

ANÁLISE NUMÉRICA PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS INTERNOS EM LAMINADOS DE FIBRA METÁLICA UTILIZANDO TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA ATIVA

Alberth Smith de Gois Sousa, alberthsousa@aluno.uema.br¹
Pedro Ivo Corrêa Abreu Conceição, pedroivoconceicao@aluno.uema.br¹
Alisson Augusto Azevedo Figueiredo, alissonfigueiredo@professor.uema.br¹

¹Universidade 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. Os laminados de fibra metálica possuem grande utilização na indústria aeroespacial, construção naval e automotiva devido à sua maior resistência mecânica e a corrosão, porém podem possuir descolamentos entre suas camadas. Os ensaios não destrutivos podem ser utilizados na detecção deste tipo de defeito, como a termografia infravermelha. Este trabalho tem como objetivo detectar a presença de descolamentos em chapas de laminado de fibra metálica de aço 1020 e fibra de vidro a partir das temperaturas da superfície obtidas por termografia infravermelha pulsada. Os estudos numéricos foram desenvolvidos no software comercial COMSOL, onde um pulso de fluxo de calor foi aplicado na superfície da peça para provocar uma perturbação térmica no material, possibilitando assim aumentar as chances de detecção dos defeitos por termografia infravermelha. Os resultados obtidos mostraram que é possível detectar defeitos de descolamento próximos à superfície da peça em tempos curtos de recuperação térmica, ou seja, após o aporte de calor ter sido aplicado. Para defeitos mais profundos necessita-se de tempos mais longos, mesmo tratando-se de descolamentos maiores. Dessa forma, conclui-se que a técnica possui maior eficiência em defeitos mais próximos a superfície com pouca influência de seu tamanho.

Palavras chave: termografia infravermelha, fibra metálica, simulação numérica, defeito.

Abstract. Metallic fiber laminates are widely used in the aerospace, shipbuilding and automotive industries due to their greater mechanical and corrosion resistance, but they may have detachments between their layers. Non-destructive testing can be used to detect this type of defect, such as infrared thermography. The objective of this work is to detect the presence of detachments in 1020 steel and fiberglass metallic fiber laminate sheets from the surface temperatures obtained by pulsed infrared thermography. Numerical studies were developed in the commercial software COMSOL, where a pulse of heat flux was applied to the surface of the part to cause a thermal disturbance in the material, thus increasing the chances of detecting defects by infrared thermography. The results obtained showed that it is possible to detect detachment defects close to the surface of the part in short thermal recovery times, that is, after the heat input has been applied. For deeper defects, longer times are needed, even when dealing with larger detachments. Thus, it is concluded that the technique has greater efficiency in defects closer to the surface with little influence of its size.

Keywords: infrared thermography, metallic fiber, numerical simulation, defect.

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos (END) atualmente auxiliam muitas áreas da engenharia, devido a sua portabilidade e não destruição da peça ou amostra, o que traz um menor custo em comparação aos ensaios destrutivos. A termografia infravermelha (TIR) é um exemplo de END com possibilidades de utilização para detecção de defeitos, fraturas ou corrosão em máquinas e instrumentos, auxiliando a indústria na manutenção. Em áreas como a engenharia civil, pode ser utilizada para visualizar falhas nas estruturas, utilizando a termografia para detectar defeitos em tijolos cerâmicos (Rodríguez *et al.*, 2012), na medicina a TIR pode encontrar anomalias em pacientes.

A TIR ativa caracteriza-se quando a amostra analisada recebe uma excitação externa, como um fluxo de calor. De acordo como o tipo de estímulo, pode-se caracterizar a termografia em periódica, pulsada ou lock-in. De acordo com trabalhos recentes Chung *et al.* (2020), D'Accardi *et al.* (2018) e Palumbo *et al.* (2019), a TIR ativa pulsada foi utilizada para a detecção e caracterização de defeitos. Em que para cada tipo de ensaio ou situação existe uma forma de termografia com melhor adaptação. Outro fator benéfico da TIR é sua utilização em conjunto com diferentes ensaios não destrutivos, como a corrente parasita que foi utilizada por Xu *et al.* (2020) em materiais compósitos. Nesse ensaio, uma chapa metálica

gerava a excitação no material, além da vibrotermografia, que foi empregada para melhorar os resultados. A detecção dos defeitos por TIR ocorre devido a presença de gradientes de temperaturas presentes na superfície da peça na região em que os defeitos estão situados, que são causados devido as propriedades termofísicas diferentes em relação a região saudável, apresentando uma resistência ao transporte de calor. Os resultados encontrados podem ser melhorados através de técnicas de pós-processamento, como a reconstrução do sinal térmico e método da diferencial de primeira ordem (Zhu *et al.*, 2022).

