

ANÁLISE NUMÉRICA PARA DETECÇÃO DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS A PARTIR DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Pedro Ivo Correa Abreu Conceição, pedroivoconceicao@aluno.uema.br¹
Alberth Smith de Gois Sousa, alberthsousa@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. A utilização de revestimentos anticorrosivos têm sido uma técnica cada vez mais empregada na indústria para proteção a corrosão, principalmente no setor petroquímico, entretanto, por conta dos revestimentos anticorrosivos a detecção da corrosão interna não é possível por meio de inspeção visual, sendo necessário a utilização de ensaios não destrutivos para o controle de qualidade. Neste trabalho, um modelo de simulação computacional de termografia ativa pulsada foi desenvolvido para detectar defeitos de corrosão em substratos metálicos com revestimento anticorrosivo, como utilizados na indústria de petróleo. A análise numérica foi realizada no software COMSOL Multiphysics a partir de um sólido virtual com a presença de três defeitos com diferentes espessuras de corrosão, onde aplicado em sua superfície superior um pulso de calor, resultando em um gradiente de temperatura entre as regiões com defeitos e a saudável. Os resultados mostraram que as maiores espessuras dos defeitos de corrosão obtiveram maior contraste térmico nos termogramas computacionais, entretanto, apesar do defeito de menor espessura ter tido uma mínima variação de temperatura, o contraste térmico foi suficiente para detectá-lo. Dessa forma, conclui-se que a técnica de termografia adotada foi capaz de detectar todos os defeitos simulados.

Palavras chave: Corrosão, Termografia infravermelha, Revestimento, Defeitos, Simulação numérica.

Abstract. The use of anticorrosive coatings has been an increasingly used technique in the industry for corrosion protection, mainly in the petrochemical sector, however, due to anticorrosive coatings, the detection of internal corrosion is not possible through visual inspection, requiring the use of anticorrosive coatings. from non-destructive testing to quality control. In this work, a computational simulation model of pulsed active thermography was developed to detect corrosion defects in metallic substrates with anticorrosive coating, as used in the petroleum industry. Numerical analysis was carried out in the COMSOL Multiphysics software from a virtual solid with the presence of three defects with different corrosion thicknesses, where a heat pulse was applied to its upper surface, resulting in a temperature gradient between the regions with defects and the healthy. The results showed that the greater thicknesses of the corrosion defects obtained greater thermal contrast in the computational thermograms, however, despite the smaller thickness defect having a minimum temperature variation, the thermal contrast was sufficient to detect it. Thus, it is concluded that the thermography technique adopted was able to detect all simulated defects.

Keywords: Corrosion, Infrared Thermography, Coating, Defects, Numerical Simulation.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão é um fenômeno que pode ser definido como a deterioração natural de um material causada pela interação química ou eletroquímica com o meio ambiente. Os materiais metálicos são particularmente vulneráveis à corrosão devido à sua tendência de perder elétrons e oxidar em contato com o ar e a umidade. No entanto, outros materiais como plásticos e cerâmicos também podem apresentar esse problema, embora a forma como ocorre possa ser diferente em cada caso (Gentil, 2017).

A corrosão é um dos principais problemas enfrentados pela indústria, principalmente no setor petroquímico, no qual os tanques de armazenamento e tubulações são expostos a condições extremas como altas temperaturas, salinidade, PH e ações microbiológicas do petróleo. A corrosão pode levar à perda de integridade estrutural, falhas operacionais, acidentes e poluição ambiental, causando grandes prejuízos financeiros e à saúde humana (Frauches-Santos, 2014).

Os revestimentos anticorrosivos têm sido amplamente utilizados na indústria, sendo aplicados na superfície interna ou externa dos equipamentos, protegendo-os contra a corrosão e prolongando sua vida útil. Os revestimentos podem ser

feitos de diferentes materiais como polímeros, metais, cerâmicas e compósitos. Contudo, apesar de sua eficácia, podem apresentar falhas como delaminação, rachaduras, porosidade e desgaste. Essas falhas podem ser difíceis de serem detectadas através de inspeções visuais, uma vez que o revestimento oculta o substrato e impede a visualização da corrosão interna. Para solucionar este problema, a indústria utiliza ensaios não destrutivos, que são técnicas capazes de avaliar a integridade estrutural dos equipamentos sem danificá-los (Lyon, 2016).

