



INFLUÊNCIA DO FORMATO DAS PASTILHAS CÊRAMICAS PIEZELÉTRICAS NAS RESPOSTAS DO MÉTODO DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECCÂNICA

Palomino, Lizeth Vargas, lvpalomino@mecanica.ufu.br¹
Tsuruta, Karina Mayumi, Karina@mecanica.ufu.br¹
Sousa, Marcos Morais, mmsousa@mecanica.ufu.br¹
Rade, Domingos Alves, domingos@ufu.br¹
Steffen, Valder Junior, vsteffen@mecanica.ufu.br¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Bloco 1M, Av. João Naves de Ávila, n.º. 2121, Uberlândia – MG, Brasil.

Resumo: *O conceito básico da técnica de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica tem a ver com o monitoramento da variação da impedância mecânica da estrutura, causada pela presença de danos, com auxílio de pastilhas de material piezolétrico. As pastilhas são coladas na superfície da estrutura que se deseja monitorar e através de uma excitação elétrica obtém-se uma resposta padrão, esta é obtida em uma estrutura considerada saudável, chamada de sinal de referência ou baseline. Caso ocorra algum tipo de dano, a resposta padrão sofre uma modificação, indicando a presença do dano. E a partir da comparação dos sinais obtidos da estrutura com e sem danos, pode-se quantificar o dano com ferramentas estatísticas (métrica do dano). Sendo a base do método a comparação de sinais de impedância eletromecânica, é importante garantir a sensibilidade dos sinais na presença de danos, para isto foi desenvolvido este trabalho que apresenta um estudo da influência dos formatos das pastilhas piezolétricas nos sinais obtidos pelo método de impedância eletromecânica.*

Palavras-chave: *Impedância eletromecânica, Monitoramento de Integridade Estrutural, Materiais Piezolétricos.*

1. INTRODUÇÃO

Normalmente, os danos que ocorrem nos equipamentos industriais e nas estruturas em geral podem estar associadas ao atrito, fadiga, impacto, crescimento de trinca, corrosão, dentre outras razões. Para o adequado funcionamento do sistema, o dano deve ser localizada e reparada, oportunamente. O problema de detecção de dano 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 e Inman, 2005). Esta técnica baseia-se no acoplamento eletromecânico que resulta da colagem de um transdutor piezolétrico 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 dano pode ser avaliada. Para quantificar o dano se utiliza uma métrica de dano, onde se faz uma comparação entre medições para os casos sem dano e com dano, utilizando ferramentas numéricas e estatísticas (Palomino e Steffen, 2009).

Os dados da impedância elétrica são obtidos pelo analisador de impedância HP4149A por pastilhas PZT (titanato zirconato de chumbo) acoplados a estrutura, afim de detectar danos. Para melhorar o desempenho deste método, foi realizado um estudo da influência dos formatos de PZT. No caso, foram utilizados PZTs em formato circular e quadrado, acoplados em estruturas tipo viga e placa.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Monitoramento de integridade estrutural baseado em 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 piezolétrica, usualmente menor que 25x25x0.1mm, que será utilizada para medir diretamente a resposta dinâmica local. Na verdade, trata-se de um sensor/atuador piezolétrico.

Os materiais piezolétricos 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 piezolétricos. 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 Fig. 1.

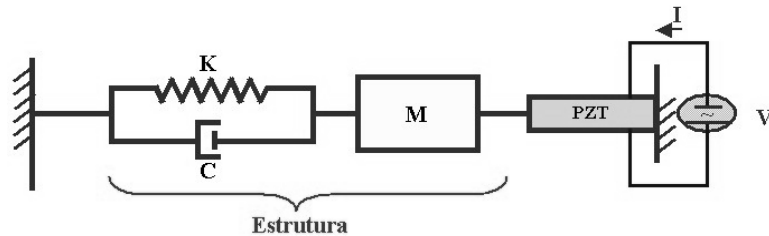


Figura 1. Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado pelo método baseado na impedância.