Um problema recorrente e que pode influenciar diretamente na estrutura são descolamentos entre a fibra e o material metálico, estes casos ocorrem nos laminados de fibra metálica (FML), que consiste em camadas de chapas finas de metal acopladas a materiais compósitos, os FML são muito utilizados na indústria aeroespacial por apresentar menor densidade e melhores propriedades mecânicas, como maior resistência a fadiga, tração e corrosão. A detecção de descolamentos em laminados metálicos foi recentemente estudada por Bu *et al.* (2020), utilizando a técnica de pulso longo e métodos de processamento, como a reconstrução do sinal térmico, análise de componente principal e transformada rápida de Fourier, para melhora dos resultados e diminuição do ruído. Em outro estudo, foram obtidos resultados numéricos e experimentais para FML, os quais foram comparados utilizando termografia pulsada e lock-in, Mabrouki *et al.* (2009). Já em Liu *et al.* (2022), foram utilizados métodos computacionais para detectar deslocamentos em estruturas de favos de mel compostas por CFRP e alumínio. Além disso, o pulso lock-in com frequência ideal foi utilizado para se obter os melhores picos de contraste térmico, o que tornou possível obter coeficientes para encontrar a profundidade do defeito, como mostrado em (Lahiri *et al.*, 2012).

Este trabalho tem como objetivo analisar a técnica de termografia infravermelha pulsada em laminados de fibra metálica, composto por aço 1020 e fibra de vidro utilizando modelos computacionais. E a partir dos gradientes de temperatura presente na superfície do material caracterizar a posição dos defeitos de descolamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A Figura 1 apresenta uma amostra que possui dimensões de 1000 mm x 500 mm composta por três furos de diferentes profundidades e diâmetros, com as nomenclaturas de D1, D2 e D3. Na Figura 1a é possível verificar a amostra e como está distribuído os defeitos que representam os descolamentos. Trata-se de um laminado de fibra metálica composta por três camadas de chapas de aço SAE 1020 com 0,5 mm de espessura e duas de fibra de vidro de 0,3 mm de espessura que foram colados de forma alternada formando cinco camadas, onde suas extremidades são formadas aço 1020, como mostrado na Fig. 1b. Os descolamentos são preenchidos com ar e foram dispostos em três camadas diferentes como mostrado na Fig. 1b, com o intuito de analisar os efeitos causados na superfície devido a profundidade do deslocamento. A Tabela 1 apresenta as dimensões dos defeitos em relação a superfície analisada.

