

DETECÇÃO DE FALHAS EM ESTRUTURAS MACIÇAS DE ALUMÍNIO UTILIZANDO A TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA

R. Costa*, J. M. Maia*, S. F. Pichorim*, A. A. Assef*, V. L. S. Button** e E. T. Costa**

* CPGEI-DAELT-DAELN/Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, Brasil

** DEB-FEEC e CEB/Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, Brasil

e-mail: rosalbautfpr@gmail.com

Resumo: Utilizado na área médica como biomaterial, o alumínio apresenta resistência à corrosão. Todavia, assim como as demais ligas metálicas, ele não está isento de apresentar falhas em sua composição, ou mesmo quando submetido aos processos químicos, térmicos e mecânicos, necessários para elaboração do produto final. As falhas também podem ocorrer durante sua utilização devido à fadiga e ao desgaste, causando danos muitas vezes difíceis de serem detectados visualmente. Este trabalho propõe uma metodologia para detectar falhas de diferentes dimensões inseridas em barras de alumínio (50 x 50 x 250 mm). Foi aplicada a técnica de medição da impedância eletromecânica de transdutores de ultrassom acoplados às estruturas para detectar as irregularidades. O índice *Root Mean Square Deviation* (RMSD) foi utilizado para a identificação quantitativa das falhas. Os resultados obtidos mostram que a metodologia proposta pode ser utilizada no monitoramento da integridade das estruturas de alumínio e, futuramente, poderá ser aplicada na caracterização de outros biomateriais.

Palavras-chave: Ultrassom, caracterização de materiais, impedância eletromecânica, RMSD.

Abstract: Used as biomaterial in the medical area, the aluminum presents corrosion resistance. However, like other metal alloys, it can fail in its composition, or even when subjected to chemical, thermal and mechanical processes required for preparation of the final product. Failures can also occur during the use due to fatigue and wear, causing damage often difficult to be detected visually. This work presents a method for detecting failures of different sizes inserted in aluminum bars (50 x 50 x 250 mm). The technique of measuring the electromechanical impedance (EMI) of ultrasound transducers coupled to the structures was applied to detect the irregularities. The Root Mean Square Deviation index (RMSD) was used for the quantitative identification of failures. The results show that the proposed methodology can be used in monitoring the integrity of aluminum structures and, in future, may be applied in the characterization of other biomaterials.

Keywords: Ultrasound, materials characterization, electromechanical impedance, RMSD.

Introdução

Técnicas para caracterização de materiais biológicos e não biológicos através de ensaios não destrutivos (END) por ultrassom são utilizadas com sucesso tanto na área da saúde quanto na área da engenharia mecânica [1-3].

Na área de diagnóstico médico, o ultrassom é definido como um método não invasivo, de fácil aquisição de dados, no qual a resposta é obtida por imagem em tempo real, onde dados como a velocidade de propagação, reflexão das ondas no meio em questão (ossos, órgãos e outros tecidos biológicos) e a taxa de atenuação em uma determinada faixa de frequência das ondas de pressão, BUA (*Broadband Ultrasound Attenuation*), são utilizados para caracterizar a composição da estrutura a ser identificada e analisada. Todavia, a complexidade na composição de muitos materiais exige uma especificação mais detalhada, o que justifica a utilização de mais de um método ultrassônico no monitoramento da integridade das estruturas [4-5].

Entre as técnicas promissoras de monitoramento da integridade estrutural (*SHM - Structural Health Monitoring*) está a Técnica da Impedância Eletromagnética (*EMI - Electromechanical Impedance*) [6]. Esta técnica baseia-se na aquisição de dados referentes ao valor da impedância eletromecânica da estrutura analisada utilizando transdutores piezoelétricos de alta frequência, maiores que 20 kHz [7-8].

Ligas de materiais como as que compõem as cerâmicas piezoelétricas, são susceptíveis a variações eletromecânicas em determinada faixa de frequência e temperatura, o que permite à técnica ultrassônica compor diversas metodologias de monitoramento de acordo com a estrutura a ser caracterizada [6-11]. As ondas ultrassônicas são geradas pela aplicação de um sinal elétrico sobre um transdutor composto por uma ou mais cerâmicas piezoelétricas. A impedância acústica é uma característica do meio e, portanto, contribui na identificação da estrutura, pois influi diretamente na intensidade do sinal refletido. A reflexão da onda ultrassônica ocorre devido à propagação da mesma em meios de diferentes impedâncias acústicas [11].

