



MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS, BASEADO NA VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS CAUSADAS PELA APLICAÇÃO DE UMA MASSA ADICIONAL USANDO AS TRANSFORMADAS DE WAVELET.

Erwin Ulises Lopez Palechor.

erwin@aluno.unb.br

Doutorando em Estruturas e Construção Civil, UnB

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Prédio SG-12, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil.

Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva.

ramon@unb.br

Doutor em Estruturas e Construção Civil, UnB

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Prédio SG-12, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil.

Luciano Mendes Bezerra.

lmbz@unb.br

Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Prédio SG-12, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil.

Marcus Vinicius Girão de Moraes.

mvmoraes@unb.br

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, UnB

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Bloco G, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil.

Resumo. *Devido à necessidade de monitoração contínua de estruturas, tais como: pontes, oleodutos, edifícios, barragens, entre outras, e também, à necessidade de busca de técnicas eficientes que auxiliem nessa monitoração visando à identificação de danos, apresenta-se neste artigo um método para a identificação de danos em vigas metálicas, baseado na variação da frequência fundamental, provocada pela aplicação de uma massa móvel ao longo de toda a estrutura. Os resultados desta aplicação em modelos numéricos de vigas metálicas biapoçadas simuladas no programa ANSYS, são apresentados e discutidos neste artigo.*

Palavra-chave: *Danos, Frequências, Wavelets, Massa, Metálicas.*

1 INTRODUÇÃO

É bem sabido que as fissuras são danos que ocorrem frequentemente em membros estruturais e podem causar graves patologias e levar a estrutura ao colapso. Os efeitos desses danos influenciam na resposta dinâmica da estrutura (frequências e modos de vibração), mas se a fissura é relativamente pequena, é difícil de detectar. Tais fissuras devem ser identificadas no seu estado inicial antes de comprometer a integridade da estrutura.

Embora o conceito de identificação estrutural tenha sido introduzido na Engenharia Civil há quase duas décadas (Aktan et al. 1997), é importante propor métodos eficazes e práticos para identificar este tipo de problemas.

Enquanto muitas fissuras superficiais em componentes acessíveis tais como: vigas de pontes, oleodutos superficiais, asas de aviões, podem ser detectadas utilizando técnicas de inspeção visual, não é possível identificar visualmente fissuras nas estruturas com revestimento externo e isolamento ou fissuras superficiais em lugares inacessíveis. Visando contribuir para superar estas deficiências, técnicas não destrutivas tem sido aplicadas possibilitando assim a tomada rápida de decisão quanto à minimização ou eliminação dos danos.

Especialmente em gasodutos e oleodutos, a detecção de danos é uma questão importante do ponto de vista da segurança. Portanto, é essencial realizar a inspeção periódica em tubulações para detectar alterações na sua estabilidade estrutural. O custo destes reparos é obviamente menor do que a de reconstrução de todo o sistema de oleodutos. Em pontes esses danos podem ocorrer em diferentes membros estruturais tais como: vigas longarinas, tabuleiro, vigas transversinas, devido a muitos fatores tais como a ação de carregamentos cíclicos denominado como fenômeno da fadiga, comprometendo seriamente a segurança da estrutura e das pessoas que circulam pela ponte.

O método utilizando wavelets e massas adicionais no sistema, pode ser uma alternativa viável em relação aos demais métodos tradicionais, visto que pode ser aplicado no processo de identificação de danos apenas utilizando a resposta danificada da estrutura, mais especificamente a frequência fundamental, o que se aproxima mais da realidade, já que a resposta da estrutura intacta é raramente conhecida (Estrada 2008).

As técnicas de monitoramento têm recebido especial atenção, entre as quais a análise dinâmica para a detecção de danos tem sido a mais popular, por causa da simplicidade de implementação e por terem parâmetros sensíveis ao dano (Radzieński et al., 2011). Uma pesquisa recente sobre as literaturas técnicas mostra que os algoritmos de identificação de danos foram desenvolvidos utilizando as características dinâmicas, especialmente, no domínio da frequência (Doebeling et al., 1996).

2 TRANSFORMADA DE WAVELET

A análise de Wavelet é uma abordagem diferente, a teoria baseia-se na ideia de que qualquer sinal pode ser dividido em uma série de funções base chamadas de “ondas”. Esta técnica também permite a utilização de janelas com tamanho variável, e a utilização de intervalos de tempo e espaço longos e curtos para captar a informação necessária (Figura 1).



Figura 1- Transformada de Wavelet (Misiti 2001).

Uma grande vantagem proporcionada pelas wavelets é a capacidade de realizar análises locais. Considere um sinal senoidal com uma pequena descontinuidade pouco visível como apresentada na Figura 2.

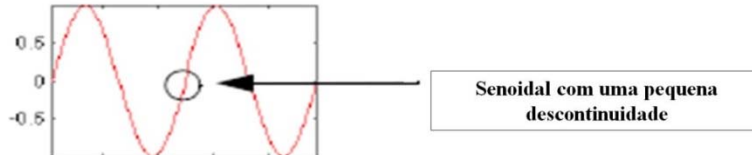


Figura 2 - Pontos de descontinuidade no sinal.

Ao aplicar a Transformada de Wavelet sobre o sinal anterior, foi obtida uma descontinuidade ou perturbação, no gráfico dos coeficientes wavelet (Figura 3).

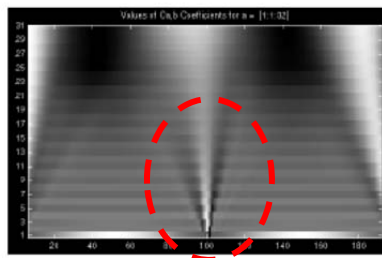


Figura 3. Coeficientes Wavelet.

A decomposição wavelet calcula um “índice de semelhança” entre o sinal e a função wavelet-mãe escolhida. Este índice é grande quando a semelhança é forte.

Para o sinal $f(x)$ no intervalo $[a, b]$, a transformada de wavelet é obtida com a seguinte fórmula:

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{a,b}(x) dx \quad (1)$$

Onde $C_{a,b}$ é o coeficiente wavelet gerado pela integral; $\psi_{a,b}(x)$, é a função wavelet-mãe que faz parte das diferentes famílias-wavelet. Os coeficientes a e b são os parâmetros de escala e posição respectivamente (Wu e Wang 2011).