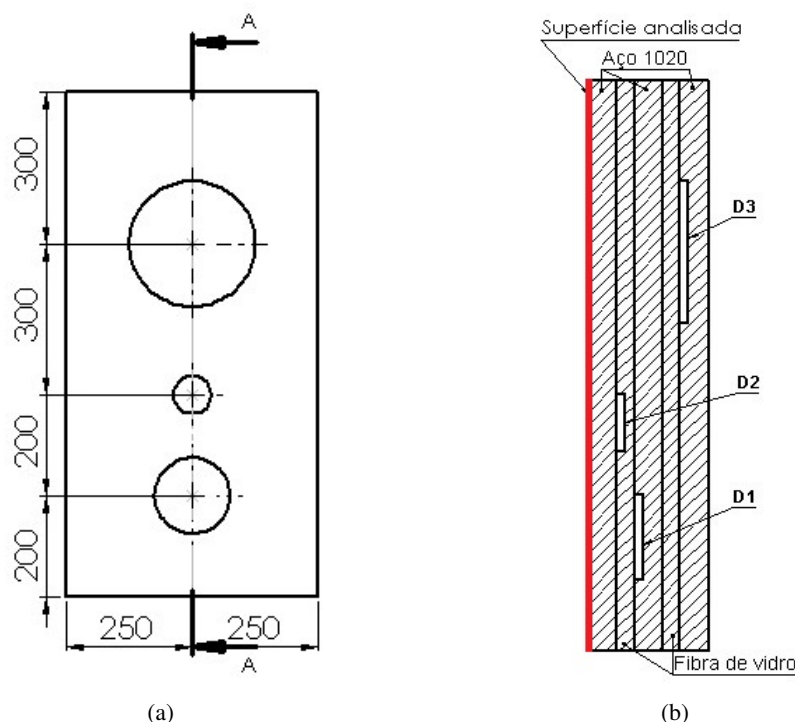


Figura 1: Desenho da amostra (mm) (a) vista superior e (b) corte A-A

Tabela 1: Dimensões dos defeitos

	D1	D2	D3
Profundidade [mm]	0,8	0,5	1,7
Diâmetro [mm]	100	50	200
Espessura [mm]	0,1	0,1	0,1

2.2 Modelo Matemático

O problema abordado trata-se de uma transferência de calor em regime transiente em uma amostra tridimensional, sem a presença de geração de calor internamente, que é representada pela Eq. (1), onde as derivadas em função de x , y , z se referem as variações de temperatura no espaço tridimensional, k a condutividade térmica, ρ a densidade do material, e c_p o calor específico.

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

A amostra recebe um fluxo de calor na superfície superior assim como uma convecção que também esta ocorrendo em suas laterais, Lei do Resfriamento de Newton, que é descrita pela Eq. (2).

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

onde tem-se h ($W/(m^2K)$) como coeficiente de transferência de calor por convecção, T_∞ representa a temperatura do fluido e T_s a temperatura da superfície, segundo (Bergman and LAVINE, 2019).

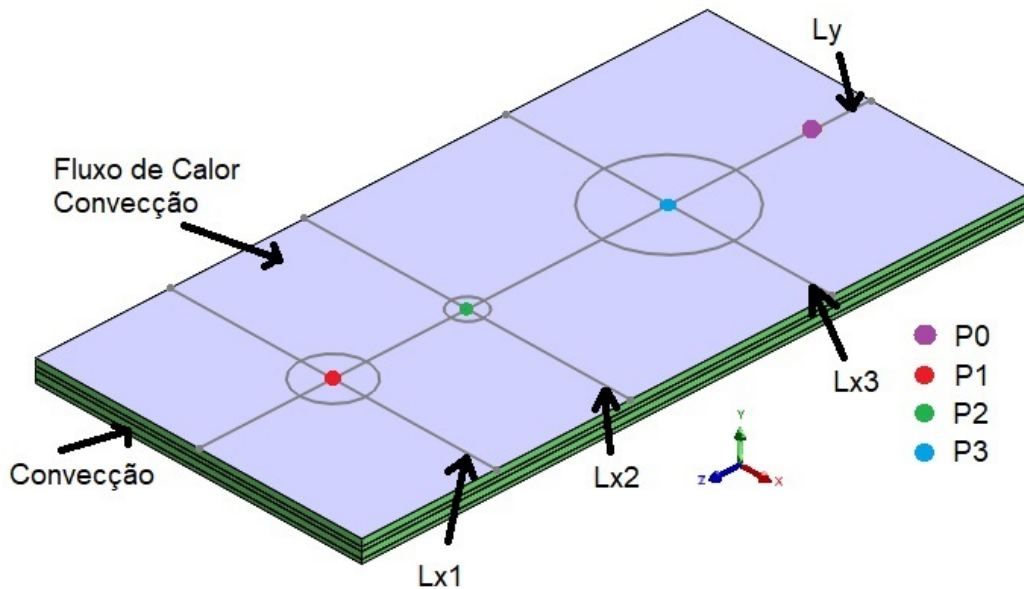


Figura 2: Condições de contorno na amostra

2.3 Simulação Numérica

A análise e modelagem do problema tridimensional foi realizada utilizando o software COMSOL multiphysics, onde foi aplicado um fluxo de calor de 10000 W/m^2 por um período de 1 s na superfície analisada do modelo. Considerou-se a troca de calor por convecção durante 15 s que ocorre na região superior e nas laterais, como visto na Fig. 2, um coeficiente de convecção de $10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, e temperatura inicial de todo o sistema de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. A malha criada para a resolução do problema foi composta por 94.046 elementos tetraédricos e 37.580 elementos triangulares e apresentando um erro aceitável para a utilização após a realização do estudo de convergência. As propriedades termofísicas dos materiais utilizados é mostrada na Tab. 2.