Os ensaios não destrutíveis incluem técnicas como ultrassom, radiografia, partículas magnéticas e termografia infravermelha, que permitem a detecção precoce de defeitos corrosivos e falhas nos revestimentos anticorrosivos, garantindo a segurança e a eficiência dos equipamentos. As técnicas não destrutivas possuem grande importância na manutenção preventiva, pois quase um terço de toda a atividade de construção atual nos países desenvolvidos é voltada para reparos e fortalecimento de infraestruturas (Kobayashi, 2011). A indústria de petróleo e gás adquire apenas 81,9% de participação no mercado global de monitoramento e manutenção contra a corrosão, e de acordo com a National Association of Corrosion Engineers (NACE) o custo anual para a prevenção de corrosão na indústria de petróleo e gás é estimado em 1,372 bilhões de dólares (AMPP, 2022; Doshvarpassanda, 2018; Technavio, 2017).

A termografia infravermelha é uma técnica não destrutiva que tem como objetivo analisar a distribuição térmica na superfície do material por meio de uma câmera infravermelha. Existem dois tipos de termografia: ativa e passiva. Na termografia ativa, é necessária uma fonte de energia térmica para aquecer a amostra; enquanto na termografia passiva são utilizadas para análise as emissões infravermelhas naturais (Wicker, 2018). A termografia ativa pode ser dividida em várias modalidades, dependendo do tipo de excitação térmica utilizada como óptica, pulsada, fase pulsada e lock-in, termografia de correntes parasitas pulsadas para excitação eletromagnética e vibrotermografia para excitação mecânica (Grosso, 2016).

A termografia ativa pulsada consiste na aplicação de curto pulso de energia, na ordem de alguns milissegundos para materiais com alta condutividade térmica e de alguns segundos para materiais de baixa condutividade, para aquecer a superfície do material e, em seguida, monitorá-lo. Ao aplicar o pulso inicial térmico, há um rápido aumento de temperatura na superfície do material devido à propagação da onda térmica, que penetra abaixo da superfície do material por meio da difusão de calor. Ao analisar a distribuição de temperaturas no termograma, as áreas com defeitos aparecem como regiões de diferentes temperaturas em relação ao restante do material saudável (Grosso, 2011).

Em comparação com outras técnicas de ensaios não destrutíveis, a termografia infravermelha apresenta várias vantagens como permitir inspeções de grandes áreas em um curto período de tempo e também é capaz de inspecionar diversos tipos de materiais como: metais, compósitos e polímeros. Ademais, essa técnica não requer contato físico com a superfície do material a ser inspecionado, portanto não é necessário interromper a operação normal do equipamento ou estrutura em questão para realizar as medições (Grosso, 2016).

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo de simulação computacional para analisar a termografia ativa pulsada em regime transiente e detectar diferentes estágios do defeito de corrosão em substratos metálicos com revestimento anticorrosivo a partir dos gradientes de temperatura presentes na superfície do material.

2. METODOLOGIA COMPUTACIONAL

Visando detectar falhas de perda de espessura do substrato devido à corrosão interna, foi desenvolvido um modelo computacional empregando os princípios da transferência de calor em sólidos no COMSOL Multiphysics, cujos fenômenos físicos são aplicados no espaço de três dimensões e a evolução da temperatura é dependente do tempo, conforme o princípio da técnica de termografia ativa pulsada. O modelo foi baseado nos parâmetros de excitação térmica, forma geométrica e composição dos materiais descritos em um estudo anterior (Grosso, 2016).

Neste trabalho, foi desenvolvido um sólido virtual com a presença de três defeitos cilíndricos de diferentes espessuras (D1, D2 e D3) preenchidos com Fe_3O_4 (ferrugem), como mostrado na Fig. 1 e dimensões indicadas na Tab. 1. O modelo ainda é caracterizado com uma camada de um revestimento amplamente utilizado na indústria petroquímica por conta da sua alta performance para proteção contra a corrosão em ambientes químicos agressivos, o Filled Epoxy Resin, que é aplicado na região inferior do sólido virtual (Margarit-Mattos, 2009). Os materiais utilizados e as propriedades termofísicas dos componentes do sólido (substrato, revestimento e defeito) estão na Tab. 2 e 3, respectivamente.

