DOI: 10.53660/CLM-1386-23F01

Analysis of PEC technique and external magnetic fields for detection of corrosion under insulation: 3D finite element model

Análise da técnica PEC e campos magnéticos externos para detecção de corrosão sob isolamento: modelo de elementos finitos 3D

Received: 2023-15-04 | Accepted: 2023-20-05 | Published: 2023-31-05

Gabriel de Souza Cortês
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0200-8351
Instituto de Educação Ciência e Tecnologia da Bahia, Brasil
E-mail: gabriel.cortes.ifba@gmail.com
Davi Franco Rêgo
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7806-0949
Instituto de Educação Ciência e Tecnologia da Bahia, Brasil
E-mail: davifr@ifba.edu.br
Luiz Antonio Pimentel Cavalcanti
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4932-9387
Instituto de Educação Ciência e Tecnologia da Bahia, Brasil
E-mail: luiz.cavalcanti@ifba.edu.br
Cláudia Teresa Teles Farias
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3976-613X
Instituto de Educação Ciência e Tecnologia da Bahia, Brasil
E-mail: cttfarias@gmail.com
Ivan Costa da Silva
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5990-5179
Instituto de Educação Ciência e Tecnologia da Bahia, Brasil
E-mail: ivan.silva@ifba.edu.br

ABSTRACT

Metal piping in industrial plants is subject to corrosion under insulation, which reduces the wall thickness and limits service life and operating conditions. The Pulsed Eddy Current (PEC) technique can be effective in the inspection of isolated metallic materials. However, changes in magnetic permeability make its use difficult in ferromagnetic steels. In this work, we used Neodymium magnets to magnetize the material during tests with a probe. We developed a 3D finite element model to reproduce the magnetic field of the PEC probe and identify defects under insulation. Theoretical results satisfactorily matched the experimental results.

Keywords: Nondestructive Testing; Pulsed Eddy Current; External Magnetic Fields; Corrosion Under Insulation; 3D Finite Element Method;

RESUMO

Tubulações metálicas em plantas industriais estão sujeitas a corrosão sob isolamento, que reduz a espessura de parede, limita a vida útil e as condições de operação. A técnica Correntes Parasitas Pulsadas (*PEC*) pode ser eficaz na inspeção de materiais metálicos isolados, porém alterações da permeabilidade magnética dificultam o seu uso em aços ferromagnéticos. Neste trabalho, ímãs de Neodímio foram utilizados para magnetização do material durante os testes com uma sonda *PEC*. Foi desenvolvido um modelo em elementos finitos 3D, para reproduzir o campo magnético da bobina e identificar defeitos sob isolamento. Os resultados teóricos conseguiram reproduzir satisfatoriamente os experimentais.

Palavras-chave: Ensaios Não Destrutivos; Correntes Parasitas Pulsadas; Campos Magnéticos Externos; Corrosão Sob Isolamento; Método dos Elementos Finitos 3D;

INTRODUÇÃO

Tubulações e equipamentos metálicos em plantas industriais estão constantemente sujeitos a processos corrosivos ou trincas durante a operação (SANTOS *et al*., 2014). Visando contornar esta condição ou prevenir contra a corrosão é aplicado revestimento estrutural na parte externa dos tubos (KHODAKARAMI *et al*., 2021). Mesmo aplicando materiais diversos como revestimento, processos corrosivos podem ocorrer na superfície externa do tubo, caracterizando um processo de corrosão sob isolamento (*CUI*, *Corrosion Under Insulation*) (KAPPES, 2020), ou na superfície interior do tubo que fica em contato com os produtos, conduzindo ao desenvolvimento de trincas e perda de espessura (CHENG, 2012).

A técnica de correntes parasitas pulsadas progride no universo de ensaios não destrutivos (GUO *et al*., 2020. ARJUN *et al*., 2015. BAR-COHEN; NICOLE, 2000). Devido à alta sensibilidade, robustez, vasta gama de frequências e à viabilidade de realizar inspeções em materiais metálicos isolados (SILVA *et al*., 2014), a técnica é cada vez mais empregada tanto na detecção e dimensionamento de falhas em recipientes de pressão, tubos de petróleo, estruturas aeroespaciais, quanto na medição de espessuras e propriedades estruturais (SUDIRMAN *et al*., 2022. ABDALLA, *et al*., 2019. TIAN *et al*., 2005).

Os tubos de aço carbono são ferromagnéticos, onde variações de condutividade elétrica e permeabilidade magnética afetam os resultados (WOHLFARTH, 1958). Dados obtidos experimentalmente empregando correntes parasitas pulsadas podem originar confusão na detecção visual e dimensionamento dos defeitos por conta de resquícios de magnetização prévia (YANG; TAI, 2002). Em um estudo anterior, foi demonstrado que a magnetização induzida por ímãs aliada a técnica *PEC* pode aumentar a discriminação dos defeitos durante a inspeção de tubos de aço carbono revestidos com material compósito (SANTANA *et al*., 2018).

Além disso, é possível utilizar técnicas de modelagem por elementos finitos para simular a inspeção em tubos ferromagnéticos utilizando correntes parasitas pulsadas e avaliar o campo

magnético no interior da sonda (HAN *et al.*, 2022). Técnicas de modelagem são aplicadas em busca do aperfeiçoamento e otimização da configuração experimental (MIZUKAMI *et al*., 2016. MACHADO *et al*., 2017), pois através deste método, modificações podem ser realizadas antes da sua montagem, permitindo predeterminar parâmetros mais eficientes.

