

ESTUDO SOBRE O MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL, BASEADO NA IMPEDÂNCIA E/M, APLICADO EM ESTRUTURAS CIVIS

Raquel Naiara Fernandes Silva, LMest, raquel.fernandes@feciv.ufu.br
Valder Steffen Júnior, LMest, vsteffen@mecanica.ufu.br

Resumo. O mau funcionamento de uma estrutura pode levar a uma considerável perda econômica, além de um grande transtorno na vida da população que a utiliza. Nesse sentido, estudos e experimentos devem ser conduzidos a fim de fornecer recursos para uma avaliação confiável a respeito de seu estado, permitindo assim estabelecer critérios para garantir sua utilização dentro de padrões de segurança. Nos últimos anos, pesquisadores têm se interessado aos aspectos econômicos e de segurança estrutural. Nesse sentido, técnicas de Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM - Structural Health Monitoring) vêm sendo amplamente estudadas visando aumentar a segurança e reduzir custos de manutenção. Diante disso estudou-se a técnica de SHM baseado em impedância E/M aplicada em estruturas de construção civil.

Palavras chave: Monitoramento de Integridade Estrutural, Impedância E/M, Estruturas Civis

1. INTRODUÇÃO

No âmbito da Engenharia Mecânica, Civil e Aeroespacial, diferentes estruturas têm sido utilizadas por um longo período, sendo submetidas a diferentes tipos de carregamento. Além disso, ao longo de sua vida útil, as estruturas estão sujeitas a processos de deterioração (corrosão, desgaste) e à ocorrência de danos (trincas, perdas de elementos de união). Outro problema importante tem a ver com o envelhecimento da estrutura. Diversos eventos podem contribuir para tais ocorrências, alguns associados a fatores naturais e, outros, a fatores provocados pelo homem.

Mesmo sabendo que tais sistemas possam ser aplicados em diferentes áreas da engenharia sua utilização em estruturas civis é bastante importante e há ainda muitos desafios a serem vencidos. Neste sentido, o objetivo desse trabalho é estudar técnicas de SHM, com foco no método da impedância eletromecânica, com aplicações na Engenharia Civil.

2. IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA

O conceito de impedância eletromecânica procede da junção de dois domínios. O mecânico, com a conhecida impedância de uma estrutura mecânica, e o elétrico, com a impedância de um dispositivo submetido a alguma excitação caracterizada por uma voltagem elétrica.

Segundo Massoud (1985), a impedância mecânica é obtida a partir da razão entre a força aplicada em um determinado ponto e a velocidade mensurada no mesmo ponto conforme Eq. (1).

$$Z_m = \frac{F}{\dot{X}(t)} \quad (1)$$

Onde Z_m : Impedância mecânica; F : Força; $\dot{X}(t)$: Velocidade.

É conhecida como impedância elétrica a oposição que um circuito elétrico oferece à passagem da corrente alternada como mostra a Eq. (2).

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2)$$

sendo Z a impedância elétrica, V a voltagem e I a corrente.

3. ESTRUTURAS INTELIGENTES

Graças a certas necessidades atuais de determinados projetos da engenharia, acrescentadas ao desenvolvimento de novos materiais, foram desenvolvidos materiais que vêm sendo utilizados simultaneamente como sensores e atuadores e que podem ser prontamente incorporados a uma estrutura de interesse. Tais estruturas são então conhecidas como “estruturas inteligentes”, utilizando-se destes novos materiais, “materiais inteligentes”. Os estudos decorrentes desta

tecnologia vêm ganhando destaque no contexto internacional, na medida em que novas aplicações bem sucedidas na indústria são reportadas, assim como novos estudos são realizados em centros de pesquisas, revolucionando o projeto de sistemas de controle e garantindo um grande efeito sobre as técnicas de projeto (Banks *et al.*, 1996).

3.1. Materiais Piezelétricos

Dentre os materiais inteligentes mais aplicados no desenvolvimento do monitoramento de integridade estrutural estão os materiais piezelétricos, graças à sua natureza dielétrica. Esse tipo de material possui a propriedade de produzir deformação ou tensão a partir da aplicação de um campo elétrico e vice-versa.

