

DETECÇÃO DE INCLUSÃO EM MODELO DA MAMA *IN VITRO* USANDO O MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

Gabriela Lima Menegaz, Universidade Federal de Uberlândia, gabriela.menegaz@gmail.com

Karina Mayumi Tsuruta, Universidade Federal de Uberlândia, karinamayumi@yahoo.com.br

Gilmar Guimarães, Universidade Federal de Uberlândia, gguima@ufu.br

Roberto Mendes Finzi Neto, Universidade Federal de Uberlândia, finzi@ufu.br

Valder Steffen Jr., Universidade Federal de Uberlândia, vsteffen@ufu.br

Cleudmar Amaral de Araújo, Universidade Federal de Uberlândia, cleudmar.araujo@gmail.com

Resumo. A detecção precoce de anomalias no tecido humano é de extrema relevância para um bom prognóstico dos pacientes. Os exames para a detecção são vários e apresentam desvantagens. A técnica de impedância eletromecânica apresenta-se como uma alternativa apresentando com a vantagem de não ser invasiva, não causar desconforto ao paciente, ter baixo-custo, não usar agentes químico ou radiativos e ter acessibilidade. Neste trabalho, detecta-se uma inclusão no modelo *in vitro* de uma mama usando a técnica de impedância eletromecânica. Acoplaram-se oito transdutores piezelétricos (PZT) distribuídos nos quadrantes da mama, adquirindo-se as assinaturas de impedância na condição de referência ou baseline (mama sem inclusão) e após a inserção de uma inclusão de PLA de 10 mm de diâmetro. Os sinais de impedância apresentaram comportamentos diferentes para as condições avaliadas. O cálculo das métricas de dano RMSD tornou possível a detecção da inclusão usando a técnica de impedância eletromecânica.

Palavras chave: Detecção, Anomalia, Mama *in vitro*, Impedância eletromecânica, Transdutor piezelétrico.

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico computacional e de imagens, assim como, a sua união às leis da física tem permitido um grande auxílio no diagnóstico das mais variadas doenças que acometem o homem, trazendo melhorias importantes no diagnóstico, na localização de tecidos malignos para biopsia, na detecção de metástase e no planejamento de protocolos de tratamento (Sree *et al.*, 2010). A detecção e o diagnóstico precoce de anomalias em tecidos vivos e órgãos, como tumores, é fundamental para o tratamento e a melhora do paciente. O câncer é o termo usado para denominar mais de 100 diferentes tipos de doenças em que ocorre o crescimento desordenado de células anormais com potencial invasivo. Diversos fatores podem agir em conjunto ou em sequência para iniciar ou promover essas doenças. A estimativa para o Brasil, biênio 2016-2017, aponta a ocorrência de cerca de 600 mil casos novos de câncer, sendo esperados 57960 casos novos de câncer de mama.

Alguns dos métodos usados para caracterizar tecidos e órgãos e possibilitar a detecção e diagnóstico de anomalias, como os tumores, são a ultrassonografia, a imagem por ressonância magnética (MRI), a tomografia por emissão de pósitrons (PET), a tomossíntese e a mamografia, no caso específico do câncer de mama, dentre outros. Cada um dos métodos apresenta desvantagens, como provocar desconforto ao paciente durante a realização dos exames, possíveis reações ao agente de contraste, emissão de radiação, dependência do operador, dificuldade de detecção em tecidos densos, falta de acessibilidade e alto custo, além da produção de rejeitos radioativos.

A mamografia e a tomografia computadorizada são exames de diagnóstico por imagem que usam equipamentos geradores de raio X para produção de radiação artificial e obtenção de imagens. Estudos têm mostrado que a exposição à radiação ionizante durante o exame pode, em alguns casos, induzir o aparecimento do câncer de mama nas mulheres radiografadas (Hendrick, 2010; Yaffe e Mainprize, 2011).

Sree *et al.* (2010) apontam que as imagens de ultrassom possuem a limitação de não visualizarem microcalcificações e que as imagens em pacientes obesos são difíceis. Nas tomografias computadorizadas o uso de radiação ionizada apresenta certo risco à paciente e existe a dificuldade de se diferenciar uma massa benigna de uma maligna em uma cicatriz. Pacientes com implantes metálicos não podem se submeter a estes exames devido a presença de alto campo magnético, além de ser menos específica e resultar em vários exames falsos positivos. Estas limitações também podem ser observadas no PET, além do seu alto custo.