Neste estudo, foram realizadas simulações utilizando o método dos elementos finitos, com o objetivo de fazer comparações com o método experimental e investigar a detecção de perdas de espessura de parede sob isolamento com a técnica de Correntes Parasitas Pulsadas, aliada a aplicação de campos magnéticos externos gerados por ímãs permanentes. Os ímãs foram utilizados visando a redução de variações de condutividade e permeabilidade magnética durante a inspeção. Com base no estudo experimental, foi gerado um modelo tridimensional de um tubo de aço carbono revestido termicamente, um yoke magnético e uma sonda *PEC*.

Na busca de descontinuidades em corpos de prova metálicos, a técnica de correntes parasitas pulsadas tem suas vantagens. Utilizada na inspeção não destrutiva, esta técnica faz uso de repetitivos pulsos de onda quadrada de curta duração para excitar uma bobina que induz um campo magnético ao se aproximar do material metálico. Correntes parasitas são, então, induzidas no corpo de provas, que geram um campo magnético secundário de mesma direção, mas com sentido contrário ao da bobina (SILVA JR *et al*., 2021). Finalmente, os dois campos magnéticos são lidos pelo sensor dentro da bobina de excitação e, a partir do sinal diferencial resultante da subtração entre os campos magnéticos primário (referência) e secundário (resposta), pode-se extrair parâmetros que servirão para a detecção de descontinuidades no tubo (SOPHIAN, 2003). A identificação do defeito se concentra, em muitos casos, na análise do transiente no domínio do tempo (PIAO *et al*., 2019), na comparação das amplitudes máximas dos sinais, na diferença entre os tempos de subida ou tempos de decaimentos, que variam em função de perturbações do campo magnético (LAROCCA *et al*., 2018).

Os materiais ferromagnéticos e paramagnéticos dispõem de uma estrutura que atua como pequenos ímãs, esta estrutura é conhecida como dipolos magnéticos. Estes dipolos, ao serem expostos a um campo magnético externo com certa força, alinham-se às linhas deste campo, reforçando a sua intensidade. Este ordenamento não é espontâneo, pois sem a presença de uma excitação, os dipolos não tenderiam ao alinhamento, adquirindo orientações aleatórias. Com a remoção do campo magnético indutor, observa-se que os dipolos em metais paramagnéticos adquirem orientações dispersas, entretanto, os ferromagnéticos mantêm o alinhamento, além de gerar seu próprio campo de baixa intensidade (SHARPE *et al*., 2021. MCHENRY; LAUGHLIN, 2012. TANASE *et al*., 2001). Neste estudo, ímãs, interligados através de um yoke magnético de aço carbono (AZIZZADEH; SAFIZADEH, 2018), foram utilizados buscando minimizar efeitos de variações de permeabilidade.

A ideia básica do método dos elementos finitos (*FEM, Finite Element Modeling*) é desagregar toda a estrutura conjunta em pequenas unidades finitas para representar os objetos

complexos, onde as unidades são conectadas por nós, sem que haja alteração das propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados (BABBAR; HARLLEY; KRAUSE, 2010). O *FEM* pode ser utilizado em diversas áreas das ciências e, devido à sua grande aplicabilidade e eficiência, é utilizado em projetos de engenharia (SALLES, 2008).

Como visto por Han *et al*. (2022, p.104), o módulo *Maxwell* no *Ansys*® pode ser utilizado para modelagem e simulação de correntes parasitas pulsadas em tubos ferromagnéticos. Em seu estudo, foi feita uma modelagem de uma bobina vertical para simular a sua capacidade de detecção de correntes parasitas em defeitos sob isolamento. Majidnia *et al*. (2014, p.560) estudaram o comportamento das correntes parasitas pulsadas através do *software* de elementos finitos *COMSOL*® *Multiphysics*, onde o modelo foi construído com uma bobina cilíndrica que envolve ao redor de um tubo de aço com isolamento, mostrando que o método de elementos finitos pode ser uma ferramenta útil para estudar a posição de sensores de campo magnético.

Neste trabalho, o método de elementos finitos foi utilizado para simular uma sonda de correntes parasitas pulsadas. O modelo construído é composto por tubo, isolamento térmico, sonda, yoke magnético e ímãs. Os resultados da simulação são comparados com os resultados experimentais.