Para as simulações realizadas, foram adotadas simplificações como por exemplo a combinação do coeficientes de radiação e convecção, que foi igual para todas as superfícies. Além disso, foi considerado um contato perfeito entre as superfícies, desprezando, assim, a resistência de contato. Já em relação ao ar presente nos defeitos, este foi considerado quase estático, devido ao fato de ser uma pequena porção de ar e apresentar uma pequena variação de temperatura.

Tabela 2: Propriedades térmicas dos materiais. (Júnior (2020); Inc. (2022))

Materiais	Aço 1020	Fibra de vidro	Ar
Condutividade Térmica [$W/(mK)$]	51,9	0,040 - 0,72	0,018
Densidade [kg/m^3]	7870	69	1,2 - 1,3
Calor específico [$J/(kgK)$]	435,42	5,4 - 7,9	1006,3

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 3a, 3b e 3c apresentam as termografias simuladas na superfície da amostra em três instantes de tempos distintos, 0, 10 e 15 s, respectivamente. Na Figura 3a toda a superfície analisada a temperatura constante de 20°C. A Figura 3b mostra que após 10 segundos, devido à diferença de temperatura entre a região saudável e a região com defeito, os defeitos mais superficiais D1 e D2 são detectados de forma clara. Na Figura 3c somente após um período maior de recuperação térmica é possível notar a presença de todos os defeitos, incluindo o defeito D3 que possui maior profundidade.

