

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA INSPEÇÃO DE TROCADORES DE CALOR POR CORRENTES PARASITAS*

Joaquim Smiderle Corte¹
Mónica P. Arenas²
João Marcos A. Rebello³
Gabriela Ribeiro Pereira⁴

Resumo

O ensaio de Correntes Parasitas (CP) tem ampla aplicação na inspeção em serviço de feixes tubulares dos trocadores de calor modelo casco e tubo. Entretanto, devido à alta sensibilidade do ensaio às diversas variáveis, nem sempre a confiabilidade dos resultados do ensaio tem sido satisfatória. Em função da sua geometria, a análise dos sinais na região dentro do espelho fica ainda mais complexa, dificultando diferenciar os sinais dos defeitos dos sinais espúrios característicos desta região, gerados simultaneamente durante o ensaio. No presente trabalho, utilizando um software de simulação computacional, foram construídos sólidos virtuais simulando os tubos, a região do espelho e as sondas, com as características geométricas e dimensionais similares a condição real. Os resultados preliminares da simulação revelaram que a metodologia se mostra promissora para diferenciar a origem dos diferentes sinais permitindo uma maior confiabilidade na análise do problema.

Palavras-chave: Correntes Parasitas; Trocador de Calor; Simulação FEM.

COMPUTATIONAL SIMULATION OF HEAT EXCHANGER TUBES BY EDDY CURRENT INSPECTION

Abstract

The Eddy Current Testing (ECT) has a wide application in the service inspection of tubular bundles of shell and tube heat exchangers. However, due to the high sensitivity of this technique to various variables, the reliability of the assay has not always been satisfactory. Due to its geometry, the analysis of the signals in the inner region tubesheet becomes even more complex, making it difficult to differentiate the signals from the characteristic spurious defects of this region generated simultaneously during the test. In the present work, using a simulation software, virtual solids were constructed simulating the tubes, region of the tubesheet and probes, with geometric and dimensional characteristics similar to the real condition. Preliminary results of the simulation revealed that the methodology is promising to differentiate the origin of the different signals, allowing greater reliability in the analysis of the problem.

Keywords: Eddy current testing; Heat exchanger tube; FEM simulation.

¹ Engenheiro Metalúrgico/MSc. em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, estudante de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

² Engenheira Física/DSc. em Engenharia Metalurgia e de Materiais, pós-doutor, Laboratório de Ensaios Não Destrutivos Corrosão e Soldagem, Rio de Janeiro, Brasil

³ Engenheiro Metalúrgico/DSc. em Engenharia Metalurgia Física/Professor do programa Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

⁴ Física/DSc. em Engenharia Nuclear/Professor do programa Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

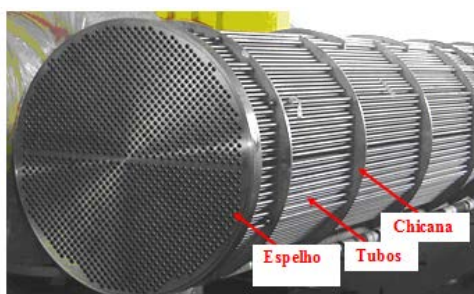
1. INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são equipamentos de extrema importância nas plantas de processo de unidades petroquímicas, refinarias e plataformas. O modelo casco tubo é comumente utilizado quando se requer maior segurança e confiabilidade operacional, mas é necessário acompanhar a evolução de danos que incidem preferencialmente no feixe tubular [1].

Esse fato justifica a utilização de materiais mais resistentes à corrosão no feixe tubular, como o aço inoxidável austenítico (AIA). Mesmo assim, constata-se em diversas aplicações uma incidência de falhas por pites e trincas de Corrosão sob Tensão (CST) em tais tubos, sendo necessário realizar inspeções periódicas para avaliar sua integridade em serviço [2]. São comuns intervenções durante a campanha nestes equipamentos, que normalmente exigem a parada para reparos e tamponamento dos tubos e, não raro, a substituição de todo feixe [3].