MATERIAIS E MÉTODOS

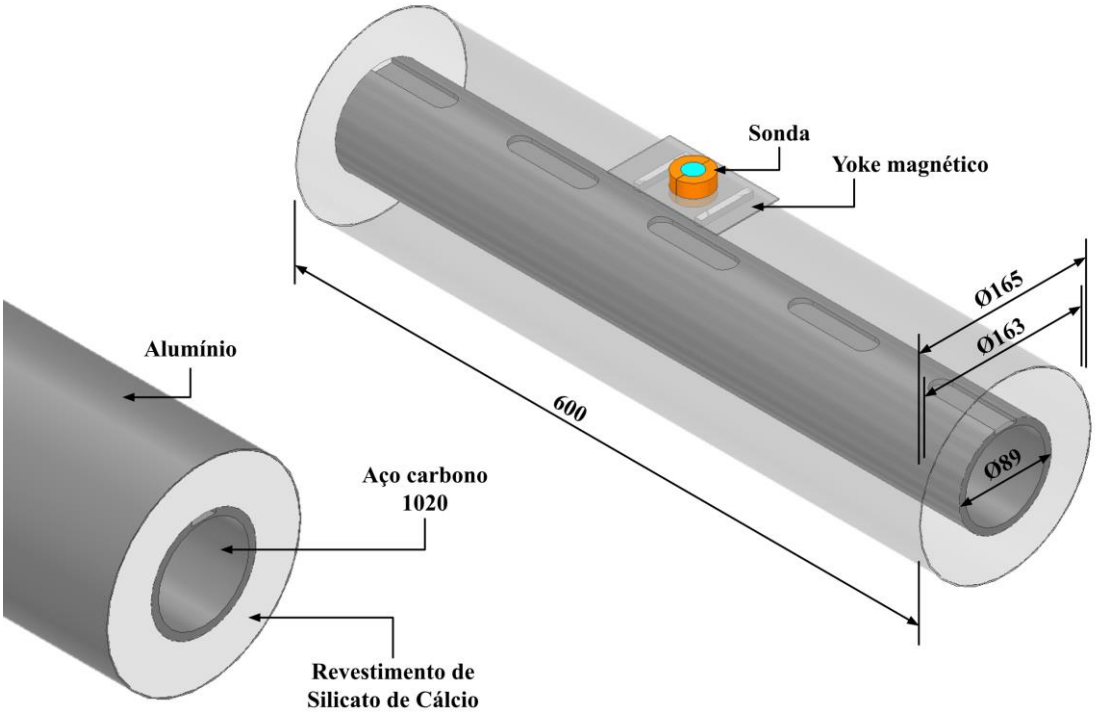
A partir de um corpo de provas tubular de aço 1020, com revestimento de silicato de cálcio e reduções de espessura na superfície externa (Figura 1), foi criado um modelo de elementos finitos da configuração tubo-bobina-ímãs. O corpo de provas utilizado no trabalho experimental possui espessura de 6mm, onde foram usinados defeitos superficiais, de 80mm de comprimento e profundidade de 3 e 5mm. O tubo de aço carbono foi coberto por uma camada de 37mm de silicato de cálcio e uma fina folha de alumínio com 1mm de espessura, para proteção térmica por barreira, conforme a Figura 2.

A Figura 3 ilustra a configuração experimental para o estudo. Foi utilizada uma sonda diferencial desenvolvida no Laboratório de Inspeção Não Destrutiva (Labind/IFBA) para a técnica de correntes parasitas pulsadas. A sonda do experimento e do modelo 3D constam de uma bobina geradora de campo magnético com as seguintes configurações: diâmetro externo de 33mm; diâmetro interno de 17mm; altura de 20mm e 500 voltas. Foi utilizada uma placa de aquisição com circuito eletrônico para acionamento da bobina com ondas quadradas com uma frequência de 300Hz. Os dados obtidos através das inspeções realizadas com a sonda foram exportados para o computador, onde foram processados utilizando os *softwares MATLAB*® e *Minitab*®.

Figura 1 – Corpo de provas experimental e sonda *PEC*.

Fonte: Autores (2022).

Figura 2 – Corpo de provas modelado com base no experimental (mm).

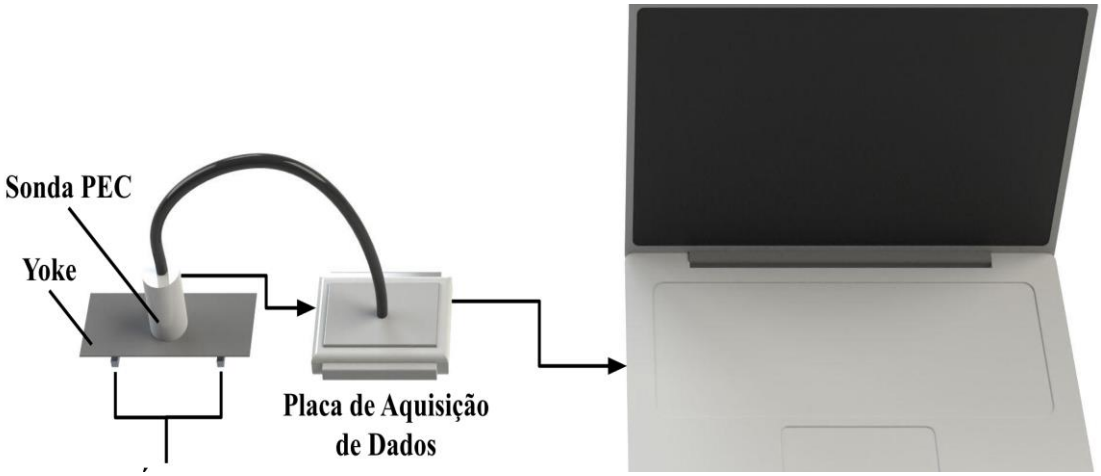


Fonte: Autores (2022).

Dois ímãs de Neodímio (N30) foram empregados para magnetizar o corpo de provas, em formato de barra de seção quadrada, com comprimento de 50mm, largura de 6mm e polaridades invertidas. Os sinais foram medidos no centro da bobina, através de um sensor GMR (*giant magnetoresistance*) AAH002, a uma altura de 2,5mm a partir do *lift-off*. Os ímãs, a bobina e um

yoke magnético de aço carbono foram posicionados sobre uma sapata polimérica impressa com a curvatura do tubo, adicionando uma distância de 3mm entre a sonda e o revestimento, totalizando o *lift-off* de 41mm.

Figura 3 – Configuração experimental.



Fonte: Autores (2022).