Três técnicas recentes para caracterização de tecidos e detecção e diagnósticos de anomalias são as imagens por palpação eletrônica (Electronic Palpation Imaging - EPI), o escaneamento por impedância elétrica (Electrical Impedance Scanning - EIS) e imagens térmicas ou infravermelhas usando termografia. A imagem por palpação eletrônica detecta a presença de um tumor na mama, gerando um mapa da rigidez do tecido mamário, impondo ondas de pressão e observando o deslocamento resultante de diferentes regiões da mama. No método de escaneamento por impedância elétrica, a impedância da mama é medida para detectar a presença de tumores. A condutividade elétrica do tumor é maior que a do tecido mamário saudável e, portanto, a impedância elétrica é menor do que no tecido saudável. As técnicas térmicas, como a termografia de cristal líquido e a imagem infravermelha (IR), dependem das leituras de temperatura na superfície da mama. Uma vez que os tumores são grupos de células que se multiplicam de maneira descontrolada, a taxa de geração

de calor metabólica e a taxa de perfusão sanguínea do tumor são superiores aos tecidos saudáveis. O aumento da geração de calor no tumor é dissipado para o tecido circundante e pode ser visto como um pico de temperatura na superfície da mama (Kandlikar *et al.*, 2017). Entretanto, esses métodos também apresentam suas desvantagens. Para os exames de impedância elétrica são necessários um número limitado de eletrodos que podem apresentar ruídos de sinal e acarretar vários falsos positivos, além de não detectarem a posição da lesão. A termografia, por sua vez, tem as desvantagens da alta dependência do operador para a interpretação das imagens e a limitação de indicação da posição exata da profundidade de uma lesão (Sree *et al.*, 2010).

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver um método baseado em impedância eletromecânica para superar as desvantagens dos métodos existentes e possibilitar a detecção precoce de anomalias de forma não invasiva, sem causar desconforto ao paciente e com acessibilidade para pessoas com deficiência ou baixa mobilidade. Nesse trabalho, o objetivo específico é a detecção de inclusões em um modelo *in vitro* da mama humana usando a técnica de impedância eletromecânica.

2. MÉTODO DE IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

Os métodos de avaliação de integridade estrutural, conhecidos como ensaios não destrutivos, são realizados com a finalidade de inspecionar, qualificar e avaliar a integridade de uma estrutura sem destruí-la, danificá-la ou gerar mudanças significativas. Desenvolveu-se a maior parte dessas técnicas para a aplicação em metais e, recentemente, em materiais compostos. Esses métodos são, geralmente, aplicados em sistemas estruturais de engenharia que envolvem altos riscos e custo de manutenção elevado, como estruturas de construção civil (edifícios, pontes, torres de telecomunicações), estruturas aeronáuticas, estruturas off-shore, tubulações da indústria petroquímica e veículos de entretenimento (Tsuruta, 2008).

Dentre os métodos de monitoramento da integridade estrutural envolvendo transdutores piezelétricos (PZT), a técnica baseada na impedância eletromecânica vem sendo amplamente estudada e é considerada uma das mais promissoras (Su, Lu e Ye, 2006). Esta técnica proposta inicialmente por Liang, Sun e Rogers (1994) baseia-se no acoplamento eletromecânico que resulta da fixação de um transdutor piezelétrico à estrutura monitorada. Assim, define-se a função de impedância que depende das características elétricas do transdutor e das características físicas da estrutura, como massa, rigidez e amortecimento. Considera-se que as propriedades do PZT não variam ao longo do tempo e, assim, as mudanças na impedância elétrica são diretamente relacionadas às mudanças na impedância mecânica, que é afetada pela presença de dano (Farrar, Lieven e Bemend, 2005; Park e Inman, 2005). Obtém-se o sinal de impedância através dos efeitos direto e inverso dos materiais piezelétricos. O efeito direto, conhecido como efeito sensor, ocorre quando o material é submetido a uma carga mecânica externa e produz uma distribuição de cargas elétricas em sua superfície. O efeito inverso, denominado efeito atuador, ocorre quando o material sujeito a um potencial elétrico externo apresenta deformações geométricas. Um modelo eletromecânico de um grau de liberdade que descreve o processo de medição é mostrado na Fig. (1).

