

ESTUDO DO MÉTODO DE IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA PARA DETECÇÃO DE DANOS INCIPIENTES EM UMA VIGA DE ALUMÍNIO

LIZETH VARGAS PALOMINO

Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Naves de Ávila, 2121
lvpalomino@mecanica.ufu.br

VALDER STEFFEN Jr

Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Naves de Ávila, 2121
vsteffen@mecanica.ufu.br

Resumo: *A técnica de monitoramento da integridade da estrutura baseado na impedância utiliza a propriedade dos materiais piezelétricos. O conceito básico desta técnica é o monitoramento da variação da impedância mecânica da estrutura causada pela presença de um dano. O método utiliza materiais piezelétricos, como pastilhas de PZT, coladas na superfície da estrutura, e a partir destas são adquiridos os sinais de impedância elétrica que está diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura a ser monitorada. O objetivo deste trabalho é avaliar o método para a identificação de danos incipientes em uma viga de alumínio. Os ensaios foram realizados em uma viga com 1000 mm de comprimento, 30 mm de largura e 3,4 mm de espessura, nesta foram feitos rasgos iniciais de um milímetro de profundidade, incrementando-se este de um em um milímetro até fazer vazar o corpo de prova. Os rasgos foram feitos a distâncias de 900, 850 e 800 mm do PZT. Pode-se observar a partir dos resultados que o PZT pode detectar danos incipientes a estas distâncias.*

Palavras-chave: *Impedância Eletro-mecânica, Monitoramento da integridade estrutural, Detecção de danos incipientes.*

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o método da impedância utilizado para o monitoramento de danos em estruturas simples como uma viga de alumínio, em condições de contorno livre-livre, com o PZT colado em uma de suas extremidades. O processo consistiu em criar rasgos de 15mm de comprimento e 1 mm de profundidade e incrementou-se este de um em um milímetro, com uma fresa de topo de 3mm, até vazar o corpo de prova. Inicialmente fez-se o rasgo a distância de 900mm do PZT, posteriormente a 850 mm e 800mm. Utilizou-se o analisador de impedância HP4194A para medir os sinais de impedância elétrica em cada estado, e assim verificar a variação do sinal em função da profundidade do rasgo. Com este estudo pretende-se avaliar o método da impedância eletromecânica para detectar danos incipientes em estruturas reais.

1.1 Monitoramento da Integridade Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica

O método de monitoramento da integridade da estrutura utiliza sensores de impedância para monitorar a alteração da rigidez, amortecimento e massa da estrutura. O sensor de impedância consiste em uma pequena pastilha piezelétrica, usualmente menor que 25x25x0.1mm, que será utilizada para medir diretamente a resposta dinâmica local. Na verdade, trata-se de um sensor/atuator piezelétrico.

Os materiais piezelétricos atuam diretamente produzindo uma mudança de potencial elétrico quando sofrem uma deformação mecânica, e inversamente, uma deformação mecânica é produzida quando é aplicado um potencial elétrico (Niezrecki *et al.*, 2001). Para obter a leitura da impedância eletromecânica da estrutura, a técnica de monitoramento baseada na impedância utiliza simultaneamente os efeitos, direto e inverso, dos materiais piezelétricos. Quando um potencial elétrico alternado atua na pastilha de PZT colada na estrutura, esta se deforma conjuntamente com a estrutura, fazendo com que o conjunto passe a vibrar. Se a frequência de excitação for muito alta, a resposta dinâmica da estrutura refletirá apenas o comportamento de uma pequena região próxima ao sensor (Stokes and Cloud, 1993). A partir da resposta dinâmica da estrutura, a pastilha PZT se deforma gerando um potencial elétrico. Assim, o mesmo funciona simultaneamente como atuador e como sensor de deformações. Quando algum tipo de dano aparece na estrutura, sua resposta dinâmica é alterada e percebida através do sinal elétrico da resposta do PZT. O modelo eletromecânico que quantifica e descreve o processo é apresentado na Figura 1.