A Transformada de Wavelet inclui: a Transformada Contínua de Wavelet (TCW) e a Transformada Discreta de Wavelet (TDW). A diferença entre as duas, é na forma de representação gráfica da escala. As características de cada uma são as seguintes:

A **TCW** é definida como a soma sobre todo o tempo (ou espaço) do sinal multiplicado pela escala.

$$C(\text{escala}, \text{posição}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi(\text{escala}, \text{posição}) dx \quad (2)$$

O resultado da TCW são os coeficientes que estão em função da escala e da posição.

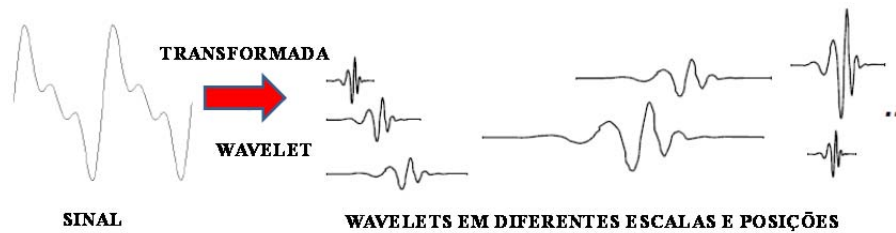


Figura 4 - Exemplo função wavelet-mãe em diferentes escalas.

Os cinco passos para a obtenção e plotagem dos coeficientes wavelet são:

1. Escolher uma função wavelet-mãe e compará-la a uma seção no início do sinal original.
2. Calcular o número C , que representa a semelhança entre a wavelet e o sinal no intervalo analisado. Observa-se que os resultados dependem da forma da wavelet escolhida (Figura 5).

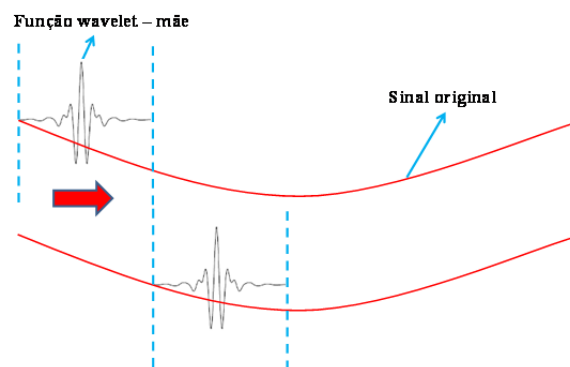


Figura 5 - Ilustração calculo coeficientes wavelet.

3. O seguinte passo é colocar a wavelet para a direita e repetir os passos 1 e 2, até que seja coberto todo o sinal (Figura 5).
4. Escalar a wavelet no trecho analisado e repetir os passos 1 a 3 (Figura 6) .

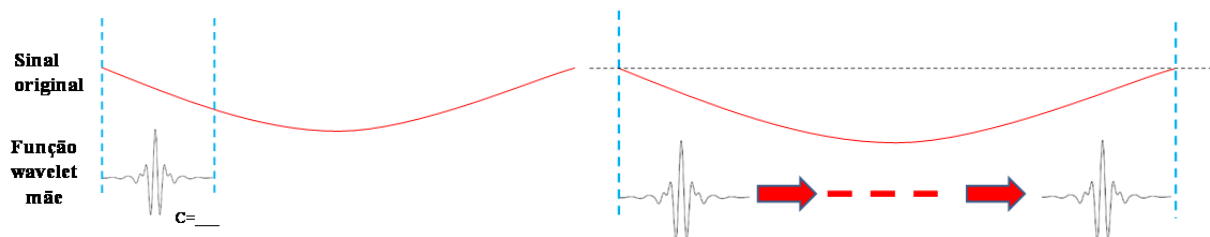


Figura 6 - Ilustração translação da função wavelet-mãe.

5. Repetir os passos 1 a 4 para todas as escalas.

O resultado final serão os coeficientes produzidos para diferentes escalas. Para a representação dos resultados, o eixo x representa a posição ao longo do sinal (tempo ou espaço), o eixo y representa a escala (a), e a cor de cada ponto xy representa a magnitude dos coeficientes wavelet C . Na Figura 7 mostra os nomes dos eixos para a representação dos coeficientes gerados pelas Transformadas de Wavelet.

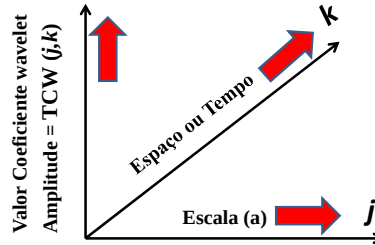


Figura 7 – Nomes eixos dos gráficos da TCW (Gutierrez, 2002).

A transformada contínua de wavelet, a wavelet $\psi^{a,b}$ pode ser descrita como uma função analítica, que depende do parâmetro a (escala), e do parâmetro b (translação) que muda continuamente sobre todo $\mathbb{R}$, excluindo $a = 0$. A transformada contínua de wavelet é definida pela seguinte equação:

$$W_{\psi}^f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (3)$$

O cálculo dos coeficientes wavelet em cada escala possível gera uma boa quantidade de dados, para minimizar esta tarefa se faz a escolha de apenas um subconjunto de escalas e posições. As escalas e posições escolhidas são baseadas em potências de dois, chamadas de escalas diádicas, o que resulta em uma análise muito mais eficiente. Esta análise é chamada de Transformada Discreta de Wavelet (TDW) (Ovanesova 2000).

