

ANÁLISE DA TÉCNICA DE IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA APLICADA NO MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE ESTRUTURAS CONSTITUÍDAS DE MATERIAIS COMPOSTOS

**Karina Mayumi Tsuruta, Leandro Rodrigues Cunha, José dos Reis Vieira de Moura Júnior,
Domingos Alves Rade, Raquel Santini Leandro Rade.**

Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

João Naves de Ávila Av. 2121, Uberlândia, MG, Brasil

karinamayumi@yahoo.com.br, leandrorcunha@gmail.com, mourajr@mourajr.com.br, domingos@ufu.br, rslr@ufu.br

Resumo: Atualmente, os materiais compostos têm uma ampla faixa de aplicações e vêm substituindo os materiais tradicionais, pois as características individuais destes podem não atender às crescentes exigências de melhor desempenho, segurança, economia e durabilidade. Os materiais compostos são amplamente utilizados na indústria aeroespacial, estruturas civis, veículos e equipamento mecânicos. No entanto, estes materiais sofrem danos que são difíceis de detectar em estágios iniciais. Estas falhas podem ocorrer durante a fabricação ou utilização, ou mesmo durante a manutenção. Em estruturas aeronáuticas, as maiores causas de dano estão ligadas a objetos que colidem com a estrutura, como a colisão de pássaros, granizo, pedras na pista de pouso/decolagem e por ferramentas durante a manutenção. Em vista disto, o principal desafio nesses materiais é detectar danos incipientes provocados por fadiga ou impactos de baixa energia. O objetivo deste trabalho é analisar um dos métodos de monitoramento de integridade estrutural, a técnica da impedância eletromecânica, aplicada em materiais compostos na detecção de danos causados por impactos de baixa energia. Este método é uma técnica não destrutiva que utiliza o acoplamento eletromecânico de materiais piezoelétricos no monitoramento de danos e na evolução destes. A metodologia adotada consiste em simular impactos de baixa energia em placas de materiais compostos, medindo assim a impedância da estrutura através de sensores. Estas medidas serão analisadas através de métricas para produção de meta modelos que correlacionarão os danos com a energia de impacto.

Palavras-chave: Monitoramento de Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, Impacto de baixa energia, Materiais Compostos.

1. INTRODUÇÃO

Os diversos tipos existentes de sistemas estruturais estão inevitavelmente sujeitos a carregamentos e influências ambientais que podem levar à ocorrência de danos que, por sua vez, podem comprometer a segurança e a eficiência operacional. O dano em uma estrutura ou um sistema mecânico pode ser definido como mudanças intencionais ou não intencionais nas propriedades dos materiais e/ou geométricas do sistema, incluindo mudanças nas condições de contorno e na conectividade do sistema, que prejudiquem a performance do sistema. (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005).

Um dos processos mais ambiciosos da Engenharia é o monitoramento da integridade estrutural em tempo real de componentes de elevado custo ou de grande importância para o sistema que tal elemento integra. Desta forma, a criação ou aperfeiçoamento de técnicas que ampliem a precisão e segurança do monitoramento é altamente desejável e são objetos de vários estudos tanto no meio industrial quanto no meio acadêmico.

A utilização das técnicas de SHM é motivada pelo potencial de segurança e no impacto econômico que esta tecnologia pode proporcionar, como por exemplo, em uma grande indústria que reduz custos adotando técnicas de SHM para minimizar paradas não planejadas e excesso de estocagem de equipamentos. E nas companhias aéreas as técnicas de SHM estão sendo utilizadas para aumentar a confiabilidade e segurança das aeronaves (FARRAR; WORDEN, 2007).

O monitoramento de integridade estrutural envolve observações periódicas de uma estrutura ou um sistema mecânico. E a partir disto retira-se com auxílio de uma rede de sensores, amostras de medidas de resposta dinâmica, com isso faz-se análises das características deste sinal com relação à sensibilidade ao dano e uma modelagem estatística para extrair características para quantificar o estado do dano no sistema (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005).