O ensaio de Correntes Parasitas (CP) tem sido um dos mais utilizados na avaliação do feixe tubular em AIA, mas devido à grande sensibilidade do ensaio de CP nem sempre a confiabilidade dos resultados do ensaio tem sido satisfatória [4-5]. Em função da geometria do conjunto espelho/trocador de calor, a análise dos sinais na região dentro do espelho fica ainda mais complexa, dificultando diferenciar os sinais dos defeitos dos sinais espúrios característicos desta região, gerados simultaneamente durante o ensaio. Isto resulta numa menor confiabilidade da inspeção nesta região, que normalmente é um local susceptível a presença de danos [4].

A confecção do feixe tubular exige um rigoroso controle de fabricação. A **Figura 1.a** apresenta um feixe todo confeccionado em AIA, já pronto para ser inserido no casco, destacando os seus principais componentes: espelho, tubos e chicanas [6]. A estanqueidade entre os fluidos é normalmente obtida com a operação de mandrilagem do tubo. A **Figura 1.b** revela as diversas regiões dentro do espelho resultantes da operação de mandrilagem do tubo nos furos do espelho. A Região Expandida (RE) é a região que sofreu deformação plástica, pois foi expandida dentro dos *grooves* e mantém a vedação do tubo com o espelho. A Região Não Expandida (RNE) é a que não sofreu deformação plástica no processo de mandrilagem e por apresentar um diâmetro menor que o furo do espelho favorecerá o aparecimento de uma Região de Fresta (RF). Devido a diferenças dimensionais entre a RE e a RNE existe uma Região de Transição (RT) entre as duas com uma configuração específica [7].



(a)



(b)

Figura 1.(a) Feixe Tubular com os principais componentes
(b) Regiões dentro do espelho após mandrilagem [6].

O nível de tensões trativas resultante da expansão do tubo é elevado, o que justifica presença de danos de CST em locais do tubo com altas concentrações de tensão [7]. Devido à geometria na Região de Transição (RT) da mandrilagem, da saída e entrada do espelho apresentam-se sinais de CP característicos dos efeitos geométricos que dificultam a interpretação do sinal dos defeitos nestas regiões [8].

Devido a necessidade de diferenciar os sinais espúrios provenientes das diversas regiões do espelho do trocador de calor, o presente estudo objetiva determinar a influência destes sinais no ensaio de CP. A simulação computacional foi realizada no software de elementos finitos **OPERA®**, no módulo **3D/Elektra**.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1. Software

As simulações foram realizadas com o software **OPERA 3D**, ferramenta que suporta avaliar:

- Campos eletromagnéticos estáticos;
- Campos eletromagnéticos de baixa frequência variáveis no tempo;
- Campos eletromagnéticos de alta frequência variáveis no tempo.

O sólido virtual foi construído com a geometria e dimensões reais, simulando a região tubo/espelho de um trocador de calor. A **Figura 2** apresenta o desenho esquemático de um espelho típico, com suas dimensões, distância entre os centros das furações e tolerâncias de fabricação, utilizados como referência na simulação [8]. O diâmetro externo do tubo foi de 19,05 mm com 2,11 mm de espessura de parede.

