

INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE NA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM PEÇAS DE MANUFATURA ADITIVA USANDO TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Milene Andréia Martins Paiva, milene.20240045050@aluno.uema.br¹
Bárbara Sampaio Alves Lima, lima.barbara@acad.ifma.edu.br²
Caio Magno Mendonça Nicácio, caio.20220058622.uema.br¹
Reginaldo Nunes da Silva, reginaldonunes@professor.uema.br¹
Willian de Vasconcelos Silva, w291178@dac.unicamp.br³
Alisson Augusto Azevedo Figueiredo, alissonfigueiredo@professor.uema.br^{1,2}

¹ Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Cidade Universitária Paulo VI, Av. Lourenço Vieira da Silva, n.º 1000, Bairro Jardim São Cristóvão, CEP: 65055-310 – São Luís/MA,

² Instituto Federal do Maranhão, Av. Getúlio Vargas, 04 - Monte Castelo, São Luís - MA, 65030-005

³ Cidade Universitária Zeferino Vaz - Barão Geraldo, Campinas - SP, 13083-970

Resumo. A manufatura aditiva (MA) conhecida como impressão 3D, é um conjunto de processos que fabricam objetos por adição sucessiva de material, camada por camada, a partir de um modelo digital. No entanto, durante o processo de fabricação, defeitos como porosidade, parâmetros de design, parâmetros de processo. O objetivo deste trabalho é detectar os defeitos internos das peças, em diferentes posições, por meio da termografia infravermelha. As amostras foram realizadas na plataforma Onshape, usando como tamanho padrão a norma ASTM D638, com dimensões 165x19x5 mm, sendo realizadas 6 peças, sendo 1 referencial e, 5 defeituosas, com dimensão do defeito cúbico 1x1x1 mm, para todas. As amostras foram posicionadas a 0,50 cm da câmera infravermelha FLIR A700 e foram utilizadas duas lâmpadas halógenas de 1KW como fonte de calor, com o tempo de pulso de 1 segundo. Os resultados mostraram que a termografia ativa pulsada usando o método de reflexão é capaz de identificar as variações de temperatura nas regiões de interesse, identificando o menor tempo possível para cada amostra, além de relacionar com o contraste térmico, apresentando um significativo contraste térmico entre o área defeituosa e a saudável.

Palavras chave: Impressão 3D. Termografia ativa. Ensaio não destrutivo. Falhas. Contraste térmico.

Abstract. Additive manufacturing (AM), known as 3D printing, is a set of processes that manufacture objects by successive addition of material, layer by layer, from a digital model. However, during the manufacturing process, defects such as porosity, design parameters, process parameters. The objective of this work is to detect internal defects of the parts, in different positions, through infrared thermography. The samples were made on the Onshape platform, using the ASTM D638 standard as the standard size, with dimensions of 165x19x5 mm, with 6 parts being made, 1 reference and 5 defective, with a cubic defect dimension of 1x1x1 mm, for all. The samples were positioned 0.50 cm from the FLIR A700 infrared camera and two 1KW halogen lamps were used as a heat source, with a pulse time of 1 second. The results showed that pulsed active thermography using the reflection method is capable of identifying temperature variations in the regions of interest, identifying the shortest possible time for each sample, in addition to relating it to thermal contrast, presenting a significant thermal contrast between the defective and healthy areas.

Keywords: 3D printing. Active Thermography. Non-Destructive Testing. Failures. Thermal contrast.

1. INTRODUÇÃO

Conhecida também como manufatura aditiva, a impressão 3D, é um conjunto de processos que fabricam objetos por adição sucessiva de material, camada por camada, a partir de um modelo digital. É essencial para a modernização da indústria, permitindo inovação, customização e otimização de processos produtivos. Este processo produz o desperdício de materiais e viabiliza a produção de peças complexas com alta precisão, impactando positivamente setores estratégicos como saúde, transporte e tecnologia. A manufatura aditiva pode apresentar defeitos que afetam a qualidade da peça final, defeitos de parâmetros de design, orientação de raster e a espessura da camada, além de parâmetros de processo, diâmetro do filamento, temperatura do bico, velocidade de impressão, temperatura da mesa (Khosravani *et al.*, 2022).