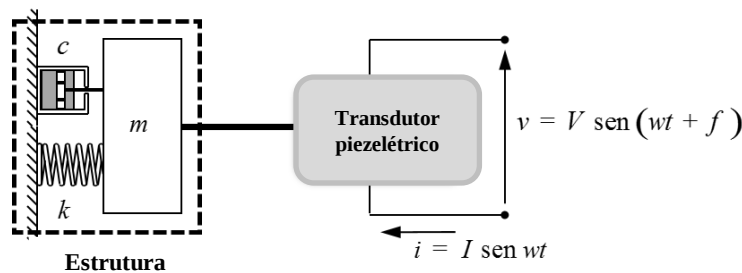


Figura 1. Modelo unidimensional usado para representar o método de monitoramento da integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, Liang, Sun and Rogers, 1994.

A partir do sistema apresentado na Fig. (1), demonstra-se que a admitância $Y(\omega)$ do sistema é uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT, $Z_a(\omega)$ e da estrutura, $Z(\omega)$, sendo dada pela Eq. (1):

$$Y(\omega) = \frac{I}{V} = i\omega a \left(\bar{\epsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (1)$$

em que, $Y(\omega)$: admitância elétrica do atuador PZT (inverso da impedância); $Z_a(\omega)$ e $Z(\omega)$: impedâncias mecânicas do PZT e da estrutura, respectivamente; V : voltagem de entrada no atuador PZT; I : corrente de saída do PZT; a : constante

geométrica do PZT; $\hat{Y}_{xx}^E$: módulo de Young; d_{3x}^2 : constante de acoplamento piezelétrico; ε_{33}^{-T} : constante dielétrica complexa do PZT; $\mathcal{S}$: fator de perda dielétrica do PZT.

Faz-se a detecção do dano com base na comparação entre as funções de impedância medidas antes e após a ocorrência do dano. As medidas feitas antes do dano caracterizam o chamado *baseline*, usado como sinal de referência. Periodicamente, a medição da impedância é feita para ser, então, comparada ao *baseline*, determinando as possíveis alterações estruturais na vizinhança do sensor (Sun *et al.*, 1995). A comparação visual das curvas da resposta no domínio da frequência é apenas qualitativa, não sendo suficiente para o diagnóstico, tornando-se necessária a aplicação de critérios quantitativos para este efeito. Para tanto são definidas as métricas de dano, que são os parâmetros escalares que representam globalmente as diferenças entre duas funções de impedância (Raju, 1997).

Uma metodologia capaz de quantificar as alterações estruturais estudadas, deve estabelecer uma referência para a métrica de dano, correspondente à estrutura sem falha. Após a determinação das métricas de dano é definido o limiar, chamado que *threshold*, que permite apontar se existe ou não dano na estrutura. O modelo estatístico usado no presente trabalho é o RMSD (Desvio Quadrático Médio da Raiz), apresentado na Eq. (2) (Sun *et al.*, 1995):

$$RMSD = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[Re(Z_{i,1}) - Re(Z_{i,2})]^2}{n}} \quad (2)$$

sendo, RMSD a métrica associada ao dano estudado, $Re(Z_{i,1})$ a impedância medida pelo PZT para condições sem dano (*baseline*) e $Re(Z_{i,2})$ a impedância que corresponde à situação investigada quando há possível existência de dano. Cada medição é feita n vezes dentro do intervalo de frequência de interesse.

