

ANÁLISE NUMÉRICA DO CONTRASTE TÉRMICO DE DEFEITOS EM METAIS E COMPÓSITOS USANDO TERMOGRAFIA PULSADA

John Vanderley Rodrigues Correia, johnvanderley143@gmail.com¹
Tarcio Cardoso Barros, tarcioabarrosl@aluno.uema.br¹
Alisson Augusto Azevedo Figueiredo, alissonfigueiredo@professor.uema.br¹

¹ Universidade Estadual do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI, Av. Lourenço Viera da Silva N.º 1000, CEP: 65.055-310, Jardim São Cristóvão – São Luís/MA)

Resumo: Este trabalho tem como objetivo analisar numericamente a termografia infravermelha pulsada e a relação do tamanho e profundidade dos defeitos em placas de aço 1010 e em plástico reforçado com fibra de carbono (CFRP) para o contraste térmico usando o software comercial COMSOL Multiphysics. Diferentes tempos foram utilizados para análise dos materiais devido as diferenças de suas propriedades, o tempo de estudo do aço é menor que o compósito. Devido à sua alta capacidade de conduzir calor e consequentemente o tempo para o término de análise do aço é menor. O estudo foi realizado avaliando os valores do comportamento térmico do material durante a aplicação do pulso de calor. O material estudado é aquecido pelo pulso de calor e seu resfriamento é estudado, observando as diferenças de temperaturas na região com e sem defeitos. O modelo numérico considera uma estrutura com furos de fundo plano com diferentes dimensões. A técnica da termografia infravermelha obtém imagens térmicas superficiais a partir de um pulso de calor aplicado à superfície do corpo de prova, possibilitando um estudo sem contato e com alta velocidade de inspeção utilizada para a detecção de defeitos próximos à superfície do material testado. Diversas propriedades e influenciam o fenômeno de transferência de calor, tais como a efusividade térmica, tempo de resfriamento e contraste térmico. Foi possível encontrar o contraste térmico dos materiais pela diferença de temperatura das regiões com e sem defeitos. Os resultados mostram que é possível localizar defeitos superficiais a partir da termografia infravermelha pulsada. Percebeu-se nas simulações numéricas que há mudanças no comportamento da temperatura e tempo de resfriamento para os materiais e para defeitos de diferentes profundidades e tamanhos, possibilitando assim a sua caracterização a partir das imagens termográficas. Este trabalho tem potencial de desenvolver análises numéricas que poderão ser utilizadas para otimização de técnicas de estimativas de defeitos em estruturas de aço e compósitos a partir de imagens infravermelhas.

Palavras-chave: Termografia Pulsada, Aço 1010, CFRP, Defeitos, Simulação Numérica

1. INTRODUÇÃO

A termografia infravermelha é utilizada para várias aplicações de monitoramento de condições em estruturas civis, inspeção de equipamentos elétricos, entre outros. Segundo Omar *et al.* (2005), a termografia infravermelha vem se tornando uma técnica muito popular para testes não destrutivos pois avalia diferentes materiais e estruturas sem contato direto. Além disso, a técnica possui a capacidade de captar ondas fototérmicas, com o objetivo de mapear defeitos na estrutura.

Existem uma variedade de trabalhos relevantes de ensaios não destrutivos que geralmente são relacionados a análise de materiais compósitos, que têm por objetivo desenvolver novas técnicas ou melhorar as convencionais em termos de precisão e rapidez. De acordo com Harizi *et al.* (2014) as técnicas baseadas em acústica, aproximação de potencial e resistência elétrica mostraram sucesso para encontrar defeitos superficiais em materiais compósitos, no entanto os valores encontrados nem sempre se mostram confiáveis por estarem distantes dos valores reais. Em comparação com essas técnicas a termografia infravermelha pulsada mostrou vantagens quanto a facilidade da utilização no ambiente de trabalho pela alta velocidade de inspeção, e eficiência na análise de defeitos subsuperficiais em materiais compósitos.