Existem várias técnicas destinadas ao monitoramento da ocorrência e propagação de danos estruturais, que se baseiam em diferentes princípios, desde a inspeção visual, o uso de raios-x e ultra-som. Todavia, seu uso prático é limitado pelo fato que a inspeção é localizada, o que torna estes métodos demorados e onerosos.

Mais recentemente, foram desenvolvidos métodos de monitoramento baseados no uso de materiais ditos inteligentes, que exibem características específicas que os tornam adaptados a esta finalidade. Citam-se, como principais exemplos, os materiais piezoelétricos e as fibras ópticas (GIURGIUTIU, 2000; TOOD, 2004).

Particularmente no tocante aos transdutores piezoelétricos, foi desenvolvida a técnica baseada na impedância eletromecânica (SU et al., 2006). Esta técnica baseia-se no acoplamento eletromecânico que resulta da colagem de transdutores piezoelétricos à estrutura monitorada, ficando definida a função de impedância que depende tanto das características elétricas do transdutor quanto das características físicas (inércia e rigidez) da estrutura. Assim, através de curvas características da impedância, variações da rigidez da estrutura decorrentes do aparecimento de falhas podem ser avaliadas. Como a perda de rigidez progressiva está intimamente relacionada com o processo de falha estrutural, faz-se tal correlação utilizando ferramentas numéricas e estatísticas.

Os materiais compostos estão sendo empregados cada vez mais em substituição aos materiais tradicionais, cujas características individuais não atendem às crescentes exigências de melhor desempenho, segurança, economia e durabilidade. No entanto o mecanismo de falha dos compostos é muito mais complexa que os materiais convencionais, produzindo novos desafios para manutenção. Assim sendo, dado o crescente interesse no uso de materiais compostos em diversos setores da indústria, notadamente no setor aeroespacial, no qual os requisitos de segurança são extremamente rigorosos, especial interesse tem sido dedicado ao uso de técnicas de monitoramento da integridade de estruturas constituídas por este tipo de material (GRONDEL et al., 2004).

Em estruturas aeronáuticas, constituídos de materiais compostos, as maiores causas de dano estão ligadas a objetos que colidem com a estrutura, como a colisão de pássaros, granizo, pedras na pista de pouso/decolagem e por ferramentas durante a manutenção, o fato é estes impactos podem ocorrer sem deixar evidências visuais na superfície do composto. (MOULIN et al., 1997; GUINARD et al., 2002, NAIK et al.; SEKHER; MEDURI, 2000, BORG et al., 2004).

O estudo a ser desenvolvido tem por objetivo o estudo da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseada em transdutores piezoelétricos, a saber: técnica da impedância eletromecânica, aplicadas à detecção de danos provocados por impacto em componentes estruturais constituídos de materiais compostos.

2. MATERIAIS COMPOSTOS

Um material composto é a combinação macroscópica de dois ou mais materiais diferentes, havendo uma interface entre estes, para funcionar como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum componente individualmente apresenta (MENDONÇA; 2005). E em virtude desta composição, os materiais compostos são heterogêneos e, na maioria das vezes, apresentam comportamento mecânico anisotrópico. Estes tipos de materiais não são utilizados apenas por suas propriedades estruturais, mas também pela térmica, tribológica, e várias outras aplicações.

Os avanços dos compostos criaram novas oportunidades para estruturas de alta performance e com baixo peso, favorecendo o desenvolvimento de sistemas estratégicos, como na área de mísseis, foguetes e aeronaves de geometrias complexas (REZENDE, BOTELHO, 2000; GAY *et al.*, 2002).

Experiências mostraram que ao se substituir peças produzidas com materiais tradicionais por materiais compostos, há uma redução de peso, variando de 10% a 50%, e uma redução de custos, cerca de 10% a 20%. Por exemplo, na aviação comercial, o fato dos materiais compostos terem boa resistência à corrosão, proporcionou uma economia nos custos de manutenção, pois diminui-se o número de inspeções (GAY *et al.*, 2002).