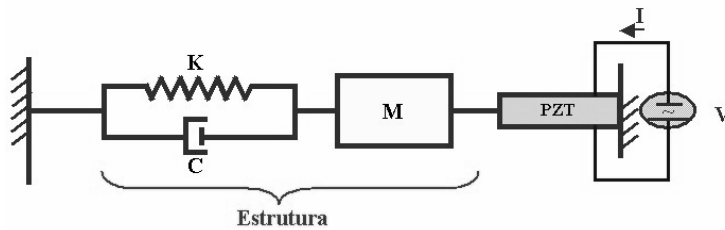


Figura 1: Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado pelo método baseado na impedância.

A Equação 1 mostra a solução do sistema em termos da admitância elétrica, em função da frequência (Liang *et al.*, 1994). Esta indica que a impedância elétrica do PZT está diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura. Os danos na estrutura ocasionam mudanças na rigidez, massa e/ou amortecimento do sistema, alterando as características dinâmicas locais.

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

Onde:

Y é admitância elétrica.

Z_a é impedância mecânica do PZT.

Z_s é impedância mecânica da estrutura.

$\hat{Y}_{xx}^E$ é o modulo complexo de Young do PZT com campo elétrico 0.

d_{3x} é a constante de acoplamento do PZT na direção x a deformação 0.

$\bar{\epsilon}_{33}^T$ é a constante dielétrica a deformação 0.

δ é a constante dielétrica do PZT.

a é a geometria constate do PZT.

A sensibilidade da técnica em detectar a falha está relacionada com a banda de frequência selecionada. Um dano muito pequeno na estrutura não faz grandes mudanças nas propriedades de rigidez e de amortecimento da mesma, por isso é necessário um comprimento de onda de excitação pequena que possa detectar o dano. A faixa de frequência tipicamente usada no método de impedância é de 30kHz a 250kHz. A faixa de frequência é determinada pelo método de tentativa e erro. Uma alta faixa de frequência (entorno de 150kHz) é favorável para detectar a localização dos danos, e uma faixa baixa (menor de 70kHz) detecta regiões em que estão localizados os danos.

O gráfico de resposta de impedância apresenta uma avaliação qualitativa do dano. Para ter uma avaliação quantitativa do dano usa-se uma escala métrica do dano. Para isto é usado o desvio médio da raiz quadrada (RMSD) (Park and Inman, 2005).

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

Onde:

M representa a métrica da falha.

$Z_{i,1}$ é a impedância do PZT medido em condições de não falha.

$Z_{i,1}$ é a impedância em comparação com a medição base no intervalo de frequência i .

O valor numérico de M na Equação 2 é a diferença entre a medição base, sem dano, e a medição que indica a presença de um dano. Outra métrica do dano pode ser o coeficiente de correlação que determina o grau de relação linear entre duas medições de impedância.

Outra forma de quantificar a medida do dano são as redes neurais (Lopes *et al.*, 2000).. Tem dois passos, o primeiro passo é detectar e localizar a falha na estrutura, o segundo passo é com uma rede neural treinada para o dano específico, determina a severidade do dano.

Outro método é estatístico com a união entre RMSD e o desvio percentual da media absoluta (MAPD) (Giurguitiu e Zagrai, 2005), mudança na covariância, e desvio do coeficiente de correlação (CCD), um bom estudo de todos estes parâmetros resulta em uma melhor quantificação do dano, além de mostrar o tamanho e localização fixa do dano.

Neste trabalho utilizara-se o desvio médio da raiz quadrada (RMSD) para quantificar os danos.

2. METODOLOGIA

Para a realização do experimento, foi utilizada uma viga de alumínio de 1000mm de comprimento, 30mm de largura e 3,4mm de espessura. Foi colado um PZT de 20x15x0,1mm a 30 mm de sua extremidade como se pode observar na Figura 2.