De acordo com a American Society for Nondestructive Testing (ASNT), os Ensaios Não Destrutivos (END) definem-se como os processos de inspeção, teste ou avaliação em materiais, componentes ou sistemas na busca por discontinuidades

ou diferenças nas suas características, sem interferir nas propriedades da peça, performance ou utilidade futura (da Silva, 2021). Além disso, os ENDS visam garantir a qualidade, segurança e confiabilidade de produtos e infraestruturas, sendo métodos mais comuns: ultrassom, radiografia, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, termografia e inspeção visual (Pscheidt, 2022). A Termografia Infravermelha (TI) é um método de ensaio não destrutivo que visa captar o perfil térmico da superfície, desempenhando um importante papel na manutenção industrial e na detecção de anomalias estruturais, que podem levar à falha mecânica. Geralmente aplicada a diferentes materiais, incluindo alumínio, compósitos, laminados metálicos, híbridos de fibra e materiais utilizados para impressão 3D.

Dentre as diversas formas de manufatura aditiva (MA), a produção camada por camada, ou Modelagem de Deposição Fundida (FDM) causa diferenças nas propriedades do material resultante em comparação com peças feitas por métodos de produção convencionais. No estudo realizado por Boccardi *et al.* (2020), considerou alguns itens de Ácido Polilático (PLA) impressos em 3D para avaliar a possibilidade de detectar defeitos internos de materiais, que são causados por erros de fabricação, de forma não destrutiva por meio de termografia lock-in. Nas análises de Khosravani *et al.* (2022), mostraram a influência de defeitos de fabricação no comportamento de fratura de componentes impressos em 3D, descon continuidades na peça podem ocorrer durante o processo de impressão 3D, podendo apresentar diferentes comportamentos mecânicos.

Wallace *et al.* (2022) estudaram as possibilidades de medições de defeitos pequenos ou superficiais de materiais que possuem baixa difusividade térmica com técnicas de termografia pulsada. Os defeitos mais comuns introduzidos na manufatura aditiva causam inconsistências nas propriedades mecânicas do material. Observaram também que, a temperatura durante a termografia flash depende de muitos parâmetros, incluindo as propriedades espectrais e térmicas do sistema, geometria e localização do defeito, condições de contorno do defeito embutido no objeto, condições do objeto ao redor do defeito e especificações da lâmpada de flash e da câmera térmica utilizada. Prever as propriedades mecânicas ou analisar o modo de falha de produtos fabricados por modelagem por deposição fundida (FDM) é desafiador devido à estrutura camada por camada e aos parâmetros de fabricação que podem interagir e ser potencialmente conflitantes.

Um estudo feito por Carvalho *et al.* (2019) demonstram que defeito do tipo vazios e má adesão de camada podem ocorrer durante o a impressão de um material. A amostra consiste numa placa com a criação de um vazio artificial, localizado no centro da peça, utilizando dois modelos de setup para condução de calor, modo de inspeção do tipo transmissão e reflexão, e ambos. O modo reflexão apresenta o melhor contraste térmico e tempo de resposta mais rápido em comparação ao modo de transmissão, sendo mais eficaz e viável em situações onde não há acesso à face oposta da peça.

Semelhante estudo é realizado por Figueiredo *et al.* (2024) utilizando duas amostras quadradas com diferentes tamanhos de discos, sendo o maior defeito com diâmetro 10 mm e o menor 2 mm, com distinto valor de preenchimento na amostra (25% e 75%). Chegaram a conclusão que, a análise das curvas de temperatura em diferentes regiões da amostra confirma a relação entre o tamanho dos defeitos e o contraste térmico.

O objetivo deste trabalho é investigar a eficiência da termografia infravermelha ativa pulsada para identificar defeitos em peças produzidas por manufatura aditiva usando a técnica FDM. Os experimentos foram realizados para detectar defeitos de 1 mm³ em amostras de PLA localizados em diferentes profundidades da superfície, de 0,5 a 2,5 mm. Durante os experimentos, duas lâmpadas halógenas foram utilizadas para o aquecimento durante 1 s, e uma câmera termográfica capturou imagens da superfície do objeto ao longo do tempo. O software MATLAB foi utilizado para o pós-processamento das imagens térmicas.