Nota-se no gráfico da figura 1, um aumento expressivo na utilização de materiais compostos na indústria aeronáutica no ano de 2000, cerca de 20%, e diminuição do uso alumínio e do aço na massa relativa nas estruturas em relação ao ano de 1982 (GAY *et al.*, 2002).

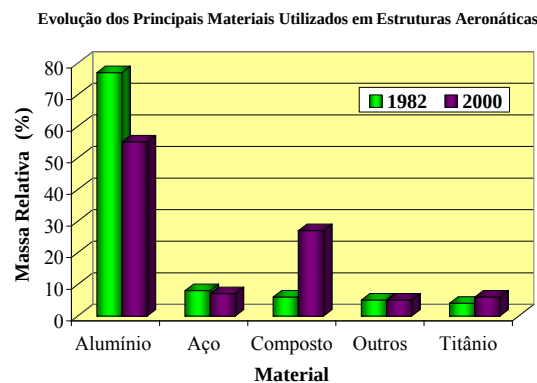


Figura 1: Evolução da massa relativa dos principais materiais utilizados em estruturas aeronáuticas.

A Fig.2 apresenta a aeronave Tucano produzido pela EMBRAER, mostrando os componentes fabricados em compostos, utilizando como reforço fibras de carbono, kevlar e vidro.

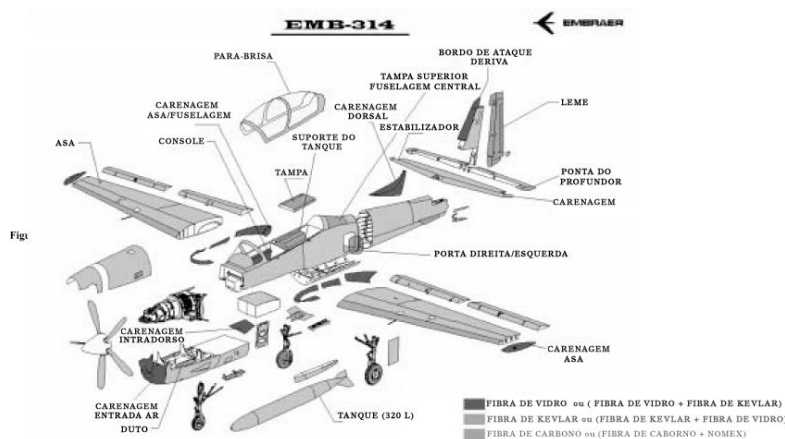
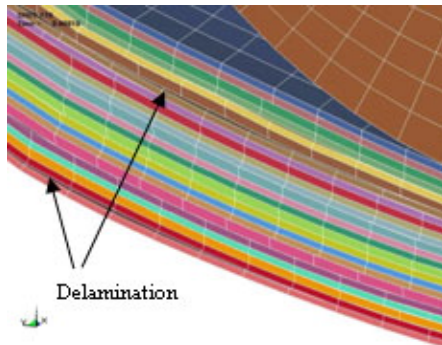


Figura 2: Aeronave Tucano da EMBRAER (EMB-314)

Na maioria, os materiais compostos produzem tipos únicos de danos, como delaminação (fig.3(a)) e descolamento (fig.3(b)), que não ocorrem em metais. Além disso, o processo de fabricação de compostos geralmente não é bem controlado como nos metais (MALLICK, 1997).



(a) Delaminação de uma estrutura composta
(Simulação numérica)



(b) Descolamento em uma estrutura composta
(Honeycomb).

Figura 3: Tipos de falhas em materiais compostos.