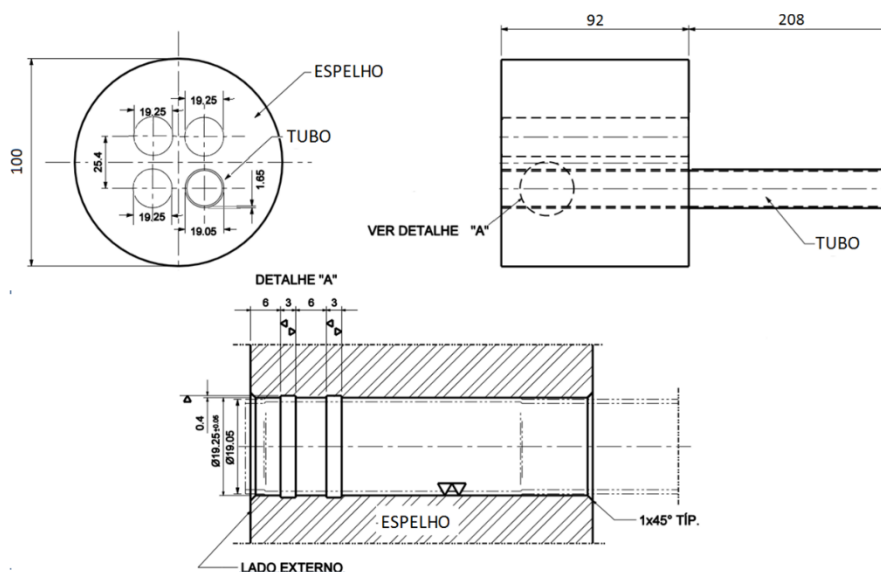


Figura 2. Desenho esquemático do espelho.

Após esta etapa foram inseridos no programa as características da sonda. Posteriormente foram definidos os materiais e as condições de contorno magnéticas.

Neste caso específico, o material do tubo e do espelho foi o aço inoxidável austenítico AISI 321.

2.2. Sonda

Foi utilizada uma sonda diferencial, fabricante Olympus, modelo TEA-140-075-N15, frequência nominal de 75 kHz e faixa de frequência de 15 a 150 kHz. As características da sonda foram obtidas através de uma imagem radiográfica, que permitiu conhecer seu número de espiras e dimensões. A **Figura 3** ilustra as características da sonda, indicando os valores de resistência e o arranjo das sondas.

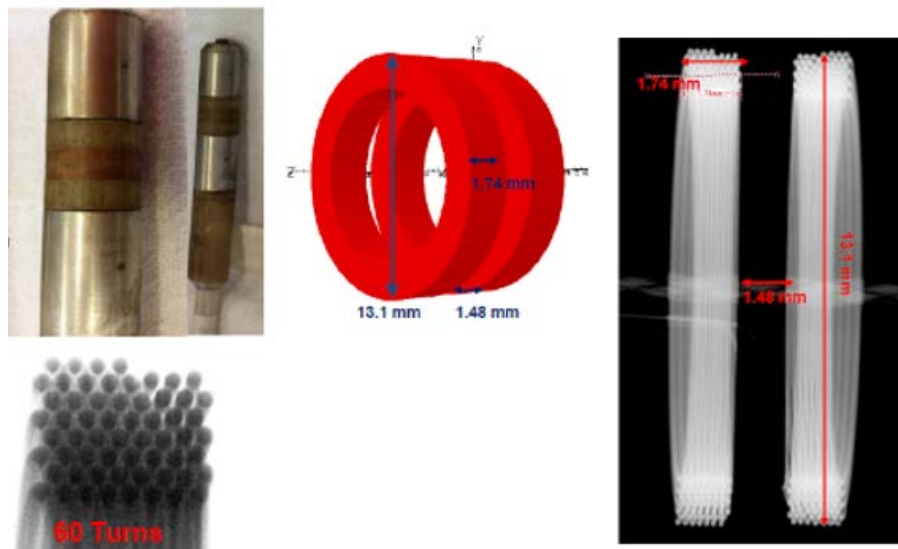


Figura 3. Características da sonda diferencial.

2.3. Metodologia

A modelagem computacional foi realizada com a seguinte sequência:

- Criação dos sólidos virtuais:
 - Tubos sem defeitos, **Figura 4.a-c**;
 - Inserção dos tubos no sólido virtual do simulador de espelho, **Figura 4.d**;
- Definição das propriedades dos materiais;
- Definição da malha de cada região, refino da malha nos lugares de principal interesse;
- Definir as condições de contorno;
- Pós-processamento dos sinais de CP e análise dos sinais característicos de cada efeito geométrico do espelho.