O artigo apresenta na Seção 2 os materiais e métodos utilizados, incluindo a modelagem da amostra, processo de manufatura e procedimentos experimentais. Os resultados e discussões serão apresentados na Seção 3, com análises dos experimentos. A Seção 4 apresentará a conclusão dos resultados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta as características das amostras de PLA que serão utilizadas nos experimentos, onde o comprimento, largura e espessura são iguais a 165, 19 e 5 mm, respectivamente. A Figura 1a, está representando o modelo CAD 3D, realizado no software Onshape, no formato STL de acordo com as especificações descritas na norma padrão ASTM D638 Tipo 1. Já na Figura 1b, está apresentado as amostras já impressas.

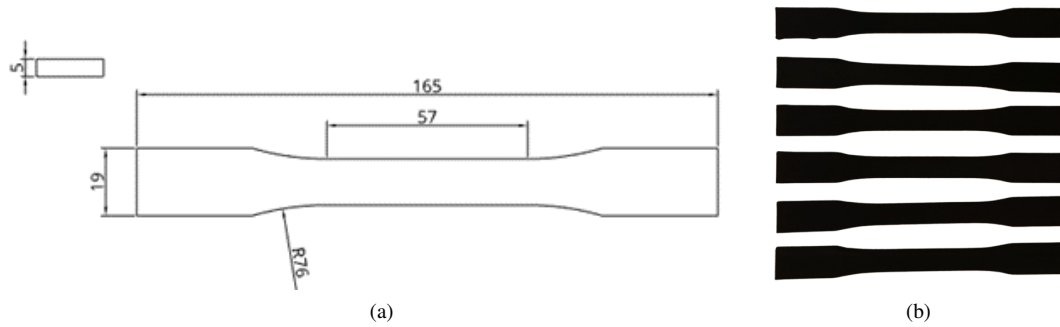


Figura 1: Peças de PLA de acordo com a ASTM D638: (a) Dimensões (mm) e (b) amostras impressas

Segundo a Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (Abendi, 2018), os métodos utilizados são procedimentos utilizados na inspeção de materiais e equipamentos para detectar defeitos ou discontinuidades visando manter a indústria e a sociedade livre de acidentes. Descontinuidade é uma interrupção da estrutura típica de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas. Um defeito é uma descontinuidade que, por natureza, tipo, dimensões, localização ou efeito acumulado, torna a peça imprópria para uso, por não satisfazer os requisitos mínimos de aceitação da norma aplicável (Oliveira, 2019).

As amostras utilizadas foram simuladas pelo software de fatiamento, Prusa, amplamente utilizado pela comunidade de impressão 3D. Com defeitos inseridos de geometria cúbica com dimensões de 1x1x1 mm, com variabilidade de distanciamento entre a superfície do defeito e a superfície do topo da peça de 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,5 mm, conforme demonstrado na Fig. 2, apresentando as nomenclaturas dos defeitos e dimensões. A Tabela 1 apresenta as nomenclaturas e as profundidades dos defeitos inserido em cada peça.

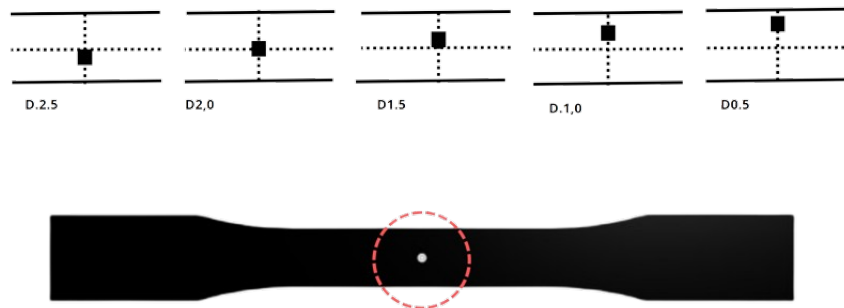


Figura 2: Caracterização das profundidades dos defeitos inseridos nas amostras

Tabela 1: Características dos defeitos das amostras.