Dentro de um material piezelétrico, a tensão mecânica, a deformação, o campo elétrico e o deslocamento elétrico, podem ser completamente descritos por um par de equações eletromecânicas. Os materiais piezelétricos, que fazem parte da classe dos dielétricos (isolantes), apresentam acoplamento eletromecânico, ou seja, produzem cargas elétricas em resposta à aplicação de forças, caracterizando o efeito piezelétrico direto, e deformam-se quando submetidos a campos elétricos externos, efeito piezelétrico inverso. A relação que descreve o acoplamento entre as variáveis elétricas e mecânicas são descritas pelas Eq. (3) e Eq. (4), as quais representam, respectivamente, o efeito inverso e direto do PZT (Crawley *et al.* 1983).

$$S_i = s_i^E + d_m E_m \quad (3)$$

$$D_m = d_m T_j + \varepsilon_{mk}^T E \quad (4)$$

Onde:

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

4. SHM BASEADA EM IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA

Entende-se por SHM como o processo de detecção de danos que envolve a observação de um sistema ao longo do tempo utilizando medições de respostas dinâmicas amostradas periodicamente a partir de uma malha de sensores, ligadas à extração de características sensíveis ao dano dessas respostas e do tratamento estatísticos dessas características para determinação do estado corrente do sistema vinculado ao dano (Farrar *et al.*, 2005).

Pode-se dividir esse tipo de monitoramento em duas fases:

I) Detecção da presença de dano, dada pela identificação da ocorrência de um evento discreto ou o início de um evento contínuo associado ao dano.

II) Quantificação da magnitude do dano, que objetiva avaliar a intensidade da modificação estrutural associada ao dano.

No contexto de sistemas mecânicos e estruturais, dano é definido como modificações intencionais ou não intencionais das propriedades físicas e/ou geométricas do sistema, incluindo modificações nas condições de contorno e na conectividade, podendo comprometer o funcionamento atual ou futuro do sistema. Dependendo do tipo de dano, sua magnitude pode ser detectada imediatamente ou a partir de certo instante posterior a sua ocorrência. Vale ressaltar que além do comprometimento do funcionamento, aspectos relacionados à segurança tornam-se primordiais sobretudo quando a existência de danos implica na ocorrência de falhas catastróficas que podem acarretar ferimentos, mortes, traumas psíquicos, danos ambientais e perdas econômicas (Farrar *et al.*, 2005).

Segundo Park e Inman (2005) o método emprega transdutores piezelétricos para detectar alterações em determinadas propriedades estruturais (rigidez, amortecimento e massa). Para obter uma assinatura de impedância para a estruturas, este método se favorece dos efeitos piezelétricos direto e inverso (sensor e atuador).

Quando uma trinca ou dano causa uma mudança na resposta dinâmica (alteração de fase, frequência ou magnitude), isto se manifesta na resposta elétrica do PZT. De forma geral, a magnitude do dano detectável em um material é inversamente proporcional à faixa de frequência do sinal adquirido. Portanto, trata-se de uma técnica para detecção de danos incipientes. Vale ressaltar que a detecção de danos incipientes em estruturas em geral é de grande importância visto que se pode, com isto, evitar o surgimento de falhas graves ou desvios no comportamento estrutural esperado.

4.1. Acoplamento eletromecânico

Os sinais de impedância eletromecânica simulam a informação caracterizante de uma estrutura mecânica (impedância mecânica) migrada para o domínio elétrico (impedância elétrica). A forma de se determinar essa relação é a partir da

colagem do transdutor piezelétrico à estrutura a ser monitorada, proporcionando o conhecido acoplamento eletromecânico. De forma geral, esse acoplamento é obtido pela fixação do transdutor na estrutura em questão utilizando algum tipo de cola instantânea ou adesivo de alta rigidez. O modelo que apresenta e quantifica o processo de medição é apresentado na Fig. 1, para um sistema de 1 g.d.l.