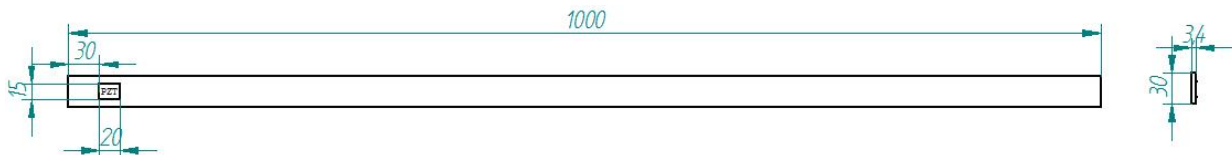
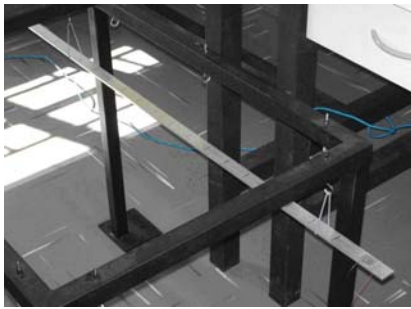
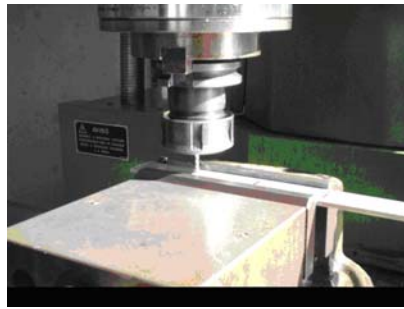


Figura 2: Dimensões da Viga em milímetros.

As condições de contorno da viga são livre-livre, Figura 3(a), e as falhas foram inseridas com uma fresa de topo de 3 mm, Figura 3(b). Inicialmente a falha tinha 15 mm de comprimento e 3mm de largura com profundidade de 1mm. Para simular o aumento do dano em cada passada foi acrescentado ao rasgo um em um milímetro de profundidade até vazear a peça. As falhas foram feitas a 900 mm, 850 mm e 800 mm de distância da pastilha de PZT. A Figura 3(c) mostra uma falha inserida na viga.



(a) Viga de Alumínio Livre-Livre



(b) Fresa de Topo de 3mm



(c) Viga com Dano

Figura 3: Descrição do Ensaio na Viga.

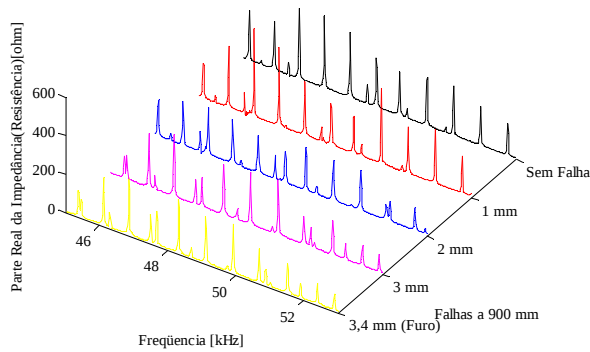
Com o analisador de impedância HP4194A, Figura 4, foi feita a aquisição dos sinais de impedância do PZT para cada um dos estados da estrutura. Para o corpo de prova sem falha foram feitas três medições em dias diferentes, para poder observar o comportamento dos sinais. Os dados foram tratados e analisados segundo a Equação 2, sendo possível obter informações a respeito da integridade da estrutura após cada falha.



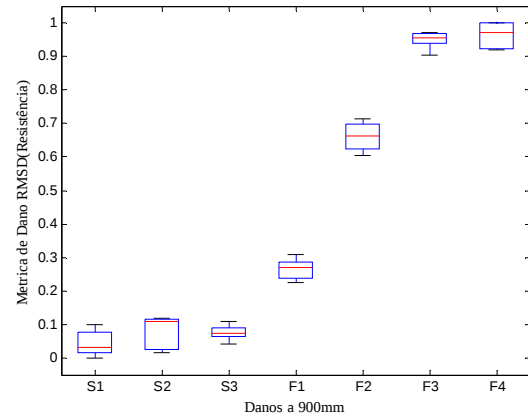
Figura 4: Analisador de impedância HP4194A.

3. RESULTADOS

A faixa de frequência utilizada para os ensaios foi de 45kHz até 53kHz. Foram tomadas 6 medições para cada estado da viga, para poder observar a estabilidade dos sinais. Para quantificar a falha foi utilizada a Equação 2 e os resultados são representados graficamente na Figura 5 para as falhas feitas a 900 mm, sendo que o gráfico (a) relaciona a frequência com valor da parte real da impedância eletromecânica, e no gráfico (b) a profundidade da falha com sua média da métrica do dano e seu respectivo desvio padrão. Pode-se observar que os três primeiros estados (S1, S2 e S3) tem médias muito similares, pois estas são medidas sem dano e realizadas em dias distintos.



