

IDENTIFICAÇÃO DE CORROSÕES EM VIGAS USANDO MÉTODOS DE ONDAS DE LAMB E SINAIS DE IMPEDÂNCIA

José dos Reis Vieira de Moura Júnior

Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Naves de Ávila, 2121
mourajr@mourajr.com

Seunghee Park

Department of Civil and Environmental Engineering – KAIST – Korea Advanced Institute of Science and Technology
373-1, Guseong-dong Yuseong-gu, Daejeon 305-701 – Republic of Korea
shparkpc@kaist.ac.kr

Valder Steffen Júnior

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

Daniel J. Inman

Center for Intelligent Material Systems and Structures, Virginia Polytechnic Institute and State University, 310 New Engineering Building, MC 0261, Blacksburg – Virginia 24061 – USA
dinman@vt.edu

Resumo: *O método de monitoramento de integridade estrutural (SHM – Structural Health Monitoring) tem sido útil em detecção de alguns tipos de falhas, tais como corrosões e perdas de rigidez e massa. Da mesma forma, uma outra técnica baseada nas Teorias de Ondas de Lamb também está conseguindo estabelecer quantidades de perdas de massas e espessuras em estruturas finas e longas. O presente trabalho utiliza ambas as metodologias para identificar e caracterizar o dano feito por corrosão em uma longa barra de alumínio. Foram colados dois MFCs (Micro Fiber Composite) em ambas as extremidades do mesmo lado de uma barra. Foram realizados sete casos de corrosão para construir meta-modelos e um para testa-lo. O meta-modelo desenvolvido usando cinco posições de falha e dois níveis de profundidade. Por fim, foram construídos meta-modelos de redes neurais baseados em GRNN (Generalized Regression Neural Network) e RBF (Radial Basis Function) para identificação da posição da falha e identificação da severidade da corrosão respectivamente.*

Palavras-chave: *Deteção de falhas, Corrosão em estruturas longas, Técnica baseada em impedância, Metodologia de ondas de Lamb*

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, dois métodos aplicados a SHM (Structural Health Monitoring – Monitoramento de Integridade Estrutural) têm sido amplamente utilizados para detecção e avaliação de falhas (Farrar et al., 2003). O primeiro é baseado em impedância, o qual as medidas usadas são baseadas em uma métrica do dano obtida pelos sinais de impedância eletro-mecânica, comparando com o sinal da estrutura sem falhas (Bhalla et al., 2000a and 2000b; Liang et al., 1994; Moura Jr and Steffen, 2004a and 2004b; Naidu et al., 2002; Park et al., 1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2001, 2003; Sun et al., 1995). O segundo método é o Método de Ondas de Lamb, o qual um sinal de tensão é aplicado em um sensor enquanto é medido por um outro (Lemistre et al., 1999; Sohn,

2005). Quando uma falha é adicionada, a onda é propagada de uma forma diferente na estrutura, o qual pode ser associada a procedimentos de detecção de falhas (Sohn, 2005).

Assim, o objetivo maior desta contribuição é a aplicação de ambos os métodos em uma viga de Al para identificar falhas causadas por corrosão em diferentes posições e intensidades.

2. METODOLOGIA SHM BASEADA EM ONDAS DE LAMB

Uma metodologia tão amplamente utilizada quanto a baseada em impedância, tem sido aquela que se fundamenta nas chamadas ondas de Lamb (*Lamb waves*) (Farrar et al, 2003). A técnica permite detectar, principalmente, possíveis defeitos presentes em estruturas esbeltas que consigam sofrer perturbações do atuador piezelétrico incorporado.

Para a extração de características, podendo associar as falhas aos sinais adquiridos, existem duas abordagens relatadas na literatura. A primeira tem a ver com a modelagem física do fenômeno (Raghavan and Cesnik, 2005) e, a segunda, se concentra na modelagem dos dados (Lemistre et al., 1999; Sohn, 2005). A abordagem utilizada ao longo desse trabalho é a construída sobre a modelagem dos dados, associando os sinais dos experimentos a uma forma de extração de características baseada em transformadas *wavelets* (Debnath, 2002). O processamento do sinal da transformada *wavelet* aplicada a sinais de ondas de Lamb se aplica especialmente aos casos de identificação de delaminações e rupturas de fibras em estruturas compostas com fibras de carbono/epóxi (Lemistre et al., 1999). Embora as aplicações sejam voltadas, em sua maioria, aos materiais compostos, a técnica pode ser igualmente aplicada a estruturas metálicas, como falhas em trilhos de ferrovias, por exemplo (Park, 2006).