Tabela 1. Dimensões dos componentes do sólido virtual

	Substrato	Revestimento	Defeito (D1)	Defeito (D2)	Defeito (D3)
Comprimento (mm)	150	150	-	-	-
Largura (mm)	100	100	-	-	-
Espessura (mm)	5	1.25	3.5	2.5	1.5
Diâmetro (mm)	-	-	11	11	11

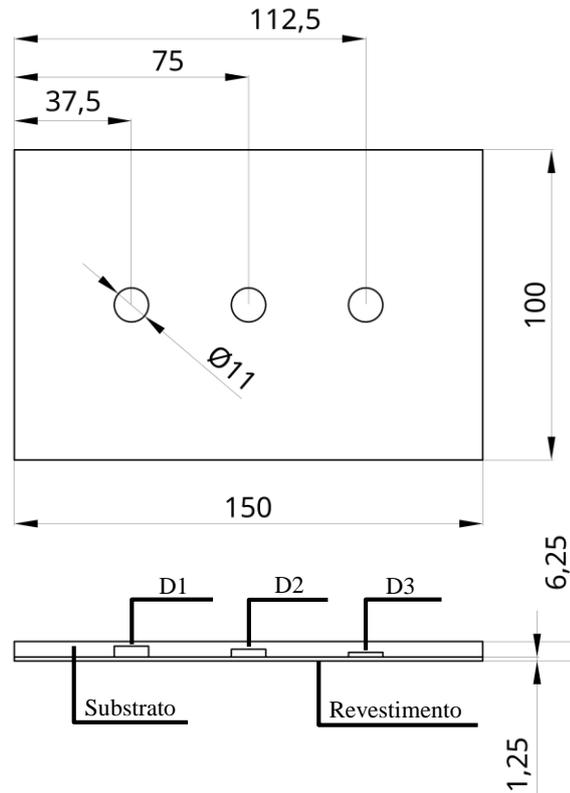


Figura 1. Sólido virtual desenvolvido para o estudo (mm)

Tabela 2. Materiais selecionados para os componentes do sólido

Componente	Material
Substrato	Steel AISI 4340
Revestimento	Filled epoxy resin
Defeitos	Fe ₃ O ₄

Tabela 3. Propriedades termofísicas dos componentes do sólido (Oshita, 2015 e Sundar, 2013)

	Steel AISI 4340	Filled epoxy resin	Fe ₃ O ₄
Densidade (kg/m ³)	7850	1673	5168
Capacidade térmica (J/(kg·K))	475	1300	650
Condutividade térmica (W/(m·K))	44,5	0,42	0,07

Ao selecionar a física de transferência de calor, o software habilita o processo de transferência de calor em todos os constituintes do sólido virtual pertencentes ao modelo. Para o estudo do modelo no software COMSOL foi utilizado a condição física que representa a condução de calor em regime transiente, conforme a Eq. 1, e a convecção que ocorre na superfície, conforme Eq. 2.

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

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

onde ρ é a densidade do material, c_p o calor específico, k a condutividade térmica, T_s a temperatura na superfície, Q a energia depositada na superfície do sólido, t o tempo do teste, T_f a temperatura do fluido e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção natural em todas as superfícies do sólido (Incropera, 2019).

A condição de contorno de radiação não foi empregada no modelo, visto que a emissão de radiação infravermelha torna-se insignificante quando o material possui temperatura próxima à temperatura do ambiente, e foi desconsiderado a resistência de contato entre a região saudável e defeituosa.

O coeficiente de convecção em toda a superfície e a temperatura ambiente considerados em todo sólido foi de $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $26 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. Essas condições são comumente empregadas em laboratórios e ambientes controlados, pois permitem simular ambientes com baixa circulação de ar, garantindo resultados mais precisos e confiáveis, além de possibilitar uma melhor comparação com outras medições realizadas em condições similares. O fluxo de calor que incide na superfície do corpo, que é representado na Fig. 2, foi de 10000 W/m^2 , com a duração do aquecimento de 10 s, após isso, o fluxo se mantém constante em 20 W/m^2 por mais 20 s, com o tempo de inspeção de 30 s. O modelo de pulso que representa o fluxo de calor incidente na superfície do corpo está esquematizado na Fig. 3. Para a construção da malha, após o estudo de convergência, foram utilizados 29.772 elementos tetraédricos e 12.290 elementos triangulares, garantindo a precisão e a efetividade da simulação.