Para este fim, a escala é definida como $a = 2^j$ e a translação ou deslocamento $b = k2^j$ onde $(j, k) \in \mathbb{Z}$ e $\mathbb{Z}$ é o conjunto dos números inteiros. Usando estes parâmetros, a TDW é dada como:

$$TDW_{j,k} = 2^{-j/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi(2^{-j}x - k) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{j,k}(x) dx \quad (4)$$

Estes são os passos para a detecção de danos usando o TDW:

1. Obtenção de um sinal associado com a resposta da estrutura completa.
2. Cálculo dos coeficientes de wavelet efetuando a TDW do sinal em níveis diferentes ou escalas diferentes. Os coeficientes Wavelet $C_{j,k}$ são obtidos a partir da seguinte equação:

$$C_{j,k} = \int_{\mathbb{Z}} f(x) \psi_{j,k}(x) dx \quad (5)$$

Onde $f(x)$ é o sinal analisado, $j \in N$ e é a escala e $k \in Z$ e é a posição, N é o conjunto de todos os inteiros positivos, Z é o conjunto de todos os números inteiros, e $\psi_{j,k}(x)$ é a Wavelet expressa como:

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \psi_{j,k}(2^j x - k) \quad (6)$$

3. Plotagem do gráfico dos coeficientes de Wavelet.

Após a plotagem dos coeficientes Wavelet, examinar a distribuição, a mudança brusca (isto é, um pico) significa uma perturbação local. Se a perturbação detectada não é causada por uma fonte conhecida, como a descontinuidade geométrica ou do material, então isso significa que existe um dano perto do local da perturbação.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

A presente metodologia visa avaliar e identificar danos em estruturas utilizando somente a resposta danificada e consiste na obtenção da frequência fundamental da estrutura quando é adicionada uma massa no sistema localizada em diferentes pontos da estrutura.

O processo de obtenção desta primeira frequência é repetido ao longo da estrutura previamente discretizada em elementos de igual comprimento. Após a obtenção das frequências, estas são interpoladas pelo método Spline Cubico para obter uma maior quantidade de pontos e em seguida aplica-se a Transformada Discreta de Wavelet naquela curva com o objetivo de localizar a região danificada da estrutura.

A metodologia será validada com a modelagem numérica de uma viga metálica biapoiada (perfil-I, laminado), de 6m de comprimento. Com as características apresentadas na Tabela 1. A seguir é apresentado o roteiro para a aplicação da metodologia proposta:

1) Discretização da estrutura:

Antes de começar a análise da estrutura se deve fazer uma discretização da mesma. No caso da viga metálica de 6m de comprimento a discretização foi feita em 30 elementos de igual comprimento (20 cm) e 31 nós, como mostrado na Figura 8. Estes 31 nós são os pontos para fixação da massa adicional na estrutura.

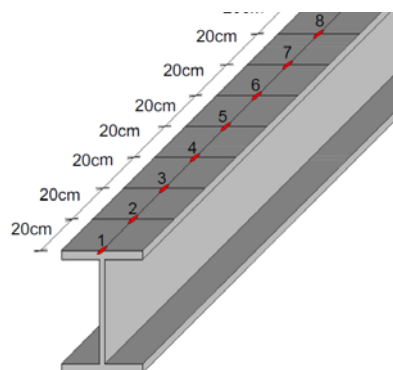


Figura 8- Discretização da viga.

2) Escolha do valor da massa concentrada.

A massa concentrada dever ter um valor proporcional à massa total da estrutura, no caso específico da viga metálica foi escolhida uma massa de 5.714 kg, aproximadamente 8% do

peso total da viga, este peso foi escolhido para compatibilizar os resultados dos ensaios que paralelamente estão sendo desenvolvidos nesta pesquisa.

3) Posicionamento da massa no primeiro nó.

Após a escolha da massa adicional, esta deve ser posicionada sobre o primeiro nó. Durante o processo de fixação da massa se deve evitar que a frequência natural da massa adicional não gere uma perturbação na obtenção das frequências da estrutura (Figura 9).

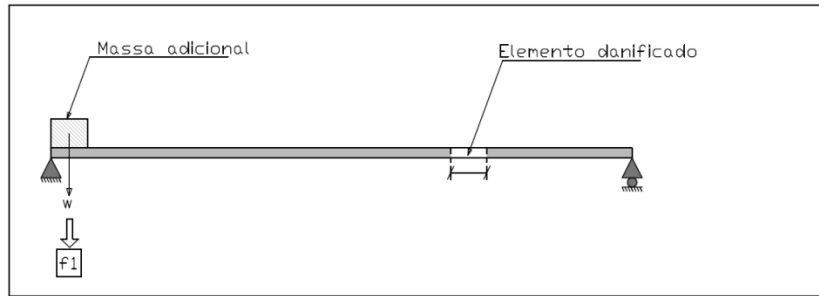


Figura 9- Posicionamento da massa adicional no primeiro nó.

4) Obtenção da primeira frequência (F_1)

Nesta etapa é feita a obtenção da primeira frequência natural da estrutura, correspondente ao primeiro modo de vibração vertical.

5) Reposicionamento da massa concentrada no seguinte nó.

Após a obtenção da primeira frequência para a primeira posição de massa, esta é reposicionada no próximo nó (nó 2) (Figura 10).

6) Obtenção da primeira frequência para a posição de massa atual.

Com a nova posição de massa é obtida a primeira frequência.

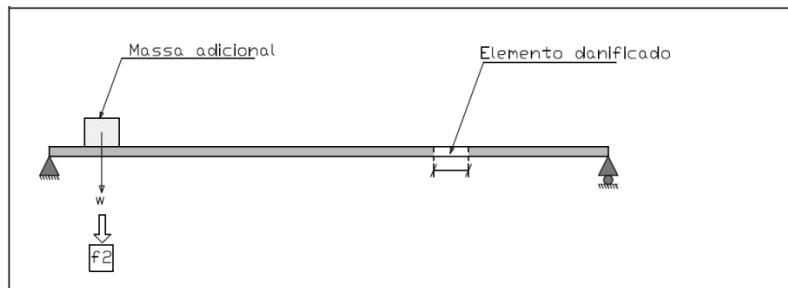


Figura 10- Posicionamento da massa adicional no segundo nó.

7) O passo 5) e 6) é repetido até percorrer todos os nós da estrutura discretizada.

8) Gerar o gráfico discreto Posição de Massa (Nº nó) Vs. Frequência Fundamental (F_1).

No método de identificação de danos proposto neste artigo é utilizada a Transformada Discreta de Wavelet, por isso foi necessário aplicar o método de interpolação sob os dados correspondentes ao gráfico obtido no passo 7. Segundo Palechor (2013), dentre os métodos de interpolação analisados, o método mais adequado para utilizar no processo de identificação de danos é o Spline Cubico.

9) Na curva anteriormente interpolada (passo 8) é aplicada a Transformada Discreta de Wavelet. De acordo com Palechor (2013), as funções wavelet-mãe: bio2.6, bior6.8, sym6 e db5 apresentaram bons resultados na identificação do dano. Estas funções têm as seguintes

características em comum: grau arbitrário de regularidade, número arbitrário de momentos nulos, as funções são simétricas no eixo y-y e tem um suporte compacto.