O modelo de elementos finitos 3D foi construído através do *software Ansys® Maxwell Electromagnetics Suite*, seguindo as mesmas configurações e dimensionamento do corpo de provas experimental. Os resultados foram calculados para a condição sem defeito e para diferentes reduções de espessura da parede do tubo de 3mm e 5mm.

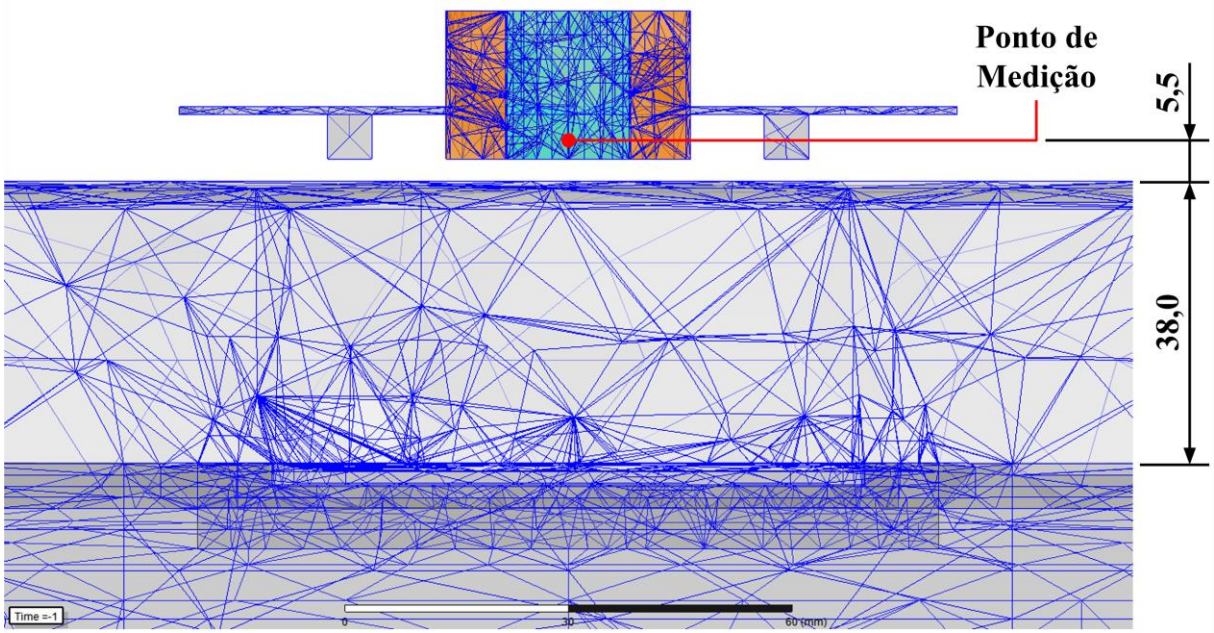
A malha do modelo de elementos finitos foi configurada para o método TAU do Maxwell, com malha curvilínea para todas as superfícies curvas e resolução mediana. A quantidade máxima de elementos finitos foi limitada em algumas partes do modelo 3D, de forma a otimizar a resolução do sistema, como mostra a Tabela 1. Dessa forma, foram gerados, aproximadamente, 27.000 elementos finitos no total, com geometria tetraédrica e distribuição uniforme em todo o modelo, como mostra a Figura 4.

Tabela 1 – Configuração do método de elementos finitos.

Região	Defeito superficial	Núcleo e bobina	Yoke magnético	Tubo e espaço
N° máximo de elementos finitos	5000	1000	5000	1000

Fonte: Autores (2022).

Figura 4 – Vista em seção dos elementos finitos da malha do modelo 3D (mm).



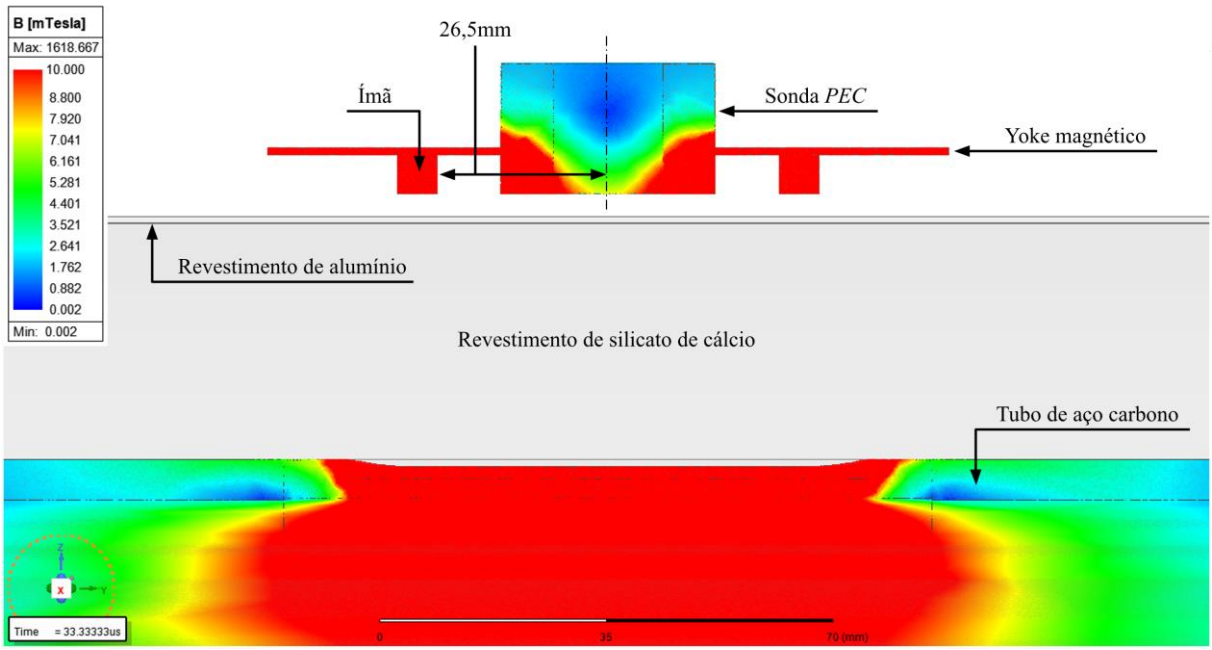
Fonte: Autores (2022).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do modelo de elementos finitos 3D, pode-se analisar a difusão do campo magnético no interior da sonda e do corpo de provas. A concentração do campo é realçada na Figura 5, onde verifica-se que existe uma grande densidade de fluxo magnético na região do defeito, devido ao campo magnético uniforme gerado pelos ímãs permanentes, mesmo quando a corrente de excitação da bobina ainda está no seu valor mínimo. A distância entre os ímãs e a bobina foi determinada experimentalmente onde, ao posicionar os ímãs a 26,5mm de distância do centro da bobina, obteve-se o melhor resultado nas leituras dos campos magnéticos, que serão discutidos a seguir.