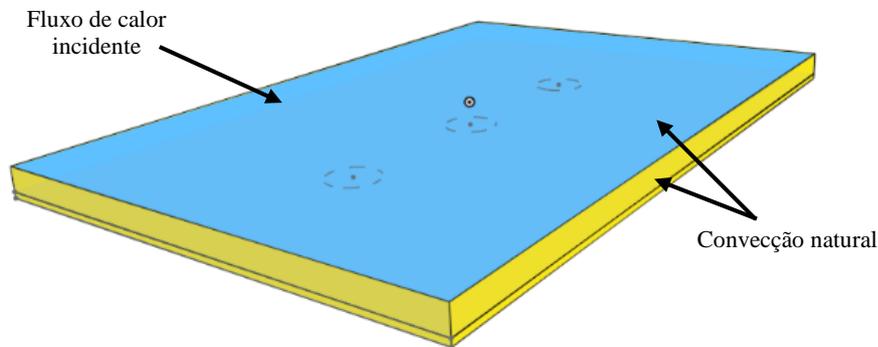


Figura 2. Condições de contorno do sólido virtual

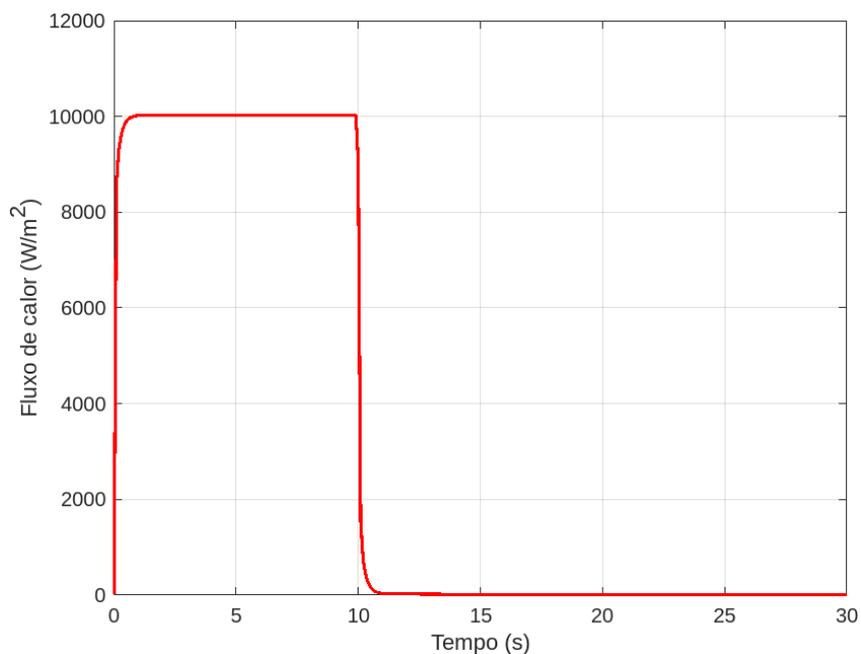


Figura 3. Fluxo de calor que incide na superfície do corpo ao longo do tempo

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a simulação computacional do modelo, obteve-se o resultado da evolução da distribuição térmica na forma de sequências de imagens com intervalos de 0.1 s durante o tempo de teste de 30 s. A Figura 4 mostra as imagens simuladas obtidas para os instantes de 5 s, 10 s e 30 s. A partir da análise das imagens obtidas durante a simulação, foi possível observar que o maior contraste térmico ocorreu durante o período de aquecimento de 10 segundos. Esse resultado pode ser explicado pela difusão de calor ser maior na região saudável do material em comparação com a região com defeito de corrosão. Isso ocorre porque a condutividade térmica do material saudável é maior do que a do material corroído, fazendo com que ele difunda o calor de forma mais eficiente. Com isso, a região com defeito acumula mais calor, resultando em um contraste térmico mais evidente.