De acordo com Rytter (1993), o método de identificação de danos proposto neste artigo está classificado como método de identificação de danos nível II, que considera que a estrutura está danificada e visa a localização do dano.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

Neste capítulo serão apresentados os resultados da análise numérica feita no programa ANSYS (versão 11.0) para uma viga (perfil-I) biapoada. Esta análise foi feita na tentativa de reproduzir as condições da análise experimental que paralelamente está sendo desenvolvida nesta pesquisa.

As características geométricas e do material da viga modelada são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades da viga (perfil-I).DADOS PERFIL-I

Material	Aço
h (m)	0,1016
bf (m)	0,0676
tw (m)	0,00483
tf (m)	0,0074
E (Pa)	2,000474E+11
Modulo de Poisson	0,3
A (m ²)	1,4316E-03
I _x (m ⁴)	2,4513E-06
I _y (m ⁴)	3,818E-06
Comprimento (m)	6
ρ(densidade kg/m ³)	7,8581456E+03

4.1 Modelagem numérica Elemento BEAM3.

Foram feitas modelagens com vários elementos da biblioteca do programa Ansys11.0, mais os melhores resultados foram obtidos com a modelagem feita utilizando o elemento BEAM3.

Para ter um parâmetro de controle do modelo numérico foi extraída a primeira frequência do modelo da viga intacta e foi comparada com a frequência obtida do desenvolvimento analítico da viga de Euler Bernoulli (Tabela 2).

Tabela 2 – Frequências Modelagem numérica elemento BEAM3.

f(Hz)	Viga Bernoulli BEAM3	Analítica	Diferença (%)
1	9.209	9.110	1.083

A modelagem com o elemento BEAM3 apresentou um erro de 1,083%, em relação à frequência fundamental obtida analiticamente.

O elemento BEAM3 é um elemento uniaxial com tensão, compressão e capacidade de flexão. O elemento tem três graus de liberdade por nó; translação nos eixos X e Y e rotação ao redor do eixo Z.

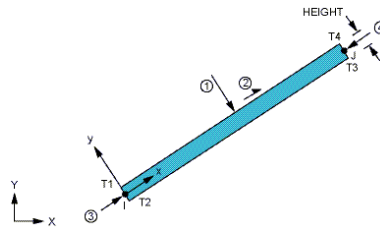


Figura 11- Elemento BEAM3, da Biblioteca (ANSYS, 2007).

A Figura 11 mostra a geometria do elemento, a localização dos nós e o sistema de coordenadas deste elemento. O elemento é definido por dois nós, a área da seção transversal, a altura (h), o momento de inércia e as propriedades do material. As características do elemento BEAM3 estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3- Características elemento BEAM3.	
CARACTERÍSTICAS DO ELEMENTO BEAM3	
Nodes	I, J
Graus de liberdade	UX, UY, ROTZ
Constantes Reais	AREA – Área da seção transversal
	IZZ – Momento de inércia
	HEIGHT – altura do elemento
Propriedades do Material	ADDMASS – massa por unidade de comprimento
	EX, ALPX (ou CTEX ou THSX), DENS, GXY, DAMP

O tamanho da malha foi escolhido em função de viabilizar da melhor forma a simulação do dano, visando a utilização de uma serra circular de espessura 5mm para fazer o entalhe nos ensaios experimentais. A malha escolhida possui 1200 elementos, gerando elementos de 5mm de comprimento (Figura 13), além disso, foi feito o estudo de convergência, verificando-se que a primeira frequência fica estável e é imediata para qualquer tamanho da malha (Figura 12).

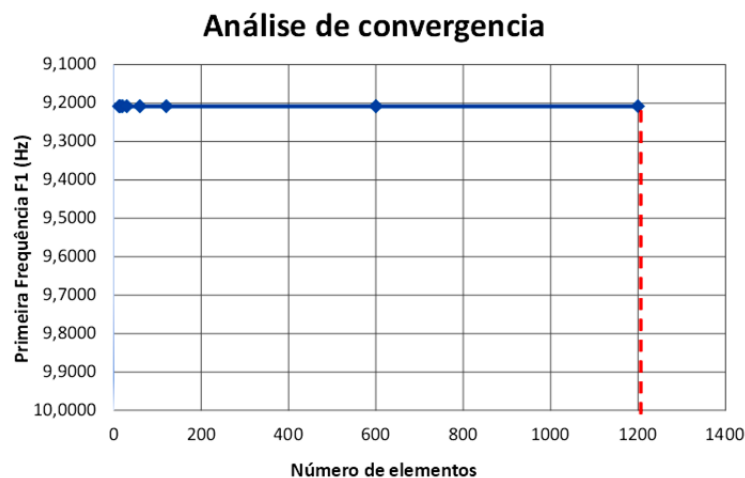


Figura 12- Gráfico da convergência para o elemento BEAM3.

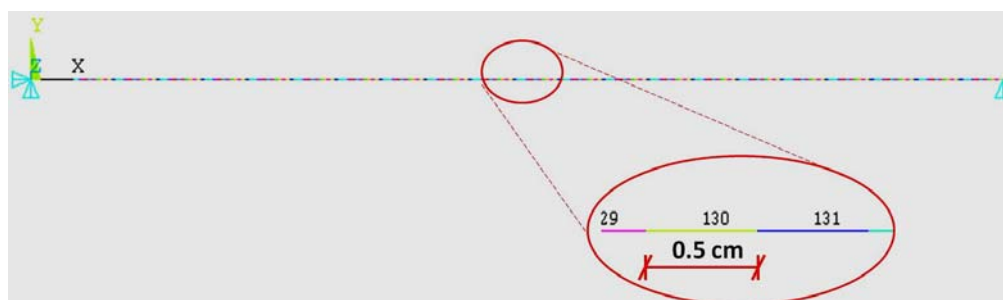


Figura 13- Malha viga com o elemento BEAM3 (ANSYS, 2007).

