

DETERMINAÇÃO DE DANOS EM VIGAS USANDO TRANSFORMADA DE WAVELET

Ramon S. Y. C. Silva, Luciano M. Bezerra, Marcus A. N. Brito

^a*Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro SG-12,70910-900, Brasil, ramon@unb.br, <http://e-groups.unb.br/ft/enc/estruturas/>*

Palavras-chave: Wavelets, Danos, Daubechies, Biorthogonal.

Resumo. Diversas são as técnicas de exame não-destrutivo para a detecção de danos em estruturas. Entretanto, geralmente estas técnicas são caras e exigem uma análise acurada de boa extensão da estrutura. As técnicas numéricas podem auxiliar no exame não-destrutivo de estruturas, apontando possível localização do dano e, portanto, diminuindo a região de análise e tornando o exame não-destrutivo menos dispendioso. Entre os métodos numéricos mais usados para a detecção de danos destacam-se os métodos dos elementos finitos e dos elementos de contorno. Geralmente, procede-se a comparação entre assinaturas obtidas antes e após o surgimento do dano, assinaturas estas e definidas em termos de deslocamentos, frequências, modos de vibrar, tensões, etc... Seria importante que a indicação da posição de um dano pudesse ser indicada sem o uso da comparação de assinaturas, apenas partindo-se da resposta da estrutura danificada. Este artigo apresenta aplicações da Transformada de *Wavelet* para a detecção de danos em vigas submetidas a carregamentos estáticos e diferentes condições de contorno. A modelagem do dano é feita em elementos finitos com o auxílio do programa ANSYS e o dano simulado através da supressão de alguns elementos finitos. A resposta estática (em deslocamento) da estrutura com o dano simulado é usada em análises de detecção da posição do dano utilizando para isso a Transformada de Wavelet. Dois tipos de wavelet-mãe, a de Daubechies e a Biorthogonal são aqui utilizadas. Os resultados das análises são apresentados e comentados neste artigo.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta um método recente para a detecção de danos estruturais ou patologias e, portanto, pode auxiliar no monitoramento da saúde estrutural. Este método utiliza as transformadas de wavelet para analisar os sinais de deslocamento, frequências, modos de vibrar, tensões e etc.

Uma fissura em uma estrutura induz uma flexibilidade local que afeta o comportamento dinâmico de toda a estrutura. Isto resulta também na redução das frequências naturais e em mudanças nos modos de vibração. A análise destas transformadas podem ajudar na detecção dos danos (Douka et al., 2003)

Para detectar o dano usando métodos modais, muitas vezes é necessária uma análise dinâmica completa e é geralmente realizada por uma análise utilizando o método dos elementos finitos para localizar e quantificar este dano. Este procedimento tem várias dificuldades: Primeiro, nem sempre é possível ou conveniente medir a resposta de vibração da estrutura antes do dano. Segundo, muitas vezes não é viável conduzir uma detalhada análise dinâmica de toda a estrutura. Terceiro, às vezes é difícil obter com precisão as propriedades dos materiais para uma análise dinâmica mais precisa. Além disso, não é fácil extrair informação local causada por um dano pequeno a partir de parâmetros modais que caracterizam o comportamento global da estrutura (Wang e Deng, 1999).

Nos últimos anos, a análise de wavelet tem-se revelado uma ferramenta em estudo para a detecção de danos e tem se mostrado promissora devido ser muito precisa na detecção mesmo de pequenas alterações localizadas em um modo de vibração ou medidas de deslocamento causada pela presença de uma fissura. As transformadas de wavelet possuem características úteis de localização e não requer a diferenciação numérica dos dados medidos (Newland, 1994a, b).

2 AS TRANSFORMADAS DE WAVELET

Considerando um sinal de interesse no domínio do tempo (ou do espaço) no intervalo $(-\infty, \infty)$ e $\Psi(t)$ os valores da função de wavelet localizado no domínio do tempo e da frequência. Chamamos $\Psi(t)$ de "wavelet mãe". As wavelets são geradas a partir da wavelet-mãe por translação e dilatação, conforme abaixo:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

A wavelet $\Psi_{a,b}$ está associada ao parâmetro de dilatação a e ao parâmetro de translação b . Ela oscila na frequência a^{-1} e está posicionada no tempo (ou espaço) b . A transformada de wavelet de um sinal qualquer $f(t)$ é definida por:

$$c_{a,b} = c_{a,b}(t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{a,b}(t_0) dt \quad (2)$$