Embora os compostos reforçados com fibra possam suportar cargas em sua direção longitudinal, na direção transversal estes materiais possuem propriedades mecânicas deficientes, principalmente quando submetidos a impactos de baixa velocidade. Estes eventos podem ocasionar danos, conforme pode ser observado na Figura 4, como deformação da matriz e micro-trincas, descolamento interfacial, delaminação, rompimento da fibra e outros. Embora a o rompimento de fibra seja a causa principal dos danos causados neste, podendo iniciar-se em forma de trinca na matriz, podendo ocasionar uma delaminação. O fato é estes impactos podem ocorrer sem deixar evidências visuais na superfície do composto (BORG; *et al* 2004, NAIK *et al*, 2000).

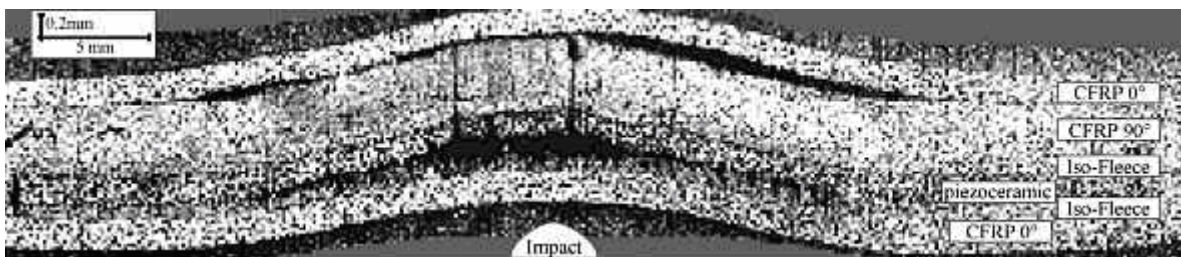


Figura 4: Falha causada por impacto em material composto.

3. IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA

O método de monitoramento de integridade estrutural de impedância eletromecânica foi primeiramente proposto Liang *et al* (1994), e tem sido aplicado como uma ferramenta promissora na avaliação de danos em tempo real (RAJU, 1997). A concepção básica desta técnica é monitorar estruturas através de sensores as variações na impedância mecânica, estas podem ser provocadas pelas mudanças de rigidez, amortecimento ou massa, que podem indicar um início de um dano (PARK, INMAN, 2005). Este método utiliza a propriedade eletromecânica dos materiais piezelétricos, normalmente chamado e PZT (Chumbo, Zirconato, Titanato) (SU *et al.*, 1995). E para obtenção do sinal de impedância utiliza-se tanto o efeito inverso como o direto dos materiais piezelétricos (PARK, INMAN, 2005). O efeito direto, quando é gerado um potencial elétrico no material quando submetido a uma tensão mecânica. E o efeito inverso, que é provocado quando um potencial elétrico é aplicado e o PZT e este sofre uma deformação mecânica. Para um material piezelétrico com comportamento linear, a relação entre as variáveis elétricas e mecânicas pode ser descrita pelas equações 1 e 2, que indicam o efeito inverso e direto, respectivamente (RAJU, 1997, PARK, INMAN, 2005).

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \quad (1)$$

$$D_m = d_{mi} T_i + \varepsilon_{mk}^T E_k \quad (2)$$

onde: S é o vetor das deformações [m/m], T é o vetor das tensões [N/m²], E é o vetor campo elétrico [V/m], D é o vetor deslocamento elétrico [C/m²], s é o tensor de flexibilidade [m²/N], d é o tensor das constantes piezelétricas em deformação [m/V], ε é o permissividade elétrica [F/m], i, j, m são os índices que indicam as direções da tensão e da deformação e k é o índice do campo elétrico.

Como as frequências de excitação são altas, a resposta dinâmica da estrutura atua em uma área pequena em torno do sensor. A resposta da vibração mecânica é transferida de volta para o PZT em forma de resposta elétrica. Quando uma trinca modifica a resposta dinâmica (alteração da fase da frequência ou magnitude), isto é manifestado na resposta elétrica do PZT (PARK, INMAN, 2005).