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 e a é a geometria constante 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 30 kHz a 250 kHz. A faixa de frequência é determinada pelo método de tentativa e erro. Uma alta faixa de frequência (entorno de 150 kHz) 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 em frequência apresenta a impedância permitindo uma avaliação qualitativa do dano. Para se ter uma avaliação quantitativa se usa uma escala métrica dada por ferramentas estatísticas (Palomino e Steffen, 2009). Neste trabalho foi usado a métrica do dano definido por Sun *et al.* (1995), dado pela Eq.(2), para representar quantitativamente o dano.

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

onde M é definida como métrica do dano, $\text{Re}(Z_{i,1})$ representa a parte real da impedância medida com a estrutura intacta (*baseline*), $\text{Re}(Z_{i,2})$ representa a parte real do sinal a ser comparado com o *baseline*, e n indica o número de frequências na banda de avaliação.

Outra forma de quantificar a medida do dano são as redes neurais artificiais (Lopes et al., 2000). A referida técnica opera por meio de dois passos: o primeiro é detectar e localizar a falha na estrutura, o segundo passo é determina a severidade do dano com uma rede neural treinada para aquele tipo específico de dano.

3. METODOLOGIA

O método de monitoramento baseado na impedância eletromecânica utiliza pastilhas piezelétricas acopladas na estrutura que se deseja monitorar. Para isso os sinais obtidos devem ser sensíveis à mudanças físicas na estrutura, a fim de detectar danos incipientes nestas, para melhorar a eficiência da técnica foi realizado um estudo dos formatos das pastilhas piezelétricas. Neste experimento, foram utilizados dois formatos de pastilhas piezelétricas, circular e quadrado, estes foram colados em estruturas tipo viga e placa.

Utilizou-se duas estruturas tipo viga iguais constituídas de alumínio, com dimensões de 550 mm de comprimento, 33 mm de largura e 3 mm de espessura (Figura 1 e 2). Na figura 1 e 2, observa-se que uma pastilha PZT com formato quadrado de 15 mm X 15 mm foi colado em uma das vigas, e na outra (Figura 2) foi colado uma pastilha circular com diâmetro de 17 mm com 1 mm de espessura, sendo que as duas possuem a mesma área, além das mesmas serem coladas na mesma posição em vigas distintas. A figura 3 (a) apresenta as vigas utilizadas no experimento, com ampliação das pastilhas piezelétricas (Figura 3 (b)).

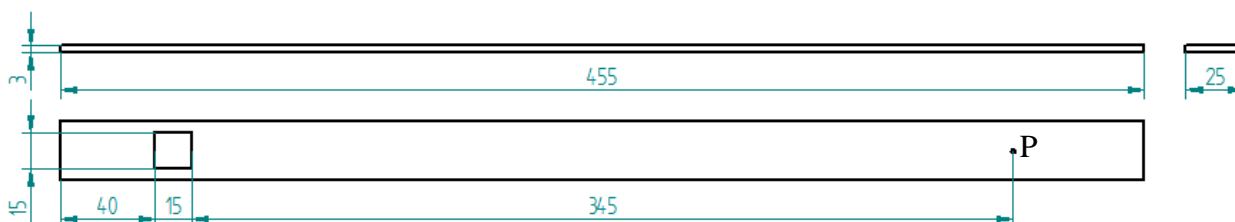


Figura 1. Dimensionamento da viga e posicionamento da pastilha piezelétrica com formato quadrado.

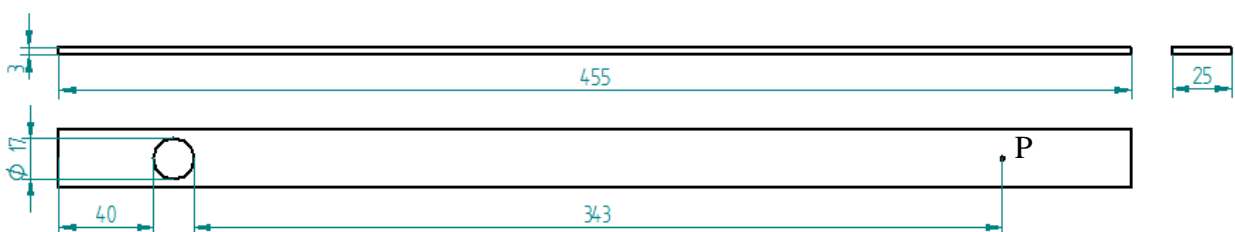


Figura 2. Dimensionamento da viga e posicionamento da pastilha piezelétrica com formato circular.

