

MÉTRICAS DE DANO PARA O MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

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: *O conceito básico da técnica de integridade estrutural baseado na impedância tem a ver o monitoramento da variação da impedância eletromecânica da estrutura, causada pela presença de um dano, usando pastilhas de material piezoelétrico coladas na superfície da estrutura. Destas pastilhas é medida a impedância, que está diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura. A partir da variação dos sinais de impedância pode-se concluir pela presença ou não de uma falha. Para quantificar esta falha, uma métrica é especialmente definida para atribuir-lhe um valor escalar característico. O objetivo deste trabalho é avaliar nove métricas diferentes, propostas pela literatura, testando-as em uma placa de alumínio. Os ensaios foram feitos adicionando uma massa de 1% do peso total da placa, e variando a distância da massa ao PZT. Com os resultados obtidos se pode observar que algumas métricas têm maior sensibilidade que as demais, especialmente quando da ocorrência de falhas incipientes.*

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

1. INTRODUÇÃO

Falhas que ocorrem normalmente nos equipamentos industriais e nas estruturas em geral podem estar associadas ao atrito, fadiga, impacto, crescimento de trinca, dentre outras razões. Para um adequado funcionamento do sistema, a falha deve ser localizada e reparada, oportunamente. O problema de detecção de falha compreende localizar, quantificar e estimar a vida útil remanescente. Um dos processos mais ambiciosos da Engenharia moderna é o monitoramento da integridade estrutural em tempo real de componentes de elevado custo ou de grande responsabilidade para o sistema considerado. Desta forma, a criação ou aperfeiçoamento de técnicas que ampliem a precisão e confiabilidade do processo de monitoramento são altamente desejáveis, sendo objeto de vários estudos tanto no meio industrial quanto no meio acadêmico (Farrar *et al.*, 2005).

Existem várias técnicas destinadas ao monitoramento da ocorrência e propagação de danos estruturais. Uma destas técnicas é aquela que se fundamenta na impedância eletromecânica (Park and Inman, 2005). Esta técnica baseia-se no acoplamento eletromecânico que resulta da colagem de um transdutor piezoelétrico à estrutura monitorada, ficando definida a função de impedância que depende tanto das características elétricas do transdutor quanto das características físicas ou mecânicas da estrutura. Assim, através de curvas características da impedância, sua variação devido ao aparecimento de falhas pode ser avaliada. Para quantificar o dano se utiliza uma dada métrica de dano, onde se faz uma comparação entre medições para os casos sem falha e com falha, utilizando ferramentas numéricas e estatísticas descritas na bibliografia.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar diferentes métricas encontradas na literatura, todas utilizadas para o monitoramento da impedância eletromecânica, com a finalidade de determinar qual delas tem maior sensibilidade a danos incipientes.

1.1. Método de Monitoramento da Integridade Estrutural Baseado na Impedância.

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/atuador 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.

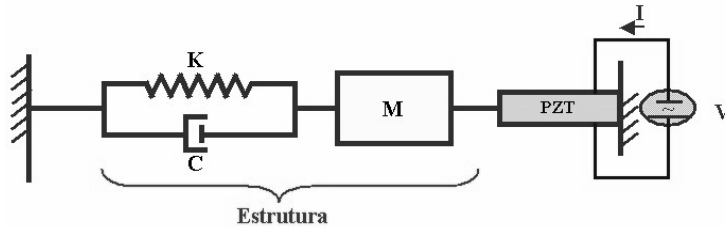


Figura 1: Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado pelo método baseado na impedância.

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 módulo 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 da falha se usa uma escala métrica do dano. Estudando a literatura, encontra-se diferentes métricas, a seguir apresenta-se nove delas.

A métrica mais usada na literatura é o desvio médio da raiz quadrada (RMSD), onde maior valor numérico de RMSD é a maior diferença entre a medição base e a medição que indica a presença de um dano (Park and Inman, 2005).

$$RMSD1 = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})]^2}{[\text{Re}(Z_{i,1})]^2}} \quad (2)$$

Onde:

$RMSD1$ representa a métrica da falha.

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

$Z_{i,2}$ é a impedância da pastilha PZT medido em condições de falha.