Nomenclatura do defeito	D0.5	D1.0	D1.5	D2.0	D2.5
Distância do defeito (mm)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5

Já em formato STL, o desenho foi utilizado no software fatiador, Prusa, onde será definido os parâmetros para a simulação de impressão. A impressora utilizada foi da Creality, modelo Ender V3. a impressora 3D, Ender V3, bem como o filamento de PLA utilizado na produção das amostras, cor preta caracterizada por sua alta absorção de radiação, resultando em um maior aumento de temperatura na superfície comparada as outras cores. Os parâmetros utilizados na impressão são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2: Características dos defeitos das amostras.

Temperatura do bico	210 °C
Temperatura da mesa	55 °C
Velocidade de impressão	150 mm/s
Preenchimento	50%
Altura da camada	0,3 mm
Orientação de raster	45°

A Figura 3a apresenta o desenho esquemático da configuração experimental construída para os ensaios de termografia infravermelha ativa. Uma câmera termográfica, modelo Flir A700, com resolução 640 x 480 pixels e taxa de quadros de 30 Hz foi utilizada para adquirir imagens térmicas das amostras. Duas lâmpadas halógenas, modelo PAR 64, com potência de 1 kW, para cada uma, foram utilizadas para o aquecimento das peças. O temporizador, modelo DM XH0001, foi utilizado para controlar o tempo de aquecimento de 1 s. O tempo total de aquisição das imagens térmicas foi de 10s, sendo cada frame obtido na frequência de 2 Hz, ou seja, 2 frames a cada 1 s. A distância entre a câmera e as amostras foi 50 cm. A Figura 3b apresenta a imagem real da configuração experimental utilizada, destacando todos os equipamentos do ensaio termográfico.

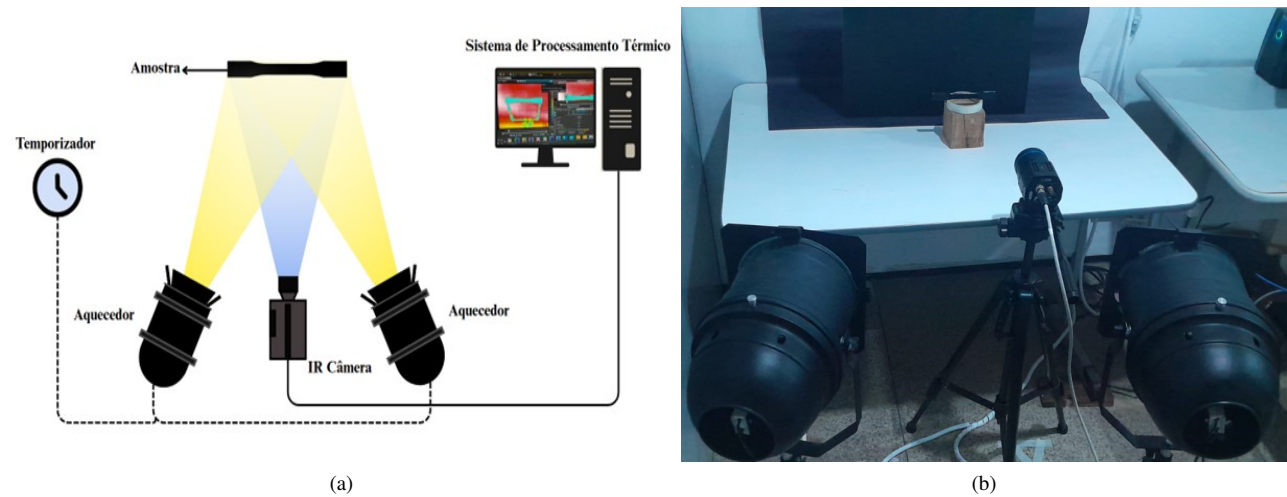


Figura 3: Configuração experimental do ensaio de termografia infravermelha: (a) desenho esquemático e (b) imagem real.

Após os procedimentos experimentais, utilizou-se contraste térmico nas imagens termográficas com o intuito de reduzir os ruídos e destacar diferenças de valores de temperaturas entre as áreas saudáveis e defeituosas. Para isso foi desenvolvido um algoritmo para a realização do contraste térmico das imagens, implementado no ambiente do MATLAB R2024b®. O contraste térmico normalizado tem como objetivo quantificar a capacidade de um sistema de imagens térmicas em detectar e distinguir variações térmicas, independente das condições de contorno, foi gerado para relacionar os diferentes tipos de testes e distância do defeito desde a superfície da amostra.