Utilizando um sensor GMR para leitura dos campos magnéticos no interior da sonda, na Figura 6 (a) os sinais experimentais da técnica de correntes parasitas pulsadas são comparados para as condições do tubo sem defeito e com perdas de espessura de 3 e 5mm na superfície externa. Observa-se na subida do transiente que o decaimento dos sinais referentes às áreas com perdas de espessura é mais acentuado que na condição sem defeito. Isto ocorre, pois a subida do sinal é modificada devido a relação entre a espessura da seção do tubo e o espaço disponível para difusão das correntes parasitas. Com uma densidade de fluxo maior, acontece uma queda da amplitude de acordo com a espessura residual, o que torna a técnica de correntes parasitas pulsadas eficaz na detecção de defeitos sob isolamento.

Figura 5 – Vista em seção do campo magnético para um defeito externo de 3mm.



Fonte: Autores (2022).

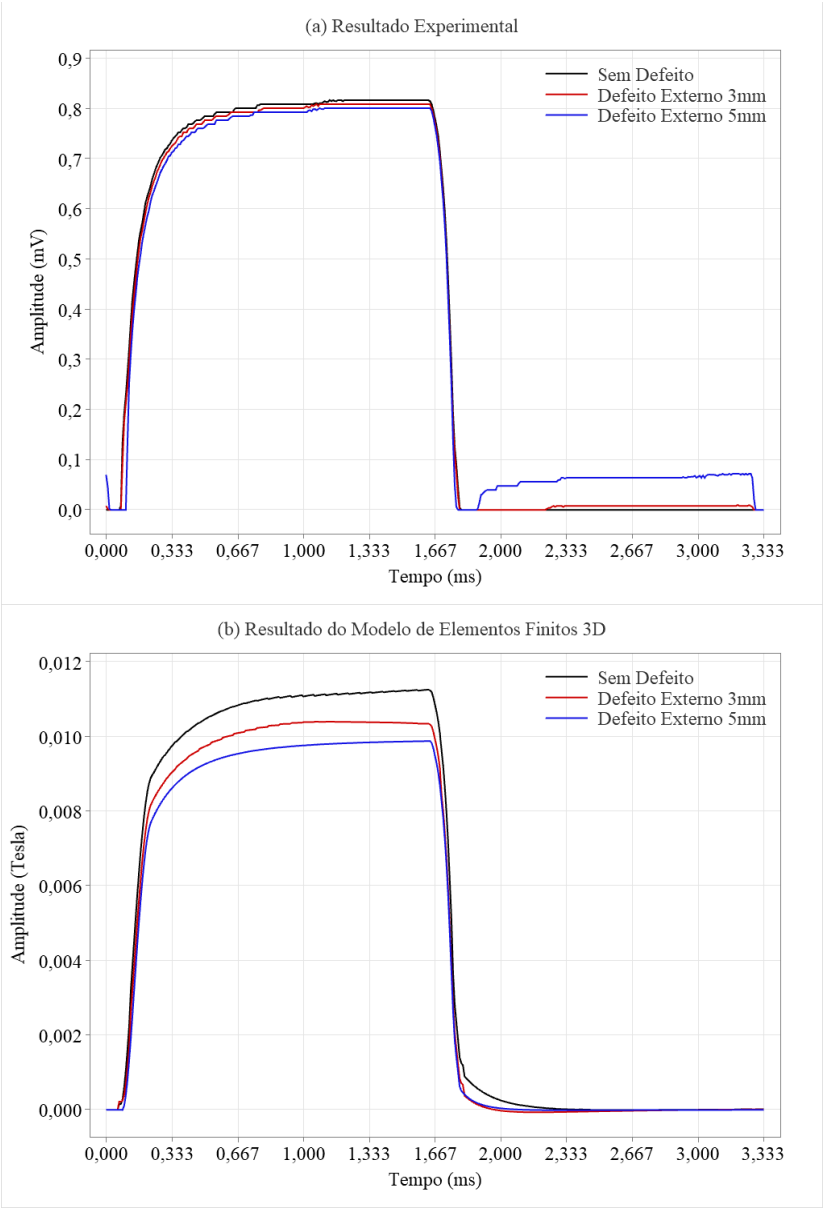
No entanto, observa-se que os sinais ficaram sobrepostos durante o decaimento do transiente, para as diferentes condições de perda de espessura. Após o decaimento, os sinais voltam a se diferenciar com amplitudes diferentes, porém, ao contrário da subida, observa-se uma amplitude menor na região sem defeito que nas áreas com perdas de espessura. Conforme visto por Sophian (2003, p.103), este fenômeno acontece, pois ao magnetizar a superfície do tubo, ocorre uma inversão na sequência de amplitude do transiente, o que não limita a técnica na busca de defeitos superficiais sob isolamento.