Para simulação dos danos nas vigas, foi adicionada uma massa de 7,70 g (figura 3 (c)) na posição do ponto P (Figuras 1 e 2). Foram obtidos os sinais de impedância antes e após a adição de massa na viga no analisador de impedância HP 4149A (Figura 3 (a)) com os corpos de prova na condição de contorno apoiado na faixa de frequência de 30 KHz a 32 KHz.

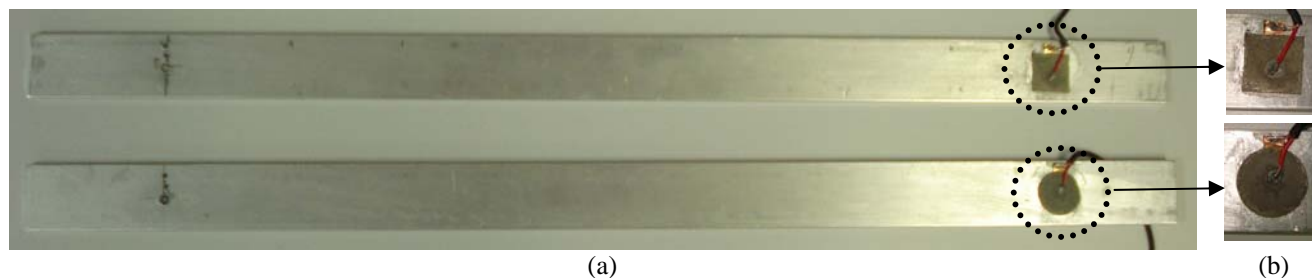


Figura 3. (a) Copos de prova (Viga); (b) Pastilhas piezelétricas acopladas às vigas.

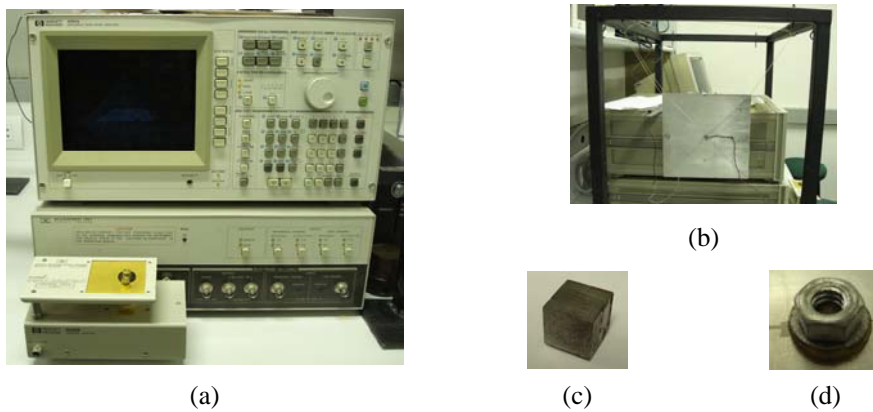


Figura 4. (a) Analisador de Impedância 4149A; (b) Condição de Contorno da Placa, livre-livre; (c) Massa adicionada na viga (7,70 g) e (d) Massa adicionada na placa (2,07 g)

Na estruturas tipo placa, utilizaram-se duas placas iguais com 200 mm x 200 mm x 1 mm, em uma delas colou-se uma pastilha piezolétrica com formato quadrado de 8,87 mm x 8,87 mm x 1 mm na posição mostrada na figura 4 (a), na outra foi colada uma pastilha PZT circular de diâmetro de 10 mm com 1 mm de espessura, como indicado na figura 4 (b), sendo que as duas pastilhas foram coladas na mesma posição em placas distintas.