Com o objetivo de reduzir os ruídos, melhorar a precisão e eficiência dos resultados, realizou-se a seleção da região de interesse (ROI) no software MATLAB R2024a®, podendo ser observado na Fig 4 o ROI nas imagens térmicas.

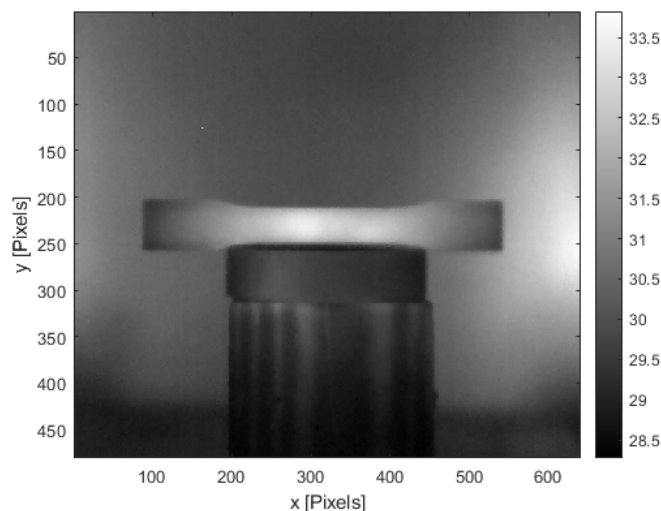


Figura 4: Visualização para a seleção do ROI

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises dos resultados foram realizadas no software FLIR Reasearch Studio, o que inclui a obtenção das imagens térmográficas e as curvas de temperaturas para realizar a detecção dos defeitos das peças, criando uma relação entre a amostra defeituosa e a amostra sem defeito. Todas as imagens térmicas são apresentadas no primeiro frame onde o defeito já pode ser detectado. Além disso, gráficos de linha (representando uma linha horizontal no centro da superfície externa) são apresentados para cada caso estudado, evidenciando de forma mais acentuada a presença dos defeitos.

A Figura 5a apresenta a imagem térmica após 3 s de ensaio termográfico da amostra D.05, sendo 1 s de aquecimento e 2 s de recuperação térmica. A partir deste frame foi possível detectar a presença do defeito peça, conforme destacado na imagem. A Figura 5b apresenta a curva de temperatura na linha central horizontal da imagem, onde observa-se o comportamento do defeito de diminuir as temperaturas locais.

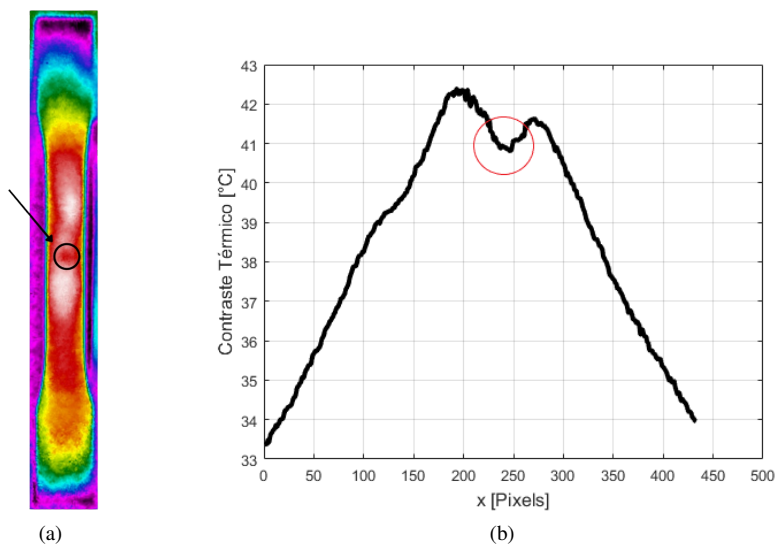


Figura 5: Detecção do defeito D0.5 no instante 3 s: (a) imagem termográfica e (b) curva do contraste térmico

A Figura 6a apresenta a imagem térmica após 3,5 s de ensaio termográfico da amostra D1.0, sendo 1 s de aquecimento e 2,5 s de recuperação térmica. A partir deste frame foi possível detectar a presença do defeito peça, conforme destacado na imagem. A Figura 6b apresenta a curva de temperatura na linha central horizontal da imagem, mostrando também o efeito da queda de temperatura na região onde existia a falha no material.