Uma abordagem diferente pode ainda ser feita com as ondas de Lamb, utilizando a transformada rápida de Fourier, detectando frequências características (Lemistre et al, 1999). Desta forma, o modo mais usual de captura destas características no tempo é o uso das transformadas *wavelets* discretas e contínuas (TWD e TWC) (Lemistre et al, 1999).

Os grupos de frequência com largura de banda relativamente constantes podem ser obtidos através da transformada *wavelet* contínua (Lemistre et al., 1999). Algumas aplicações em ensaios não destrutivos têm sido obtidas através desta técnica (James and Ma, 1997; Hayashi *et al.*, 1999).

A decomposição por *wavelets*, alternativamente ao uso da frequência, cria a noção de escala e mapeia um sinal em um plano no tempo-escala, similar ao plano tempo-frequência da transformada de Fourier no tempo (Lemistre et al., 1999). Cada escala no plano tempo-escala corresponde a uma determinada faixa de frequências no plano do tempo-frequência. Assim, a transformada contínua de *wavelet* fornece uma decomposição do sinal $x(t)$ em um conjunto de funções base que são obtidas através da dilatação de uma *wavelet* "mãe", $\Psi(t)$, da equação (1).

$$TWC_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

onde as variáveis contínuas a e b são os parâmetros de escala e translação respectivamente. O sinal então é decomposto pela convolução do tempo com um conjunto de *wavelets* elementares, as quais são versões em escala (estendidas ou comprimidas) da *wavelet* mãe $\Psi(t)$. Desta forma, a *wavelet* mãe pode ser compreendida como a resposta do impulso de um sinal de filtro passa banda de referência (Lemistre et al., 1999). Em geral, a *wavelet* utilizada é a de Morlet complexa (Lemistre et al., 1999), a qual fornece informações tanto sobre a amplitude quanto da fase, possibilitando a visualização das descontinuidades do sinal que possam existir. Para a obtenção da *wavelet* de Morlet complexa, dada pela equação (2), basta realizar o produto de uma função exponencial complexa por uma gaussiana.

$$\Psi(t) = \exp(-ik_0 t) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

A frequência central f_{sc} que corresponde a cada escala da *wavelet*, ou seja, cada um dos filtros passa banda elementar, são obtidos pela equação (3).

$$f_{sc} = \frac{1}{\sigma} \frac{f_0}{sc} \quad (3)$$

onde σ é o desvio padrão gaussiano da *wavelet*, sc é a escala da *wavelet*, ou seja, a relação da duração de tempo da *wavelet* pela duração do tempo do sinal, f_0 é a menor frequência obtida pelo inverso da duração do tempo do sinal.

O sistema de referência bidimensional tempo-escala, ou tempo-frequência criado pela TWC é muito útil na análise de sinais não-estacionários complexos (Lemistre et al, 1999), criando, no entanto, coeficientes redundantes de igual amplitude. Uma forma alternativa para esse processo é a discretização dos parâmetros de escala a e b de tal forma que a base ortonormal das funções $\gamma(t)$ possam ser obtidas, recebendo o nome de Transformada *Wavelet* Discreta (TWD).

Uma família de *wavelets* ortogonais pode ser construída a partir de um número de diferentes bases. Dentre estas, a base mais simples é dada pela função de Haar, descrita pela equação (4) (Debnath, 2002).

$$H(t) = \begin{cases} 1 & \text{para } t \in \left(0, \frac{1}{2}\right) \\ -1 & \text{para } t \in \left(\frac{1}{2}, 1\right) \\ 0 & \text{para outros casos} \end{cases} \quad (4)$$