Segundo Maldague (2001), a termografia infravermelha pulsada é dividida em duas técnicas principais a ativa e a passiva. A técnica passiva é analisada em condições ambientes havendo uma variação natural de temperatura entre o objeto e o meio. A termografia infravermelha ativa necessita de uma fonte externa de energia artificial, gerando uma variação de temperatura sobre o objeto e o meio (Silva *et al.*, 2019; Kylili *et al.*, 2014; Viegas, 2015). Para Wysocka-fotek *et al.* (2012) uma das técnicas da termografia infravermelha ativa é a termografia pulsada onde a superfície da estrutura analisada é aquecida por um pulso de calor e seu resfriamento é analisado. Durante esse processo a taxa de decrescimento da temperatura é diferente nas regiões com e sem defeitos.

Os defeitos analisados por termografia infravermelha pulsada são assumidos como descolamentos, delaminações, impacto ou rachaduras que são paralelas à superfície da amostra. De acordo com Benitez *et al.* (2008), o contraste térmico é utilizado em testes não destrutivos quando é utilizado termografia infravermelha pulsada para avaliar a visibilidade dos defeitos. Assim é possível melhorar a qualidade da imagem térmica para fins quantitativos, é necessário encontrar as temperaturas das regiões com e sem defeitos e realizar a diferença das temperaturas nos pontos analisados.

Wei *et al.* (2021) menciona que os sinais térmicos dos materiais possuem uma natureza difusa gerando uma variação de temperatura dos defeitos subsuperficiais em relação as regiões sem defeitos. A termografia pulsada tem se mostrado viável para medir profundidade, tamanho e propriedades térmicas dos defeitos pela detecção das variações de temperaturas nas imperfeições encontradas no objeto de estudo.

Este trabalho tem como objetivo à análise numérica de placas de aço 1010 e do Plástico reforçado com fibra de carbono (CFRP), que foram estudadas simulando um pulso de calor para representar a termografia infravermelha pulsada. Verificando a variação de temperatura nas regiões com e sem defeitos foi encontrado o contraste térmico. Para o aço 1010 o maior contraste foi de 0,35°C, para o CFRP foi de 10°C as regiões com maiores variações de temperatura foram as que tinham maior tamanho e maior profundidade. Desse modo é possível relacionar os parâmetros tamanho e profundidade dos defeitos para entender como afetam o contraste térmico. É perceptível que a profundidade é um parâmetro com maior influência para o contraste térmico, pois em ambos os casos o segundo defeito com maior contraste térmico é o que tem 6 mm de diâmetro e 3 mm de profundidade, mesmo havendo outros furos com 8 mm de diâmetro, mas com profundidades menores.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Modelo Numérico

A geometria proposta é uma estrutura tridimensional utilizada para representar placas de aço 1010 e para o CFRP, como representado na Fig. 1a. Possuindo dimensões de altura, comprimento e profundidade de 42, 42 e 4 mm, respectivamente. Além disso, a Fig. 1b mostra a representação de furos de fundos planos, com diâmetros de 8, 6 e 4 mm. E a profundidade de defeitos de 1, 2 e 3 mm.

