

IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM VIGAS METÁLICAS UTILIZANDO MASSAS ITINERANTES ADICIONAIS, ANÁLISE EXPERIMENTAL.

Erwin Ulises Lopez Palechor^{1(*)}, Luciano Mendes Bezerra²
Marcus Vinicius Girão de Moraes³, Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva⁴

Resumo

Devido à necessidade de monitoração contínua de estruturas, tais como: pontes, oleodutos, edifícios, barragens, entre outras, e também devido à necessidade de buscar técnicas eficientes e práticas que auxiliem nessa monitoração visando à identificação de danos, apresenta-se neste artigo um método para a identificação de danos em vigas metálicas utilizando apenas a reposta da estrutura danificada, baseado na variação da frequência fundamental provocada pela aplicação de uma massa móvel adicional ao longo da estrutura. A aplicação do método e os resultados desta análise são apresentados para vigas metálicas de tamanho comercial e mostram que o método pode ser usado na detecção de danos ou de regiões com danos estruturais.

Palavras-chave: Danos, Frequências, Wavelets, Massa adicional, Metálicas.

1 Introdução

As fissuras ocorrem frequentemente em membros estruturais e causam graves patologias estruturais ou 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. Entretanto, o ideal é que esses danos possam ser identificados no seu estado inicial antes de comprometer a integridade e a vida útil da estrutura (Choi 2002). O conceito de identificação estrutural foi introduzido na engenharia civil há quase duas décadas por diversos

¹ Doutor em Estruturas e Construção Civil, Professor do Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Cariri, Campus Juazeiro do Norte, erwin.lopez@ufca.edu.br.

² PhD em Mecânica Computacional, Professor do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, lmbz@unb.br

³ Doutor em Ciências Mecânicas, Professor do Programa de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, mumorais@unb.br

⁴ Doutor em Estruturas, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, ramon@unb.br

pesquisadores (Aktan et al. 1997, Breysse et al. 2008) com propostas de métodos que nem sempre se mostram eficazes e práticos para identificar este tipo de dano.

Uma pesquisa recente na literatura técnica (Li et al. 2009) mostra que os algoritmos de identificação de danos tiveram um avanço significativo e foram desenvolvidos utilizando-se dados de carregamentos estáticos e também dinâmicos. Na linha de carregamentos estáticos, Bezerra e Saigal (1993) e mais recentemente, Buda e Caddemi (2007) estudaram a detecção de trincas abertas e fechadas em painéis convexos e não convexos a partir do Método dos Elementos de Contorno. No domínio da frequência, destacam-se os trabalhos de Doebling et al. (1996) e Hu et al. (2010).

Especialmente em pontes, a detecção de danos é uma questão importante do ponto de vista da segurança e economia. Portanto, é essencial realizar a inspeção periódica para detectar alterações na estabilidade estrutural (Estrada 2008). O custo de reparar as estruturas com sérios danos é obviamente menor do que o de reconstrução de todo o sistema estrutural. Nota-se ainda que num sistema estrutural esses danos podem ocorrer em diferentes membros estruturais tais como: vigas longarinas, tabuleiros de pontes, vigas transversinas. Obviamente, tais danos podem ser provocados por muitos fatores, tais como a ação de carregamentos cíclicos que, eventualmente, podem gerar fadiga. Tais danos podem comprometer seriamente a segurança da estrutura e das pessoas que circulam pela ponte, entre outros riscos.

As técnicas de monitoramento de danos em estruturas têm recebido especial atenção, entre as quais a análise dinâmica para a detecção de danos tem sido a mais popular. E isso se deve a simplicidade em que hoje as análises das propriedades dinâmicas de estruturas podem ser facilmente implementadas. Some-se a isso a sensibilidade que alguns parâmetros dinâmicos apresentam diante da presença de danos em uma estrutura (Radziński et al. 2011).