De acordo com a metodologia proposta no passo 1), a massa adicional foi localizada nos 31 nós correspondentes a discretização apresentada. A discretização feita no Ansys com 1200 elementos tem como finalidade a simulação do dano (tamanho 5mm), pelo qual foram compatibilizados os nós da malha gerada com os 31 nós propostos na discretização inicial e os nós gerados com a malha do Ansys. Assim os dados de frequências obtidos foram os correspondentes a esses 31 nós.

As propriedades da viga que foram introduzidas na modelagem com o elemento BEAM3 foram obtidas experimentalmente, exceto o coeficiente de Poisson, conforme a Tabela 1.

Para simular o local danificado, foi feita uma diminuição da rigidez à flexão da viga (EI) (Figura 14) em função da diminuição da seção transversal e do momento de inércia (I_x) no elemento danificado considerando a posição do dano em dois casos de dano apresentados na Tabela 4.

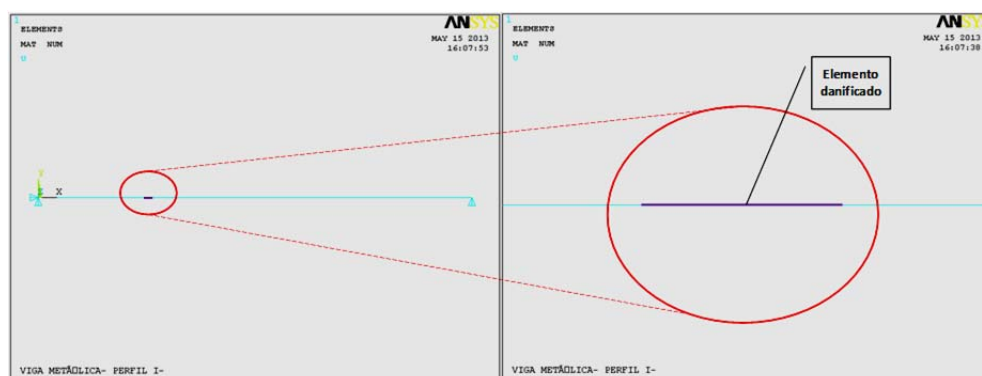


Figura 14- Simulação do dano- elemento BEAM3 (ANSYS, 2007).

As condições dos apoios são mostradas na Figura 15. O apoio do lado esquerdo é um apoio de segundo gênero, restringindo o deslocamento vertical e horizontal e do lado direito é um apoio de primeiro gênero, restringindo apenas o deslocamento vertical (viga biapoiada).

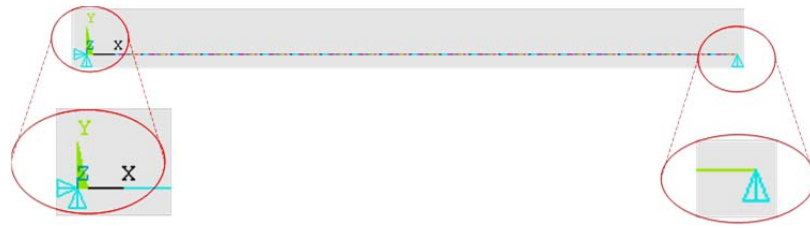


Figura 15- Apoios viga-elemento BEAM3 (ANSYS, 2007).

A massa adicional foi simulada utilizando o elemento MASS21, como mostra a Figura 16, este é um elemento de massa concentrada, podendo ter até seis graus de liberdade, sendo três translações e três rotações nas direções x, y e z. Valores de massa e inércia rotacional podem ser atribuídos a cada direção das coordenadas.

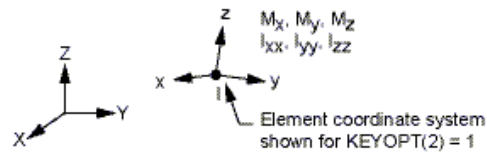


Figura 16- elemento MASS21 (ANSYS, 2007).

Na modelagem numérica foi considerada a ação da inércia rotacional da massa. Esta propriedade foi introduzida dentro das constantes reais do elemento MASS21. O eixo de rotação da massa adicional foi considerado como sendo paralelo ao eixo longitudinal e que passa pelo centro de gravidade.

Na Tabela 4 são apresentados os dois casos de dano propostos. Nela são expostas a localização do dano, a diminuição da área e consequentemente a diminuição do momento de inércia da seção transversal e a rigidez a flexão EI da viga.

Tabela 4- Casos de dano analisados.

Caso	Posição do dano (m) (dano1/dano2)	Nº elementos Eliminados (dano1/dano2)	Área danificada (cm ²)	Área (cm ²) (dano1/dano2)	Inercia Ix (cm ⁴) (dano1/dano2)	% Diminuição rigidez a flexão <u>EI</u>
Intacta	--	--	0	14.5	249	0.00
1	3	4	1.00048	13.2	226.49	9.04
2	2	16	4.00192	10.2	159.76	35.84
	4	8	2.00096	12.2	204.25	17.97

4.2 Caso 1

O dano esta localizado na metade do vão (3m), o dano simulado é o correspondente e um entalhe num lado da mesa inferior da viga. A largura do entalhe é a largura correspondente a espessura de um disco de corte convencional, visando na simulação do dano na análise experimental. A diminuição da seção transversal para o Caso 1 provoca uma diminuição na rigidez a flexão EI de 9.04%, esta porcentagem de diminuição na rigidez a flexão EI foi introduzida no elemento danificado (Figura 17).

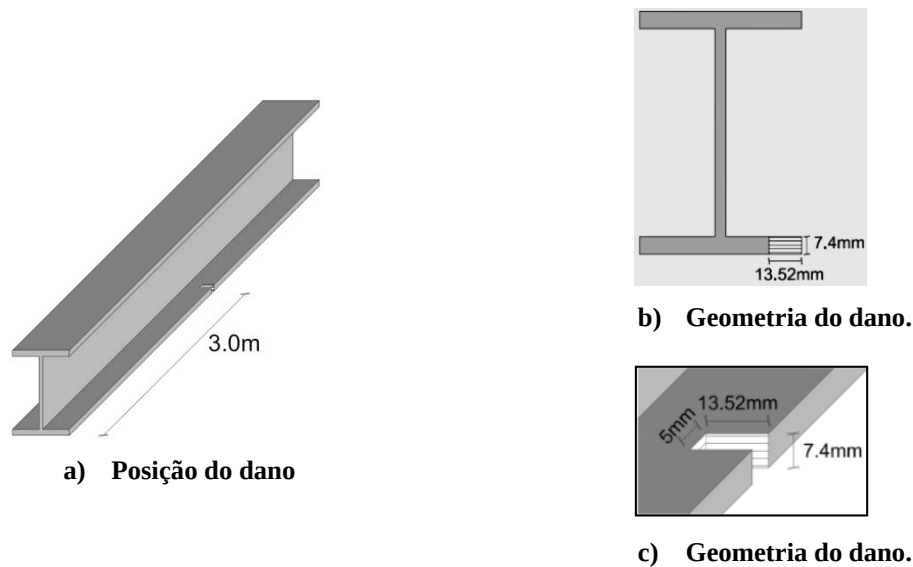


Figura 17- Caso 1.