Esta métrica foi chamada de RMSD1 por que ao revisar outros autores, a Equação 2 tem pequenas variações, a seguir são apresentadas mais três RMSD achadas na literatura,

$$RMSD2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{[\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})]^2}{[\text{Re}(Z_{i,1})]^2}} \quad (3)$$

Na Equação 3, a diferença com relação à Equação 2 é que o somatório está dentro da raiz (Grisso, 2005).

$$RMSD3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})]^2}{\sum_{i=1}^n [\text{Re}(Z_{i,1})]^2}} \quad (4)$$

Na Equação 4 tem-se o somatório tanto no numerador, como no denominador (Giurguitiu and Zagrai, 2005).

$$RMSD4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})]^2}{n}} \quad (5)$$

Na Equação 5 apresenta-se a definição formal do desvio médio da raiz quadrada. Nele está o somatório no numerador e o denominador é o número de pontos.

Outra métrica é o somatório da variação de cada ponto do sinal de impedância ao quadrado (Peairs, 2002), como mostra a Equação 6.

$$M = \sum_{i=1}^n [\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})]^2 \quad (6)$$

Onde M representa a métrica da falha. Outra forma de quantificar a falha é o coeficiente de correlação (CC) (Giurguitiu and Zagrai, 2005), apresentada na equação (7).

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n [\text{Re}(Z_{i,2}) - \text{Re}(\bar{Z}_2)] [\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(\bar{Z}_1)]}{\sigma_{Z_1} \sigma_{Z_2}} \quad (7)$$

Onde:

CC representa a métrica da falha.

$\bar{Z}_1$ é a média dos valores do sinal da impedância do PZT medidos sem falha.

$\bar{Z}_2$ é a média dos valores do sinal da impedância do PZT medidos com falha.

σ_{Z_1} é o desvio padrão do sinal de impedância do PZT sem falha.

σ_{Z_2} é o desvio padrão do sinal de impedância do PZT com falha.

Quando CC é -1 os sinais têm uma correlação total. Quanto maior é a diferença menor é o valor de CC . O coeficiente de correlação também se aplica para a parte real da admitância (Naidu and Soh, 2004), ou seja, a condutância, como mostra a Equação 8.

$$CCY = \frac{\sum_{i=1}^n [\text{Re}(Y_{i,2}) - \text{Re}(\bar{Y}_2)] [\text{Re}(Y_{i,1}) - \text{Re}(\bar{Y}_1)]}{\sigma_{Y_1} \sigma_{Y_2}} \quad (8)$$

Onde:

CCY representa a métrica da falha.

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

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

$\bar{Y}_1$ é a média dos valores do sinal da admitância do PZT medidos sem falha.

$\bar{Y}_2$ é a média dos valores do sinal da admitância do PZT medidos com falha.

σ_{Y_1} é o desvio padrão do sinal de admitância do PZT sem falha.

σ_{Y_2} é o desvio padrão do sinal de admitância do PZT com falha.

Outra métrica achada na literatura é o desvio do coeficiente de correlação (CCD) (Giurguitiu and Zagrai, 2005), a formulação matemática esta dada pela Equação 9.

$$CCD = 1 - CC \quad (9)$$

Onde CC é o coeficiente de correlação descrito na Equação 7. Por último tem-se o desvio percentual da média absoluta (MAPD) descrito por Giurgiutiu and Zagari, 2005.

$$MAPD = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})}{\text{Re}(Z_{i,1})} \right| \quad (10)$$

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, mas neste trabalho não são apresentadas as redes neurais.

2. METODOLOGIA

Para a avaliação das métricas realizou-se um experimento. Para tal fim, foi utilizada uma placa de alumínio de 344x180x1mm, Nela foi colado um PZT de 20x20x0,1mm como apresenta a Figura 2.

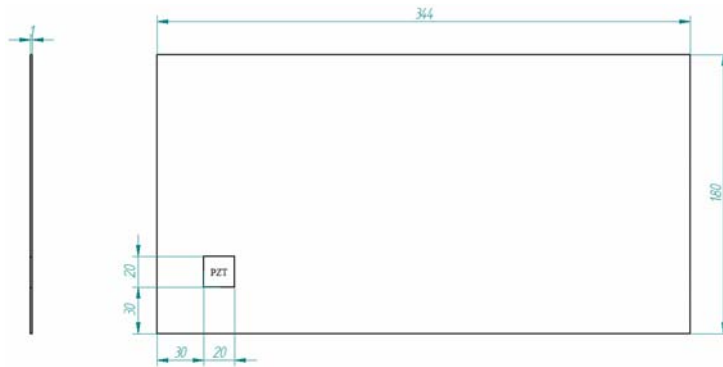


Figura 2: Dimensões da placa e o PZT em milímetros.