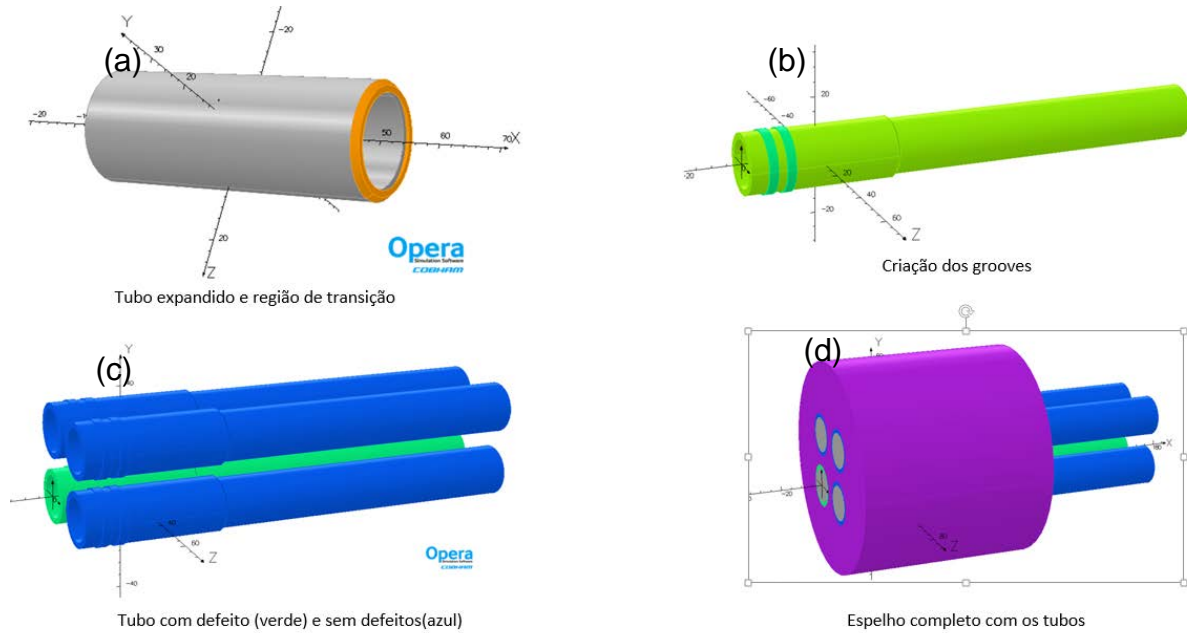


Figura 4. Construção de um sólido virtual de tubo e espelho de trocador de calor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A **Figura 5** mostra a configuração do sólido virtual do conjunto tubos/espelho revelando a localização da sonda. A **Figura 5.a** mostra uma visualização dos sólidos virtuais criados, quais sejam, espelho (cor roxa), tubo com a sonda (cor verde), tubos adjacentes (cor azul) e a sonda (cor vermelha). A **Figura 5.b** mostra a malha diferenciada para cada sólido criado.

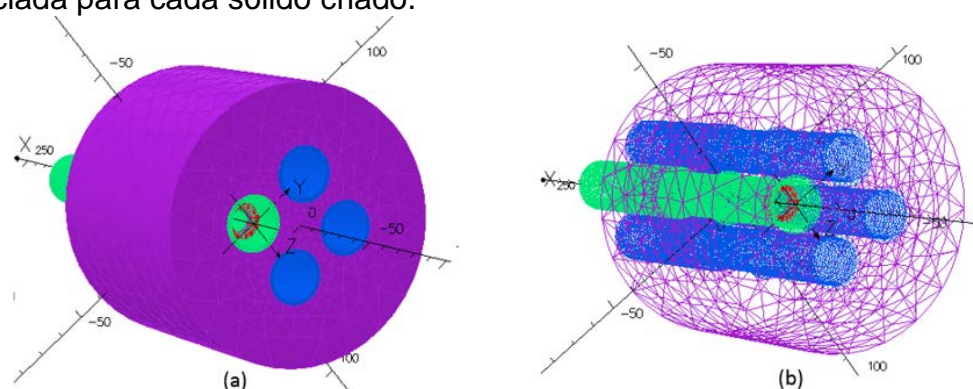


Figura 5. (a) Sólido virtual do conjunto tubo/espelho; (b) Visualização da malha nos componentes