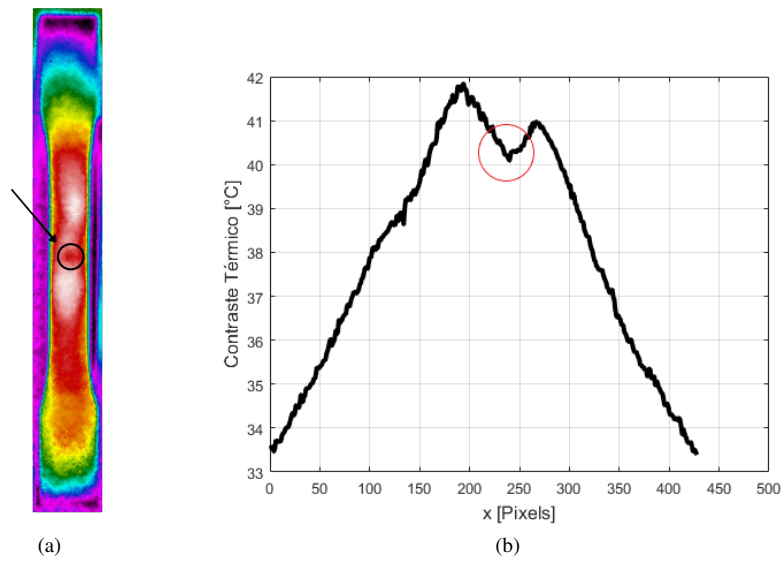


Figura 6: Detecção do defeito D1.0 no instante 3,5 s: (a) imagem termográfica e (b) curva do contraste térmico

A Figura 7a apresenta a imagem térmica após 4 s de ensaio termográfico da amostra D1.5, sendo 1 s de aquecimento e 3 s de recuperação térmica. A partir deste frame foi possível detectar a presença da falha na peça, conforme apresentado na imagem. A Figura 7b apresenta a curva de temperatura na linha central horizontal da imagem, onde nota-se o comportamento a diminuição da temperatura na localidade do defeito.

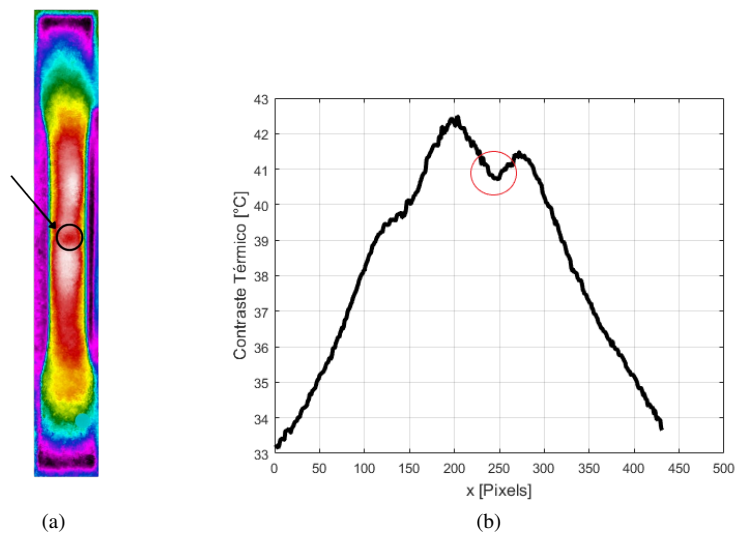


Figura 7: Detecção do defeito D1.5 no instante 4 s: (a) imagem termográfica e (b) curva do contraste térmico

A Figura 8a apresenta a imagem térmica após 8,5 s de ensaio termográfico da amostra D2.0, sendo 1 s de aquecimento e 7,5 s de recuperação térmica. A partir deste frame foi possível detectar a presença do defeito na peça, destacado na imagem. A Figura 8b apresenta a curva de temperatura na linha central horizontal da imagem, onde apresenta uma diminuição de temperatura na região defeituosa da peça.