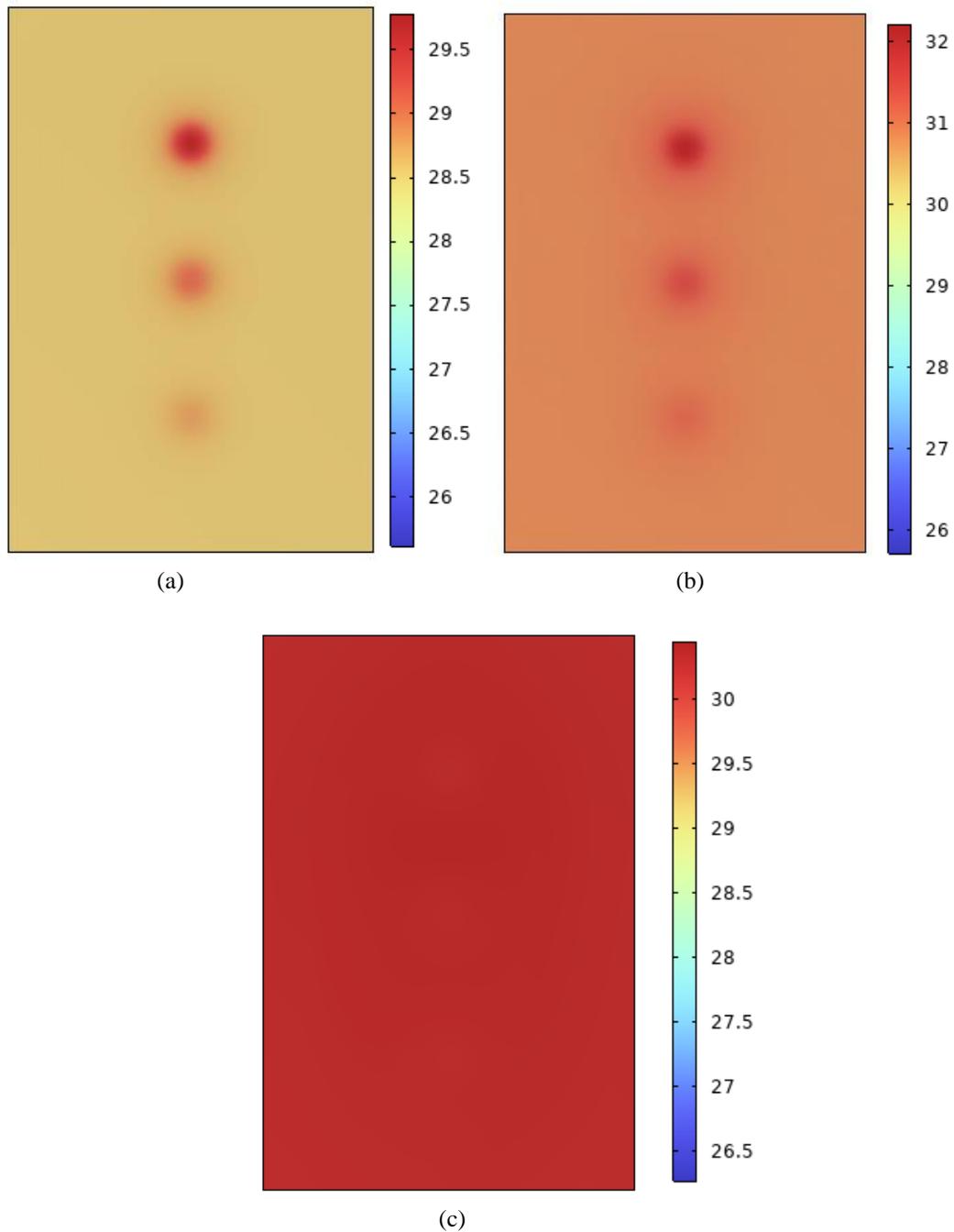


Figura 4. Imagens da distribuição de temperatura do sólido em °C obtidas pelo modelo de simulação desenvolvido:
(a) 5 s, (b) 10 s e (c) 30 s