Um detalhe importante na simulação da região do espelho é a criação de um sólido virtual com todas as características geométricas e dimensionais similares à condição real experimental. A **Figura 6** ilustra as principais geometrias desta região. A região de fresta (RF) é resultante da folga entre o tubo (diâmetro 19,05 mm) e a furação do espelho (diâmetro 19,25 mm) resultando em um gap de 0,1 mm. A RT é devido a mandrilagem que aumenta o diâmetro interno do tubo apenas na região expandida. Esta transição é de aproximadamente 2mm de comprimento entre o diâmetro interno expandido (15,03 mm) e o diâmetro interno nominal de (14,83 mm).

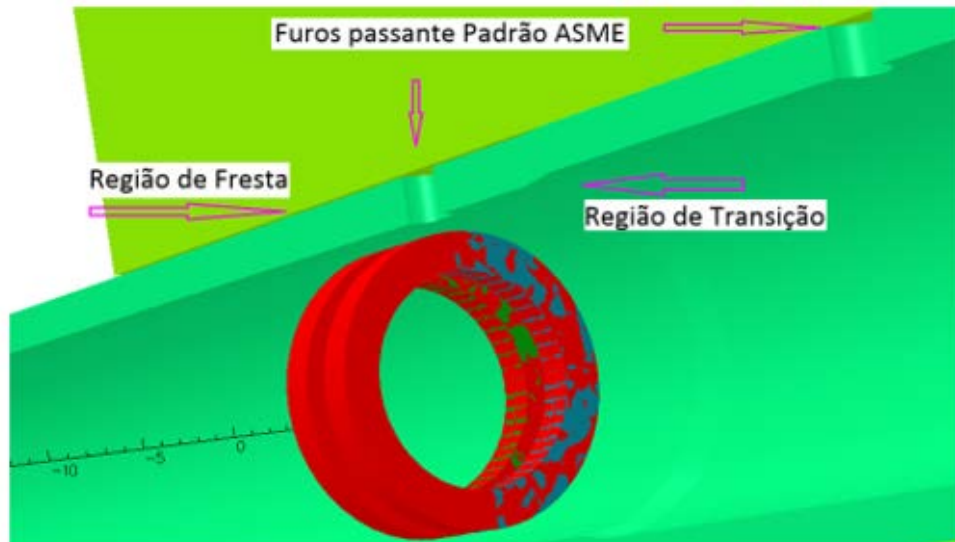


Figura 6 Sólido virtual com características dimensionais similares à condição real do espelho (verde limão), do tubo trocador de calor (verde) e da sonda diferencial (vermelho).

A **Figura 7.a-c** apresenta algumas visualizações do sólido virtual quando a sonda está localizada na RT. A **Figura 7.a** revela os detalhes construtivos internos do sólido virtual. A **Figura 7.b** revela que existe uma diferença do tamanho da malha do espelho e dos tubos. Foi definido um tamanho da malha de 10mm para a região do espelho, enquanto que para os tubos o tamanho de malha foi de 1mm, para melhor definição na região de maior interesse. O tipo de elemento escolhido para todos os componentes foi linear com formato tetraédrico. A **Figura 7.c** indica a densidade de corrente J neste ponto.

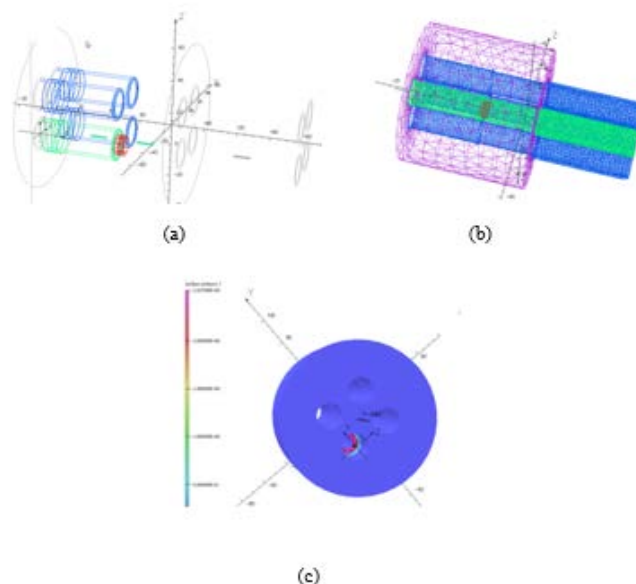


Figura 7. (a) Detalhes internos do sólido virtual; (b) Diferença do tamanho da malha do espelho e dos tubos; (c) Densidade de corrente J na RT.