As condições de contorno da placa são livre-livre, Figura 3(a), e o peso é de 173,2g. Para inserir falhas incipientes foi adicionada uma massa de cera de abelha de 1,7g (1% do peso total da estrutura) inicialmente a 25 mm do PZT, posteriormente a 20 mm e a 15 mm como mostra a Figura 3(b) e (c).

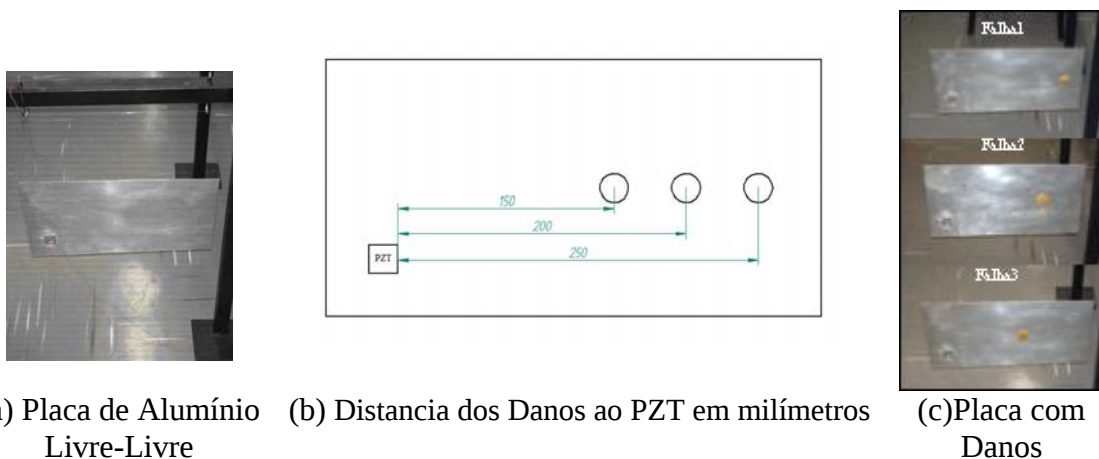


Figura 3: (a) Descrição da Placa.

Com o analisador de impedância HP4194A, foi feita a aquisição dos sinais de impedância do PZT para cada um dos estados da estrutura. Para o estado sem falha foram feitas quatro medições em dias diferentes para ver o comportamento dos sinais. Os dados foram tratados e analisados segundo as diferentes métricas descritas anteriormente com o fim de analisar quais delas têm maior sensibilidade a falhas incipientes.

3. RESULTADOS

A faixa de frequência utilizada para os ensaios foi de 49kHz até 59kHz. Foram tomadas 12 medições por cada estado da placa para poder observar a estabilidade dos sinais, na Figura 4 se apresenta a frequência com o valor da parte real da impedância eletromecânica, Na Figura 4(a) se apresenta os sinais medidos sem falha tomados em cinco dias diferentes, e na Figura 4(b) estão os sinais medidos de cada estado de dano da placa, nela se pode observar como variou os sinais para cada estado.