A Figura 5 mostra os pontos impostos na superfície (P1, P2, P3 e P4), para se obter as diferentes evoluções da temperatura ao longo do tempo, como evidenciado na Fig. 6, no qual P1 é uma região superficial saudável (18,75 mm, 50 mm), P2 é a região superficial do centro do defeito D2 (75 mm, 50 mm), P3 é a região superficial do centro do defeito D3 (112,5 mm, 50 mm) e P4 é a região superficial do centro do defeito D1 (37,5 mm, 50 mm). Analisando a Fig. 6, percebe-se que a superfície do sólido atinge a temperatura máxima no tempo de 10 s e, nesse instante, a temperatura central do defeito de maior espessura (D1) foi de 32,2 °C; o defeito de menor espessura (D3) foi de 31,3 °C; o defeito de espessura média (D2) foi de 31,6 °C; e a região saudável foi de 31 °C. Após o tempo de 15 s, toda a superfície superior do sólido entra em um equilíbrio térmico de 30,4 °C. A Figura 7 ilustra a diferença entre a evolução da temperatura ao longo do tempo nos defeitos D1, D2 e D3 (P2, P3 e P4) em comparação com a região saudável (P1). Observa-se que quanto maior for a espessura de corrosão maior será a variação de temperatura, o que torna possível detectar irregularidades facilmente como ocorreu com os defeitos D1 e D2. Entretanto, o defeito D3 apresentou uma mínima variação de temperatura devido à espessura do defeito de corrosão ser pequena, definido assim no modelo para tentar identificar a corrosão em seu estado inicial. Apesar disso, foram detectados todos os defeitos impostos.

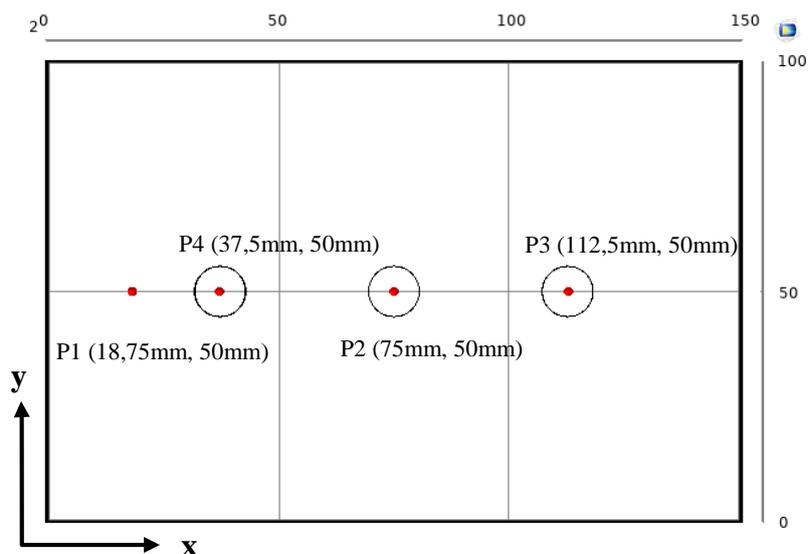


Figura 5. Esquematização dos pontos inseridos na superfície do sólido virtual

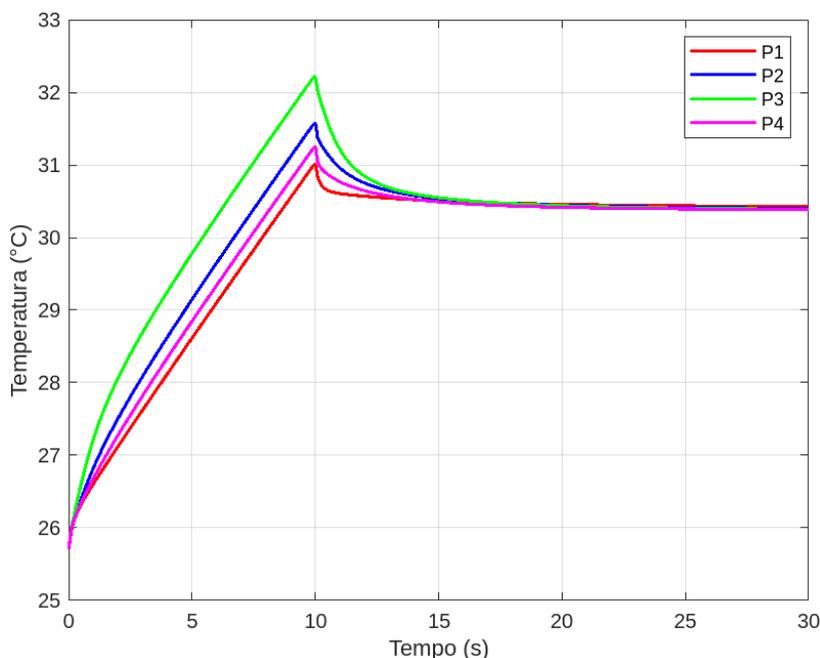


Figura 6. Gráfico da evolução da temperatura ao longo do tempo para os quatro pontos