O resultado da simulação por CP no OPERA pode ser visualizado na **Figura 8**, que apresenta graficamente os valores da variação da resistência elétrica (R) e da reatância indutiva (X_L) durante a varredura dentro do espelho. Os valores de R estão representados em azul e os de X_L em vermelho. Podemos identificar a variação de ambas variáveis nos sinais de CP devido à presença da RT e da saída do

espelho. Estes sinais são de grandes amplitudes dificultando a discriminação dos sinais de CP oriundos de defeitos nestas regiões.

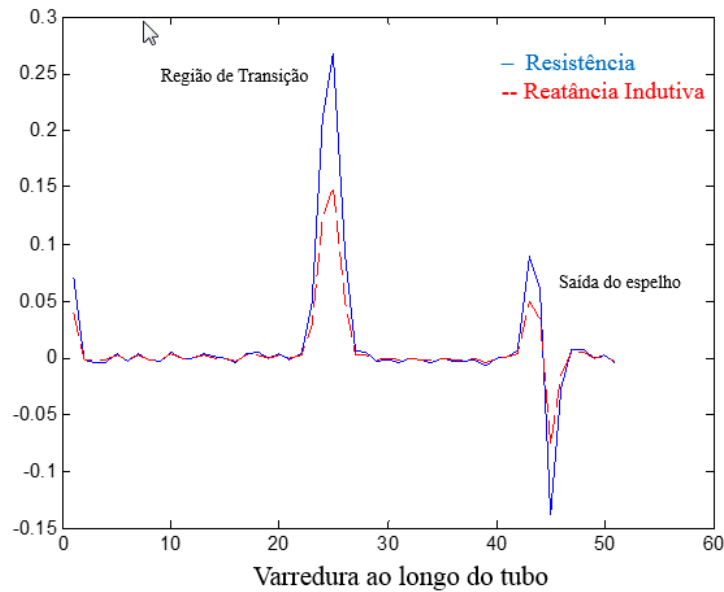


Figura 8 Variação da resistência elétrica (Ω) e da reatância indutiva (Ω) durante a varredura dentro do espelho

A **Figura 9** ilustra a sobreposição do resultado dos sinais de CP na varredura com o sólido virtual, indicando que as variações de R e X_L ocorrem exatamente em função destes efeitos geométricos. Podemos observar uma boa correlação dos sinais com a presença da RT e da saída do espelho.