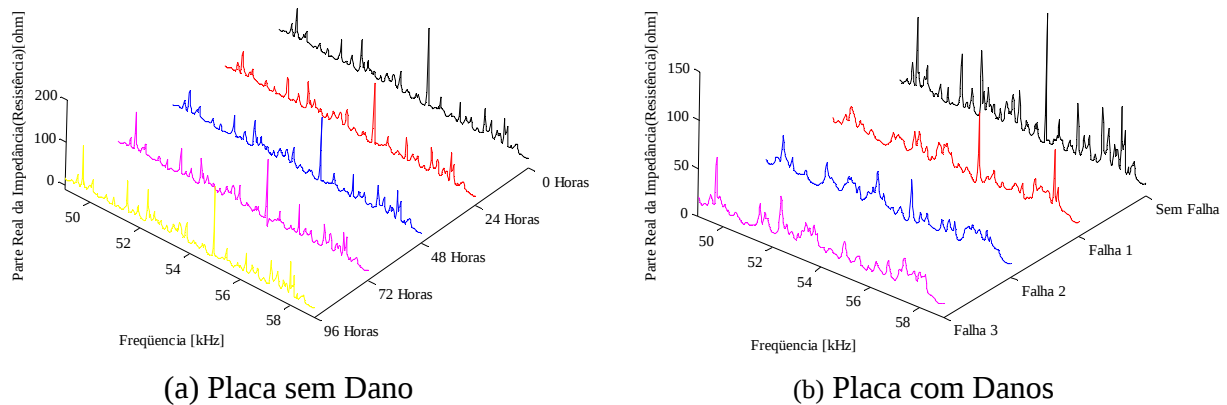
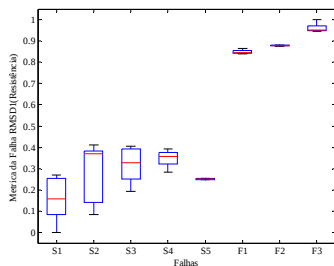
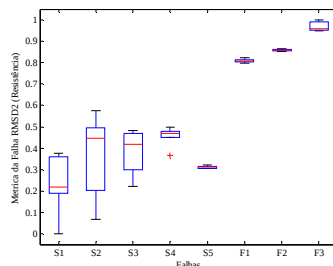


Figura 4: Gráficos de impedância-frequência.

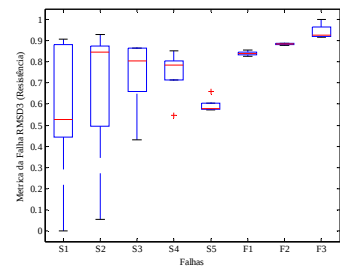
Para quantificar os danos, foram utilizadas as métricas das Equações 2 até 10 e os resultados são representados graficamente na Figura 5. Pode-se observar como algumas métricas não apresentam muitas diferenças no estado com falha e sem falha, como são RMSD3, Figura 5(c), RMSD4, Figura 5(d), M, Figura 5(e) e CCY, Figura 5(g), nestas métricas não é possível separar por meio de reta paralela ao eixo x os estados sem falha e com falha.



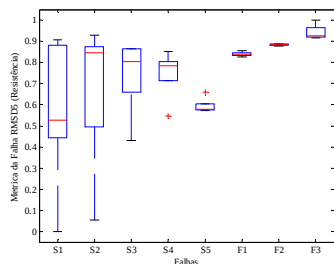
(a) Média e Desvio Padrão (RMSD1)



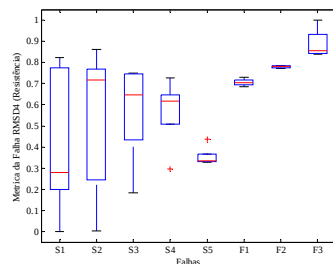
(b) Média e Desvio Padrão (RMSD2)



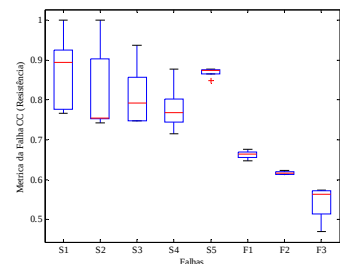
(c) Média e Desvio Padrão (RMSD3)



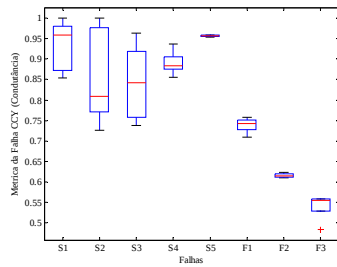
(d) Média e Desvio Padrão (RMSD4)



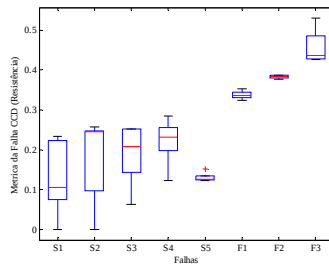
(e) Média e Desvio Padrão (M)



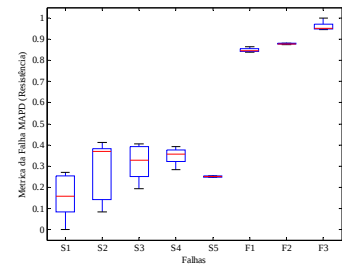
(f) Média e Desvio Padrão (CC)



(g) Média e Desvio Padrão (CCY)



(h) Média e Desvio Padrão (CCD)



(i) Média e Desvio Padrão (MAPD)

Figura 5: Comparação entre métricas do dano.