Dados os problemas inerentes à função de Haar que não possui regularidade do seu decaimento, um aperfeiçoamento da análise pode ser feito com a *wavelet* de Daubechies (Daubechies, 1993). Assim, como mostra a equação (5), para cada um dos r inteiros, as *wavelets* de Daubechies constroem uma base ortonormal e são definidas na forma de funções com dilatações binárias m e com translações diádicas k (Lemistre et al., 1999).

$$\gamma_{m,k}(t) = 2^{\frac{m}{2}} \gamma_r(2^m t - k) \quad (5)$$

Entretanto, nenhuma das *wavelets* de Daubechies pode ser dada em uma forma explícita, podendo ser determinadas recursivamente das funções de escala correspondentes a um filtro de resposta ao impulso finito (Lemistre et al., 1999). Assim, a TWD pode ser descrita de acordo com a equação (6).

$$TWD_{m,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \gamma_{m,k}(t) dt \quad (6)$$

De forma análoga à TWC, a forma sintética da TWD pode ser representada pela equação (7) (Lemistre et al., 1999).

$$x(t) = \sum_m \sum_k TWD_{m,k} \gamma_{m,k}(t) \quad (7)$$

Após a decomposição, o sinal analisado pode ser representado como uma soma dos m níveis dados pela equação (8).

$$x_m(t) = \sum_k TWD_{m,k} \gamma_{m,k}(t) \quad (8)$$

onde esses níveis representam o comportamento do tempo do sinal em diferentes bandas de frequência e dão suas contribuições à energia completa do sinal (Lemistre et al., 1999). Este processo é muito útil para aplicações como compressões de sinais, filtragens frequência-tempo reconstruções parciais (Lemistre et al., 1999). Em especial, os procedimentos apresentados sugerem uma boa opção na extração de características dos sinais, podendo modelar os comportamentos de inserção de falhas em meta-modelos baseados em ensaios experimentais que utilizem a metodologia de monitoramento de integridade estrutural baseada nas ondas de Lamb.

3. METODOLOGIA

A estrutura utilizada neste experimento foi uma viga de alumínio do tamanho aproximado a 80 cm, conforme ilustra a figura 1 a). As falhas por corrosão que foram inseridas na superfície da barra foram feitas utilizando *HCL* (ácido clorídrico). Para isto, foram considerados dois níveis de severidade (leve e grave), como mostra a figura 1 b). O procedimento utilizado foi o mesmo descrito por Simmers Jr (2005).



a) Viga de Al com dois MFCs



b) Exemplo de uma corrosão leve

Figura 1 – Viga de Al utilizada para a identificação de falhas

A figura 2 mostra as posições de corrosões adicionadas à estrutura para o procedimento de identificação de falhas. As condições são:

- Corrosão 1: corrosão leve acrescentada a 15 cm do MFC #1;
- Corrosão 2: corrosão grave acrescentada a 15 cm do MFC #1;
- Corrosão 3: corrosão leve acrescentada a 15 cm do MFC #2;
- Corrosão 4: corrosão grave acrescentada a 15 cm do MFC #1;
- Corrosão 5: corrosão leve acrescentada no meio da barra;
- Corrosão 6: corrosão grave acrescentada no meio da barra;
- Corrosão 7: corrosão leve acrescentada a 6,25 cm do MFC #1;
- Corrosão 8: corrosão grave acrescentada a 6,25 cm do MFC #1;
- Corrosão 9: corrosão leve acrescentada a 6,25 cm do MFC #2.

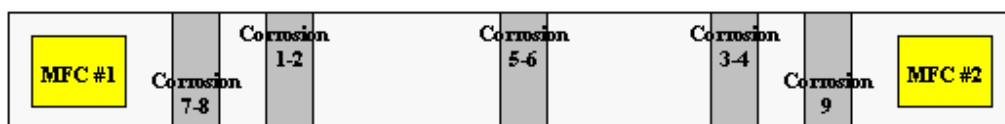


Figura 2 – Figura ilustrativa da estrutura e respectivas posições de corrosão

Assim, a tabela 1 ilustra os experimentos realizados considerando tanto o método de ondas de Lamb quanto os baseados em impedância. A linha em cor diferente (Corrosão 8) foi utilizada como teste de validação do meta-modelo.