Neste trabalho foi escolhida como parâmetro de medição das propriedades dinâmicas de vigas metálicas (Perfis-I) a frequência fundamental, mas o trabalho vale para qualquer frequência que se possa escolher. Esta frequência age como um indicador sensível da integridade estrutural, portanto, uma análise da estrutura com certa periodicidade na medição de algumas propriedades dinâmicas desta estrutura pode ser usada para monitorar o estado da ponte. Estas medições de frequência associadas às Transformadas de Wavelets podem fornecer uma técnica com potencial de avaliação de baixo custo e alta praticidade de estruturas de grande

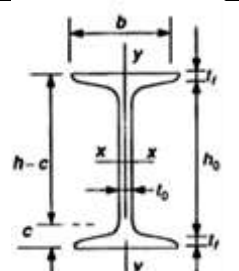
porte, como pontes, viadutos, por conta da facilidade na aquisição apenas de parâmetros dinâmicos como as frequências naturais. De fato, tal potencialidade da técnica fundamenta-se apenas no requisito da leitura de um acelerômetro estrategicamente localizado ao longo da estrutura a ser analisada.

2 Uso de massas adicionais.

Neste trabalho é apresentado um método de identificação de danos baseado na análise das propriedades dinâmicas (ensaio de impacto ou transiente) de vigas metálicas (Perfis-I) biapoiados em escala real, submetidas à presença de danos e massas móveis adicionais. O papel fundamental da massa móvel é gerar uma mudança na frequência quando esta é posicionada em diferentes pontos ao longo da viga. Com as frequências e as posições da massa adicional respectivamente, é possível obter uma curva suave sobre a qual são aplicadas as TDW para identificar pequenas perturbações que são causadas pela mudança na rigidez da estrutura (danos), e podem não ser tão evidentes na curva anteriormente descrita, sendo assim, faz-se necessário o uso de ferramentas adicionais como as Transformadas Discretas de Wavelet (TDW) e cujo papel é explicado posteriormente. Assim, as TDW auxiliam no processo de localização das possíveis alterações devidas ao enfraquecimento da estrutura pela presença do dano (Eun et al. 2014).

Na Tabela 1 são apresentadas as características nominais das três vigas ensaiadas (uma intacta e duas danificadas) e cujas características de posição e intensidade do dano serão explicadas posteriormente:

Tabela 1 – Características geométricas e do material das vigas ensaiadas (valores nominais)

	h (cm)	h ₀ (cm)	t _f (cm)	t ₀ (cm)	c (cm)	b (cm)	Área (cm ²)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)
	10,16	8,68	0,74	0,483	1,59	6,76	14,5	252	49,7
	i _x (cm)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)	i _y (cm)	Z _x (cm ³)	Z _y (cm ³)	f _y (kN/cm ²)	E (GPa)	Vão Livre (m)
	4,17	31,7	9,37	1,48	56,22	17,414	25	200	5

A massa adicional colocada nas vigas foi conformada por chapas de aço fixadas com parafusos como mostrado na Figura 1.

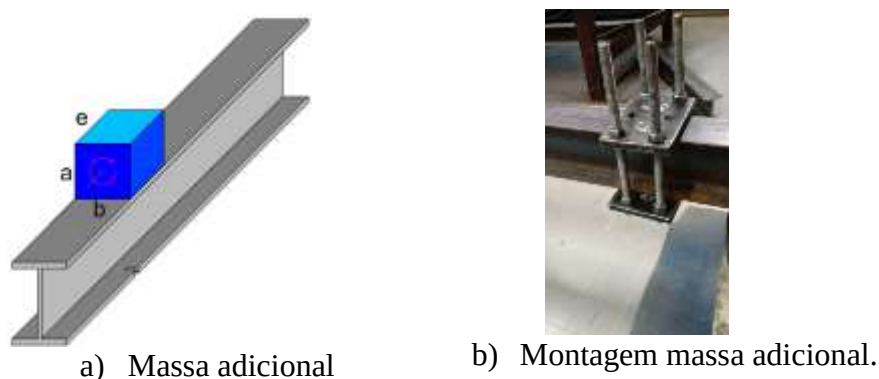


Figura 1- Massa adicional.