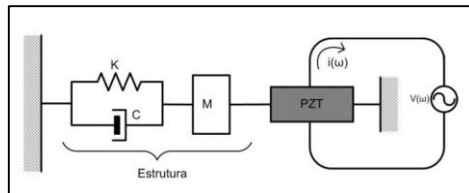


Figura 1. Modelo unidimensional clássico do acoplamento eletromecânico utilizado pelo método baseado em impedância

onde:

K: constante de rigidez da mola;

M: massa

C: coeficiente do amortecedor;

V: voltagem de entrada do atuador PZT.

Considerando que as propriedades mecânicas do PZT não variam ao longo do tempo que o mesmo é utilizado para o monitoramento estrutural, Liang *et al.* (1994) demonstraram que a admitância $Y(\omega)$ do atuador PZT é dada por uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT, $Z_a(\omega)$ e da estrutura, $Z_s(\omega)$, conforme a Eq. (5).

$$Y(\omega) = \frac{I_0(\omega)}{V_i(\omega)} = j\omega \frac{w_a l_a}{h_a} \left[\frac{-T}{\epsilon_{33}} (1 - j\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{22}^E (1 + j\eta) \right] \quad (5)$$

onde $Y(\omega)$: admitância elétrica do PZT (inverso da impedância); $Z_s(\omega)$: impedância mecânica da estrutura; $Z_a(\omega)$: impedância mecânica do PZT; $V_i(\omega)$: tensão elétrica de entrada do atuador PZT; $I_0(\omega)$: corrente de saída do PZT; w_a, l_a e h_a : largura, comprimento e espessura da pastilha PZT; $\bar{Y}_{22}^E$: módulo de Young do PZT com campo elétrico nulo; d_{3x}^2 : constante de acoplamento piezelétrico; $\frac{-T}{\epsilon_{33}}$: constante dielétrica do PZT com tensão mecânica nula; δ : fator de perda dielétrica do PZT; η : fator de perda mecânica do PZT; j : unidade imaginária $\sqrt{-1}$.

4.2. Estado da arte

O SHM é um processo de implementação de uma estratégia de identificação de danos para a indústria aeroespacial, mecânica, naval, e infraestrutura na Engenharia Civil. Os últimos 10 anos têm visto um rápido aumento na quantidade de pesquisas relacionadas a SHM quantificada pelo crescimento significativo de trabalhos publicados sobre este assunto. O aumento do interesse em SHM, associado a benefícios de segurança e de aumento de vida útil, além de aspectos econômicos, tem motivado muitos estudos recentes (Sohn, 2005).

Inman *et al.* (2005) apresentam uma investigação para um SHM em um modelo de ponte do tipo treliçada de aço (Fig. 7). Esse tipo de ponte consiste em cantoneiras de aço, canais, placas e juntas ligadas por mais de 200 parafusos. Trata-se de uma estrutura com 1,8 m de altura e uma massa de aproximadamente 250 kg.

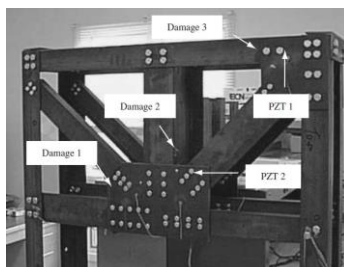


Figura 2. Modelo de uma ponte de aço (Fonte: Inman *et al.*, 2005)

Foram acoplados quatro sensores PZT nas seções mais críticas da estrutura a fim de monitorar ativamente as condições que oferecem alta resistência estrutural civil. Essa experiência teve como objetivo examinar o efeito das condições de contorno externas relativas à assinatura de impedância. Para isso foram aplicadas três condições de contorno sobre a estrutura a fim de simular a variação no cotidiano: variou-se o sinal ao longo de um período de tempo; criou-se uma