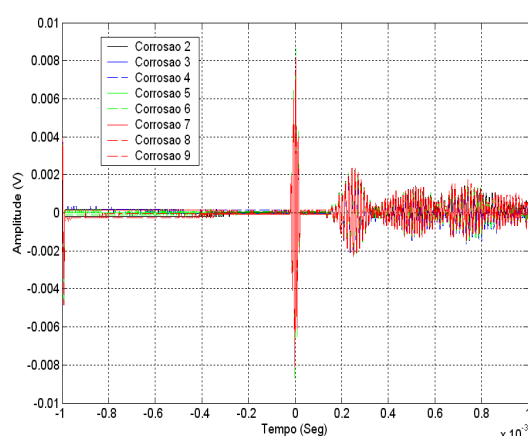
Para tornar a situação mais realista, foram consideradas as condições posteriores à Corrosão 2, simulando uma condição a qual deseja-se avaliar uma estrutura depois que ela esteja em uso, ou seja, os casos sem falhas e Corrosão 1 não estão disponíveis no meta-modelo. Desta forma, a primeira medida considerada é a Corrosão 2, tomando-a como sinal da estrutura sem falhas (sinal de referência). A Corrosão 8 foi considerada como uma condição de teste para validação do meta-modelo de detecção de falhas.

Na coluna *Método de Impedância – MFC #1* da tabela 1, os sinais correspondentes foram obtidos pela medição do sinal da impedância no MFC #1. O mesmo ocorreu para o MFC #2. Os sinais medidos do MFC #2 para o MFC #1 para o caso de ondas de Lamb também foram gravados, mas não serão utilizados ao longo deste trabalho.

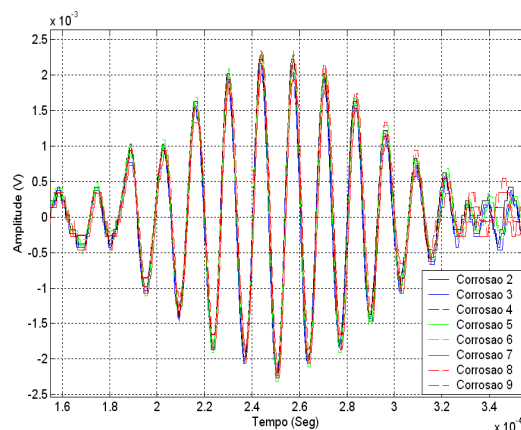
Tabela 1 – Experimentos utilizados para a construção do meta-modelo.

Nome do Exp.	Posição da Falha	Severidade da Falha	Ondas de Lamb - MFC #1 para MFC #2	Método de Impedância - MFC #1	Método de Impedância - MFC #2
Sem falhas	-	-	-	-	-
Corrosão 1	1	1	-	-	-
Corrosão 2	1	2	d2	d21	d22
Corrosão 3	2	1	d3	d31	d32
Corrosão 4	2	2	d4	d41	d42
Corrosão 5	3	1	d5	d51	d52
Corrosão 6	3	2	d6	d61	d62
Corrosão 7	4	1	d7	d71	d72
Corrosão 8	4	2	d8	d81	d82
Corrosão 9	5	1	d9	d91	d92

Primeiramente, o procedimento utilizando ondas de Lamb foram realizados obtendo um sinal para cada corrosão no domínio do tempo, como ilustra a figura 3, na qual todos os sinais são apresentados juntos.