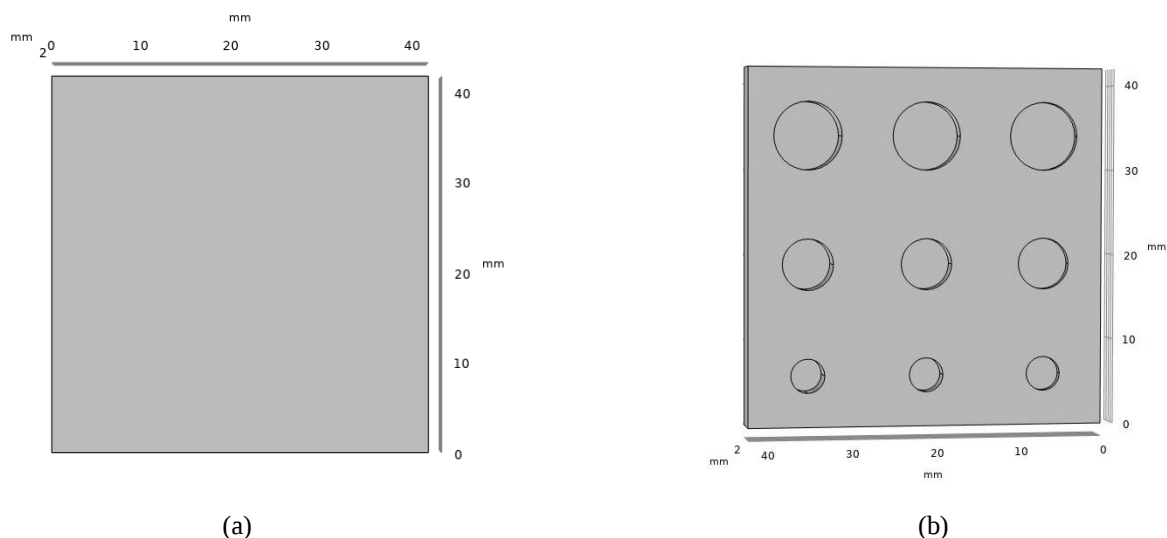


Figura 1. Dimensões das placas de aço 1010 e CFRP (a) Superfície superior (b) Região inferior com defeitos.

2.2. Modelo Matemático

Segundo Incropera *et al.* (2014, p.45) a condução de calor tem por objetivo determinar um campo de temperaturas a partir das condições impostas por suas fronteiras, nesse caso será mostrada a distribuição de temperatura, e como varia com o meio em que se encontra. Uma vez conhecida pode se calcular o fluxo de calor por meio da equação de Fourier em qualquer ponto. Para os sólidos a distribuição de temperatura pode ser usado para descobrir se a estrutura mantém sua integridade, usando a equação do calor em sua forma reduzida como é mostrada na Eq. (1).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde α é a difusividade térmica, T é a temperatura e x, y e z as direções que a temperatura se propaga pela placa. O contraste térmico foi apresentado como a diferença quantitativa entre os valores de temperatura nas regiões com defeito e sem defeitos, como mostrado na Eq. (2).

$$C_t = T_{def} - T_{sd} \quad (2)$$

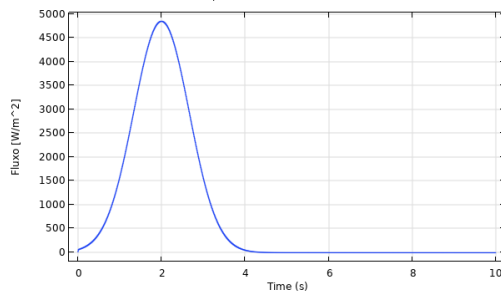
na qual C_t representa o contraste térmico, T_{def} representa a temperatura na região onde os defeitos se encontram, T_{sd} o valor da temperatura na região sem defeitos. Os principais parâmetros dos materiais que foram utilizados estão apresentados na Tab. 1. Nota-se que as propriedades de condutividade térmica e calor específico apresentam diferenças significativas nos materiais, a condutividade térmica é maior no aço e a capacidade de calor específico maior no CFRP. Uma vez que o aço possui maior capacidade de transferir calor, enquanto o CFRP tem baixa capacidade de conduzir calor e precisa de muita energia térmica para variar a temperatura causando diferenças nos tempos de análises.