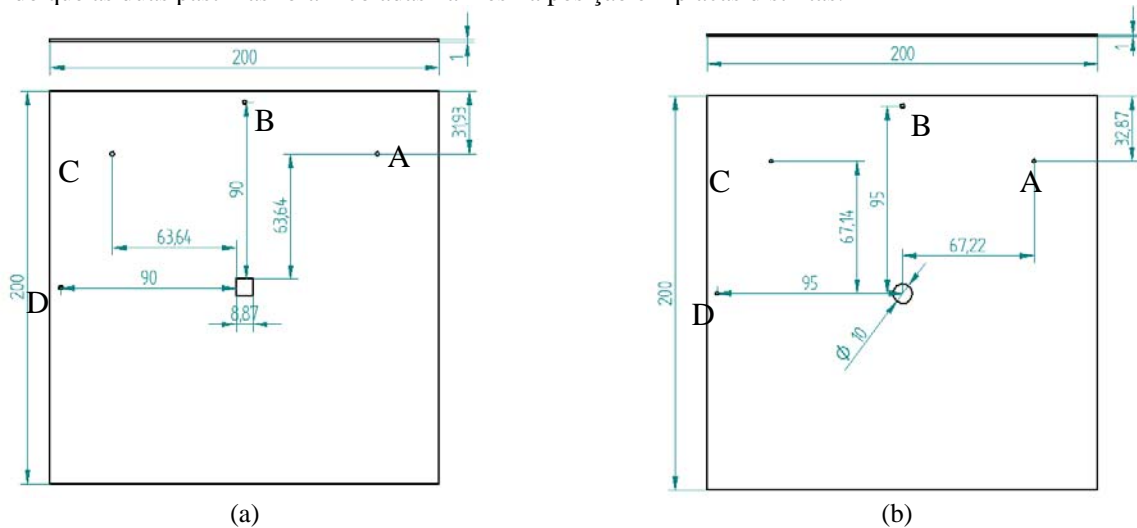


Figura 5. (a) Dimensionamento da placa com pastilha piezolétrica com formato quadrado; (b) Dimensionamento placa com pastilha piezolétrica com formato circular.

A figura 6 mostra os copos de prova utilizados no experimento com ampliação das pastilhas PZT utilizadas. As áreas das pastilhas piezolétricas coladas nas placas são iguais. Para simulação dos danos, foi adicionada uma massa de 2,07 g (Fig. 3 (d)). As leituras da impedância foram realizadas antes e após a adição de massa nos pontos A, B, C e D das placas (Figuras 5 (a) e 5 (b)), pelo analisador de impedância(Figura 4 (a)) na faixa de frequência de 30 KHz a 40 KHz.

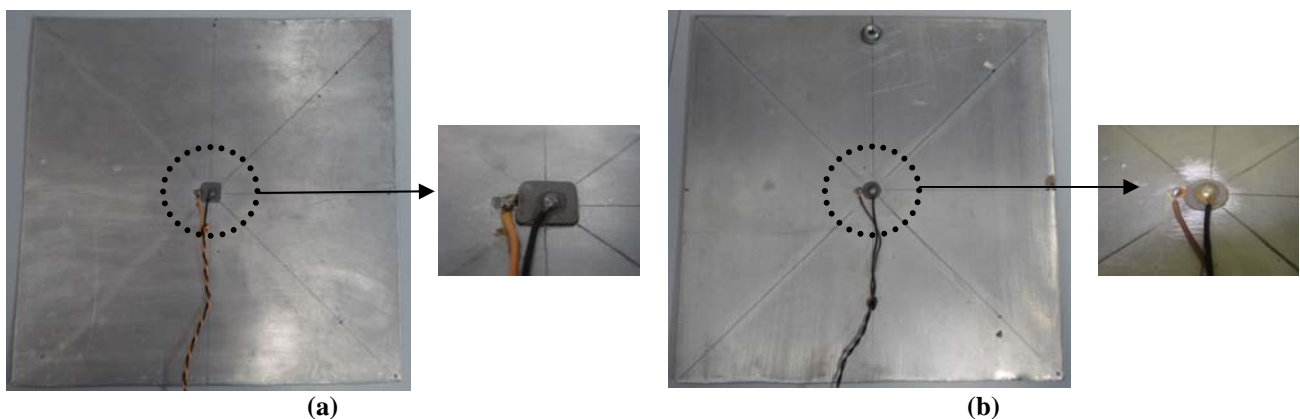


Figura 6. Placas; (a) Pastilha piezolétrica quadrada; (b) Pastilha piezolétrica circular.