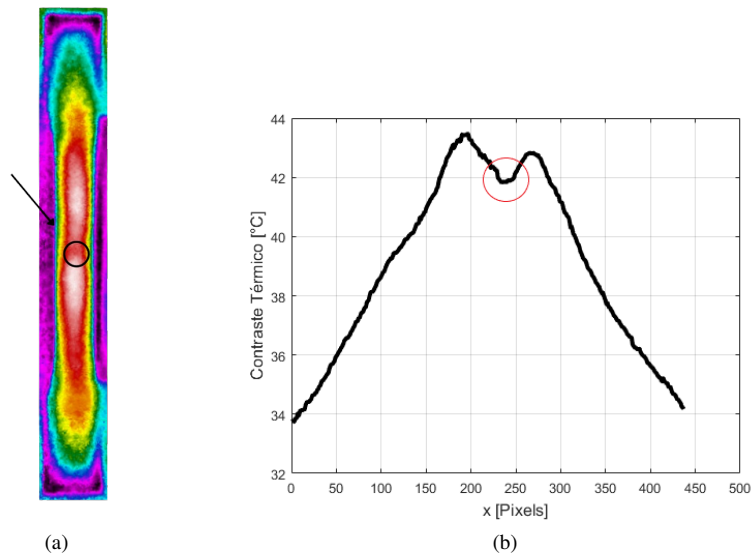


Figura 8: Detecção do defeito D2.0 no instante 8,5 s: (a) imagem termográfica e (b) curva do contraste térmico

A Figura 9a apresenta a imagem térmica após 9 s de ensaio termográfico da amostra D2.5, sendo 1 s de aquecimento e 8 s de recuperação térmica. A partir deste frame foi possível detectar a presença do defeito peça, conforme destacado na imagem. A Figura 9b apresenta a curva de temperatura na linha central horizontal da imagem, onde observa-se o comportamento do defeito de diminuir as temperaturas locais.

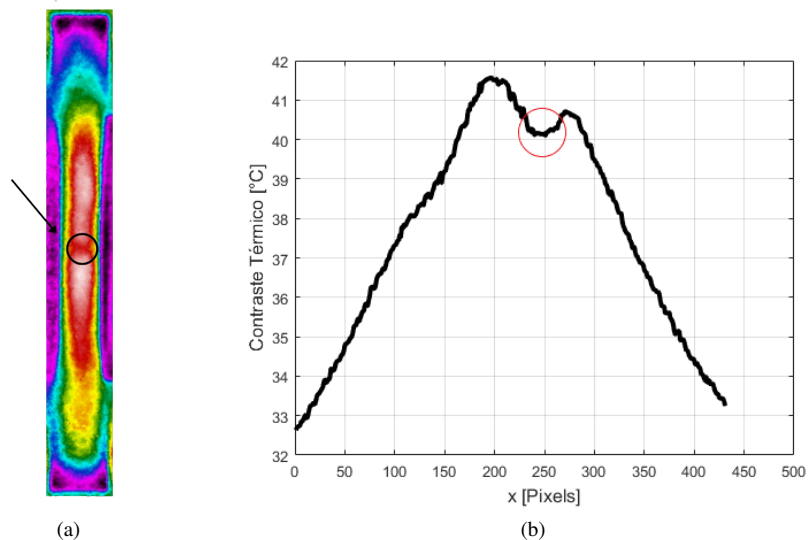


Figura 9: Detecção do defeito D2.5 no instante 9 s: (a) imagem termográfica e (b) curva do contraste térmico

Como já mencionado, as amostras foram preenchidas com 50%, sendo os outros 50% de ar, o acúmulo de temperatura foi menor nas regiões com defeitos devido à presença significativa de ar, tornando-se um isolante térmico nas amostras. Em virtude das regiões saudáveis possuírem um maior volume de ar quando comparada as regiões defeituosas, uma vez que o PLA tem um maior valor de condutividade térmica que o ar e possuindo bastante ar em sua composição. Devido ao seu preenchimento, o calor aplicado na peça pelas lâmpadas teve maior resistência para ser dissipado nas regiões saudáveis, promovendo maiores contrastes térmicos. Na Figura 10 apresenta o gráfico normalizado, no qual relaciona todas as amostras, concluindo assim, a visualização do defeito no corpo de prova