Tabela 1. **Propriedades do Aço 1010 e do CFRP (Incropera *et al*,2014; Wei *et al*,2021).**

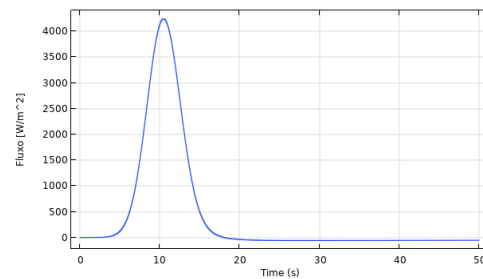
Propriedades dos materiais	Aço 1010	CFRP
Capacidade de calor específico [J/kgK]	434	1677
Condutividade Térmica [W/mK]	63,9	0,253
Coefficiente de Convecção [W/m ² K]	20	20
Densidade [kg/m ³]	7832	1200
Passo de Tempo [s]	0,01	0,1
Tempo de análise [s]	10	50

2.3. Simulação Numérica

As placas de aço e CFRP foram modeladas utilizando o software COMSOL multiphysics, considerando as temperaturas ambientes iniciais de 26,85°C e coeficiente de convecção $h = 20 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Neste trabalho, a termografia infravermelha ativa foi utilizada para variar a temperatura das placas, com valor de fluxo pulsado de 5000 W/m^2 aplicado na superfície superior do modelo. O Tempo de análise levou um período de 10 s na placa de aço 1010, onde os dois primeiros segundos representam o aquecimento e os 8s restantes de tempo o resfriamento da peça, como mostra a Figura 2a. Durante a análise da placa CFRP, o tempo de aquecimento e resfriamento foi de 10 e 40s, respectivamente, com o tempo total de análise de 50s (Fig. 2b). Então, o contraste térmico foi obtido a partir da diferença de temperatura entre a região com e sem defeito em determinados pontos. A representação do contraste térmico foi feita analisando os valores de temperatura encontrados no COMSOL e a diferença realizadas no software MATLAB.



(a)



(b)

Figura 2. Pulso de calor no (a) aço 1010 (b) CFRP.

A Figura 3 apresenta malha numérica estudada para o modelo de transferência de calor na placa, com um total de 2248 elementos triangulares e 1474 vértices. A qual foi o suficiente para uma convergência de malha satisfatória para o estudo.

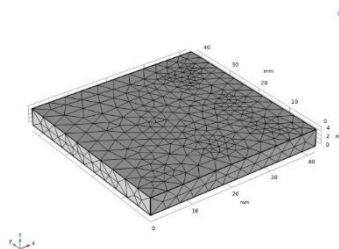


Figura 3. Malha com Elementos Triangulares.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, as temperaturas das placas com e sem defeitos do aço 1010 foram analisadas durante a aplicação de um pulso de calor. Quando se compara os valores de temperatura das placas sem defeitos do aço 1010, nota-se uma pequena variação de temperatura como mostrado na Fig. 4a os pontos analisados se comportam de maneira quase idêntica, variando de 26,85°C para mais ou menos 27,45 °C. As placas com defeitos tiveram maiores variações de temperaturas que as sem defeito, com o valor máximo chegando a 27,75°C. Nas figuras seguintes os termos representados abaixo *sd*, *d* e *c* representam as placas sem defeitos, com defeitos e o contraste respectivamente, analisados os diâmetros de 8, 6 e 4 mm e profundidades de 1, 2 e 3 mm.

Na Figura 4 mostra que tempo de análise do aço 1010 foi de 10 segundos, a temperatura da placa sem defeitos fica com os valores de temperatura muito próximos em todos os pontos, como mostra a Fig.4a. Na Figura 4b é possível perceber a variação de temperatura nas placas devido aos defeitos entre os intervalos de 2 e 3s.