4. Resultados

A partir da metodologia, obtiveram-se os sinais de impedância para monitoramento da estrutura. Com isso, foi possível analisar se os danos simulados nas estruturas foram detectados, comparando-se os gráficos de impedância antes e depois da adição de massa. E para quantificar este dano, foram utilizadas ferramentas estatísticas, chamada métrica do dano.

4.1. Viga

Analisando-se os resultados obtidos pelos corpos de prova tipo viga, observou-se que tanto para a viga com a pastilha PZT quadrada ou circular, que o sinal da parte real da impedância modificou após a adição de massa, como visto nas figuras 7 (a) e 7 (b), sendo que o estado “baseline” é o sinal de referência da estrutura (sem dano), está mudança do sinal indica que o método foi capaz de detectar o dano. E para quantificar este dano, este sinal foi tratado por uma equação de métrica do dano (Eq. 2). A figura 8 (a) mostra um gráfico de métrica do dano da viga com pastilha PZT quadrada, e na figura 8 (b) a métrica do dano da viga com pastilha PZT circular, percebe-se que os valores das métricas no estado baseline ficaram próximos de zero, e após a inserção da massa na estrutura, observa-se que houve um aumento do valor da métrica do dano, no entanto para a pastilha piezolétrica quadrada, após a inserção da massa, o valor da métrica ficou em torno de 900, enquanto para a pastilha circular em torno de 100. Com isso, pode-se dizer, que a pastilha PZT quadrada possui uma maior sensibilidade para detecção de falhas.

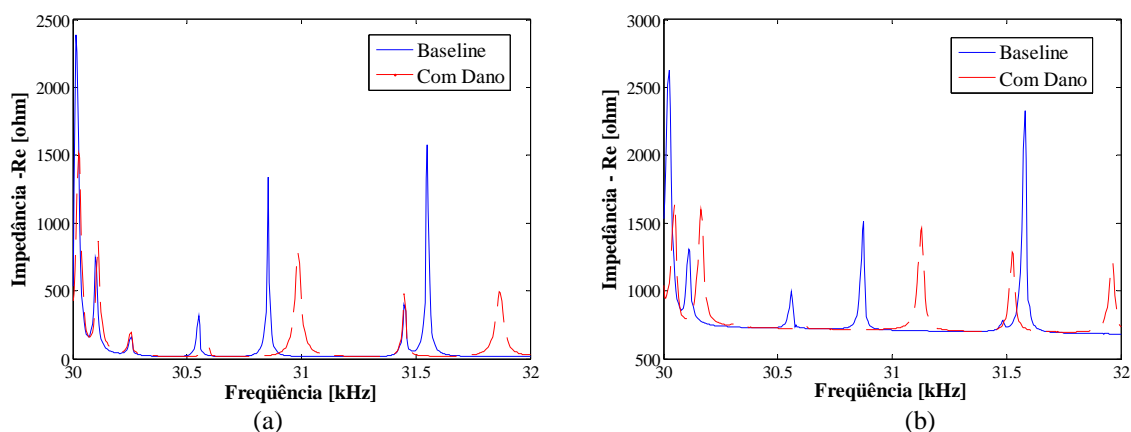


Figura 7. Gráficos da parte real da Impedância (Viga): (a) Pastilha piezolétrica circular; (b) pastilha piezolétrica quadrada.