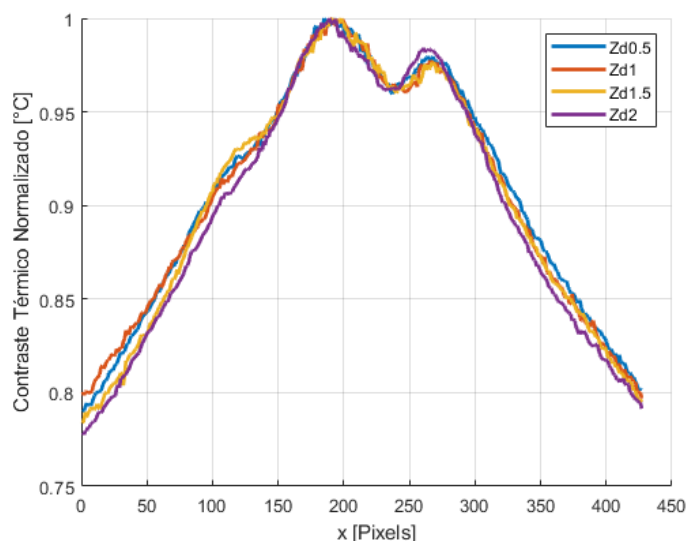


Figura 10: Curvas de contrastes térmicos normalizados das amostras

4. CONCLUSÃO

O estudo conclui que a termografia infravermelha ativa pulsada, utilizando o método de reflexão, é eficaz para a detecção de defeitos em materiais produzidos por manufatura aditiva. As análises das curvas de contrastes térmicos com defeitos de várias distâncias em relação ao superfície, pode confirmar a relação entre a distância do defeito e o tempo de contraste térmico. Este experimento apresentou menor acúmulo de calor no defeito durante o processo de experimento, resultando em menor temperatura no local do defeito.

Essa técnica de termografia demonstrou ser eficaz na detecção de falhas em componentes fabricados com materiais poliméricos, que são utilizados na produção de peças para diversas aplicações, incluindo próteses para atletas de alto desempenho, órteses para reconstrução óssea, substituição de peças metálicas para maior durabilidade, tubulações, automóveis, entre outros.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), o Laboratório de Experimentação e Simulação de Calor (LESC), o PPGMEC-IFMA Monte Castelo e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fundamental apoio oferecido para a construção da configuração experimental.

6. REFERÊNCIAS

- Abendi, 2018. *GUIA ABENDI 2018*. Site Abendi, Brasil, 1st edition.
- Boccardi, S., Carlomagno, G.M., Core, G.D. and Meola, C., 2020. "Lock-in thermography for non-destructive testing of 3d printed pla itens". *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 12, pp. 149–155.
- Carvalho, M.S., Martins, A.P. and Santos, T.G., 2019. "Simulation and validation of thermography inspection for components produced by additive manufacturing". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 159, pp. 1–7.
- da Silva, H.V., 2021. *SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DE TERMOGRAFIA ATIVA PARA COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADAS COM FIBRAS CONTÍNUAS PRODUZIDOS POR MANUFATURA ADITIVA*. Ph.D. thesis, Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Figueiredo, A.A.A., Silva, W.V., Moraes, M.F.B. and Campos, S.P., 2024. "Detection of defects in additive manufacturing usinf active infrared thermography". *Researchg Gate*.
- Khosravani, M.R., Božić, Z., Zolfagharian, A. and Reinicke, T., 2022. "Failure analysis of 3d-printed pla components: Impact of manufacturing defects and thermal ageing". *Elsevier BV | Engineering Failure Analysis*, Vol. 136, pp. 1–10.
- Oliveira, D.G., 2019. *ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS: Fundamentos e Aplicações*. Ph.D. thesis, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, Brasil.
- Pscheidt, L.F., 2022. *Termografia aplicada na detecção de defeitos em compósitos de fibra de carbono e resina epóxi*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil.
- Wallace, N.J., Cranes, N.B. and Jones, M.R., 2022. "Defetc measurement limits usinf flash thermography with application to additive manufacturing". *Elsevier BV | NDT and E International*, Vol. 128, pp. 1–11.