Como as medidas da impedância mecânica são complicadas de se obter, o método utiliza a impedância elétrica dos materiais piezelétricos que estão coladas na superfície do sistema, sendo que a impedância elétrica do PZT está diretamente correlacionada com a impedância mecânica da estrutura, isto pode ser comprovado pela equação da admitância (eq. 3).

Na figura 5 está esquematizado um sistema unidimensional (1D) de uma modelo eletromecânico. O PZT normalmente é colado diretamente na superfície da estrutura com adesivo de alta resistência para assegurar um melhor acoplamento eletromecânico. Este considera uma pastilha piezelétrica em uma barra sofrendo vibrações axiais em resposta a voltagem alternada aplicada pelo analisador de impedância. Uma extremidade é fixada e a outra é conectada na estrutura, representando um sistema com um grau de liberdade (LIANG *et al.* 1993).

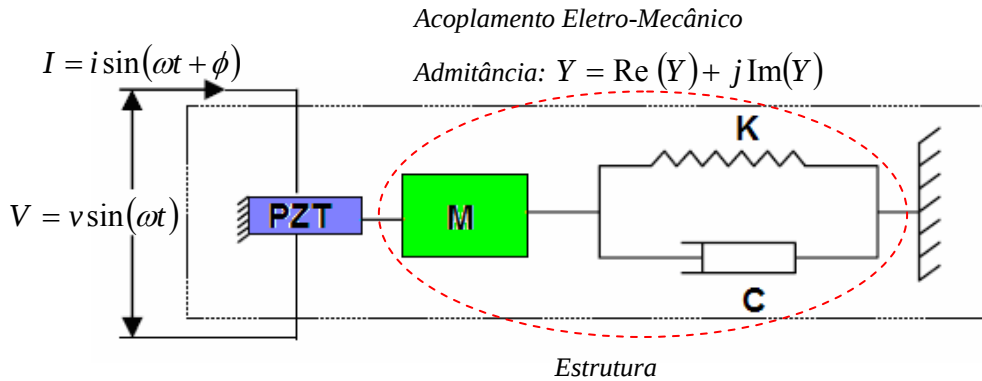


Figura 5: Modelo unidimensional utilizado para representar a pastilha piezelétrica - sistema dinâmico estrutural.

Partindo do pressuposto de que as propriedades mecânicas do PZT não variam ao longo do tempo que o mesmo é utilizado para o monitoramento estrutural (LIANG, 1994), demonstrando que a admitância $Y(\omega)$ do atuador PZT é uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT, $Z_a(\omega)$ e da estrutura, $Z(\omega)$, como mostra a eq. 3. Está também demonstra que a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura, levando à utilização dos sinais de impedância elétrica do PZT para o monitoramento da integridade estrutural do sistema representado pela impedância mecânica da estrutura.

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

onde: $Y(\omega)$ é a admitância elétrica do atuador PZT (Inverso da Impedância), $Z_a(\omega)$ e $Z(\omega)$ são as impedâncias mecânicas do PZT e da estrutura, respectivamente, V : voltagem de entrada no atuador PZT, I : corrente de saída do PZT. a é a constante geométrica do PZT, Y_{xx}^E é o módulo de Young, d_{3x} é a constante de acoplamento piezelétrico, ϵ_{33}^T : constante dielétrica complexa do PZT e δ é a tangente de perda dielétrica.

Normalmente o método utiliza frequências altas, maiores que 30 KHz, que são aplicadas no PZT, o qual está colado na superfície as estrutura, e sinais são adquiridos pelos sensores. Normalmente os PZTs utilizam pequenas voltagens (<1V) e estes geram altas frequências excitação nos pontos em que estão anexados na estrutura.

Basicamente a técnica consiste na obtenção da função resposta em frequência (FRFs) da estrutura, e posteriormente realizar uma comparação da modificação destes sinais, sendo que as mudanças nos sinais das FRFs podem indicar a presença de um dano.