O sistema de massa adicional permite a fixação de um peso maior ou menor dependendo do número de chapas utilizadas. Esta massa adicional deve ser posicionada adequadamente em pontos específicos. Tais pontos são aqui chamados de nós, e são definidos numa prévia discretização da viga. Esta massa adicional deve ser bem fixada com parafusos. O sistema de massa adicional é desmontável e bem prático e a fixação deve evitar a movimentação ou trepidação das chapas que compõem a massa adicional - fato este que poderia influenciar nos resultados finais. Obviamente que outros dispositivos podem ser pensados para fixar a massa adicional. Durante a aplicação da metodologia proposta foram testadas diferentes massas adicionais variando de 1,0 kg até 20,0 kg, os melhores resultados foram obtidos com uma massa adicional de 3,266 kg e são apresentados ao longo do trabalho. A massa escolhida (3,266 kg) representa aproximadamente o 5,7 % do peso total das vigas ensaiadas (peso total = 57,0 kg).

2.1 Metodologia

No presente fluxograma é apresentado o roteiro seguido para a validação do método de identificação de danos proposto (Figura 2):

3 Características dos ensaios experimentais

3.1 Simulação do dano

Os danos induzidos na viga simulam o efeito de deterioração de um processo de fadiga. Ao longo das duas vigas foram realizados, com uma serra circular (Figura 3) de 3,0 mm de espessura três cortes espaçados a cada 2,5 cm. Estes três entalhes foram posicionados em 1,5 m (Dano-1) e 4,5 m (Dano-2).

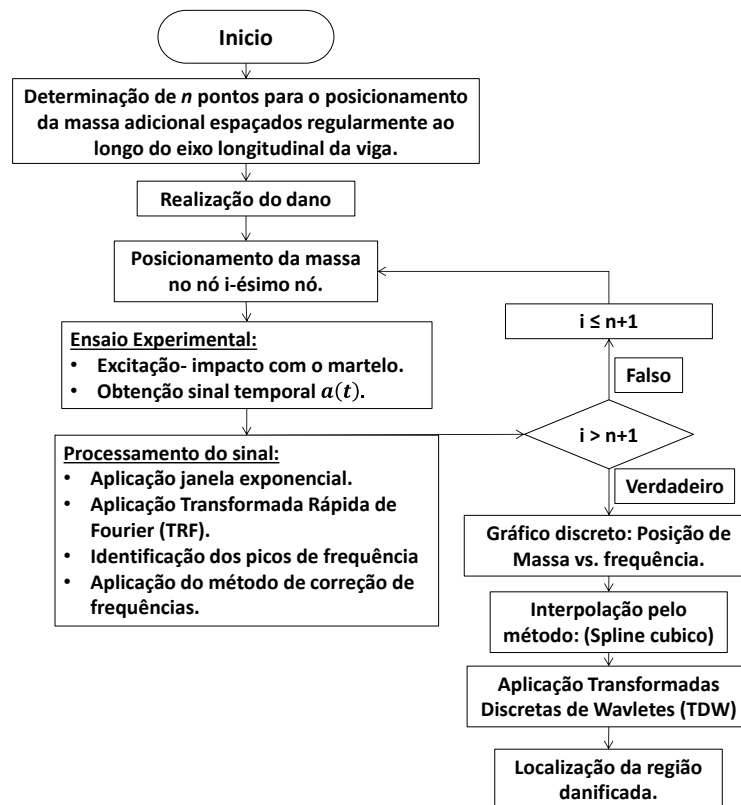


Figura 2 – Fluxograma da metodologia proposta.



Dano com 3 entalhes.

Figura 3- Simulação do dano.

Para comprovar a efetividade e repetitividade do método foram propostos dois casos de dano em duas vigas biapoiadas medindo 5m de comprimento. Para os casos em questão, os danos

estão localizados a 1,5m (Dano-1) e a 4,5m (Dano-2) em relação ao apoio esquerdo da viga. A única mudança entre os dois casos de dano foi a discretização que foi realizada de forma diferente, no Caso 1 foi considerado o dano coincidindo com o nó, já no segundo caso de dano Caso 2 o dano ficou posicionado entre dois nós. Além das duas vigas anteriormente mencionadas, foi testada uma viga intacta submetida ao mesmo valor de massa adicional, isto, como parâmetro de referência em relação às frequências obtidas para as vigas danificadas.