O resultado desta transformação $c_{a,b}$ é chamado de coeficientes de wavelet para a

wavelet $\Psi_{a,b}$. Estes coeficientes são muito sensíveis a descontinuidades e singularidades presentes em um sinal. Considerando esta propriedade, foi descoberto que o dano devido a uma perda súbita de rigidez pode ser detectado através dos modos de vibração com os coeficientes de wavelet que alcançam grandes amplitudes como um pico ou um impulso que naturalmente surge no local do dano. Esta perturbação devido ao dano é mais clara nas finas escalas da wavelet. Este procedimento é a base da detecção de dano usando wavelets (Estrada, 2008).

Wavelets (Ψ) com parâmetros inteiros são geralmente usadas nas transformadas de wavelet, por exemplo, podem ser geradas de uma wavelet-mãe usando valores de dilatações de a e translações de b baseados na potência de 2. Este procedimento reduz o esforço computacional nos cálculos dos coeficientes de wavelet. A dilatação a é definida como $a = 2^j$ e a translação $b = k2^j$ com $(j,k) \in \mathbb{Z}$. Sendo assim, as wavelets são geradas e representadas conforme mostra a equação 2.10 e a Figura 1.

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - k) \quad (3)$$

Onde j e k são os índices de dilatação (escala) e translação (posição) respectivamente.

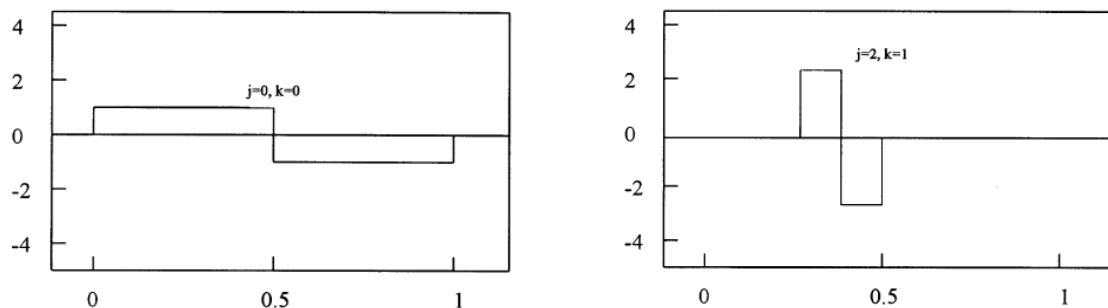


Figura 1 – Wavelets: (a) “Haar Wavelet mãe”, (b) Wavelet com $j=2$ e $k=1$

2.1 Propriedades das wavelets

As funções wavelet possuem diferentes propriedades que lhes permitem ser mais apropriadas para determinados fins. Segundo Estrada (2008), as propriedades mais relevantes que uma função wavelet precisa ter para auxiliar em um processo de detecção de danos são:

- Ortogonalidade e biortogonalidade: Estas propriedades garantem o cálculo rápido dos coeficientes de wavelet. Infelizmente, nem todas as funções de wavelet possuem estas duas propriedades;
- Suporte compacto: Esta propriedade significa que a função wavelet não assume o valor zero para intervalos finitos. Esta propriedade permite

representar de forma mais eficiente os sinais que têm características localizadas;

- Momento de decaimento: Esta propriedade determina o grau do polinômio que podem ser aproximados. Esta propriedade é usada para selecionar a wavelet-mãe mais adequada para a detecção de danos;
- Regularidade: É o número de vezes que uma função é diferenciável no ponto x_0 . Singularidades em uma função podem ser detectadas por essa regularidade.

De acordo com estas propriedades, as wavelet-mãe mais conhecidas são classificadas em (Ovanesova and Suarez, 2004):

- A wavelet de Haar, Daubechies de ordem N, Meyer, Symlets de ordem N e a Coiflets de ordem N são exemplos wavelet-mãe ortogonais;
- A wavelet de Haar, Daubechies de ordem N, Symlets de ordem N e a Coiflets de ordem N são wavelet-mãe que possuem suporte compacto;
- A wavelet de Daubechies de ordem N, Symlets de ordem N e a Coiflets de ordem N são wavelet-mãe que possuem um número arbitrário de momentos de decaimento;
- A wavelet de Morlet, Meyer e Gaussian são wavelet-mãe regulares. Por outro lado, a Daubechies de ordem N, a Symlets de ordem N e a Coiflets de ordem N são wavelet-mãe que possuem uma regularidade pobre.