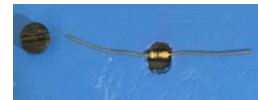
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os testes de impedância eletromecânica foram feitos em corpos de prova com geometria similar à de uma mama real. Os simuladores de tecidos biológicos, denominados fantasmas, são uma alternativa na representação de tecidos humanos *in vivo*, por apresentarem características físicas e morfológicas próximas, serem mais acessíveis, duráveis e de fácil reprodução (Cavalcanti, 2012). Usou-se um modelo anatômico L55 3B Scientific® que simula a mama direita humana sem tumores, possibilitando a simulação da condição de uma mama saudável (*baseline*). O modelo foi instrumentado com oito pastilhas de PZT (diâmetro de 10 mm x 0,5 mm espessura, do tipo 5H), distribuídas a cada 45° nos quatro quadrantes da mama a uma distância de 40 mm a partir da auréola, como mostrado na Fig. (2a). Os sensores-atuadores piezelétricos foram colados com um adesivo à base de cianocrilato (Superbonder®).

Simulou-se o dano a ser detectado por uma esfera com 10 mm de diâmetro constituída de polilático (PLA), feita por manufatura aditiva em impressora 3D, mostrada na Fig. (2b). A geração de calor provocada pela presença de um tumor, que ocorre devido a sua própria geração de calor metabólica e perfusão sanguínea, foi simulada pelo aquecimento interno, de aproximadamente 2 °C, da inclusão provocado por uma resistência elétrica de 56 Ω posicionada em seu interior. Inseriu-se a esfera no interior do modelo anatômico da mama através de um furo feito em sua parte inferior.



(a)



(b)

Figura 2. (a) Modelo *in vitro* da mama direita instrumentado com oito pastilhas piezelétricas; (b) Inclusão de 10 mm de diâmetro a ser detectada.

Mediram-se as assinaturas de impedância usando-se o impedancímetro portátil SySHM desenvolvido e fabricado pelos pesquisadores do LMEst/UFU, apresentado na Fig. (3a). Consideraram-se 4096 pontos e 1024 médias em uma faixa de frequência de 80 kHz a 200 kHz, obtendo-se 30 medidas para cada PZT. Os ensaios foram feitos com o sistema no interior da câmara climática EPL-4H da série Platinous para manter a temperatura a 25 °C, Fig. (3b).



(a)



(b)

Figure 3. (a) Impedancímetro portátil (SySHM); (b) Câmara climática.

5. RESULTADOS

No presente trabalho detalham-se apenas o transdutor piezoelétrico número 1 (PZT 1), pois o comportamento observado neste transdutor foi semelhante aos demais. A Figura (4) mostra os resultados das assinaturas de impedância eletromecânica obtidas no teste para a configuração de referência (*baseline*) e a configuração com a presença da inclusão de 10 mm, para o PZT 1. Observa-se que os sinais de impedância para as configurações estudadas apresentam diferentes comportamentos, mostrando que a técnica foi capaz de detectar alterações no sistema após a inserção da inclusão. Entretanto, apenas a análise visual das assinaturas de impedância não é suficiente para indicar se houve a detecção do dano. Por isso, faz-se o cálculo das métricas de dano RMSD, apresentadas na Fig. (5). Observa-se que as métricas do modelo com inclusão são maiores do que a condição de referência, estando acima do limiar (*threshold*) determinado para este caso, indicando que o dano foi detectado.

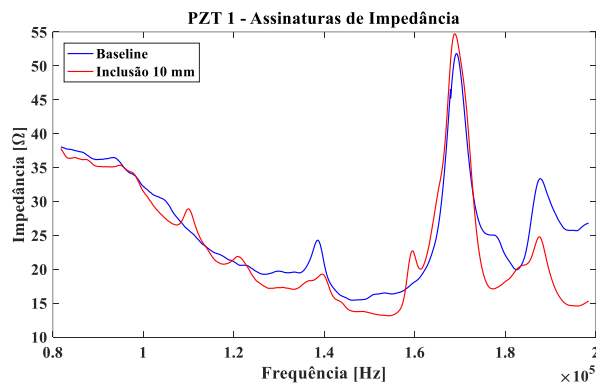


Figura 4. Gráfico de assinaturas de impedância do modelo *in vitro* da mama sem inclusão (*baseline*) e com a inclusão de 10 mm obtidos no PZT 1.