situação similar às vibrações, martelando a estrutura manualmente e adicionou uma carga de 15 kg de massa à estrutura próximo aos sensores. Realizou-se leituras ao longo de 3 semanas e após identificar o intervalo das variações da impedância devido à condição limite, introduziu-se os danos através dos parafusos ao longo da estrutura. A maior variação da impedância foi detectada ao introduzir vibrações com as marteladas, como já se esperava. Consistente com outros resultados científicos, as juntas parafusadas foram os principais contribuintes de dissipação de energia na estrutura. Um problema importante associado com o monitoramento de estruturas civis em larga escala é que elas possuem baixas frequências naturais e são difíceis de excitar, acarretando dificuldades na detecção de pequenas frequências (Friswell e Penny, 1997 APUD Inman *et al.*, 2005). Porém, conforme foi demonstrado a técnica de SHM baseado em impedância E/M pode ser aplicado em grandes estruturas civis utilizando excitações locais de alta frequência.

Sun *et al.* (2010) estudam as técnicas de SHM aplicados à engenharia civil. Ao comparar com outros métodos concluíram que o método de SHM baseado na impedância E/M requer mais estudos a fim de verificar a viabilidade deste método para detectar danos em estruturas de concreto.

Soh *et al.* (2010) apresentam os resultados de um SHM, realizado durante o teste de carga destrutiva de um protótipo de uma ponte de concreto armado. A ponte foi feita de concreto reforçado com barras de aço e representou uma classe popular de pontes rodoviárias em que o monitoramento regular é uma questão muito importante durante sua vida útil. Foram acoplados sensores PZT à ponte, que eram eletricamente excitados em altas frequências, da ordem de kHz, e a parte real de admissão (condutância) foi extraído como uma função dessa frequência, onde é exibido na Fig. (3). Os resultados demonstram claramente a "inteligência" do PZT na detecção de dano em um estágio muito precoce, abrindo caminhos para a possibilidade de utilizar sensores PZT para o monitoramento de integridade estrutural de grandes estruturas civis.

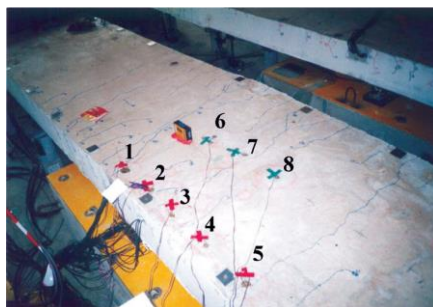


Figura 3. Sensores acoplados à estrutura estudada (Fonte: Soh *et al.*, 2010)

Yang e Divsholi (2010) propõem uma nova abordagem no SHM baseado na impedância E/M, dividindo a frequência em pequenos intervalos a fim de calcular os valores do RMSD (desvio quadrático médio), para uma estrutura de concreto. O RMSD dos intervalos de sub-frequências foi utilizado para estudar a gravidade e local do dano. Para o experimento cinco pastilhas de PZT com dimensões de 20,0 x 20,0 x 0,5 mm foram ligados à estrutura de concreto com 2,0 x 1,5 x 1,5 m de dimensão. Utilizou-se um adesivo epóxi para colar a superfície dos PZT à superfície estudada. Um analisador de impedância com o nível de tensão máxima de 2 volts e um multiplexador foram usadas para adquirir as assinaturas de admissão eletromecânica do PZT. Uma unidade de aquisição de dados paralelos de 16 canais foi utilizada para estudar o PZT gerando propagação de ondas na superfície da estrutura de concreto. Utilizou-se uma serra circular de mão para criar os danos do tipo fenda na estrutura estudada, resultando o seguinte cenário conforme Fig. (4).