Após aplicação da metodologia proposta anteriormente, na Figura 18, apresenta-se o gráfico discreto dos dados correspondentes a Posição da Massa Vs. Frequência Fundamental, obtidos para as 31 posições da massa adicional ao longo da viga e a sua respetiva interpolação utilizando o método Spline Cubico incrementando de 31 para 100 pontos. A massa utilizada foi de 5.714kg, para se ter uma compatibilidade com os resultados nos ensaios experimentais que estão em andamento.

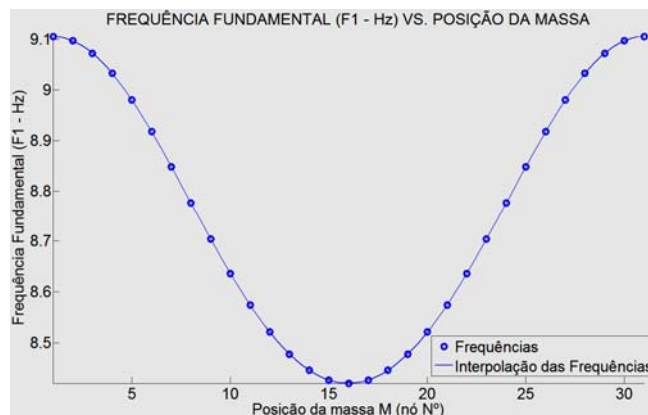


Figura 18- Interpolação gráfico Frequência (F1) Vs. Posição de massa, Caso 1.

A perturbação gerada pela diminuição da rigidez a flexão do elemento danificado não é visível, por isto é necessário aplicar a Transformada Discreta de Wavelet e plotar o gráfico Coeficientes Wavelets Vs. Posição da Massa, assim o gráfico apresentará uma perturbação na região danificada.

No processo de aplicação das Transformadas Discretas de Wavelet faz-se necessário escolher uma função wavelet mãe, no nosso caso foram escolhidas duas funções recomendadas por Palechor(2013), elas são: Sym6 e Coif3. Os gráficos correspondentes a os coeficientes wavelets são apresentados na Figura 19, onde é claramente visível a perturbação gerada ao redor do nó 15 (metade do vão =3m) da viga. Esses gráficos também apresentam descontinuidades elevadas nos extremos, isto devido às restrições dos apoios.

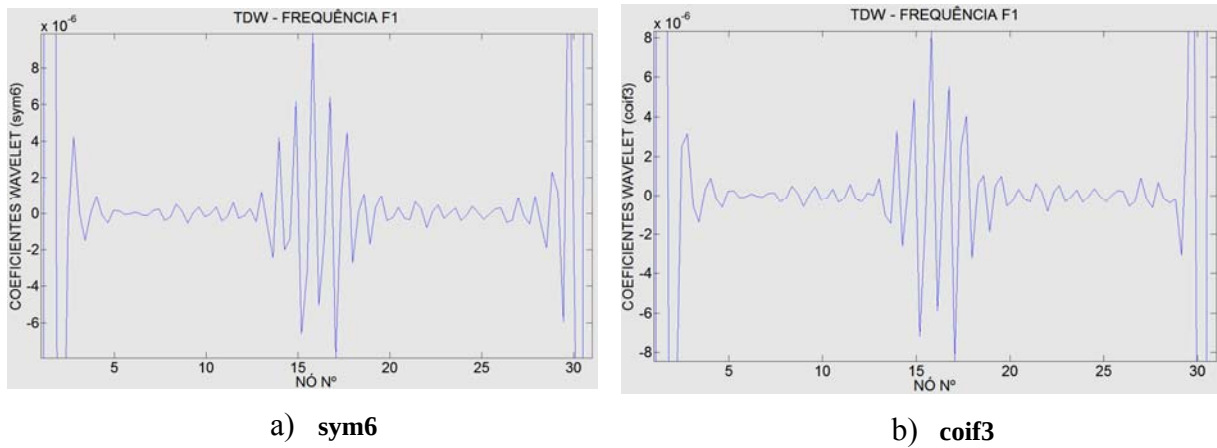


Figura 19- TDW Caso1.

4.3 Caso 2

O caso de dano 2, tem duas posições do dano, a 2 e 4m (Figura 20), provocando uma diminuição da rigidez a flexão de 35.84% e 17.97% respetivamente.