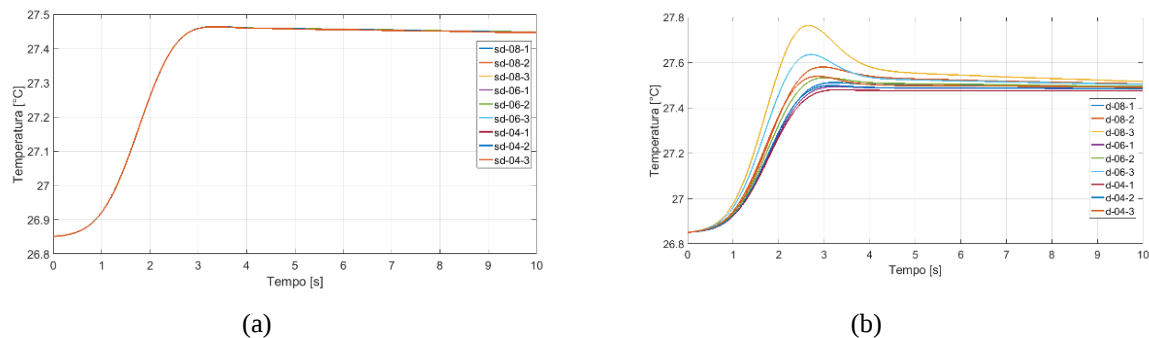


Figura 4. Temperatura da placa de aço 1010 (a) sem defeitos (b) com defeitos.

Em seguida, os valores de temperaturas da região com e sem defeitos foram subtraídos obtendo o contraste térmico, como ilustra a Fig. 5. Examinando o gráfico do contraste térmico percebe-se que devido suas propriedades, este material tem alta capacidade de conduzir calor, o tempo de análise necessário para analisar seu comportamento é relativamente curto. E pode variar sua temperatura com certa facilidade, o maior valor do contraste térmico máximo está entre 2 e 3s, mostrando que do mesmo modo que ele ganha essa energia térmica, rapidamente também a perde. Por isso necessita de um tempo de análise menor que o do material compósito. Os pontos do gráfico com maiores variações de temperatura, são aquelas que estão relacionadas as regiões que possuem maiores profundidades e tamanhos de defeitos como mostra a Fig.5. Os maiores contrastes térmicos foram para os defeitos de 8 mm de diâmetro e 3 mm de profundidade, 6 mm de diâmetro e 3 de profundidade e 4 mm de diâmetro e 3 mm de profundidade esse padrão volta a se repetir, com prioridade a profundidade do defeito seguido pelo seu tamanho.

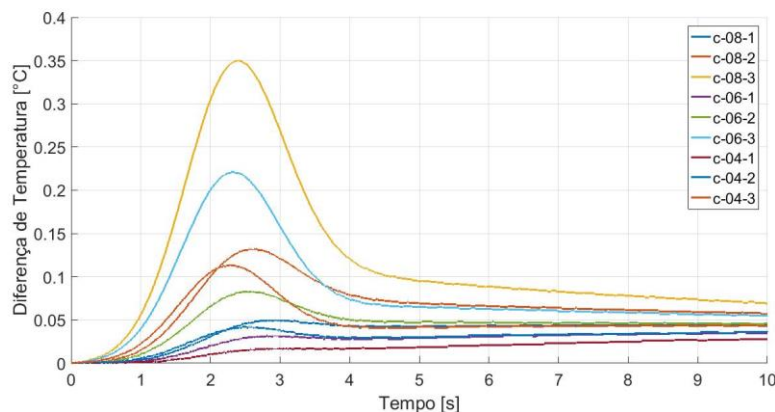


Figura 5. Contraste Térmico na superfície da placa de aço 1010.

Quando a placa de CFRP é aquecido por um pulso de calor, sua temperatura tende a ultrapassar a temperatura de 44°C como mostra a Fig. 6a. O estudo do resfriamento mostra um comportamento bem padronizado mesmo havendo uma pequena variação. No entanto, para a placa com defeitos, a temperatura nos pontos analisados se mostra mais acentuado, mostrando uma diferença perceptível de temperatura, com valores que ultrapassam 48 °C. Quando comparamos o resfriamento do CFRP com defeitos mostrado na Fig. 6b em relação a região sem defeitos apresentado na Fig. 6a percebe-se que o seu resfriamento é mais lento para maiores profundidades.