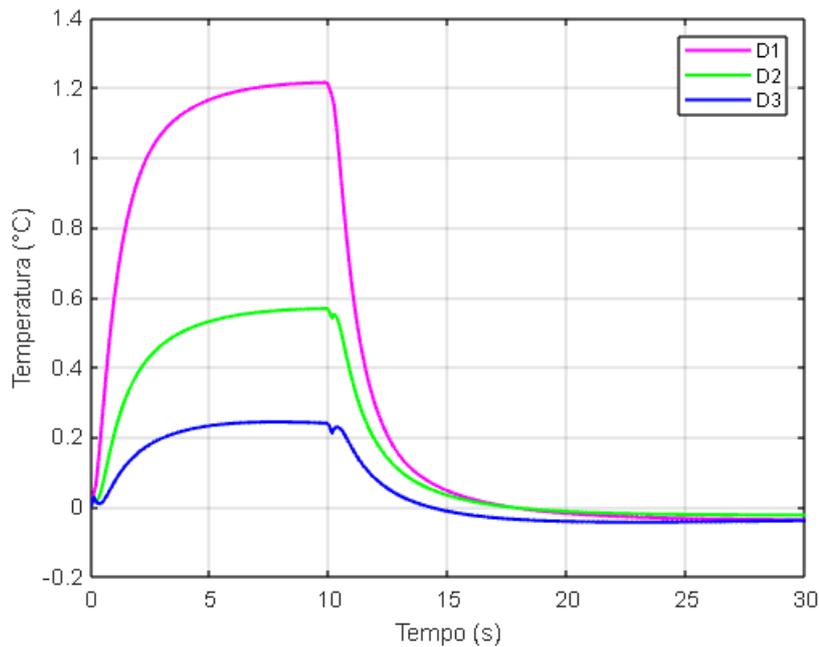


Figura 7. Subtração da evolução da temperatura ao longo do tempo dos defeitos D1, D2 e D3 com a região saudável

A Figura 8 mostra a variação da temperatura ao longo da superfície no tempo de 10 s, obtida a partir de uma linha traçada no centro do sólido identificando todos os defeitos. E, através desse gráfico, foi possível localizar com precisão os defeitos de corrosão, pois o centro da falha apresenta uma temperatura mais elevada que a região saudável. Como era esperado, os defeitos com maiores espessuras apresentaram maiores picos de temperatura.