3 ESTUDO NUMÉRICO

Nesta seção apresenta-se o modelo numérico em elementos finitos de duas vigas com uma fissura transversal e diferentes condições de contorno submetidas a um carregamento estático. As vigas foram modeladas utilizando o elemento PLANE42 da biblioteca do programa ANSYS 11.0. Este elemento possui dois nós e três graus de liberdade por nó.

Os sinais de resposta dos deslocamentos obtidos no ANSYS foram analisados no programa Matlab para o cálculo dos coeficientes de wavelet.

3.1 Viga em balanço sob carregamento estático

A viga em balanço submetida à uma carga $F = 500\text{kN}$ e a uma fissura de tamanho $a = 0,025\text{m}$ localizada a uma distância $d = 0,125\text{m}$ da extremidade engastada está apresentada na Figura 2.

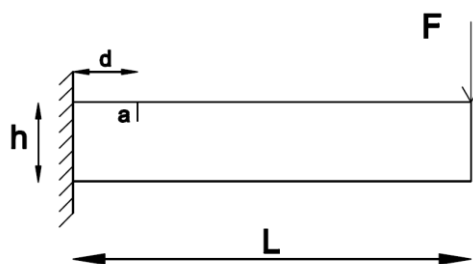


Figura 2 – Modelo da viga em balanço

A viga discretizada em 4000 elementos está apresentada na Figura 3 e para aplicar as transformadas de wavelet, utilizou-se os 500 nós no fundo da viga.

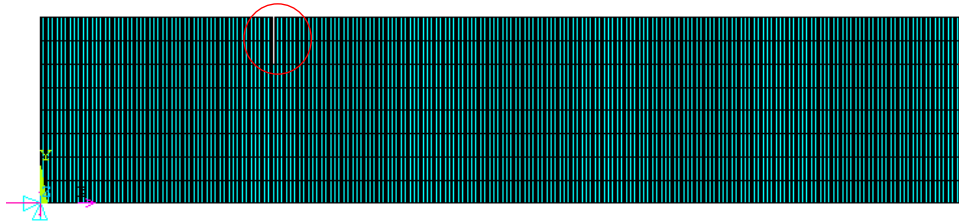


Figura 3 – Modelo em elementos finitos da viga em balanço

As propriedades geométricas e dos materiais da viga em balanço estão apresentadas na Tabela 1.

| Propriedades | Símbolo | Valor | Unidade |
|-------------------------|---------|------------------------|-------------------|
| Base da viga | b | 0,10 | m |
| Altura da viga | h | 0,10 | m |
| Área | S | 0,01 | m ² |
| Momento de Inércia | I | $8,333 \times 10^{-6}$ | m ⁴ |
| Comprimento da viga | L | 0,50 | m |
| Módulo de elasticidade | E | 200,00 | GPa |
| Massa específica | ρ | 7850,00 | Kg/m ³ |
| Coefficiente de poisson | ν | 0,30 | - |

Tabela 1 – Propriedades geométricas e dos materiais da viga em balanço

A deflexão da viga submetida à uma carga estática com e sem fissura está apresentada na Figura 4.

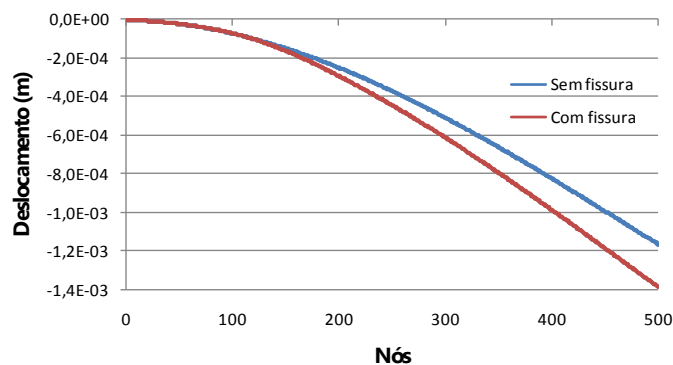


Figura 4 – Deflexão da viga em balanço com e sem fissura

A transformada de wavelet foi aplicada no sinal de deslocamento dos nós no fundo da viga. Os coeficientes de wavelet foram calculados utilizando-se duas wavelet-mãe: a Biorthogonal(bior6.8) e a Daubechies(db2). As figuras 5 e 6 apresentam os coeficientes de wavelet para a bior6.8 e db2 respectivamente.