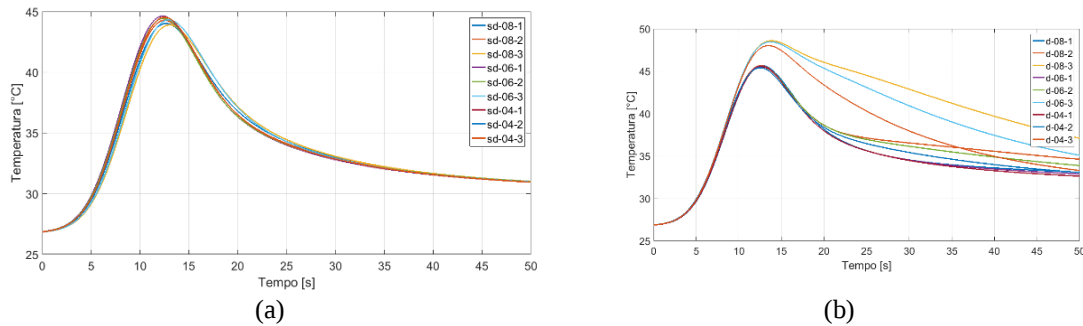


Figura 6. Temperatura da placa de CFRP (a) sem defeito e (b) com defeito.

Fazendo a diferença entre as curvas dos gráficos mostrados da Fig. 6b e o da Fig. 6a encontra-se o contraste térmico no CFRP, quando comparado o contraste térmico do aço na Fig. 5 e do compósito da Fig. 7, os compósitos mostram um contraste mais acentuado chegando a ultrapassar 10°C em um dos pontos. Isso acontece devido a alta capacidade de calor específico, precisando de mais energia para haver variação de temperatura e por ter baixa condutividade térmica tem menor velocidade de perda de calor. Comparado ao aço, o tempo de análise é maior com 50s de aplicação, sendo os 10s iniciais para o aquecimento e 40s para o resfriamento. O contraste é melhor percebido nas regiões onde a profundidade e tamanho dos defeitos são maiores, por apresentar uma espessura do menor. Dessa forma o calor consegue chegar com mais facilidade na face oposta não perdendo tanta energia. Um aquecimento mais rápido na região onde se tem maior defeito e maior profundidade não indica que haverá um resfriamento mais rápido. Pois ainda há perda por condução onde a espessura é maior, temos no gráfico da Fig. 7. O maior contraste no defeito de tamanho 8 mm de tamanho e 3 mm de profundidade seguido do defeito de tamanho 6 mm e 3 mm de profundidade, mostrando o mesmo comportamento do contraste do aço 1010 representado na Fig. 5.

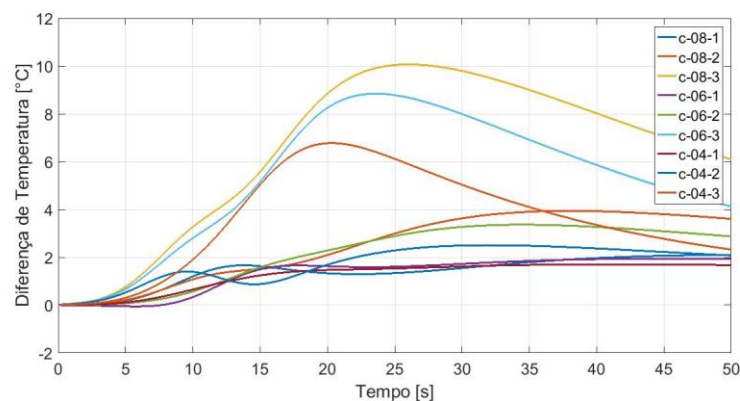


Figura 7. Contraste térmico da superfície do material (CFRP).