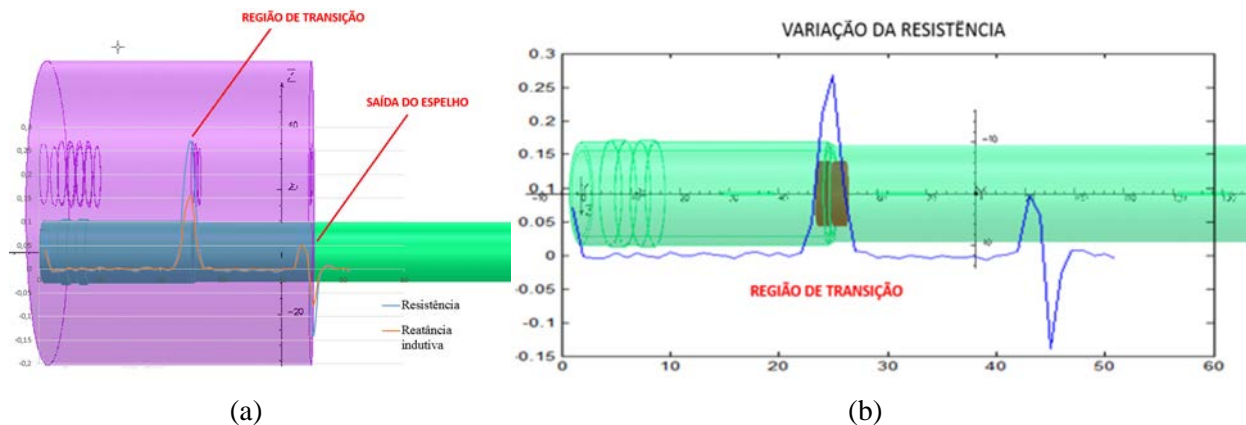


Figura 9. Sobreposição do resultado gráfico da varredura com: (a) sólido virtual conjunto tubo/espelho e (b) com o sólido virtual do tubo.

4. CONCLUSÕES

A presença do espelho e da mandrilagem resulta em sinais espúrios e indesejáveis, que dificultam a interpretação dos sinais oriundos de defeitos nesta região. Como visto, os resultados indicaram a necessidade de compreender melhor a influência de cada efeito geométrico da região do espelho. A interpretação e análise dos resultados da inspeção nas diversas regiões dentro do espelho demandam a elaboração de procedimentos específicos para cada inspeção e devem considerar os possíveis sinais espúrios que podem ser gerados em uma situação real.

O desenvolvimento de uma modelagem computacional permitiu um melhor diagnóstico dos problemas devido a possibilidade de criar e simular rotinas específicas para o processamento de sinal. Desta forma, podemos antecipar a influência e efeito de cada variável do ensaio de CP, alterando parâmetros, propriedades e outras variáveis, dando suporte para uma melhor análise e entendimento dos sinais, principalmente em regiões de geometrias complexa, como é o caso da região do espelho.

A metodologia desenvolvida para criar o sólido virtual da região do espelho com o OPERA se mostra muito promissora para uma maior efetividade do ensaio de CP, reduzindo custo e tempo na confecção de “mockup’s” do conjunto tubo/espelho e corpos de prova com os diversos tipos de danos, inclusive com a possibilidade de inserir defeitos reais na própria simulação.

Agradecimentos

À CAPES, CNPq e FAPERJ pelo apoio financeiro. À Petrobras pelo fornecimento das amostras. À equipe de ensaios não destrutivos do LNDC pelo apoio técnico no desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Mukherjee, R., "Effectively design shell-and-tube heat exchangers", Chemical Engineering Progress, Feb. 1998.
- 2 EL-Roubil, E.Y., Kermani, B. and Selmin Nacif, M., "The Impact of Chloride Contamination From Leaking Heat-Exchanger Tubes on Plant Materials of Construction", In The Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, November 5-8, Abu Dhabi, UAE, 2006.
- 3 Stewart, M., Oran, L. "Heat exchanger equipment field manual: common operating problems and practical solutions". [S.l.], Elsevier, 2012.
- 4 Cecco, V. S.; Sharp, F. L., "Recent advances in probe design for Eddy Current testing of Heat Exchangers", NDT International, v. 22, no. 4, pp. 217-221, 1989.
- 5 IAEA- International Atomic Energy Agency, "Eddy current testing at level 2: manual for the syllabi contained in IAEA-TecocC-628".Rev. 2. In: International Atomic Energy Agency. Training guidelines for non-destructive testing techniques, Vienna, 2011.
- 6 J.S.Corte, "Análise de sinais de Correntes Parasitas para identificação de descontinuidades em tubos de aço inoxidável austenítico na região do espelho em trocadores de calor", Tese de Mestrado, PEEM, COPPE, UFRJ, 2013.
- 7 P. Hernalsteen, PWSCC in the tube expansion zone - an overview Nuclear Engineering and Design 143 (1993) 131-142 North-Holland.
- 8 L. Obrutsky, B. Lepine, J. Lu, R. Cassidy and J. Carter , Eddy Current Technology for Heat Exchanger and Steam Generator Tube Inspection, Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario, Canada.