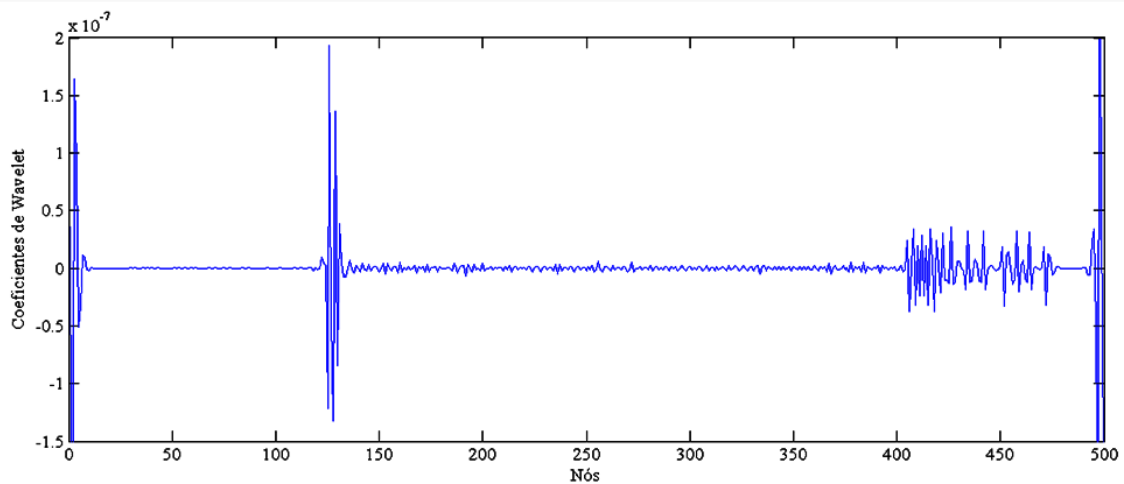


Figura 5 – Coeficientes de wavelet usando bior6.8

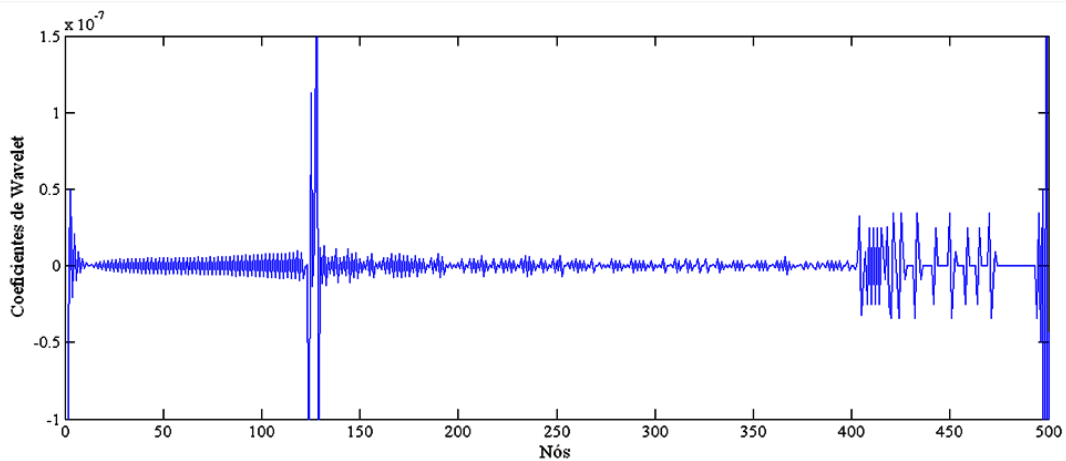


Figura 6 – Coeficientes de wavelet usando db2

Como já era esperado, a presença da fissura não foi identificada apenas fazendo a comparação da deflexão da viga com e sem fissura, mas as transformadas de wavelet utilizando as duas wavelet-mãe detectaram a presença da fissura através de um pulso na região danificada. Os gráficos das Figuras 5 e 6 apresentaram pequenas perturbações nas extremidades devido as discontinuidades geométricas no engaste e na extremidade livre.