Assim como no resultado experimental, as leituras de campo magnético do modelo de elementos finitos 3D foram realizadas no interior da sonda e são mostradas na Figura 6 (b). Verifica-se nas curvas do transiente um comportamento semelhante entre o resultado modelado e experimental, em que, na subida do transiente, o decaimento dos sinais em áreas com perdas de espessura é mais acentuado que na condição sem defeito. Porém, no modelo, a diferença entre as amplitudes dos sinais é significativamente maior que no método experimental, o que facilita a detecção de perdas de espessura na superfície do tubo.

Entretanto, em relação ao resultado experimental, os sinais do modelo de elementos finitos 3D apresentam amplitudes diferentes durante o decaimento do transiente, onde a amplitude é maior na região sem defeito do que nas áreas com perdas de espessura. Portanto, é possível realizar a identificação do defeito sob isolamento através da análise do tempo de decaimento.

Além disso, por ser um sinal calculado por elementos finitos, as curvas modeladas apresentam pouco ou nenhum ruído e não ocorre a inversão da curva na região após o decaimento do transiente, fazendo com que os sinais se sobreponham no fim do pulso.

Figura 6 – Leituras do campo magnético para diferentes reduções de espessura: (a) resultado experimental; (b) resultado do modelo de elementos finitos 3D.



Fonte: Autores (2022).

Ao calcular a amplitude normalizada dos sinais, é possível produzir um gráfico de comparação entre o resultado experimental versus o modelo de elementos finitos 3D para cada condição de perda de espessura, como mostra a Figura 7.

Dessa forma, torna-se possível calcular o erro quadrático médio (MSE) entre o experimento e o modelo, para cada condição de perda de espessura, conforme mostrado na Tabela

2. Na tabela, verifica-se que o menor erro médio quadrático apresenta-se na condição de defeito externo de 3mm, enquanto o maior erro médio está presente na condição de 5mm de perda de espessura.

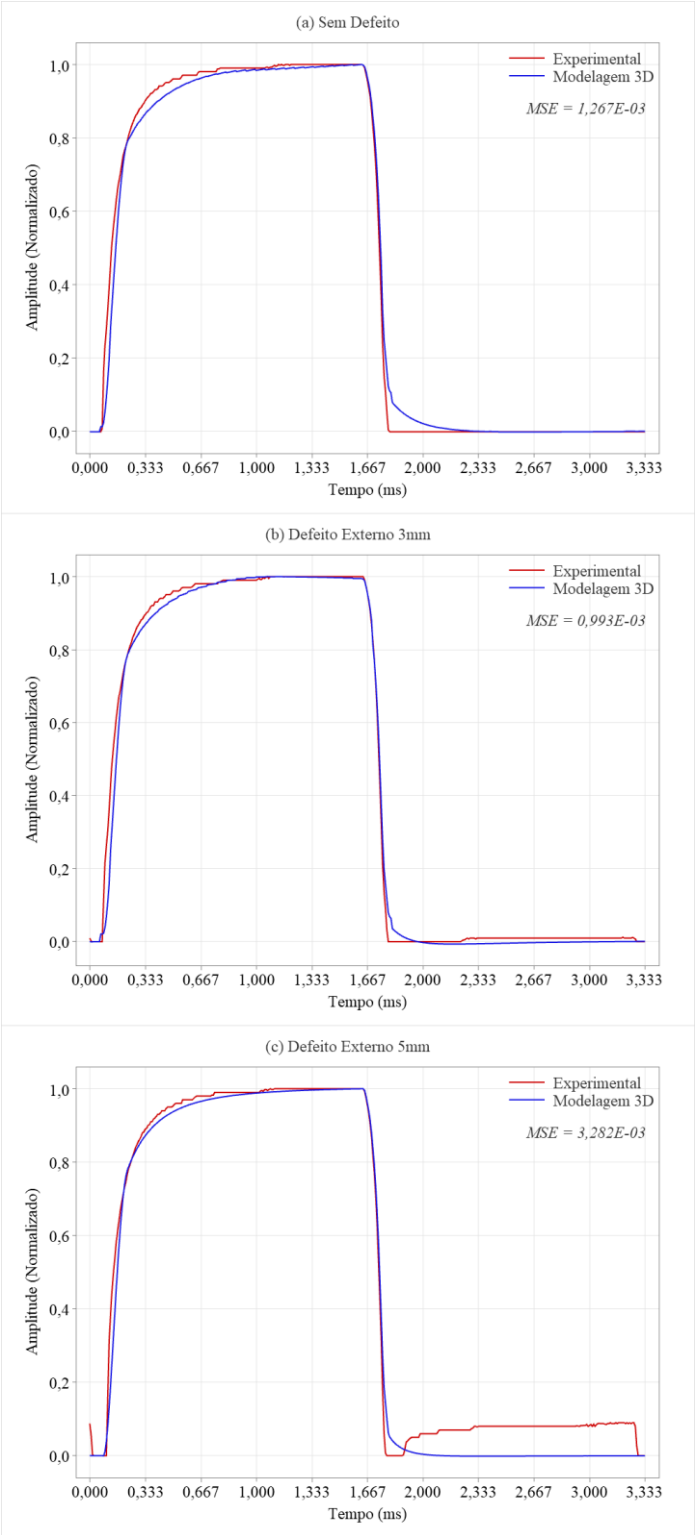
Ao analisar as Figuras 7 (a) e (b), observa-se que o modelo foi capaz de gerar uma resposta semelhante à resposta obtida experimentalmente. Entretanto, verifica-se na Figura 7 (c) uma diferença entre os dois sinais, principalmente no transiente após o decaimento do sinal experimental, onde observa-se uma rápida subida da amplitude. Este fenômeno pode ter ocorrido devido ao pouco espaço disponível para difusão das correntes parasitas, o que concentrou todo o campo magnético no substrato do tubo na espessura residual de 1mm. Esta inversão não limita a técnica de correntes parasitas pulsadas na busca de defeitos superficiais sob isolamento, pois, como discutido anteriormente, ainda é possível analisar e identificar o defeito através da comparação das amplitudes dos sinais.