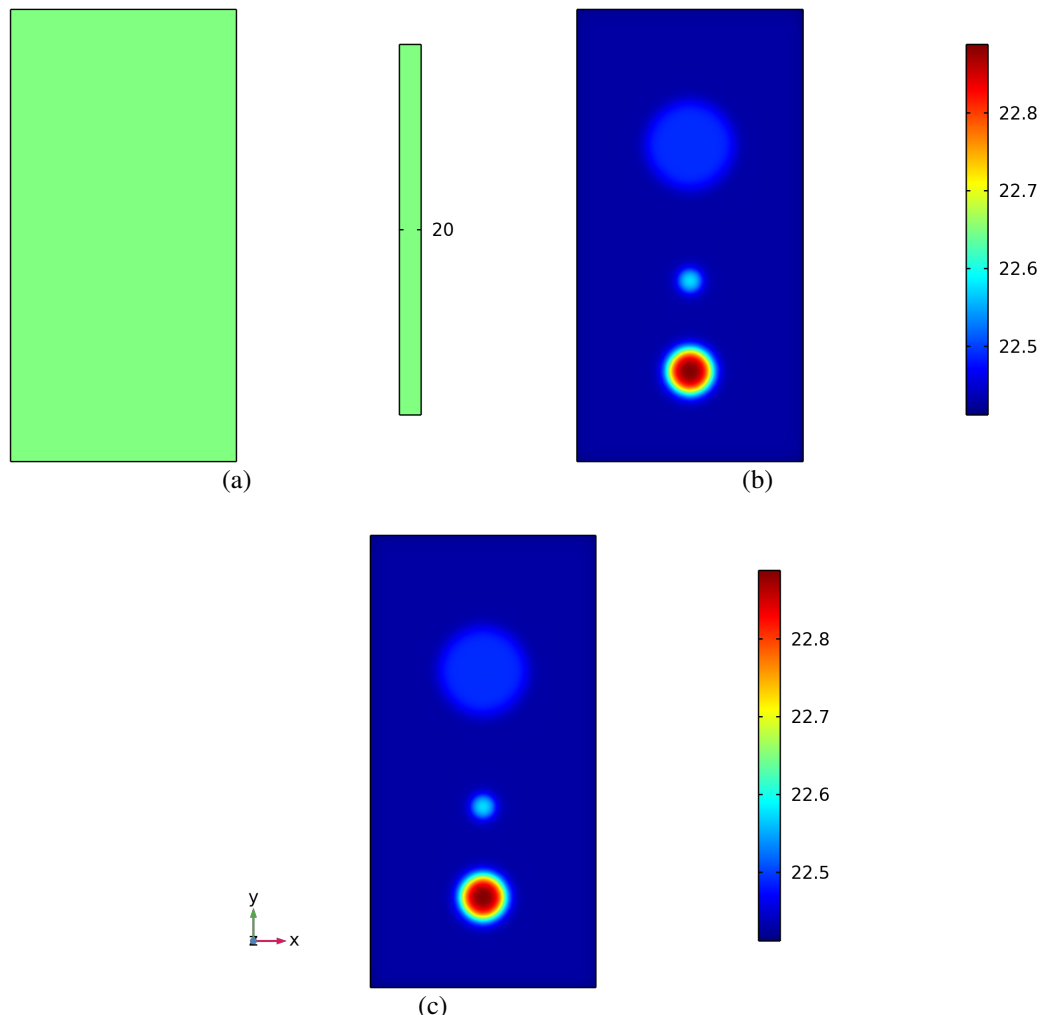


Figura 3: Temperatura na superfície ($^{\circ}C$) em (a) $t = 0$ s, (b) $t = 10$ s e (c) $t = 15$ s

A Figura 4 apresenta os resultados das temperaturas na superfície da amostra nos pontos P0, P1, P2 e P3 durante e após a aplicação do fluxo de calor. No intervalo de tempo em que ocorre o aquecimento, todas as temperaturas aumentam de forma similar, sendo que no instante final do aporte do fluxo de calor, observa-se que a temperatura no ponto P1 é um pouco superior. No período de recuperação térmica, o ponto P1 foi o que apresentou a menor queda de temperatura devido ao maior tamanho do defeito D1 em relação ao D2, ou seja, mesmo o defeito D2 sendo o mais superficial, este não foi o que apresentou a maior diferença de temperatura em relação a região saudável. Como o defeito D3 encontra-se mais distante da superfície da amostra, isto resultou em uma diferença de temperatura insignificante entre o ponto P3 e P0

durante a recuperação térmica.

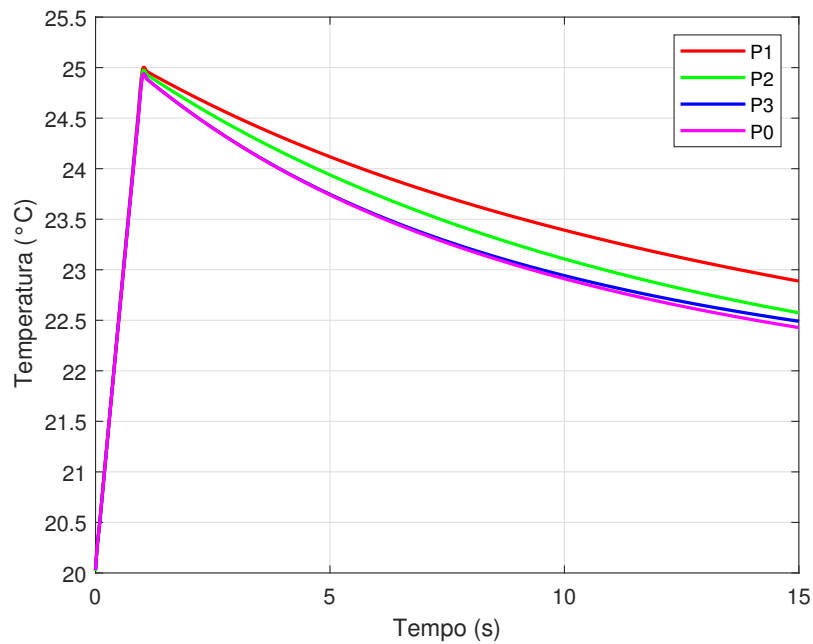


Figura 4: Temperatura no centro dos defeitos e na região saudável

A Figura 5 apresenta as temperaturas no instante de 15 s, onde pode ser observado os maiores gradientes de temperaturas entre as regiões com e sem defeito na superfície. A Figura 5a apresenta as temperaturas na linha Ly, onde observa-se o maior pico de temperatura acima do defeito D1, alcançando aproximadamente 22,9 °C. Na Figura 5b, as temperaturas nas linhas lx1, lx2 e lx3 apresentam uma comparação entre os diferentes comportamentos térmicos na superfície da amostra devido a profundidade distinta de cada descolamento. A partir destas informações de temperaturas, pode-se realizar as estimativas da profundidade e tamanho dos defeitos utilizando metodologias de problemas inversos em transferência de calor.