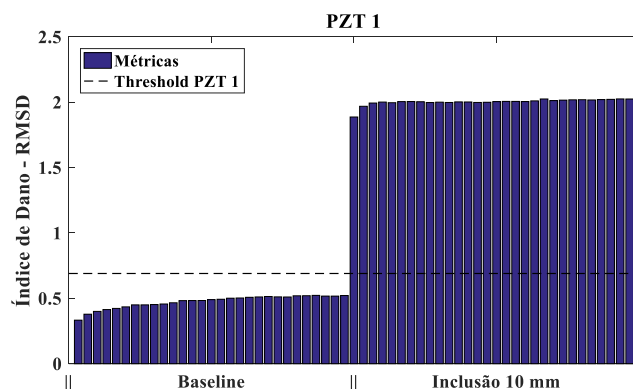


Figura 5. Métricas de dano (RMSD) do modelo *in vitro* da mama sem inclusão (*baseline*) e com a inclusão de 10 mm.

6. CONCLUSÕES

Avaliou-se, neste trabalho, a detecção de uma inclusão em um modelo *in vitro* da mama usando a técnica de impedância eletromecânica. Testes com oito transdutores piezelétrico acoplados ao modelo e distribuídos nos quatro quadrantes da mama tornaram possíveis essa detecção. Obtiveram-se as assinaturas de impedância na condição de referência (*baseline*) representando uma mama saudável, e após a inserção de uma inclusão de PLA de 10 mm de diâmetro. Comparando-se as assinaturas de impedância observaram-se os comportamentos diferentes para as duas condições avaliadas. O cálculo das métricas de dano RMSD permitiu uma avaliação quantitativa dos resultados mostrando que a inclusão de 10 mm pôde ser detectada nesse modelo em todos os transdutores piezelétrico usados. Estes resultados são estudos preliminares. Outros experimentos devem ser realizados para a consolidação da técnica e o seu uso em tecidos *in vivo*, possibilitando a futura detecção de tumores mamários e outras anomalias.

7. REFERÊNCIAS

- CAVALCANTI, E. S. **Desenvolvimento de um Sistema para Medida Elastográfica Dinâmica por Ultrassom**. 191 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2012.
- FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BEMENT, M. T. **An Introduction to Damage Prognosis**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2005. 470 p.
- HENDRICK, R. E. Radiation doses and cancer risks from breast imaging studies. **Radiology**, v. 257, n. 1, p. 246–253, 2010.
- KANDLIKAR, S. G.; PEREZ-RAYA, I.; RAGHUPATHI, P. A.; GONZALEZ-HERNANDEZ, J.-L.; DABYDEEN, D.; MEDEIROS, L.; PHATAK, P. Infrared imaging technology for breast cancer detection – Current status, protocols and new directions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 108, p. 2303–2320, 2017.
- LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 5, p. 12-20, 1994.
- PARK, G.; INMAN, D. J. Impedance-based structural health monitoring. In: INMAN, D. J., et al. **Damage Prognosis: For Aerospace, Civil and Mechanical System**. [S.l.]: Wiley, 2005. cap. 13, p. 275-291.
- RAJU, V. Implementing impedance-based health monitoring. Virginia Polytechnic Institute - State University. Blacksburg, 1997.
- SREE, S. V.; NG, E. Y.-K.; U, R. A.; TAN, W. Breast Imaging Systems: A Review and Comparative Study. **Journal of Mechanics in Medicine and Biology**, v. 10, n. 1, 2010.
- SU, Z.; YE, L.; LU, Y. Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: a review. **Journal of Sound and Vibration**, v. 295, p. 753-780, 2006.
- SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C. A., Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 6, 134–139, 1995.
- TSURUTA, K.M. **Monitoramento de Integridade Estrutural de Materiais Compostos Sujeitos a Impactos Empregando a Técnica da Impedância Eletromecânica**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- YAFFE, M. J.; MAINPRIZE, J. G. Risk of radiation-induced breast cancer from mammographic screening. **Radiology**, v. 258, n. 1, p. 98–105, 2011.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento (FAPEMIG, CNPq e CAPES) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica/UFU pelo apoio financeiro. Agradecem também ao Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM), ao Centro de Inovação Tecnológica em Esportes Paralímpicos (CINTESP), ao Laboratório de Transferência de Calor: Modelagem e Experimento (LTCME) e ao Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst).

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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