (°C)	Com tinta	ΔT (°C)
FLIR0025	2,7	FLIR0042	2,1
FLIR0026	3,5	FLIR0043	3,1
FLIR0027	4,2	FLIR0044	5,0

Fonte: Autora (2018).

Nestas tabelas, a menor variação é encontrada para as imagens FLIR0051 e FLIR0029, que são as amostras logo após o aquecimento de 1 minuto, e isso também faz sentido fisicamente, uma vez que ainda não houve tempo para a transferência de calor para a parte frontal da amostra já que a condutividade térmica do material cerâmico (alumina) é baixa.

Quando se compara os resultados das termografias em que os pontos centrais são mais visíveis, FLIR0053 para a amostra sem tinta, e FLIR0031 para a amostra com tinta, percebe-se que para a amostra estudada o melhor momento de análise termográfica é aquele em que a variação de temperatura entre a amostra e o ambiente encontra-se à respectivamente 1,5°C e 2,0°C.

É interessante notar que para a amostra com maior valor de emissividade (amostra com tinta), a sensibilidade na visualização dos defeitos é menor do que na amostra com menor emissividade (sem tinta). Isso pode ser visualizado comparando-se os resultados da Figura 29 (perfis horizontais de temperatura para teste de resfriamento após 2 minutos de aquecimento) e as Tabelas 7 e 8 (diferença de temperatura entre superfície frontal e temperatura ambiente). Na Figura 29 observa-se que para a amostra com tinta (direita) a linha com maior tempo de resfriamento

(FLIR0044) não é possível identificar os três orifícios centrais da linha horizontal. A Tabela 8 indica uma diferença de temperatura no centro da linha com o ambiente de $5,0^{\circ}\text{C}$. Na amostra sem tinta, no mesmo ponto (FLIR0027) ainda é visível claramente o terceiro defeito (mais a direita) enquanto a diferença de temperatura com o ambiente é de apenas $4,2^{\circ}\text{C}$. Ou seja, foi necessário uma menor diferença de temperatura com o ambiente e a superfície medida da amostra para visualizar o defeito para a amostra com menor emissividade. A mesma conclusão pode ser feita ao se comparar a linha do tempo de resfriamento anterior, na mesma figura (fotos FLIR0026 e FLIR0043). Neste caso agora, a temperatura da superfície traseira é idêntica para ambas as fotos mas os defeitos são visualizados com maior clareza na imagem da amostra com menor emissividade. Neste caso porém, a diferença de temperatura entre o ponto central da linha horizontal na superfície frontal é levemente maior para o caso da amostra com emissividade menor ($3,5^{\circ}\text{C}$ para a emissividade menor e $3,1^{\circ}\text{C}$ para a emissividade maior). Isso leva a crer que apenas a comparação entre diferença de temperatura entre superfície medida e temperatura ambiente talvez não seja variável o suficiente para concluir totalmente a que profundidade de defeito amostras com diferentes emissividades possuem sensibilidade confiável.

É importante notar também que a melhor visualização do defeito durante os testes realizados ocorreu para a amostra sem tinta e com tinta com diferença de temperatura entre superfície medida e ambiente de $1,5^{\circ}\text{C}$ e $2,0^{\circ}\text{C}$ respectivamente, para o teste de 1 minuto de aquecimento. Para o de 2 minutos os resultados melhor visualizados ficaram em $2,7^{\circ}\text{C}$ e $2,1^{\circ}\text{C}$, para as amostras sem tinta e com tinta, respectivamente. Esse resultado aponta que diferenças muito grandes de temperatura entre a superfície medida e o ambiente também não são boas para a visualização do defeito. Isso pode ser talvez devido ao aumento da emissão do material com maiores temperaturas, mascarando o efeito do defeito dentro da amostra. Comparando os resultados dos testes de 1 minuto e 2 minutos de aquecimento, conclui-se que uma diferença de temperatura entre superfície medida e ambiente entre 1°C e 2°C parece ser mais adequada para a visualização de defeitos internos tipo bolha com aproximadamente 12mm de profundidade e 7mm de diâmetro. Destaca-se aqui que para conclusões para outros tipos de defeitos e tamanhos é necessário testes específicos.

5. CONCLUSÃO

Os resultados encontrados para metodologia utilizada nos testes e estudo de termografia infravermelha em materiais cerâmicos se mostrou condizente, num geral, com o esperado pela teoria. Ainda, os testes comprovaram a eficiência de testes não destrutivos e a sua utilização neste tipo de material.