Para que o dispositivo transdutor responda com maior precisão e sensibilidade às pequenas irregularidades na estrutura, a faixa de frequências utilizadas deve ser superior a 20 kHz [6-10]. O transdutor piezoelétrico ao atuar sobre a estrutura a ser

monitorada sofre uma alteração devido à interação entre a impedância mecânica da estrutura e a impedância elétrica do teste. Esta técnica utiliza a análise de comparação entre os valores obtidos na medida da impedância elétrica (amplitude e fase) da estrutura de referência e a impedância elétrica da amostra a ser detectada a falha. A partir das alterações na impedância mecânica da estrutura, falhas no processo de fabricação, desgastes ou corrosão podem ser detectadas através da medição da impedância elétrica do transdutor quando submetido à faixa de frequência adequada [6].

O índice de desvio médio da raiz quadrada (*RMSD* – *Root Mean Square Deviation*) é amplamente utilizado na detecção e quantificação de falhas em estruturas por apresentar maior sensibilidade à variação da impedância elétrica [10].

Neste trabalho foi avaliado um método para caracterização de materiais que inclui o cálculo do índice *RMSD* nas medições da impedância eletromecânica de transdutores de ultrassom acoplados a estruturas maciças de alumínio nas quais foram inseridas falhas de diferentes dimensões.

Materiais e métodos

A Figura 1 apresenta a configuração utilizada para realizar a aquisição dos dados de impedância eletromecânica. O sistema é composto por um analisador de impedância (Agilent 4294A), um transdutor de ultrassom de elemento único (FUNBEC, 15700IH, 1,6 MHz de frequência central) e quatro amostras de alumínio (50 x 50 x 250 mm).

Uma das barras de alumínio foi mantida íntegra para servir como referência (Ref.) e nas demais (a, b e c) foram inseridas falhas (furos utilizando-se brocas) em três posições diferentes, com as seguintes dimensões: (a) = 11 mm vazada, (b) = 8 mm vazada e (c) = 5 mm vazada (Figura 2).

O transdutor foi posicionado sobre a estrutura em quatro regiões diferentes (1, 2, 3 e 4) utilizando-se gel como meio de acoplamento. Em cada região foi registrada a medida da impedância eletromecânica (amplitude e fase) em função da frequência, na faixa entre 500 kHz e 3 MHz. Foram realizadas cinco medições em cada posição.

Todos os testes foram realizados à temperatura ambiente (aproximadamente 21 °C), todavia esta metodologia não sofre influência de pequenas variações de temperatura [14].

Os dados do analisador de impedância foram transmitidos a um microcomputador via interface Ethernet para serem processados utilizando-se o programa Excel (Microsoft Inc.).

No microcomputador foi feito o cálculo do índice *RMSD* (Equação 1) para verificar quantitativamente a existência do dano na estrutura. Este relaciona a impedância eletromecânica da estrutura íntegra, utilizada como referência, com a impedância da estrutura defeituosa.

A impedância elétrica (magnitude, parte real ou

imaginário) $Z_{n,h}$ está relacionada à estrutura íntegra, enquanto a $Z_{n,d}$ remete ao valor da impedância da estrutura com falha, n corresponde à medida obtida e p é o número total de medições que compõem a faixa de frequências utilizadas no sistema de aquisição dos dados. Neste caso, foram utilizados 800 pontos no intervalo entre 500 kHz e 3 MHz.

$$RMSD = \sum_n^p \sqrt{\frac{(Z_{n,d} - Z_{n,h})^2}{Z_{n,d}^2}} \quad (1)$$

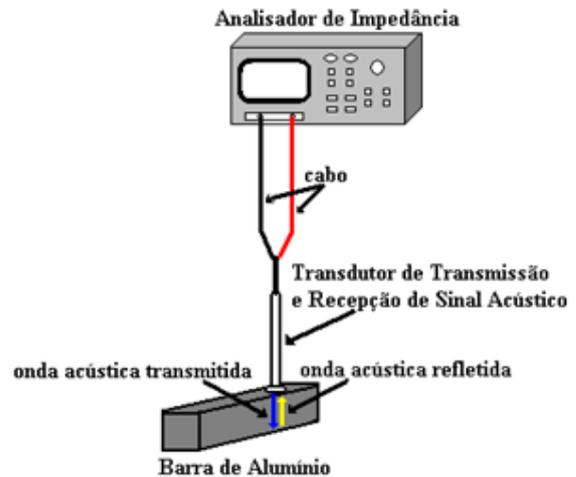


Figura 1: Configuração utilizada para realizar os testes e medição da impedância eletromecânica do transdutor acoplado às amostras.