Tabela 2 – Erro calculado entre resultado experimental e resultado do modelo de elementos finitos 3D.

Condição	**Erro quadrático médio (*MSE*)**
Sem defeito	$1{,}267 \times 10^{-03}$
Defeito de 3mm	$0{,}993 \times 10^{-03}$
Defeito de 5mm	$3{,}282 \times 10^{-03}$

Fonte: Autores (2022).

Figura 7 – Comparação entre resultado experimental e do modelo de elementos finitos 3D para as condições: (a) sem defeito; (b) defeito externo 3mm; (c) defeito externo 5mm.



Fonte: Autores (2022).

CONCLUSÃO

O método de modelagem por elementos finitos 3D foi capaz de prever a resposta da sonda *PEC* na presença de descontinuidades na superfície do tubo de aço carbono, portanto, o método pode ser utilizado para estudar a técnica de correntes parasitas pulsadas.

Através da associação da técnica *PEC* com a magnetização por ímãs permanentes, foi possível diferenciar os sinais de resposta em regiões sem defeito e com perdas de espessura, tanto experimentalmente, quanto através de modelagem por elementos finitos. Dessa forma, pôde-se identificar defeitos superficiais sob isolamento, mesmo com a inversão na sequência de amplitude do transiente.

A melhor distância de posicionamento foi determinada experimentalmente, onde, com os ímãs distanciados a 26,5mm do centro da sonda, foi possível visualizar a difusão do campo magnético e detectar defeitos na parede externa do tubo sobre um revestimento de 38mm de espessura.

Além disso, os defeitos sob isolamento puderam ser identificados através da análise do transiente no domínio do tempo, ao comparar as amplitudes máximas, as amplitudes durante subida ou decaimento, e ao comparar o tempo de subida ou tempo de decaimento.

Como trabalhos futuros, novas configurações da técnica de correntes parasitas pulsadas poderão ser estudadas utilizando o modelo de elementos finitos 3D e validadas experimentalmente com a construção de uma nova configuração experimental.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, Ahmed N. *et al*. Challenges in improving the performance of eddy current testing. **Measurement and Control**, v. 52, n. 1-2, p. 46-64, 2019. Disponível em <https://doi.org/10.1177/0020294018801382>. Acesso em: 08 dez. 2022.

ARJUN, V. *et al*. Optimisation of pulsed eddy current probe for detection of sub-surface defects in stainless steel plates. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 226, p. 69-75, 2015. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.02.018>. Acesso em: 08 dez. 2022.

AZIZZADEH, T.; SAFIZADEH, M. S. Detection of sub-surface defects in ferromagnetic steels using a pulsed eddy current technique. **Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, v. 60, n. 6, p. 311-316, 2018. Disponível em <https://doi.org/10.1784/insi.2018.60.6.311>. Acesso em: 08 dez. 2022.

BABBAR, V. K.; HARLLEY, D.; KRAUSE, T. W. Finite element modeling of pulsed eddy current signals from aluminum plates having defects. In: **AIP Conference Proceedings**. American Institute of Physics, p. 337-344, 2010. Disponível em <https://doi.org/10.1063/1.3362413>. Acesso em: 08 dez. 2022.

BAR-COHEN, Yoseph; NICOLE, R. Emerging NDE technologies and challenges at the beginning of the 3rd millennium — Part I. In: **The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics**, v.5, n. 1, 2000. Mensal. ISSN: 1435-4934. Disponível em <https://www.ndt.net/article/v05n01/barcohen/barcohen.htm>. Acesso em: 08 dez. 2022.

CHENG, Weiying. Pulsed eddy current testing of carbon steel pipes' wall-thinning through insulation and cladding. **Journal of Nondestructive evaluation**, v. 31, n. 3, p. 215-224, 2012. Disponível em <https://doi.org/10.1007/s10921-012-0137-9>. Acesso em: 08 dez. 2022.

GUO, Wei *et al*. Physic perspective fusion of electromagnetic acoustic transducer and pulsed eddy current testing in non-destructive testing system. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 378, n. 2182, p. 20190608, 2020. Disponível em <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0608>. Acesso em: 08 dez. 2022.

HAN, Yang *et al*. Pulsed eddy currents in ferromagnetic pipes with cladding in nuclear power plants. **Energy Reports**, v. 8, p. 104-111, 2022. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.113>. Acesso em: 08 dez. 2022.