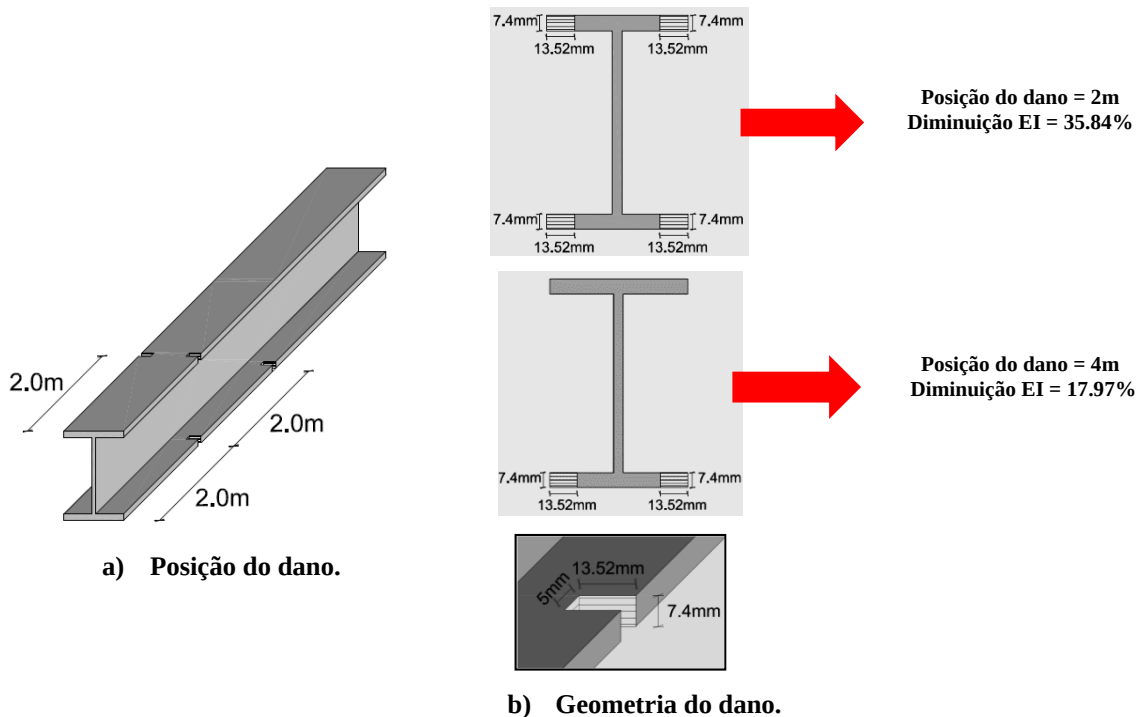


Figura 20- Caso 2.

Na Figura 21 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a Posição de Massa Vs. Frequência Fundamental descrita e depois interpolada como método de interpolação Spline Cubico. A massa utilizada foi de 5.714kg.

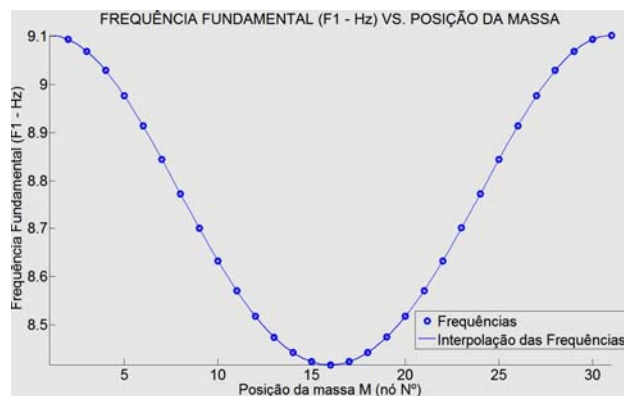


Figura 21- Interpolação gráfico Frequência (F1) Vs. Posição de massa, Caso 2.

Na curva interpolada da Figura 21 foram aplicadas as Transformadas Discretas de Wavelets da mesma forma como foram aplicada no caso 1.

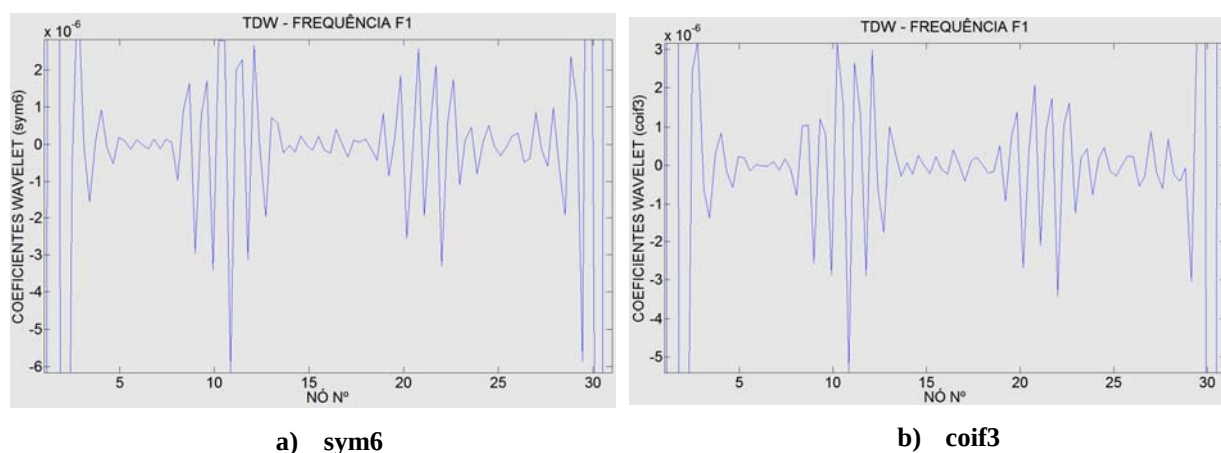


Figura 22- TDW Caso1.

Na Figura 22 é claramente visível a perturbação dos coeficientes wavelets ao redor do nó 10 e do nó 20, correspondentes às distancias do dano de 2m e 4m. Esses gráficos apresentam perturbações nos extremos, isto devido à descontinuidade geométrica e a presença do apoio.

5 ENSAIOS PRELIMINARES.

O artigo apresentado faz parte de um projeto de pesquisa em andamento, no qual estão previstos análises experimentais, analíticas e numéricas (com introdução do ruído) em modelos de vigas e tubos danificados. No artigo apresentado anteriormente não foi considerado o ruído no sinal de frequências (Gráfico Posição de Massa Vs. Frequência).

Nos ensaios realizados inicialmente foram utilizadas vigas intactas com as mesmas condições da viga simulada numericamente no programa ANSYS. Foi considerada uma massa de 5.714kg, correspondente a montagem da massa adicional no sistema. Tal massa, foi fixada por meio de placas metálicas e parafusos (Figuras 23a e 23b), mudando sua posição, até percorrer os 31 nós de acordo com a metodologia proposta neste artigo.

Inicialmente foram coletados 31 espectros de acelerações correspondentes as 31 posições da massa adicional em cada nó da estrutura, após foi feita a análise de Fourier e foram identificadas as frequências fundamentais para cada posição de massa. Esses dados foram

plotados na Figura 24 (linha vermelha) na qual mostra que a variação da primeira frequência por causa da posição da massa adicional não é a variação esperada. Para resolver esta dificuldade foi utilizado o método chamado de Energy Centrobatic Correction Method (ECCM) proposto por Zheng et al (2009). Este método propõe uma alternativa para uma obtenção mais precisa das frequências produto da FFT (erro=0,4% da frequência analítica), por que o espectro de frequências pode ser calculado com apenas um número limitado de dados o que gera o efeito de vazamento espectral, dificultando a obtenção precisa das frequências. O método está baseado na energia do espectro da janela de Hanning (Zhong et al., 2008).