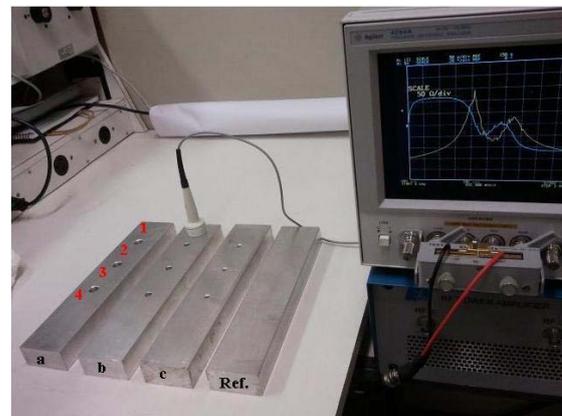


Figura 2: Estruturas de alumínio maciças utilizadas, mostrando a posição das falhas de seguintes dimensões: (a) = 11 mm vazada, (b) = 8 mm vazada, (c) = 5 mm vazada e (Ref.) = estrutura íntegra. As regiões de medição com o transdutor são indicadas pelos números 1, 2, 3 e 4.

Resultados

O tempo de monitoramento e diagnóstico da falha em cada estrutura, considerando cinco medidas em quatro regiões diferentes, foi inferior a cinco minutos.

Este processo é relativamente rápido e necessário, principalmente quando aplicada à área da saúde como, por exemplo, na caracterização de materiais utilizados em próteses e órteses.

A Figura 3 apresenta um exemplo dos resultados obtidos para uma das medições do módulo da impedância realizada com o transdutor colocado na região 1 de cada uma das quatro amostras de alumínio utilizadas nos testes. A primeira curva (Data Trace A Real-TRANS) corresponde à medição da impedância acústica do transdutor isoladamente (sem acoplamento com as estruturas) e as demais correspondem às medições nas barras de 5 mm, 8 mm e 11 mm, respectivamente.

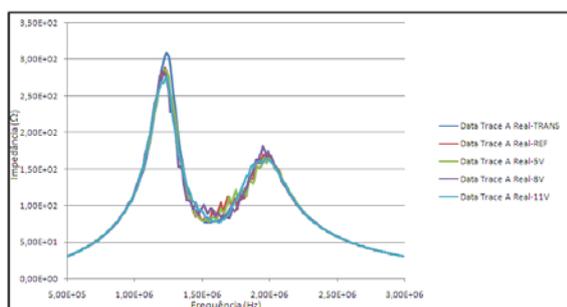


Figura 3: Espectro do módulo da impedância elétrica em função da frequência, obtidos com o transdutor livre (Data Trace A Real-TRANS) e posicionado na região 1 das quatro barras de alumínio (Ref. e com furos de 5 mm, 8 mm e 11 mm).

É possível verificar na Figura 3 que, em algumas frequências, principalmente na faixa da frequência de ressonância do transdutor (1.6 MHz), há diminuição da impedância com o aumento do diâmetro das falhas.

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos para o cálculo do índice RMSD dos dados apresentados na Figura 3, indicando um aumento no valor do índice de acordo com o aumento do diâmetro das falhas presentes nas estruturas de alumínio.

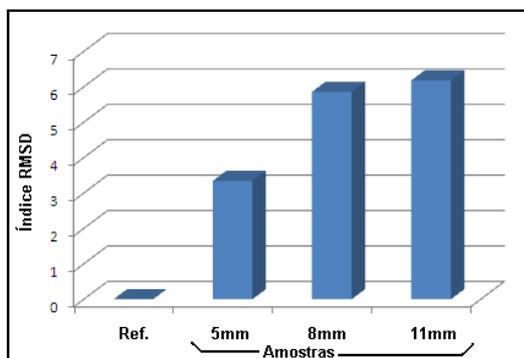


Figura 4: Índice RMSD calculado para as amostras de alumínio com furos de 5 mm, 8 mm e 11 mm em relação à amostra de referência (Ref.). O transdutor foi posicionado na região 1 das quatro amostras.

Discussão

Neste trabalho foi possível avaliar a eficácia da técnica de medição da impedância eletromecânica, juntamente com o cálculo do índice RMSD para a caracterização de estruturas de alumínio com a presença de falhas de diferentes tamanhos. Os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com os encontrados por outros autores [6, 14], que avaliaram outros tipos de materiais e observaram que a impedância eletromecânica é um método adequado para identificar falhas em estruturas maciças tais como amostras de alumínio, materiais utilizados na construção de aviões, na industrial naval e, principalmente, materiais utilizados na área de Engenharia Biomédica.

A aplicação dessa metodologia pode auxiliar na detecção de falhas na composição em ligas de alumínio utilizadas na confecção de hastes e articulações de próteses e órteses [15].

Por ser mais leve, a liga de alumínio é amplamente utilizada na composição de exoesqueletos (antebraço, mãos e outros) [16]. Porém, o contínuo movimento em determinadas regiões do dispositivo pode gerar desgastes que, geralmente, não são visivelmente detectáveis pelo usuário, mas podem ser identificados pela metodologia proposta neste trabalho.