KAPPES, Mariano A. Localized corrosion and stress corrosion cracking of stainless steels in halides other than chlorides solutions: a review. **Corrosion Reviews**, v. 38, n. 1, p. 1-24, 2020. Disponível em <https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0061>. Acesso em: 08 dez. 2022.

KHODAKARAMI, Siavash *et al*. Scalable corrosion-resistant coatings for thermal applications. **ACS applied materials & interfaces**, v. 13, n. 3, p. 4519-4534, 2021. Disponível em <https://doi.org/10.1021/acsami.0c19683>. Acesso em: 08 dez. 2022.

LAROCCA, Camilla B. *et al*. Wall thinning characterization of composite reinforced steel tube using frequency-domain PEC technique and neural networks. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 37, n. 3, p. 1-8, 2018. Disponível em <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0477-1>. Acesso em: 08 dez. 2022.

MACHADO, Miguel A. *et al*. Novel eddy current probes for pipes: Application in austenitic round-in-square profiles of ITER. **NDT & E International**, v. 87, p. 111-118, 2017. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.02.001>. Acesso em: 08 dez. 2022.

MAJIDNIA, S.; RUDLIN, J.; NILAVALAN, R. Investigations on a pulsed eddy current system for flaw detection using an encircling coil on a steel pipe. **Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, v. 56, n. 10, p. 560-565, 2014. Disponível em <https://doi.org/10.1784/insi.2014.56.10.560>. Acesso em: 08 dez. 2022.

MCHENRY, Michael E.; LAUGHLIN, David E. Magnetic moment and magnetization. **Characterization of materials**, p. 1-25, 2012. Disponível em <https://doi.org/10.1002/0471266965.com042.pub2>. Acesso em: 08 dez. 2022.

MIZUKAMI, Koichi *et al*. Detection of in-plane and out-of-plane fiber waviness in unidirectional carbon fiber reinforced composites using eddy current testing. **Composites Part B: Engineering**, v. 86, p. 84-94, 2016. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.041>. Acesso em: 08 dez. 2022.

PIAO, Guanyu *et al*. A novel pulsed eddy current method for high-speed pipeline inline inspection. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 295, p. 244-258, 2019. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.05.026>. Acesso em: 08 dez. 2022.

SALLES, Fábio Papa. **Aplicação do método de elementos finitos para aprimoramento da análise de motores de indução trifásicos acionados por inversores**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008. Disponível em <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2008052601.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2022.

SANTANA, Carollina S. *et al*. Estudo da Magnetização em Aço Carbono para emprego da Técnica PEC. **Congresso Anual de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção 2018 (ConaEnd&Iev2018)**, p. 411, 2018. Disponível em <https://archive.org/details/cona-end-iev-2018-411>. Acesso em: 08 dez. 2022.

SANTOS, Ygor Tadeu, *et al*. Ultrasonic Non-destructive Evaluation of Isothermal Aging in HP Steels. **11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)**, Prague, Czech Republic, 2014. Disponível em <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=16762>. Acesso em: 08 dez. 2022.

SHARPE, Aaron L. *et al*. Evidence of orbital ferromagnetism in twisted bilayer graphene aligned to hexagonal boron nitride. **Nano Letters**, v. 21, n. 10, p. 4299-4304, 2021. Disponível em <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c00696>. Acesso em: 08 dez. 2022.

SILVA, Ivan Costa, *et al*. Corrosion Inspection Using Pulsed Eddy Current. **11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)**, Prague, Czech Republic, 2014. Disponível em <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=16752>. Acesso em: 08 dez. 2022.

SILVA JR, Manoel M. *et al*. Intelligent embedded system for decision support in pulsed eddy current corrosion detection using Extreme Learning Machine. **Measurement**, v. 185, p. 110069, 2021. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110069>. Acesso em: 08 dez. 2022.

SOPHIAN, Ali. **Characterisation of surface and sub-surface discontinuities in metals using pulsed eddy current sensors**. Tese de Doutorado. University of Huddersfield. 2003. Disponível em <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/6916/>. Acesso em: 08 dez. 2022.

SUDIRMAN, Sud *et al*. Pulsed Eddy Current signal processing using wavelet scattering and Gaussian process regression for fast and accurate ferromagnetic material thickness measurement. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 12, p. 11239-11250, 2022. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.04.028>. Acesso em: 08 dez. 2022.

TANASE, Monica *et al*. Magnetic alignment of fluorescent nanowires. **Nano Letters**, v. 1, n. 3, p. 155-158, 2001. Disponível em <https://doi.org/10.1021/nl005532s>. Acesso em: 08 dez. 2022.

TIAN, Gui Yun *et al*. Multiple sensors on pulsed eddy-current detection for 3-D subsurface crack assessment. **IEEE Sensors Journal**, v. 5, n. 1, p. 90-96, 2005. Disponível em <https://doi.org/10.1109/JSEN.2004.839129>. Acesso em: 08 dez. 2022.

WOHLFARTH, Erich Peter. Relations between different modes of acquisition of the remanent magnetization of ferromagnetic particles. **Journal of Applied Physics**, v. 29, n. 3, p. 595-596, 1958. Disponível em <https://doi.org/10.1063/1.1723232>. Acesso em: 08 dez. 2022.

YANG, Hung-Chi; TAI, Cheng-Chi. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate. **Measurement science and technology**, v. 13, n. 8, p. 1259, 2002. Disponível em <https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/8/313>. Acesso em: 08 dez. 2022.