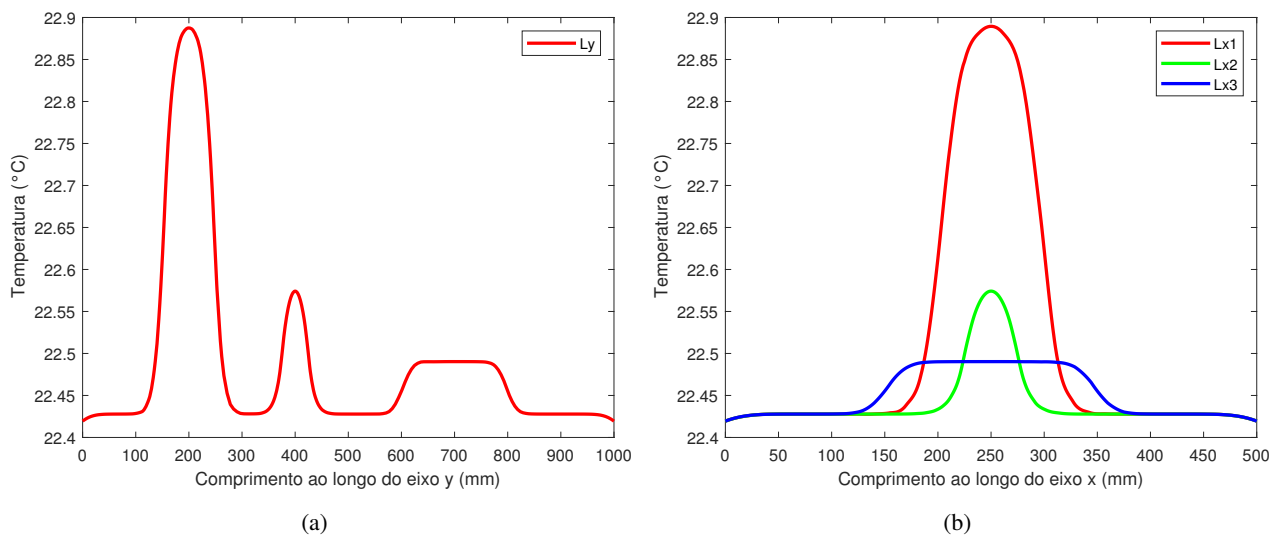


Figura 5: Temperatura ao longo do comprimento da amostra seguindo (a) o eixo Y e (b) o eixo X

A Figura 6 apresenta a diferença de temperatura entre a região saudável e os defeitos D1, D2 e D3. Observa-se nestes resultados uma variação de temperaturas significativa entre os diferentes pontos analisados na superfície da amostra. Conforme a peça é resfriada ao longo do tempo, os gradientes de temperatura se tornam mais acentuados e perceptíveis, o que facilita a detecção dos defeitos. Além disso, é possível observar que o defeito D3 apresenta um gradiente de temperatura muito menor em relação aos demais defeitos, que são mais superficiais.