De modo geral, as placas do aço 1010 e do material compósitos tiveram as mesmas dimensões, um fluxo pulsado de calor de 5000 W/m^2 em sua superfície e posição de furos nas mesmas regiões. No entanto houve variação no tempo de análise devido as diferentes propriedades dos materiais, pois afeta como eles se relacionam com a energia térmica. Na Figura 8 é mostrado o contraste da superfície da placa e o tempo em que é mais acentuado como mostra a Fig. 7 e a Fig. 5 para os tamanhos de 8 mm e 3 mm de profundidade. O contraste térmico da superfície da placa de aço 1010 é mostrada no tempo de 2,14s e do CFRP no tempo de 25s deixando claro que é possível encontrar defeitos por termografia pulsada. Na Figura 8a e na Fig. 8b é possível perceber que o maior contraste se encontra na última coluna em ambos os materiais. Isso ocorre devido a esses pontos terem maiores profundidades de defeitos, e como consequência os defeitos estarão mais próximos da superfície das placas. O CFRP se mostra mais capaz de reter o calor, portanto mostra um contraste maior. Nas imagens térmicas dos materiais é possível notar os defeitos com profundidade de 2 mm na coluna do centro com o contraste menos aparente, nesses casos percebe-se a importância do tamanho do defeito pois evidência o contraste quanto maior for seu tamanho. Os defeitos com 1 mm de profundidade são difíceis de classifica-los, pois podem ser confundidos com apenas uma variação de temperatura na placa.

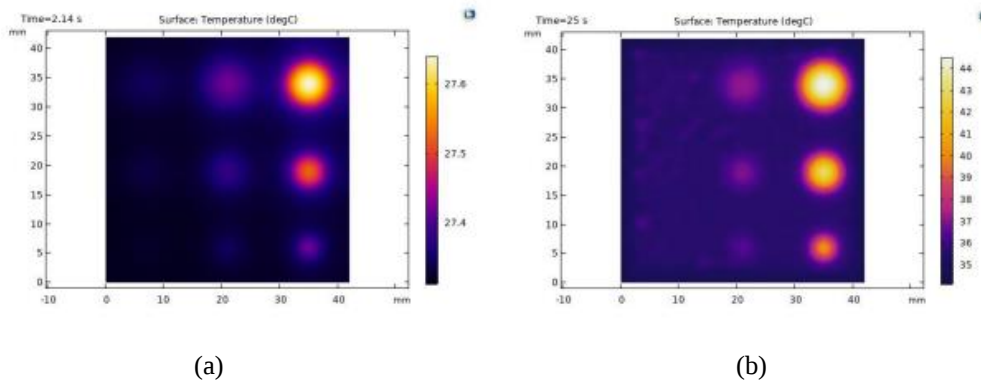


Figura 8. Distribuição de Temperatura na Superfície do (a) aço 1010 (b) CFRP

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi simulado uma placa tridimensional com e sem defeitos para o aço 1010 e para o CFRP usando o software comercial COMSOL multiphysics, para avaliar a temperatura nas regiões com e sem defeitos. Com os valores encontrados foi feita a diferença de temperatura entre elas utilizando o software Matlab. Analisando esses valores percebe-se que quando se analisa a temperatura em uma superfície defeituosa pelo método da termografia pulsada e tenta encontrar seu contraste em relação a uma superfície sem defeitos haverá fatores que acabam por influenciar na análise. Como as propriedades do material, o tamanho do defeito e sua profundidade. Sendo a profundidade a mais importante devido ao método da termografia pulsada ser voltada para defeitos mais superficiais, portanto o que estiver mais profundo, estará mais próximo da superfície e consequentemente terá contraste térmico maior.

Nos gráficos com e sem defeitos do aço 1010 nota-se que as regiões sem defeitos a variação de temperatura na superfície entre os pontos analisados são muito pequenas quase desprezíveis, quando se analisa a placa com defeitos pode-se notar uma variação de temperatura maior nessas regiões. O mesmo acontece para os materiais compósitos quando analisado uma estrutura sem defeitos temos um comportamento aparentemente igual, onde o comportamento de variação de temperatura é muito próximo, na placa com defeitos percebe-se uma variação bem maior de temperatura entre as imperfeições, do mesmo modo que no metal. Entretanto a variação da temperatura é mais acentuada na região onde há o maior profundidade e tamanho do defeito. Sendo a profundidade, um parâmetro de maior grau de importância quando relacionado ao contraste, seguido do tamanho do defeito. Para este trabalho percebeu-se que a profundidade e tamanho dos defeitos são fatores que estão diretamente relacionados com contraste pois quanto maior estes forem, maiores será o seu contraste. Para melhorar em futuras análises, seria interessante partir desses estudos e tentar quantificar os tamanhos e profundidades dos defeitos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Estadual do Maranhão e das agências de fomento, CNPq, CAPES e FAPEMA.