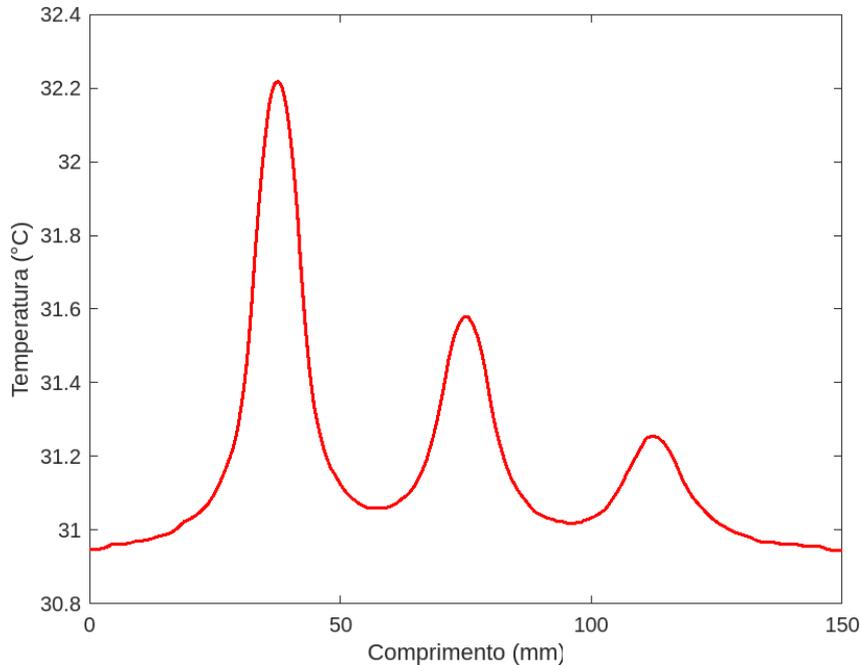


Figura 8. Gráfico da evolução da temperatura ao longo do comprimento central da superfície

4. CONCLUSÃO

Conforme explicado anteriormente, a avaliação de técnicas de detecção de defeitos de corrosão interna é de extrema importância, visto que esses defeitos não são visíveis por meio de inspeção visual. Este artigo apresentou um modelo de simulação computacional para analisar a técnica de termografia ativa pulsada, que permitiu detectar defeitos de diferentes espessuras.

Os resultados das análises indicaram que o período de aquecimento de 10 segundos determinou o maior contraste térmico para identificação dos defeitos de corrosão. Com isso, a técnica de termografia infravermelha foi capaz de detectar todos os defeitos de corrosão, incluindo aqueles com baixo contraste térmico e mínima variação de temperatura. Esses resultados demonstram o grande potencial da aplicação da técnica de termografia infravermelha no ramo da manutenção preventiva.

5. AGRADECIMENTO

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

6. REFERÊNCIAS

- AMPP, 2022. “Oil and Gas Production”, The Association for Materials Protection and Performance. <<https://www.ampp.org/technical-research/what-is-corrosion/corrosion-reference-library/oil-gas>>.
- Doshvarpassanda, S; Wu, C; Wang, X, 2018. “An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography”. In *Infrared Physics & Technology*. Elsevier B.V., United States.
- Frauches-Santos, C.; Albuquerque, M. A.; Oliveira, M. C. C.; Echevarria, A, 2014. “A corrosão e os agentes anticorrosivos”. In *Rev. Virtual Quím.*
- Grosso, M., 2016. *Detecção de defeitos em aços com revestimentos anticorrosivos através da técnica de termografia aliada ao emprego de simulação computacional*. Tese de mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro.
- Grosso, M., 2011. *Análise termográfica de defeitos de corrosão em aços revestidos por materiais compósitos*. Tese de mestrado, UFRJ-Escola Politécnica, Rio de Janeiro.
- Gentil, V., 2017. *Corrosão*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 6ª edição.
- Incropera, FP; De Witt, DP, 2019. *Introdução à transferência de calor*; John Wiley & Sons: Nova York, EUA, 8ª edição.
- Kobayashi, K; Banthia, N, 2011. *Corrosion detection in reinforced concrete using induction heating and infrared thermography*. Springer-Verlag.
- Lyon, S.; Bingham, R.; Mills, DJ, 2016. *Avanços na proteção contra corrosão por revestimentos orgânicos: o que sabemos e o que gostaríamos de saber*. Prog. Org. Casaco.
- Margarit-Mattos, I.C., Quintela, J.P., Mattos, O. R. et al., 2009. “Revestimentos anticorrosivos para tanques de armazenamento de petroquímicos”. In *Petro & Química*, ed. 319.
- Oshita, H, 2015. *Acoustic Emission and Related Non-Destructive Evaluation Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete*. Chuo University, Tokyo, Japan.
- Sundar, L.S.; Singh, M.K.; Sousa, A.C.M., 2013. “Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe₃O₄ nanofluid for heat transfer applications”. In *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Elsevier B.V., University of Aveiro. Portugal.
- Technavio, 2017.” Top 3 Trends Impacting the Global Corrosion Monitoring System Market Through 2021”, Businesswire. <<https://www.businesswire.com/news/home/20170531005921/en/Top-3-Trends-Impacting-Global-Corrosion-Monitoring>> .
- Wicker, M.; Alduseb, B.P.; Jung, S, 2018. “Detection of hidden corrosion in metal roofing shingles utilizing infrared thermography”. In *Journal of Building Engineering*. Elsevier B.V., United States.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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