Nas Figuras 5(b), (f) e (h), pode-se verificar a diferença entre os estados sem dano e com dano, embora não seja muita, é possível fazer uma linha reta paralela ao eixo x e dividir os estados. Mas as métricas que apresentam maior sensibilidade aos pequenos danos induzidos na placa são RMSD1, Figura 5(a), e MAPD, Figura 5(i), nestas métricas é muito mais visível a diferença entre a placa com dano e sem dano.

4. CONCLUSÃO

Pode-se observar na Figura 4(a) que os sinais não têm grande variações entre si, uma vez que todas foram obtidas para a estrutura sem falha ao longo de cinco dias. Ao aplicar a métrica foram obtidas pequenas variações, embora as médias para cada dia sejam muito parecidas. Nos gráficos da Figura 5 pode-se observar que o desvio padrão é maior em alguns casos, pois ocorreu variação de temperatura, o que teve influência nas medidas realizadas. Portanto, pode-se concluir que as mudanças de temperatura afetam os sinais de impedância. Evidentemente, para as estruturas com danos, as variações obtidas nos sinais são muito mais expressivas, como se observa na Figura 4(b).

Quanto ao estudo das métricas, pode-se concluir que aquelas que têm maior sensibilidade às falhas incipientes são as seguintes: a) o desvio médio da raiz quadrada (RMSD), dado por RMSD1 e descrito por Park and Inman, 2005; b) o desvio percentual da média absoluta (MAPD), descrito por Giurgiutiu and Zagarai, 2005. Eles apresentam maiores diferenças entre os estados da estrutura para os casos sem dano e com dano como se observa nas Figuras 5(a) e 5(i).

5. REFERÊNCIAS

- Farrar, C.R., Lieven, N.A.J. and Bement M.T., "An Introduction to Damage Prognosis", Damage Prognosis, Wiley, Cap.1, pp. 1-12.
- Giurgiutiu, V. and Zagarai, a., 2005, "Damage Detection in Thin Plates and Aerospace Structure with the Electro-Mechanical Impedance Method", Structural Health Monitorin, Vol. 4, pp. 99-118.
- Grisso, B. L., 2005, "Tailoring the Impedance-Based Structural Health Monitoring Technique to Composites and Wireless Systems", Apresentação Técnica 13 de Março 2005-CMISS.
- 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 Technique using Artificial Neural Network and Structural impedance Sensor", Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol. 11, pp. 206-214.
- Naidu, A. S. K. and Soh, C.K., 2004, "Damage severity and propagation characterization with admittance", Smart Materials and Structures, Vol. 13, pp. 393-403.
- 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.

- Peairs, D. M., 2002, “Development of a Self-Sensing and Self-Healing Bolted Joint ”, Tesis de Mestrado – Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Stoker, J.P., and Cloud, G. L., 1993, “The Application of interferometric technique to the nondestructive inspection of fiber-reinforced materials”, Experimental Mechanics, Vol.33, pp. 314-319.

DAMAGE METRICS FOR ELECTROMECHANICAL IMPEDANCE-BASED STRUCTURAL HEALTH MONITORING

Lizeth Vargas Palomino

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

Valder Steffen Jr

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

Abstract: *The basic concept of impedance-based structure health monitoring is measuring the variation of the electromechanical impedance of the structure as caused by the presence of damage by using patches of piezoelectric material bonded to the surface of the structure. The impedance of these patches, which is directly related to the mechanical impedance of the structure, is measured. On the basis of the variation of the impedance signal, the presence of damage can be determined. In order to quantify this damage, a metric is properly defined, which allows to associate a characteristic scalar value to the damage. The objective of this work is to evaluate nine different metrics, suggested by the literature, being tested on an aluminum plate. The experiments were carried out by adding a mass of 1% of the total weight of the plate and varying the distance of the mass to the PZT. The obtained results showed that some metrics have a higher sensitivity than others, especially when incipient damage occur.*

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