a) sinais completos

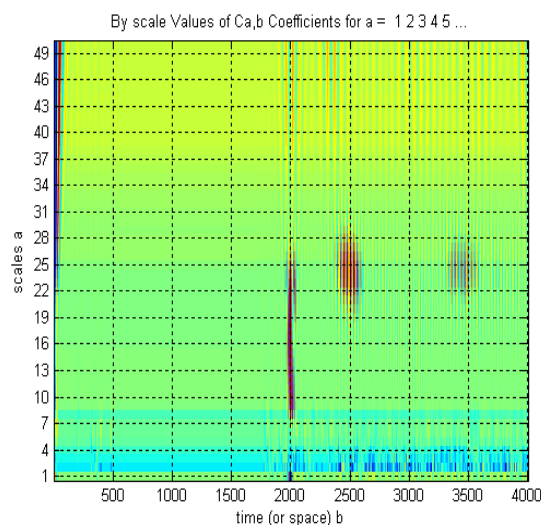


b) parte dos sinais

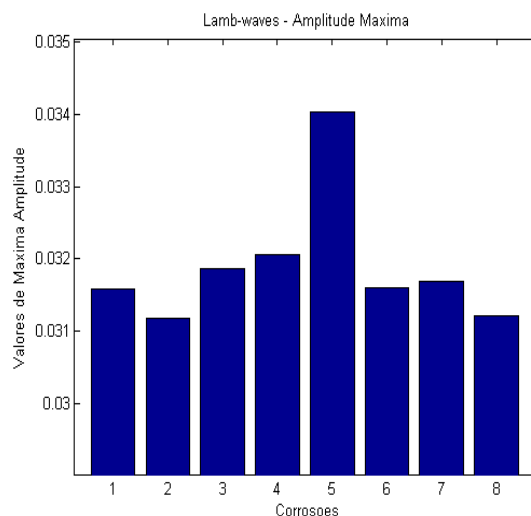
Figura 3 – Sinais obtidos pelos experimentos de ondas de Lamb

Desta forma, todos os sinais no domínio do tempo foram separados em escalas diferentes, gerando uma família de funções. Isto foi feito utilizando a TWC (transformada de Wavelet contínua), como mostra a figura 4 a).

Assim, foi utilizada uma destas funções (escala $a = 17$) gerada a partir da TWC a qual existem diferentes amplitudes do sinal para cada caso de corrosão, como mostrado na figura 4 b). Esta escala foi adotada por ser a maior amplitude da família.

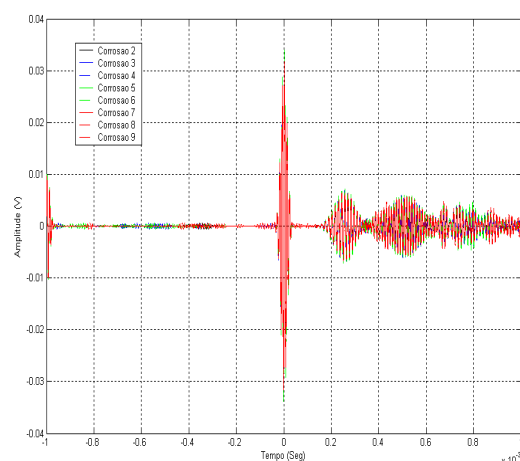


a) TWC de um sinal (Corrosão 9)