Trabalhos futuros deverão ser realizados para avaliar a técnica na caracterização de outros materiais biológicos e não biológicos, bem como no auxílio à identificação do risco de fraturas devido à osteoporose.

Conclusão

Através da análise dos resultados obtidos neste trabalho, foi possível concluir que a técnica de medição da impedância eletromecânica de transdutores de ultrassom acoplados a estruturas metálicas de alumínio permite a identificação de irregularidades nas amostras. O cálculo do índice RMSD apresentou relação crescente com o aumento do diâmetro das falhas inseridas nas estruturas, indicando que o método apresenta resultados promissores para ser aplicado na caracterização de outros tipos de materiais biológicos (tecido humano, ossos) e não biológicos (termoplásticos, ligas metálicas e outros).

Agradecimentos

Ao CNPq, Fundação Araucária e CAPES pelo suporte financeiro para a realização do trabalho. Ao DEB/FEEC/UNICAMP e ao BIOTA/CPGEI/UTFPR pelo empréstimo de equipamentos utilizados no trabalho e ao DAMEC/UTFPR pela preparação das amostras.

Referências

- [1] Pereira MM. Conceitos básicos de ciência dos materiais. Em: Oréfice RL, Magalhães MM, Mansur HS, eds. Biomateriais: fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro: Cultura Médica; 2006. p. 13-37.

- [2] Grimm MJ, Williams JL. Use of ultrasound attenuation and velocity to estimate Young's modulus in trabecular bone. In: Bioengineering Conference; 1993 Mar 18-19; Newark, NJ. 1993. P. 62-63.
- [3] Lorenzi A, Caetano LF, Drunn MT, Silva Filho LCP. Utilização de ultrassom para o monitoramento de estruturas de concreto. In: 3rd Pan American Conference For Nondestructive Testing – PANNDT; 2003 Junho 2-6; Rio de Janeiro, Brazil. 2003. p. 1-7.
- [4] Maia JM. Sistema ultra-sônico para auxílio ao diagnóstico da osteoporose [tese]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2001.
- [5] Assef AA. Sistema de aquisição e processamento de sinais de ultra-som para caracterização de meios biológicos e não biológicos [dissertação]. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná; 2006.
- [6] Baptista FG, Filho JV, Inman DJ. Sizing PZT transducers in impedance-based structural health monitoring, IEEE Sensors Journal. 2011. 11(6):1405-14.
- [7] Giurgiutiu V, Reynolds A, Rogers CA. Experimental investigation of e/m impedance health monitoring of spot-welded structural joints. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1999; 10(10):802-812.
- [8] Bhalla S, Naidu ASK, Soh CK. Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE. In: Proceedings of ISSS-SPIE. International Conference on Smart Materials Structures and Systems; 2002 December; Bangalore, India. 2002. p. 12-14.
- [9] Sun FP, Chaudhry Z, Liang C, Rogers CA. Truss structure integrity identification using pzt sensor-actuator. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1995; 6(1):134-139.
- [10] Peairs DM, Park G, Inman DJ. Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method. J. Intell. Mater. Syst. Struct. 2004; 15(2), p. 129-139.
- [11] Hedrik WR, Hykes DL, Starchman DE. Ultrasound Physics and Instrumentation, 3th Edition, 1994.
- [12] Bhalla S, Naidu ASK, Ong CW, Soh CK. Practical issues in the implementation of electromechanical impedance technique for NDE. In: Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano and Micro-Smart Systems; 2002 Dec; Melbourne, Australia. 2002. p. 16-18.
- [13] Marqui CR, Bueno DD, Baptista FG, Filho JV, Santos RB, Lopes Jr. V. External disturbance effect in damage detection using electrical impedance. In Proc. Int. Modal Anal. Conf.; 2008; Orlando, FL. 2008. p. 286.
- [14] Chaudhry Z, Joseph T, Sun F, Rogers C. Local-area health monitoring of aircraft via piezoelectric actuator/sensor patches. In: Smart Structures and Integrated Systems, SPIE Conference; 1995 Feb 26; San Diego, CA, p. 268-276.
- [15] Grivas TB, Bountis A, Vrasami I, Bardakos NV. Brace technology thematic series: the dynamic derotation brace. Scoliosis, Sept 21, 2010, Vol. 5, p. 20.
- [16] Baker MD, McDonough MK, McMullin EM, Swift M, Busha, BF. Orthotic Hand-Assistive Exoskeleton. In: Proceedings of the 37th Annual Northeast Conference of the IEEE Bioengineering (NEBEC); 2011 April 1-3; Troy, New York, USA. p. 1-2.