A estimativa da emissividade da tinta emissiva, diferentemente do que se esperava, não apresenta uma emissividade muito maior do que da alumina (cerâmica empregada para as amostras), obtendo um valor de apenas 0,86 na faixa de temperatura medida (18 a 23°C). Medições futuras para faixas de temperatura mais elevada podem apresentar resultados com emissividade mais elevada, sendo interessante de serem realizados para uma completa caracterização da tinta. Concluiu-se ainda que a tinta de alta emissividade, também contrário ao que se esperava, não auxiliou na visualização de defeitos. Sendo então preferível a utilização de amostras cerâmicas sem tinta no caso da faixa de temperaturas próxima da ambiente (perto de 18°C).

Com relação a sensibilidade à visualização de defeitos, as principais conclusões são apontadas abaixo:

- a) O aparecimento de pontos quentes (como o visto nos perfis de temperatura vertical em todos os testes realizados) atrapalha a sensibilidade do testes e impossibilita o uso da técnica com confiabilidade;
- b) Diferentes emissividades na superfície a ser medida, mesmo que em pequenas diferenças, influenciam bastante na sensibilidade da identificação de defeitos internos. No caso analisado neste trabalho, a amostra com maior emissividade se mostrou com menor sensibilidade na visualização dos defeitos interno para a mesma quantidade de calor fornecida. O critério clássico empregado para análise de termografia ativa (diferença de temperatura entre superfície analisada e ambiente) não se mostrou suficiente para tomar a decisão sobre a existência ou não de um defeito, como foi visto nos resultados apresentados.

Por fim, foi possível a visualização dos defeitos por meio das curvas de temperatura e viu-se que a melhor visualização dos defeitos, para este caso, ocorre quando a diferença de temperatura entre a amostra e o ambiente de 1,5 a 2°C.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

Para continuação deste estudo destaca-se as seguintes possibilidades, consideradas importantes:

- a) Ampliação dos testes para faixas de temperaturas maiores (assim como estimativa da emissividade da tinta emissiva e da amostra cerâmica para faixas maiores de temperatura) para reforçar a conclusão de que diferenças de temperaturas elevadas na realidade não contribuem para a identificação de defeitos internos e que há um ponto intermediário ótimo para cada defeito e material;
- b) Projeto de um sistema diferente de montagem da amostra que diminua a geração de pontos quentes (como o gerado pela reflexão de radiação pela mesa onde a amostra é apoiada atualmente);
- c) Expansão do estudo para outros tipos de defeitos e com diferentes profundidades para diferentes cerâmicas;
- d) Expansão do estudo para materiais compósitos e metais, empregados na indústria aeroespacial.

REFERÊNCIAS

- ABRATE, Serge. **Soft impacts on aerospace structures**. Carbondale: Elsevier, 2015.
- ANTONUCCI, V. et al. **Non destructive techniques for the impact damage investigation on carbon fibre laminates**. [s. L.]: Elsevier, 2014.
- ANGHEL, Viorel et al. **On the use of infrared thermography as NDT of aerospace materials**. Bucareste: Incas Bulletin, 2010.
- CIAMPA, Francesco et al. **Recent Advances in Active Infrared Thermography for Non-Destructive Testing of Aerospace Components**. Bath: Reative Commons Attribution, 2018.
- INCROPERA, Frank P; DEWITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992. 455 p.
- LAND INSTRUMENTS INTERNATIONAL. **A Basic Guide to Thermography**. Dronfield: Land Instruments International, 2004.
- LI, Yi et al. **Low-velocity impact damage characterization of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) using infrared thermography**. Hongqing Town: Elsevier, 2016.
- MALDAGUE, Xavier. **Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing**. 2. ed. Estados Unidos: John Wiley and Sons Inc., 2011.
- MEOLA, C. et al. **Impact damaging of composites through online monitoring and non-destructive evaluation with infrared thermography**. Naples: Elsevier, 2016.
- MEOLA, C. et al. **Infrared thermography to detect residual ceramic in gas turbine blades**. Itália: Springer-verlag, 2008.
- REVEL, G. M.; ROCCHI, S.. **Defect Detection in Ceramic Materials by Quantitative Infrared Thermography**. Ancona: Paper Qirt 2006-003, 2006.
- RODRÍGUEZ, Fernando de Jesús López. **Detecção de defeitos em materiais cerâmicos usando termografia**. 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- SFARRA, Stefano et al. **Quantitative Infrared Thermography (IRT) and Holographic Interferometry (HI): Nondestructive Testing (NDT) for defects detection in the Silicate Ceramics Industry**. Suíça: Trans Tech Publications, 2010.
- YASMINA, Fedala et al. **Infrared Lock-in Thermography Crack Localization on Metallic Surfaces for Industrial Diagnosis**. New York: Springer Science+Business Media, 2013.