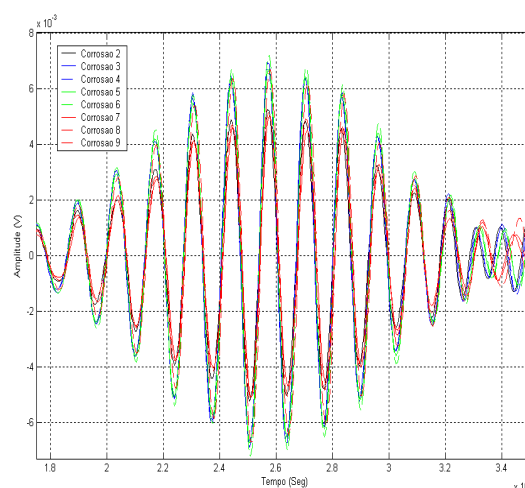


b) amplitude máxima para cada caso de corrosão para a escala = 17

Figure 4 – TWC em todos os casos de corrosão



a) sinais completos

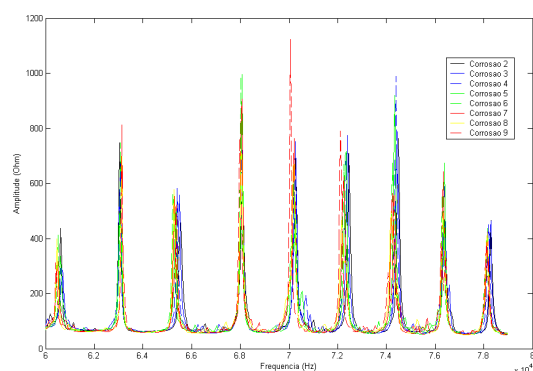


b) partes dos sinais

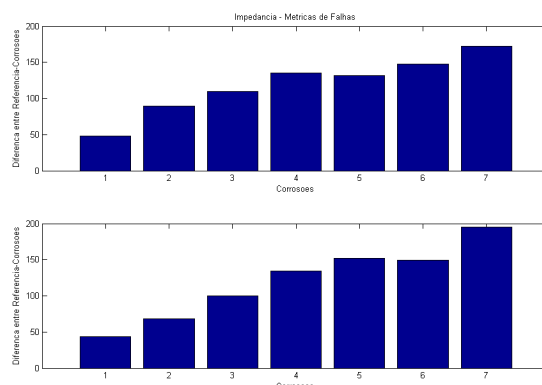
Figure 5 – Todas os sinais de corrosão para a escala $a = 17$

Ao se observar as funções no domínio do tempo para a escala $a = 17$ é possível identificar uma diferença visual entre as amplitudes para cada caso de corrosão como mostra a figura 5.

O método baseado em impedância também foi realizado para obter as métricas de falhas correspondentes de cada caso de corrosão para cada MFC. A figura 6 a) mostra os sinais de impedância para todos os casos medidos do MFC #1. A figura 6 b) mostra as métricas de falhas para os dois MFCs considerando a corrosão 2 como o caso sem falhas.



a) Sinais de impedância do MFC #1



b) Métricas de Falhas dos dois MFCs

Figure 6 – Sinais de impedância

4. IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS

Para identificar completamente uma falha é necessário determinar a posição e a severidade da falha. Neste trabalho, dois diferentes meta-modelos foram construídos para incrementar a precisão e o tornar mais robusto.

O primeiro meta-modelo utiliza os experimentos das ondas de Lamb (o maior valor de amplitude de cada caso de corrosão) e os experimentos baseados em impedância (métrica da falha de cada caso de corrosão de ambos os MFCs). Este meta-modelo foi construído utilizando uma GRNN (General Regression Neural Network – Rede Neural de Regressão Geral) para identificar a posição da corrosão, considerando o MFC #1 como referência: Corrosão 2 – posição 2; corrosões 3 e 4 – posição 4; corrosões 5 e 6 – posição 3; corrosões 7 e 8 – posição 1 e finalmente, corrosão 9 – posição 5.

Da mesma forma, utilizando somente os experimentos baseados em impedância, uma RBF (Radial-basis Function – Rede Neural de Funções de Base Radial) foi construída para identificar a severidade da corrosão baseando-se nos sinais de ambos MFCs.

5. CONCLUSÕES

Com este trabalho foi apresentada a utilização de duas metodologias trabalhando juntas em processos de identificação de falhas em vigas de alumínio. É importante ressaltar a contribuição que cada tipo de análise contribuiu para a elaboração dos meta-modelos, construindo uma forma mais robusta de detecção de falhas.

Diferentes modelos de redes neurais foram testadas, mas a GRNN e a RBF foram as mais adequadas aos processos de detecção de posição e severidade, respectivamente. Como neste caso abordado, a posição da falha era mais complexa que a severidade (cinco posições em contraposição a duas severidades), um meta-modelo mais elaborado foi utilizado com base nas duas metodologias.

6. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao CNPq pela bolsa de Doutorado. Os autores agradecem especialmente a Pablo Tarazaga, Eddie Simmers, Ben Grisso e Dan Peairs pelos auxílios durante as realizações dos experimentos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bhalla, S., Naidu, A. S. K., and Soh, C. K., “Influence of Structure– Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE,” in Proceedings of ISSS-SPIE