3.1 Avaliação do Dano

Enquanto os gráficos de resposta da frequência prestam-se a mostrar a qualidade dos sinais, os gráficos da métrica do dano, que são baseados da função resposta em frequência, tentam quantificar os dados. Esta métrica são extremamente importantes para resumir e comparar os dados. Muitas formulações matemáticas são utilizadas para definir os vários tipos de métrica existentes (RAJU, 1997).

Esta avaliação quantitativa do dano com o método de impedância está tradicionalmente ligada à métrica do dano, este é um índice utilizado para monitorar a ocorrência de danos. Este índice simplifica a interpretação das variações de impedância e fornece informações do sinal em impedância para região de influência do atuador (LOPES *et al.*, 2000).

O valor de M , descrito como “desvio da raiz média quadrática”, é definido por Sun *et al.* (1995):

$$M = \sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{[\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})]^2}{[\text{Re}(Z_{i,2})]^2} \right)} \quad (4)$$

onde:

M é a métrica do dano

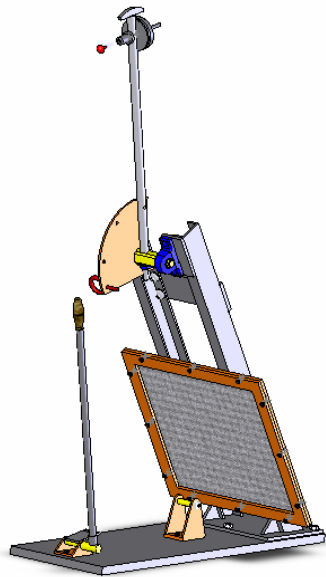
$Z_{i,1}$ é a medida da impedância do PZT nas condições iniciais ;

$Z_{i,2}$ representa o sinal a ser comparado, para o i -ésimo valor da frequência.

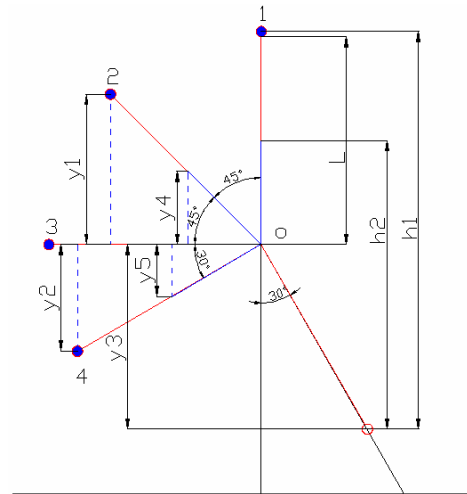
Comparando-se vários valores obtidos da métrica do dano, uma diferença muito grande dos valores da métrica em relação à métrica inicial obtida quando se considerou a estrutura sem danos, pode indicar a presença de um dano (PARK, INMAN, 2005).

4. METODOLOGIA

Para simulação do impacto de baixa energia será utilizado um painel constituído de material composto (carbono/epóxi), este possui as camadas com os seguintes ângulos [(0°), (45°), (90°/0°), (45°), (90°/90°), (45°), (0°/90°), (45°), (0°)]. Para simulação o impacto de baixa energia foi projetado um aparato experimental, na figura 7 (a), que pode ser observado a vista 3D do pêndulo. E para flexibilizar as energias utilizadas no experimento, na faixa de 3J a 25J, variaram-se as alturas em que o pêndulo será liberado, que é definida pelos ângulos adotados (fig7(b)), o diâmetro da ponteira do pêndulo e a massa que pode ser acoplada na ponteira.