Segundo Ding et al. se f_s é a frequências de amostragem, N é o numero de pontos da FFT, m é o numero da linha espectral, a melhor estimacão da frequência w_0 do sinal, pode ser obtida como:

$$w_0 = \frac{\sum_{i=-n}^n Y_i(m+i)}{\sum_{i=-n}^n Y_i} f_s / N \quad (7)$$

Onde a correção do valor da frequência pode ser expresso como:

$$\Delta w = (w_0 - m f_s / N) / (\frac{f_s}{N}) \quad (8)$$

Onde:

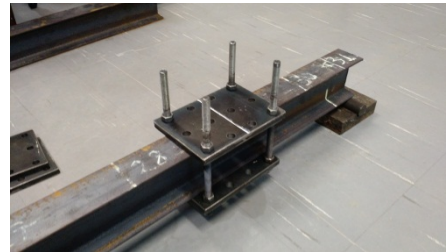
f : frequência corrigida.

f_s : frequência de amostragem.

N : tamanho da mostra.



a) Viga biapoiada



b) Massa adicional.

Figura 23- TDW Caso1.

O resultado obtido nos ensaios prévios experimentais aplicando a metodologia proposta neste artigo, são apresentados na Figura 24, nela pode-se apreciar a linha vermelha indicam os valores da primeira frequência em função da posição da massa sem a aplicação do método de correção espectral, já na linha azul é apresentado o gráfico correspondente a primeira frequência corrigida utilizando o método de correção espectral para cada posição da massa. Nesta figura é claramente visível a diferença da obtenção das frequências sem correção espectral e com correção. A curva em azul é aproximadamente igual ao comportamento da

curva nos modelos numéricos, o que dá para perceber que o método proposto neste artigo é viável.

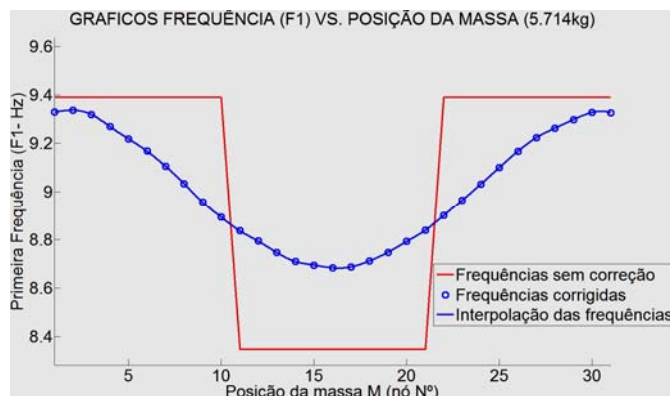


Figura 24- Posição de massa Vs. Primeira Frequência.

CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia alternativa para os métodos tradicionais de identificação de dano utilizando apenas a resposta da estrutura danificada, enquanto os métodos tradicionais precisam fazer comparações entre a resposta da estrutura intacta e a resposta da estrutura danificada.

Os resultados dos coeficientes wavelet para a TDW usando as wavelet-mãe: *coif3* e *sym6* foram muito eficientes no processo de identificação do dano. Os gráficos também apresentaram sensibilidade às descontinuidades geométricas geradas pelos apoios.

As estruturas em serviço exigem manutenção e monitoramento contínuo para garantir a sua integridade e funcionalidade. Durante os últimos anos, muitas pesquisas têm sido feitas e discutidas em torno de vários métodos para identificação de dano. Os avanços alcançados usando a variação das frequências associadas as Transformadas de Wavelets são uma alternativa para se obter uma boa manutenção, pois mudanças bruscas nas frequências podem indicar uma possível região danificada.

Os testes preliminares em vigas intactas em escala real, apresentaram bons resultados em relação a obtenção da curva Posição de massa Vs. Frequência Fundamental, a qual serve como base para a aplicação das Transformadas Discretas de Wavelet e posteriormente a localização do dano.

REFERÊNCIAS

Aktan, A. E., Farhey, D. N., Helmicki, A. J., et al., 1997. Structural Identification for Condition Assessment: Experimental Arts. *Journal of Structural Engineering*, vol. 123, n. 12, pp. 1674–1684.

Doebbling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., Shevitz, D. . Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics. , 1996. Los Alamos National Laboratory.

Estrada, R. S., 2008. *Damage Detection Methods in Bridges through Vibration Monitoring : Evaluation and Application*. PhD thesis, University of Minho.

Gutierrez, C. E. C., 2002. *Eliminação do ruído por encolhimento de wavelets*. Msc dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro/Brasil.

Misiti, M., Poggi, J., 2001. *Wavelet Toolbox For Use with MATLAB*. Natick/Massachusetts.

Ovanesova, A. V., 2000. *Applications of Wavelets to Crack Detection in Frame Structures*. PhD thesis, University of Puerto Rico.

Palechor, E. U. L., 2013. *Identificação de Danos em Vigas Metálicas Utilizando Wavelets e Dados Numéricos e Experimentais*. Msc dissertação de mestrado, Universidade de Brasília/Brasil.

Rytter, A. *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures.*, 1993. Aalborg University.

Radzieński, M.; Krawczuk, M.; Palacz, M. Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 25, n. 6, p. 2169–2190, 2011.

Wu, N., Wang, Q., 2011. Experimental studies on damage detection of beam structures with wavelet transform. *International Journal of Engineering Science*, vol. 49, n. 3, pp. 253–261.

Zheng, C. S., Ding, K., Yang, Z. J. Noise influence on frequency estimation accuracy from energy centrobaric correction method for discrete spectrum. 2009 *IEEE International Conference on Information and Automation*, ICIA 2009, , n. 50875085, p. 1477–1481, 2009.

ZhonG, S.; Oyadiji, S. O.; Ding, K. Response-only method for damage detection of beam-like structures using high accuracy frequencies with auxiliary mass spatial probing. *Journal of Sound and Vibration*, v. 311, n. 3-5, p. 1075–1099, 2008.