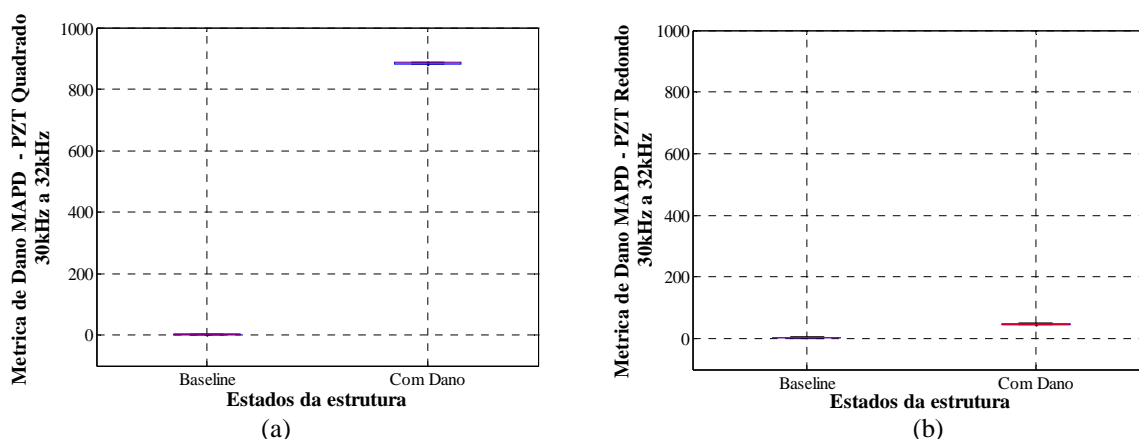


Figura 8. Gráficos de Métrica do Dano (Viga): (a) Pastilha piezolétrica circular; (b) pastilha piezolétrica quadrada.

4.2. Placa

Analisando os resultados obtidos nas estruturas tipo placa, nos gráficos da parte real da impedância (Figuras 9 (a) e 9 (b)), os sinais tiveram antes (baseline) e após adição de massas tiveram pequenas modificações, tanto para a estrutura com pastilha PZT quadrada quanto para pastilha PZT circular, indicando que o método baseado na

impedância eletromecânica detectou os danos simulados na placa. E para quantificar estas mudanças nos sinais, utilizou-se a equação da métrica do dano, obtendo-se os gráficos de métrica de dano, sendo a figura 10 (a) para a placa com pastilha PZT quadrada e a figura 10 (b) para a placa com pastilha PZT circular. Observando o gráfico da Figura 10 (a), observou-se que as métricas do dano foram próximas de 20, mesmo nas posições distintas em que foram adicionados massas, conforme explicado pela metodologia, e no gráfico da Figura 10 (b), os valores das métricas ficaram próximos de 50. Logo, pode-se dizer que a placa com pastilha PZT redondo possui maior sensibilidade na detecção do dano.

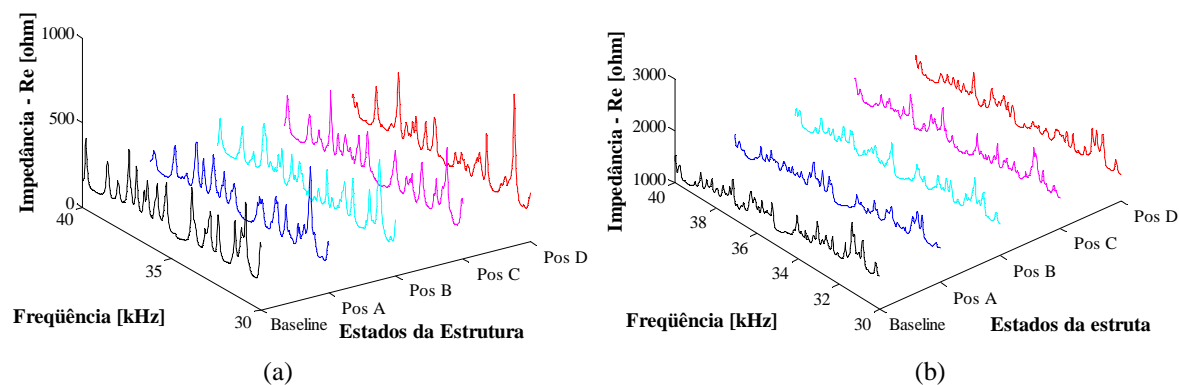


Figura 9. Gráficos da parte real da Impedância (Placa): (a) Pastilha piezolétrica circular; (b) pastilha piezolétrica quadrada.