(a) Vista em 3D do pêndulo



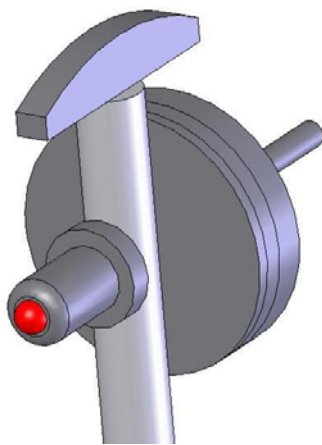
(b) Figura esquemática e os ângulos utilizados no pêndulo

Figura 6: Equipamento para ensaio de impacto.

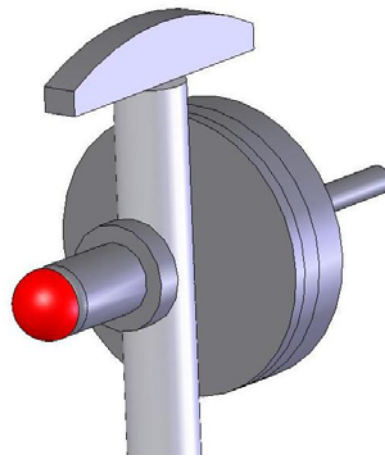
Na tabela 1 estão especificados os diâmetros das ponteiros que são de 12.5 e 25.5 mm, sendo que as duas tem formato esférico, conforme demonstrado na figura 7.

Tabela 1: Configuração da Ponteira do Pêndulo

Diâmetro (mm)	Formato
12.5	Esférico
25.4	Esférico



(a) 12.5 mm



(b) 25.4 mm

Figura 7: Ponteiros utilizados na ponteira do pêndulo.

Primeiramente para o cálculo da energia mecânica (eq. 5) que a pêndulo vai impactar no corpo de prova, fez-se o cálculo da energia potencial e cinética, explicitadas nas equações 6 e 10, respectivamente. Para se obter a equação 9, substitui-se na equação 7, as equações 8 e 9.

$$E_M = E_p + E_c \quad (5)$$

$$E_p = m_1 g h_1 + m_2 g h_2 \quad (6)$$

onde E_p é a energia potencial, m_1 é a massa da ponteira, g é a aceleração da gravidade, h_1 é a altura da ponteira, m_2 é a massa da barra, e h_2 é a altura do centro de massa da barra.

$$E_c = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} J_o \omega^2 \quad (7)$$

onde E_c é a energia potencial, m_1 é a massa da ponteira, v_1 é a velocidade linear da ponteira, J_o é o momento angular da barra, e ω é a velocidade angular da barra.

$$v_1 = \omega L \quad (8)$$

$$J_o = \frac{1}{3} m_2 L^2 \quad (9)$$

$$E_c = \frac{1}{2} L^2 \omega^2 \left(m_1 + \frac{1}{3} m_2 \right) \quad (10)$$

Para o cálculo da velocidade, utilizou-se do principio da conservação de energia (eq.11).

$$E_{MO} = E_{MF} \quad (11)$$

No qual, E_{MO} é a energia mecânica inicial e E_{MF} é a energia mecânica final.

Será feito um planejamento experimental para realização dos ensaios e utilização de ferramentas estatísticas para análise dos dados.

5. TRABALHOS FUTUROS

Realização e análise dos resultados do monitoramento de integridade através do método da impedância eletromecânica em materiais compostos, que sofreram impactos de baixa energia.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro de Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ pela bolsa concedida para que a realização deste trabalho fosse possível e à EMBRAER pela doação do painel de material composto que será utilizado nos ensaios de impacto.

7. REFERÊNCIAS

- Grondel, S., Assaad, J., Delebarre, C., Moulin, E., “Health Monitoring of a Composite Wingbox Structure”, *Ultrasonics* 42, 2004, pp 819-824.
- Guinard, S., Allix, O., Guédra-Segeorges, D., Vinet, A., A 3D damage analysis of low-velocity impacts on laminated composites, *Composites Science Technology* 62, 2002, 585-589p.
- Gay, D.; Hoa, S.V.; Tsai, S.W. *Composites Materials: design and applications*, 4 ed, CRC Press.
- Mendonça, P.T.R. *Materiais Compostos e Estruturas Sanduíche: projeto e análise*, 1 ed.. Barueri: Manole, 2005. 632p.
- Mallick, P. K. *Composites Engineering Handbook* 22. Nondestructive test, 1998.
- Naik, N.K., Sekher, Y.C., Meduri, S., “Damage in composites subjected to low-velocity impact”, *Composites Science and Technology* 60, pp.731-744, 2000.