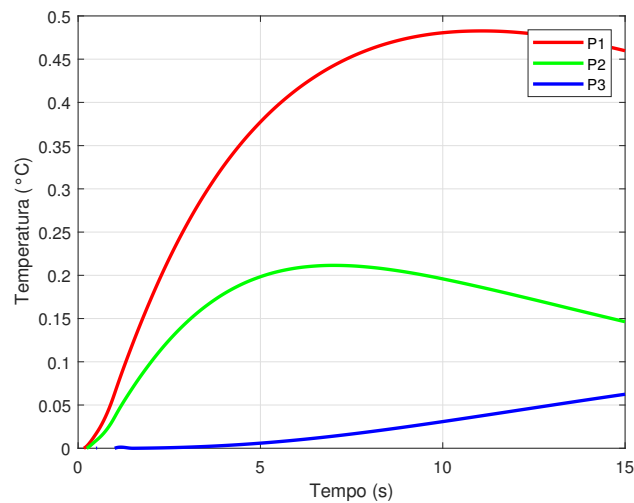


Figura 6: Gradiente de temperatura entre a região saudável e os defeitos

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizadas simulações computacionais em uma chapa de laminado de fibra metálica, que apresentou três defeitos internos de descolamento em diferentes profundidades. As simulações tiveram como objetivo localizar a posição dos defeitos durante o período de recuperação térmica, a partir dos gradientes de temperaturas presentes na superfície da amostra entre a região com descolamento e saudável.

Os resultados obtidos mostram que a melhor visualização dos defeitos na superfície se encontra no período de recuperação térmica, devido ao maior gradiente de temperatura entre a região saudável e os descolamentos. A posição dos defeitos também pode ser encontrada a partir dos picos de temperatura, visto que foi observado uma menor diminuição de temperatura em todas as regiões dos defeitos.

Conclui-se que defeitos mais superficiais, são mais fáceis de serem detectados e não necessitam de um tempo de resfriamento com duração maior quando comparados aos defeitos mais profundos. Com isso, a técnica de termografia infravermelha se mostra eficiente para a detecção de defeitos mais superficiais em pequenos períodos de tempo sem grande influência do seu diâmetro nesta situação.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Bergman, T.L. and LAVINE, A.S., 2019. “Incropera-fundamentos de transferência de calor e de massa”. *8a Edição ed. Grupo GEN*.
- Bu, C., Liu, G., Zhang, X. and Tang, Q., 2020. “Debonding defects detection of fmls based on long pulsed infrared thermography technique”. *Infrared Physics & Technology*, Vol. 104, p. 103074.
- Chung, Y., Shrestha, R., Lee, S. and Kim, W., 2020. “Thermographic inspection of internal defects in steel structures: analysis of signal processing techniques in pulsed thermography”. *Sensors*, Vol. 20, No. 21, p. 6015.
- D’Accardi, E., Palumbo, D., Tamborrino, R. and Galietti, U., 2018. “A quantitative comparison among different algorithms for defects detection on aluminum with the pulsed thermography technique”. *Metals*, Vol. 8, No. 10, p. 859.
- Inc., C., 2022. “COMSOL Multiphysics”.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P. and Bergman, T.L., 2000. *Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa*. Grupo Gen-LTC.
- Júnior, E.R.B., 2020. “Análise térmica de propulsor de foguete comparando aço 1020 e alumínio 7075 como material de fabricação”.
- Lahiri, B., Bagavathiappan, S., Reshmi, P., Philip, J., Jayakumar, T. and Raj, B., 2012. “Quantification of defects in composites and rubber materials using active thermography”. *Infrared Physics & Technology*, Vol. 55, No. 2-3, pp. 191–199.
- Liu, G., Gao, W., Liu, W., Zou, X., Zhang, X., Li, R. and Shen, R., 2022. “Study on debonding defects detection of cfrp/al honeycomb structure by square-wave thermography”.

- Mabrouki, F., Genest, M., Shi, G. and Fahr, A., 2009. “Numerical modeling for thermographic inspection of fiber metal laminates”. *NDT & E International*, Vol. 42, No. 7, pp. 581–588.
- Palumbo, D., Cavallo, P. and Galietti, U., 2019. “An investigation of the stepped thermography technique for defects evaluation in gfrp materials”. *NDT & E International*, Vol. 102, pp. 254–263.
- Rodríguez, F.d.J.L. *et al.*, 2012. “Detecção de defeitos em materiais cerâmicos usando termografia”.
- Xu, C., Zhang, W., Wu, C., Xie, J., Yin, X. and Chen, G., 2020. “An improved method of eddy current pulsed thermography to detect subsurface defects in glass fiber reinforced polymer composites”. *Composite Structures*, Vol. 242, p. 112145.
- Zhu, P., Wu, D. and Qian, L., 2022. “Detection of defects in metallic materials using an improved post-processing method of pulsed thermography”. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 151, p. 106927.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.