3.2 Viga bi-engastada sob carregamento estático

A viga biengastada submetida à uma carga $F = 500\text{kN}$ e a uma fissura de tamanho $a = 0,025\text{m}$ localizada a uma distância $d = 0,125\text{m}$ da extremidade esquerda está apresentada na Figura 7.

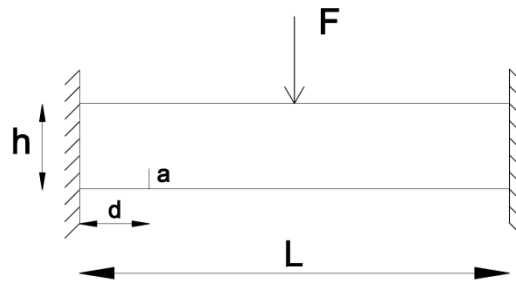


Figura 7 – Modelo da viga bi-engastada

A discretização e as propriedades da viga bi-engastada são as mesmas para a viga em balanço. O modelo em elementos finitos da viga bi-engastada está apresentado na Figura 8.

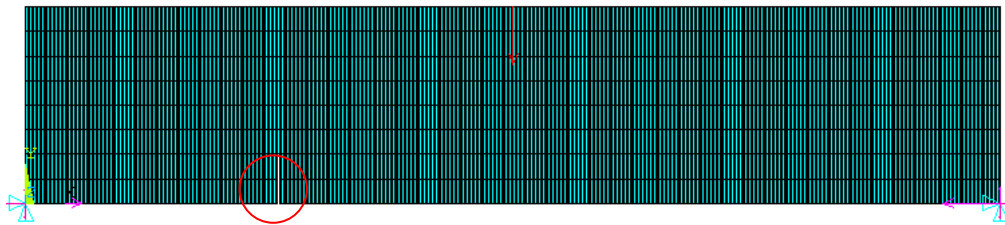


Figura 8 – Modelo em elementos finitos da viga bi-engastada

A deflexão da viga submetida à uma carga estática com e sem fissura está apresentada na Figura 9.

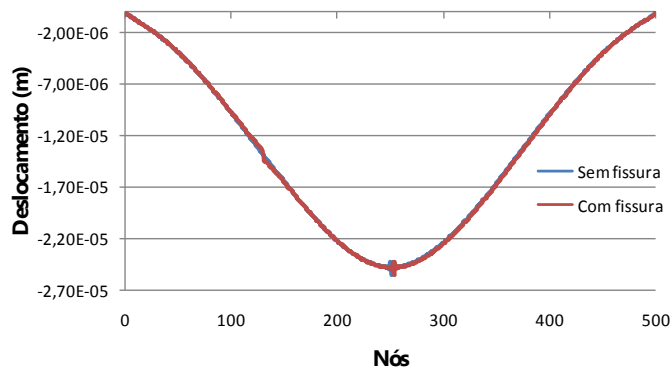


Figura 9 – Deflexão da viga em bi-engastada com e sem fissura

Os coeficientes de wavelet para as wavelet-mãe bior6.8 e db2 estão apresentados nas Figuras 10 e 11.