6. REFERÊNCIAS

- Silva, G. P., Batista, P. I. B., Povóas, Y. V. (2019), "O uso da termografia infravermelha para o estudo do desempenho térmico de paredes: revisão bibliográfica", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 117 – 129.
- Benítez, H. D., Ibarra-Castanedo, C., Bendada, A., Maldague, X., Loaiza, H., & Caicedo, E. (2008). Definition of a new thermal contrast and pulse correction for defect quantification in pulsed thermography. *Infrared Physics & Technology*, 51(3), 160-167.
- Wysocka-Fotek, O., Oliferuk, W., & Maj, M. (2012). Reconstruction of size and depth of simulated defects in austenitic steel plate using pulsed infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 55(4), 363-367.
- Gonzalez, D. A., Ibarra-Castanedo, C., Lopez-Higuera, J. M., & Maldague, X. (2006). New algorithm based on the Hough transform for the analysis of pulsed thermographic sequences. *NDT & E International*, 39(8), 617-621.
- Wei, Y., Zhang, S., Luo, Y., Ding, L., & Zhang, D. (2021). Accurate depth determination of defects in composite materials using pulsed thermography. *Composite Structures*, 267, 113846.
- Omar, M., Hassan, M. I., Saito, K., & Alloo, R. (2005). IR self-referencing thermography for detection of in-depth defects. *Infrared physics & technology*, 46(4), 283-289.
- Bergman, T. I., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2014). Fundamentos de Transferencia de calor e Massa. Em T. I. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, & D. P. Dewitt., Fundamentos de Transferencia de calor e Massa (pp. 40-45). Rio de Janeiro: O GEN - Grupo de Editoras Nacionais.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE THERMAL CONTRAST OF DEFECTS IN METALS AND COMPOSITES USING PULSED THERMOGRAPHY

John Vanderley Rodrigues Correia, johnvanderley143@gmail.com¹

Tarcio Cardoso Barros, tarcio Barros1@aluno.uema.br¹

Alisson Augusto Azevedo Figueiredo, alissonfigueiredo@professor.uema.br¹

¹ State University of Maranhão, University City Paulo VI, Av. Lourenco Viera da Silva No. 1000, CEP: 65.055-310, Saint Christopher Garden – Saint Luis/MA)

Abstract. *This work aims to numerically analyze pulsed infrared thermography and the relationship of size and depth of defects in 1010 steel plates and carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plates for thermal contrast using the commercial software COMSOL Multiphysics. Different times were used to analyze the materials due to the differences in their properties, the study time of steel is shorter than the composite. Due to its high capacity to conduct heat and consequently the time for the completion of steel analysis is shorter. The study was carried out by evaluating the values of the material's thermal behavior during the application of the heat pulse. The studied material is heated by the heat pulse and its cooling is studied, observing the temperature differences in the region with and without defects. The numerical model considers a structure with flat-bottomed holes with different dimensions. The technique of red infrared thermography obtains surface thermal images from a heat pulse applied to the surface of the specimen, enabling a non-contact study with high inspection speed used for the detection of defects close to the surface of the tested material. Several properties influence the heat transfer phenomenon, such as thermal effusivity, cooling time and thermal contrast. It was possible to find the thermal contrast of the materials by the temperature difference of the regions with and without defects. The results show that it is possible to locate surface defects using pulsed infrared thermography. It was noticed in the numerical simulations that there are changes in the behavior of temperature and cooling time for materials and for defects of different depths and sizes, thus enabling their characterization from thermographic images. This work has the potential to develop numerical analyzes that can be used to optimize techniques for estimating defects in steel and composite structures from infrared images.*

Keywords: Pulsed Thermography, 1010 Steel, CFRP, Defects, Numerical Simulation.