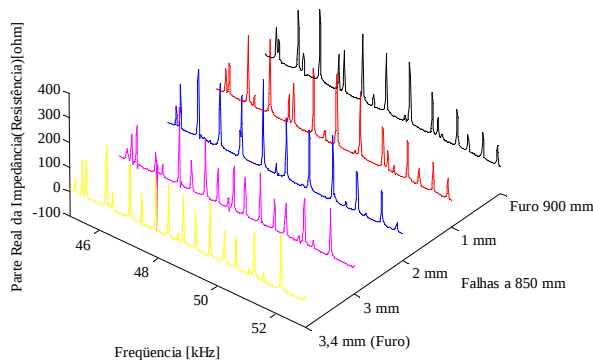
(a) Gráfico de Impedância -Frequência



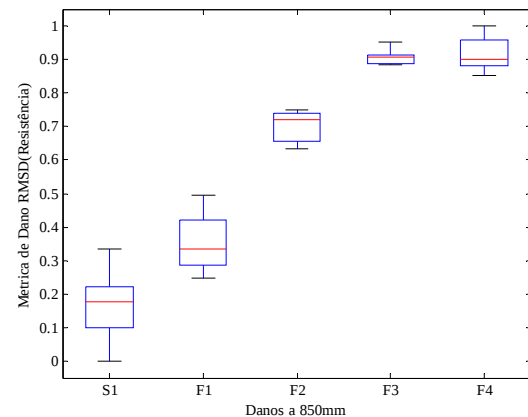
(b) Média e Desvio Padrão do RMSD

Figura 5: Resultados para Danos a 900mm.

Na Figura 6 observa-se os resultados para os danos feitos a 850 mm do PZT, no estado inicial deste ensaio a estrutura tinha um furo a 900 mm, por isso o sinal do estado sem falha para este experimento é o último sinal obtido no ensaio a 900 mm da pastilha PZT, para poder observar se o método detecta só os rasgos. No gráfico, pode-se observar que a técnica tem sensibilidade para detectar os danos simulados na estrutura.



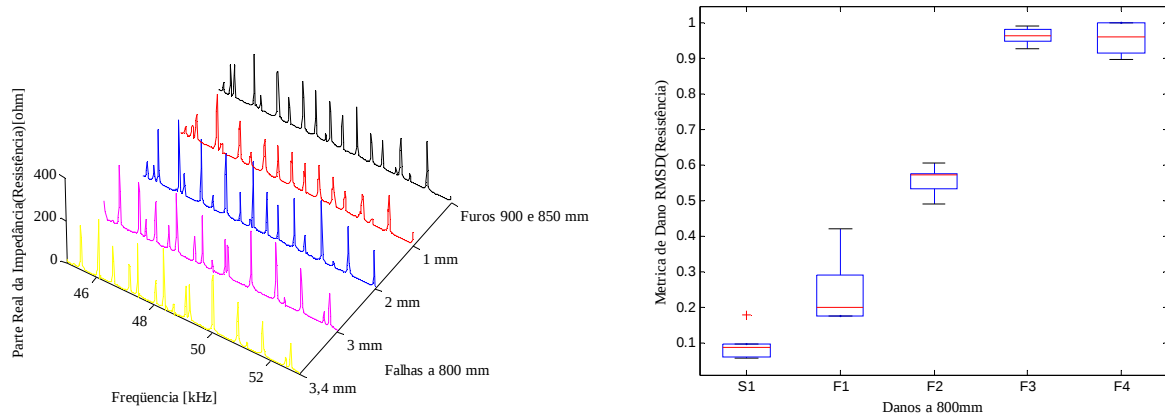
(a) Gráfico de Impedância -Frequência



(b) Média e Desvio Padrão do RMSD

Figura 6: Resultados para Danos a 850 mm.