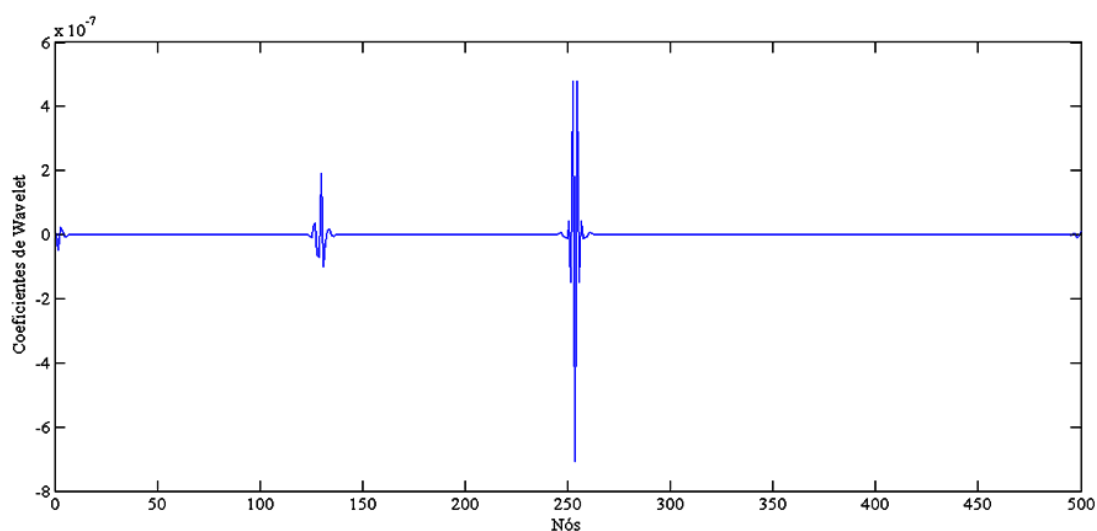


Figura 10 – Coeficientes de wavelet usando bior6.8

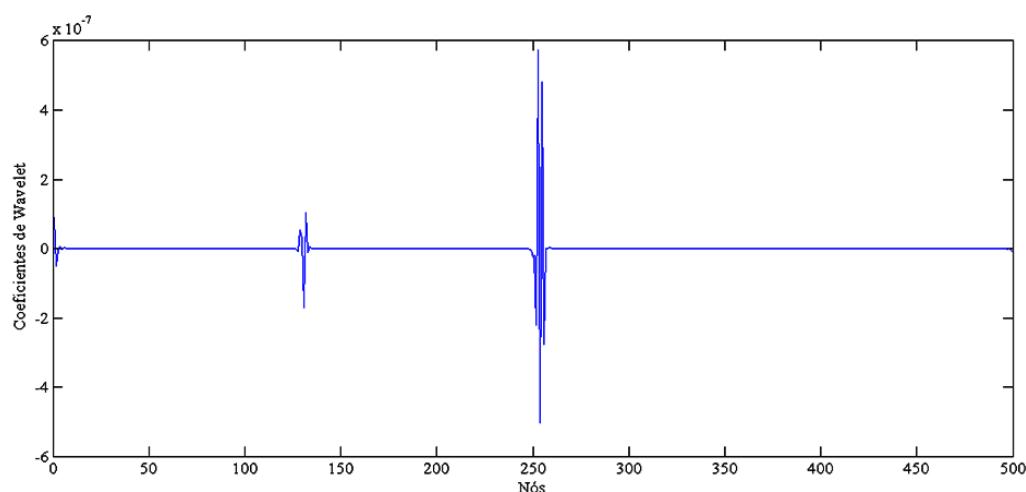


Figura 11 – Coeficientes de wavelet usando db2

Da mesma forma que na viga em balanço a presença da fissura não foi identificada apenas fazendo a comparação da deflexão da viga com e sem a fissura.

As transformadas de wavelet detectaram a presença da fissura na estrutura e também a presença da carga concentrada no meio do vão.

4 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia para detecção de danos em vigas para diferentes condições de contorno e submetidas à um carregamento estático.

As duas wavelet-mãe utilizadas na aplicação das transformadas de wavelet foram capazes de identificar a presença e a localização exata da fissura

As wavelets são capazes de detectar também singularidades no sinal devido a presença de um carregamento e devido à uma descontinuidade geométrica nos apoios da estrutura.

As transformadas de wavelet são uma alternativa em relação aos métodos modais

tradicionais. A principal vantagem do uso das transformadas de wavelet é que a mesma pode identificar a presença do dano somente a partir da resposta da estrutura já danificada.

REFERÊNCIAS

- Douka, E., Loutridis, S., Trochidis, A., Crack identification in beams using wavelet analysis. *International Journal of Solids and Structures* 40, 3557–3569, 2003.
- Estrada, E. S., Damage Detection Methods in Bridges through Vibration Monitoring: Evaluation and Application. *Doctoral Thesis, University of Minho*, 2008.
- Newland, D.E., Wavelet analysis of vibration, part I: theory. *Journal of Vibration and Acoustics* 116, 409–416, 1994a.
- Newland, D.E., Wavelet analysis of vibration, part II: wavelet maps. *Journal of Vibration and Acoustics* 116, 416–425, 1994b.
- Ovanesova, A.V. and Suárez, L.E., Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures, *Engineering Structures*, 26, 39-49, 2004.
- Wang, Q., Deng, X.M., Damage detection with spatial wavelets. *International Journal of Solids and Structures* 36, 3443–3468, 1999.