- 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems, Bangalore, India (paper no ISSS-SA-502), December 12–14, 2002a.
- Bhalla, S., Naidu, A.S.K., Ong, C.W. and Soh, C.K., “Practical Issues in the Implementation of Electromechanical Impedance Technique for NDE”, in Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems, Melbourne, Australia, December 16-18, 2002b.
- Farrar, C., and Damage Prognosis Team from Weapon Response Group, Los Alamos National Laboratory, “An Introduction to Damage Prognosis”, Pan American Advanced Study Institute on Damage Prognosis, Florianopolis, SC, Brasil, 2003.
- Lemistre, M., Gouyon, R., Kaczmarek, H. and Balageas, D., “Damage Localization in Composite Plates Using Wavelet Transform Processing on Lamb Wave Signals”, Second International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, USA, 1999.
- Liang, C., Sun, F.P., and Rogers, C.A., “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, 1994.
- Moura Jr, J.R.V. and Steffen Jr, V., “Impedance-Based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation”, XXII IMAC, Dearborn, MI, USA, 2004a.
- Moura Jr, J.R.V., “Damage Detection Methods in Aeronautic Structures by Using Meta-Modeling Associated with Impedance Techniques and Smart Structures”, MSc Thesis, Federal University of Uberlandia, Brazil (In Portuguese), 2004b.
- Naidu, A. Bhalla, S., and Soh, C.K., “Incipient Damage Localization with Smart Piezoelectric Transducers using High-Frequency Actuation,” in Proceedings of SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems, Melbourne, Australia, December 16–18, 2002.
- Park, G., Kabeya, K. Cudney, H. H., and Inman, D. J., “Impedance- Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications,” JSME International Journal, Series A, Vol. 42, No. 2, 249–258, 1999a.
- Park, G., Cudney, H., and Inman, D., “Impedance-Based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-Temperature Structures,” in Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, Proceedings of the SPIE, Vol. 3670, 461–469, 1999b.
- Park, G., Cudney, H., and Inman, D. J., “Impedance-Based Health Monitoring of Civil Structural Components,” ASCE Journal of Infrastructure Systems, Vol. 6, No. 4, 153–160, 2000a.
- Park, G., Cudney, H., and Inman, D.J., “An Integrated Health Monitoring Technique Using Structural Impedance Sensors,” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 11, No. 6, 448–455, 2000b.
- Park, G.,Cudney, H., and Inman, D.J., “Feasibility of Using Impedance-Based Damage Assessment for Pipeline Systems,” Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal, Vol. 30, No. 10, 1463–1474, 2001.
- Park, G, Sohn, H., Farrar, C.R. and Inman, D.J., “Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward”, The Shock and Vibration Digest, Vol. 35, No. 6, November 2003, pp. 451-463, 2003.
- Simmers Jr, G.E., “Impedance-Based Health Monitoring to Detect Corrosion”, Master Thesis. Virginia Tech, Blacksburg-VA, USA, 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 Inc., Hoboken, NJ, USA, 2005.
- Sun, F.P., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C.A., “Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor–Actuator,” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 6, 134–139, 1995.

CORROSION DETECTION IN BEAMS BY THE USE OF LAMB WAVES AND IMPEDANCE-BASED METHODS

José dos Reis Vieira de Moura Júnior

Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Naves de Ávila, 2121

mourajr@mourajr.com

Seunghee Park

Department of Civil and Environmental Engineering – KAIST – Korea Advanced Institute of Science and Technology 373-1, Guseong-dong Yuseong-gu, Daejeon 305-701 – Republic of Korea

shparkpc@kaist.ac.kr

Valder Steffen Júnior

Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Naves de Ávila, 2121

vsteffen@mecanica.ufu.br

Daniel J. Inman

Center for Intelligent Material Systems and Structures, Virginia Polytechnic Institute and State University, 310 New Engineering Building, MC 0261, Blacksburg – Virginia 24061 – USA

dinman@vt.edu

ABSTRACT: *The measurement of the signatures of structures based on electro-mechanics impedance has been useful to determine the position of some kinds of damages, as such as corrosion and loss of stiffness or mass. Also, another technique with many good results is the application of Lamb Wave Theories to quantify loss of mass and thickness in flat structures. This proposed work uses both methodologies to identify and characterize the damage made by corrosion in a long aluminum beam. It was bonded two MFCs (Micro Fiber Composite) in both tips of a same side of the aluminum beam. It was done seven cases of corrosion to build the meta-model and one case to test it. The meta-model was developed using five positions of damage and two levels of depth. Finally, it was built a meta-model using Generalized Regression Neural Network and Radial Basis Function Neural Network for damage position and severity identification respectively.*

Key words: *Damage detection, Corrosion in flat structures, Impedance-based technique, Lamb wave methodology*