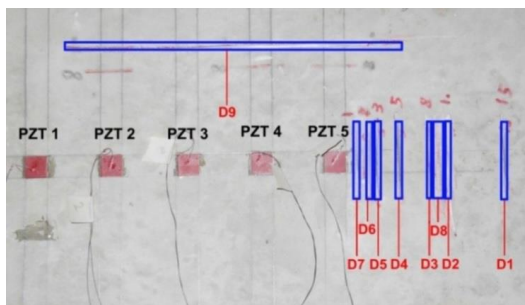


Figura 4. Localização e frequência dos danos na estrutura (Fonte: Yang e Divsholi, 2010)

Concluiu-se que, em comparação com a abordagem convencional, onde é utilizado o valor RMSD para toda gama de frequências, a técnica proposta neste trabalho é confiável para o monitoramento de estruturas de concreto. A severidade e localização dos danos podem ser estimadas por um único sensor através do RMSD-S. Ressaltou-se que múltiplos

sensores-atuadores de PZT podem aumentar a precisão dessa identificação de danos e proporcionar uma maior área de detecção.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho fez-se uma revisão teórica sobre a técnica de SHM baseado na impedância E/M, pensando em sua aplicação em estruturas de construção civil.

Percebeu-se que se trata de uma metodologia que está ganhando espaço gradativamente, à medida que aplicações bem sucedidas são reportadas. Com os avanços contínuos da tecnologia de sensores e atuadores, implementações de novos algoritmos para processamento de sinais, acredita-se que esta técnica se desenvolva ainda mais, atraindo a atenção de pesquisadores e engenheiros para o monitoramento de vários tipos de estrutura, conforme apresentado.

Conclui-se ainda que a técnica da impedância eletromecânica requer estudos adicionais a fim de verificar a viabilidade deste método para detectar danos em Estruturas Cíveis (concreto, por exemplo). Estudos experimentais detalhados não são comuns na literatura, justificando assim novos esforços de pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANKS, H. T.; SMITH, R. C.; WANG, Y. Smart Materials Structures – Modeling, Estimation and Control. Paris: John Wiley & Sons, 1996.
- CRAWLEY, P., The impedance Method of Non-destructive Inspection. Ultrasonics International, 1983.
- FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BEMEND, M. T. An introduction to damage prognosis. In: AUTOR. Damage Prognosis for aerospace, civil and mechanical systems. Bristol: John Wiley & Sons, 2005. p. 1-12.
- INMAN, D. J., FARRAR, C. R., JÚNIOR, V. L., STEFFEN Jr, V. Damage Prognosis. For Aerospace, Civil and Mechanical Systems. Wiley Editorial. 417 p. 2005.
- LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled Electro-Mechanical Analysis of Adaptive Material Systems- Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer. Journal Intelligent Material Systems and Structures, p.5, 1994.
- MASSOUD, M. Impedance Methods for Machine Analysis: Modal Parameters Extraction Techniques. Université de Sherbrooke, Quebec, Canada. 1985. P. 4-14.
- PARK, G. INMAN, D. J. Impedance-Based Structural Health Monitoring. Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System, Wiley, 2005.
- SOHN, H. Statistical Pattern Recognition Paradigm Applied to Defect Detection in Composite Plates in Damage Prognosis – for Aerospace, Civil and Mechanical Systems. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2005.
- SOH, C. K. TSENG, K. K-H., BHALLA, S. GUPTA, A. Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a RC Bridge. Smart Materials and Structures. 2000. 533-542.
- SUN, M., STASZEWSKI, W. J., SWAMY, R. N. Smart Sensing Technologies for Structural Health Monitoring of Civil Engineering Structures. Advances in Civil Engineering. 2010.
- YANG, Y.; DIVSHOLI B. S. Sub-Frequency Interval Approach in Electromechanical Impedance Technique for Concrete Structure Health Monitoring. 2010. Sensors. ISSN 1424-8220.

7. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Valder Steffen Júnior pelas importantes contribuições, ao Laboratório de Mecânica de Estruturas e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

8. ABSTRACT

The malfunction of a structure can lead to considerable economic loss as well as a great inconvenience in the lives of the population that uses it. In this sense, studies and experiments should be conducted in order to provide resources for reliable evaluation regarding their status, thus establishing criteria to ensure their use within safety standards. In recent years, researchers have focused on the economic aspects and structural safety. In this sense, Structural Health Monitoring techniques (SHM - Structural Health Monitoring) have been widely studied to increase safety and reduce maintenance costs. Therefore, we studied the SHM technique based on impedance E/M applied in civil structures.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.