No ensaio de falhas a 800mm, foi feito o mesmo procedimento que o ensaio anterior, os sinais obtidos foram comparados com o último sinal do estado anterior, ou seja, com as medições da viga furada a 900 mm e 850 mm. Na Figura 7 apresenta-se os resultados obtidos. Observe-se que nos três ensaios a métrica aumentou, quando se aumentou a profundidade do rasgo. Também se pode observar que a diferença da métrica para profundidade de 3 mm e 3,4 mm não é significativa.



(a) Gráfico de Impedância -Frequência

(b) Média e Desvio Padrão do RMSD

Figura 7: Resultados para Danos a 800 mm.

4. CONCLUSÃO

A evolução da métrica para cada nível de falha inserida na estrutura pode ser observada nas Figuras 5, 6 e 7, sendo que quanto maior é a profundidade da falha, maior é a variação do sinal de impedância elétrica, o que significa variação na impedância mecânica da viga pela Equação 1. Portanto, com os resultados obtidos, é possível afirmar que o método é válido para analisar danos incipientes em estruturas simples.

Também pode-se observar que a métrica dos danos com profundidade de 3 e 3,4mm nos três ensaios, não tem muita diferença, pelo qual pode-se afirmar que, para estes ensaios, danos menores de 1mm de profundidade não podem ser detectadas pela pastilha PZT.

Como continuação deste trabalho será realizado estudos em estruturas com aplicações reais, observando a sensibilidade da técnica a pequenos danos.

5. REFERÊNCIAS

- Giurgiutiu, V. and Zarai, a., 2005, "Damage Detection in Thin Plates and Aerospace Structure with the Electro-Mechanical Impedance Method", Structural Health Monitorin, Vol. 4, pp. 99-118.
- Liang, C., Sun, F.P., and Rogers, C.A., 1994, "Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive material system – determination of actuator power consumption and system energy transfer ", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.5, pp.21-20.
- Lopes,V., Park, G., Cudney, H. and Inman, D.J., 2000, "A Structural Monitoring Tecnique using Artificial Neural Network and Structural impedance Sensor", Journal of Inteligent Material System and Structures, Vol. 11, pp. 206-214.
- Niezrecki,C., Brei, D., Balakrishnan, S., and Moskalik, A., 2001, "Piezoelectric Actuation: State of the Art", The Shock and Vibration Digest, Vol. 33, pp. 269-280.
- Park, G. and Inman, D., 2005, "Impedance-based Structural Health Monitoring", Damage Prognosis, Wiley, Cap.13, pp. 275-292.
- Stoker, J.P., and Cloud, G. L., 1993, "The Application of interferometric technique to the nondestructive inspection of fiber-reinforced materials", Experimetal Mechanics, Vol.33, pp. 314-319.

STUDY OF THE ELECTROMECHANICAL IMPEDANCE METHOD FOR THE DETECTION OF INCIPIENT DAMAGE IN A ALUMINUM BEAM

Lizeth Vargas Palomino

College of Mechanical Engineering (FEMEC) - Federal University of Uberlandia. Av. Joao Naves De Avilla # 2121
lvpalomino@mecanica.ufu.br

Valder Steffen Junior

College of Mechanical Engineering (FEMEC) - Federal University of Uberlandia. Av. Joao Naves De Avilla # 2121
vsteffen@mecanica.ufu.br

Abstract: *The impedance-based structural health monitoring technique uses the piezoelectric property found in piezoelectric materials. The basic concept of this technique is monitoring the variation of the mechanical impedance of the structure as caused by the presence of damage. The method uses piezoelectric materials such as patches of PZT bonded to the surface of the structure in order to measure the signals of the electrical impedance, which is directly related to the mechanical impedance of the structure under study. The objective of this work is to evaluate the method for the identification of incipient damage in an aluminum beam. The experiments were carried out on a beam with 1000 mm of length, 30 mm of width and 3.4 mm of thickness. Cracks of 1mm of depth were first made on the beam, increasing by 1 mm each time, until reaching complete holes, at distances of 900 to 800mm from the PZT. The results showed that the PZT can detect incipient damage from these distances.*

Keywords: *Electromechanical impedance, Structure health monitoring, Detection of incipient damages.*