Borg, R., Nilsson, L., Simonsson, K., “Simulation of low velocity impact on fiber laminates using a cohesive zone based delamination model”, *Composites Science and Technology*, number 64, pp.279-288, 2004.

Guinard, S., Allix, O., Guédra-Degeorges,, D., Vinet, A., “A 3D damage analysis of low-velocity impacts on laminated composites”, *Composites Science and Technology* 62, pp. 585–589, 2002.

Liang, C., Sun, F.P., and Rogers, C.A., 1994, “Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, 12–20.

Park, G, Sohn, H., Farrar, C.R. and Inman, D.J., 2003, “Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward”, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, No. 6, November 2003, pp. 451-463.

Park, G. and Inman, D. J., 2005. “Impedance Based Structural Health Monitoring,” Chapter 18 in *Damage Prognosis –For Aerospace, Civil and Mechanical Systems*, Inman, D. J., Farrar, C.R. , Steffan, V. and Lopes, V., Editors, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, pp. 275-292.

Raju, V., 1997, “Implementing Impedance-Based Health Monitoring”, MSc Thesis, Virginia Tech, USA.

Su, Z., Ye, L., Lu, Y., “Guided Lamb Waves for Identification of Damage in Composite Structures: A Review”, *Journal of Sound and Vibration* N° 295, March 2006, pp. 753-780.

Todd, M. D., “Optical- Based Sensing”, *Damage Progenosis*, Irman D.J Inman, edito John Wiley and Sons Inc., 2004, pp. 343-360.

Sun, F.P., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C.A., 1995, “Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor–Actuator,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, 134–139.

ASSESSMENT OF THE ELETROMECHANICAL IMPEDANCE METHOD FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING IN COMPOSITE STRUCTURES

Karina Mayumi Tsuruta, Leandro Rodrigues Cunha, José dos Reis Vieira de Moura Júnior, Domingos Alves Rade, Raquel Santini Leandro Rade.

Faculty of Mechanical Engineering - Federal University of Uberlândia

João Naves de Ávila Av. 2121, Uberlândia, MG, Brazil

karinamayumi@yahoo.com.br, leandrorcunha@gmail.com, mourajr@mourajr.com.br, domingos@ufu.br, rslr@ufu.br

Resumo: Composite materials are widely used in aerospace, civil structures, vehicles and machines, because of the substantial performance benefits they can afford. But these materials suffer from damages mechanisms that are difficult to detect in the early stages. These flaws could occur during manufacturing, processing of the material, while the structures are subjected to service loads or during maintenance. The major concern in the composite materials is to find an undetected hidden damage, caused by fatigue and impacts with low velocity that can reach a critical size in service, resulting in a catastrophic failure of the structure. The goal of this contribution is to analyze a promise method of Structural Health Monitoring (SHM), called electro-mechanical impedance method, applied in a composite material to detect damage caused by low-impact energy. This method is a nondestructive method which explores the electro-mechanical coupling property of piezoelectric materials to monitor the occurrence and evolution of structural damage. The adopted methodology consists in simulate an impact with low energies (between 3J to 12J) in composite plates, measuring the signatures of impedance from the structure through the sensors/actuators (PZT patches) bonded onto the structure surface. These signatures are evaluated from specific metrics to build meta-models to define energies of impact and establish the relationship between damages and energies.

Palavras-chave: Monitoramento de Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, Impacto de baixa energia, Materiais Compostos.