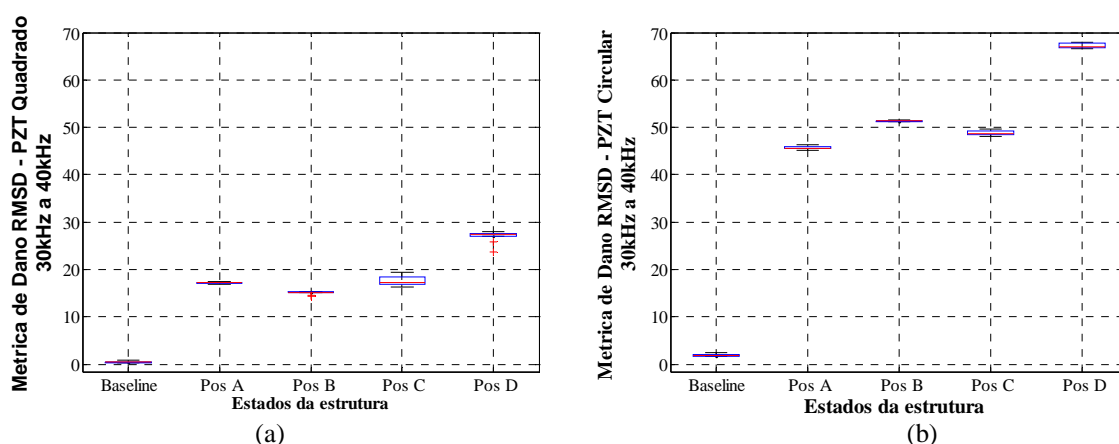


Figura 10. Gráficos de Métrica do Dano (Placa): (a) Pastilha piezolétrica circular; (b) pastilha piezolétrica quadrada.

5. Conclusões

Analisando os resultados da influencia do formato das pastilhas piezolétricas, pode-se dizer que o método foi capaz de detectar os danos simulados nas estruturas tipo viga e placa. Em vigas observou-se que a pastilha PZT com formato quadrado teve maior sensibilidade na detecção no dano simulado na estrutura, pois tinha um maior valor da métrica do dano em relação à viga com pastilha PZT circular. Já na placa na qual a pastilha piezolétrica tinha formato circular, os sinais adquiridos possuíam uma maior sensibilidade na detecção da massa adicionada, visto que possuía um maior valor de métrica do dano em relação à placa com pastilha piezolétrica com formato quadrado. Portanto, deve-se considerar o formato da pastilha piezolétrica utilizada no monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, visto que o comportamento destas pode estar ligada ao tipo de estrutura monitorada.

6. REFERÊNCIAS

Farrar, C.R., Lieven, N.A.J. e Benent, M.T., 2005, "Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System, Cap. 1: An Introduction to Damage Prognosis", Wyle, Inglaterra, 449 p.

- 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.
- 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.
- Palomino, L.V. e Steffen, V., 2009, "Damage Metric Associated with Electromechanical Impedance Technique for SHM Applied to a Riveted Structure", Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, Brazil.
- Park, G., Inman, D.J., 2005, "Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System, Cap. 13: Impadance-Based Structural Health Monitoring", Wyle, Inglaterra, 449 p.
- 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.

**7. DIREITOS AUTORAIS **

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

**INSTRUCTIONS FOR FORMATTING THE PROCEEDINGS PAPERS OF
THE VI CONEM (TIMES NEW ROMAN, BOLD, SIZE 14)
(single blank line size 14)**

First Author's Name, e-mail¹ (Times New Roman, Bold, size 10)

Second Author's Name, e-mail² (Times New Roman, Bold, size 10)

Third Author's Name, e-mail² (Times New Roman, Bold, size 10)
(single space line, size 10)

¹Institution and address for third author (Times New Roman, size 10)

²Institution and address for third author (Times New Roman, size 10)

Same format for other authors and institutions, if any (double space line, size 10)

***Abstract.** The basic concept of the technique of health monitoring based on the electromechanical impedance is correlated with the variation of mechanical impedance of the structure, caused by the presence of the damage, with the assistant of the piezoelectric materials. The PZT patches are bonded on the surface of the structure monitored, and through an electrical excitation, a pattern signal was obtained, from the structure considered healthy, this signature is called reference signals or baseline. If there is some kind of structure damage, the signal pattern changes, indicating the presence of the damage. And from the comparison between the obtained signals from the structure with and without damage, it is possible to quantify this damage, using the statistical tools (damage metric). The base of this method is comparing the impedance electromechanical signals; in face of this it is important to ensure the sensibility of the method to detect damages. Therefore this work presents a study of the influence of the PZT patches format.*

Keywords: *Impedance Electromechanical; Structural Health Monitoring; Piezoelectric Materials.*