As características de cada caso de dano proposto são apresentadas a seguir:

Caso 1: viga nº1 com duas posições de dano e 5m de comprimento. Os entalhes feitos foram simétricos na mesa superior e inferior localizados a 1,5m (Dano-1) do apoio esquerdo espaçados a cada 2,5cm e a segunda posição de dano por um entalhe localizado em 4,5m (Dano-2) em relação ao mesmo apoio (Figuras 4 e 5). As duas posições de dano geraram uma diminuição do momento de inércia da seção transversal (I_x) de 52,2% e 65,6% respectivamente. Para a coleta de dados (espectro de acelerações $a(t)$) a viga foi discretizada ao longo do eixo longitudinal com elementos de 20 cm de comprimento, considerando a posição do primeiro e o último nó a uma distância de 10 cm dos extremos da viga (Figura 4), isto foi utilizado como ferramenta para diminuir a perturbação gerada nos apoios devida a descontinuidade geométrica.

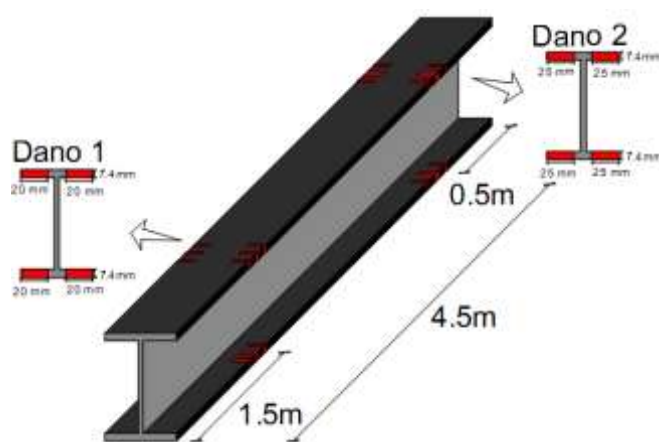


Figura 4- Geometria e posição dos danos Caso 1 e 2.

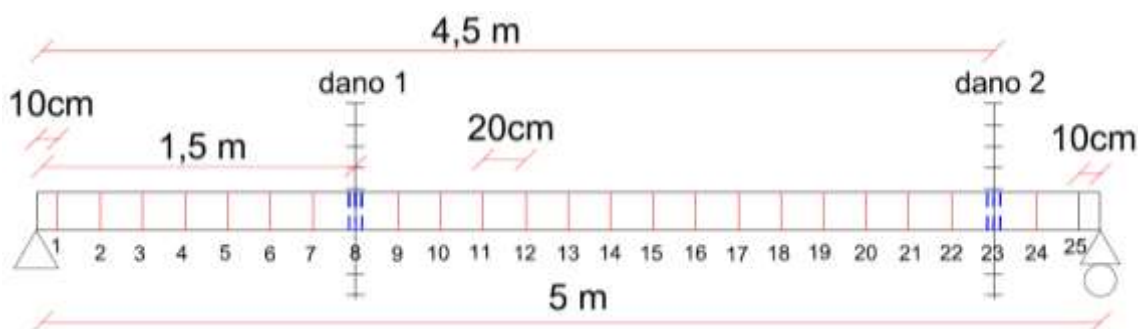


Figura 5- Posição e discretização - Caso 1.

De acordo com a discretização apresentada na Figura 4, o Dano-1 e o Dano-2, coincidem com os nós 8 e 23 respectivamente.

Com o intuito de testar a viabilidade do método foi proposta uma discretização diferente, na qual, os danos não coincidem com os pontos definidos na discretização.

Caso 2: viga nº2 com as mesmas características geométricas e do material da viga nº1 e com as mesmas posições dos danos. Entalhes simétricos na mesa superior e inferior localizados a 1,5m (Dano-1) do apoio esquerdo espaçados a cada 2,5cm e a segunda posição de dano por um entalhe localizado em 4,5m (Dano-2) em relação ao mesmo apoio (Figura 5). As duas posições de dano geraram uma diminuição do momento de inércia da seção transversal (I_x) de 52,2% e 65,6%, respectivamente. Para a coleta de dados (espectro de acelerações $a(t)$) a viga foi discretizada ao longo do eixo longitudinal com elementos de 20 cm de comprimento, considerando a posição do primeiro e o ultimo nó a uma distancia de 20 cm dos extremos da viga (Figura 6).

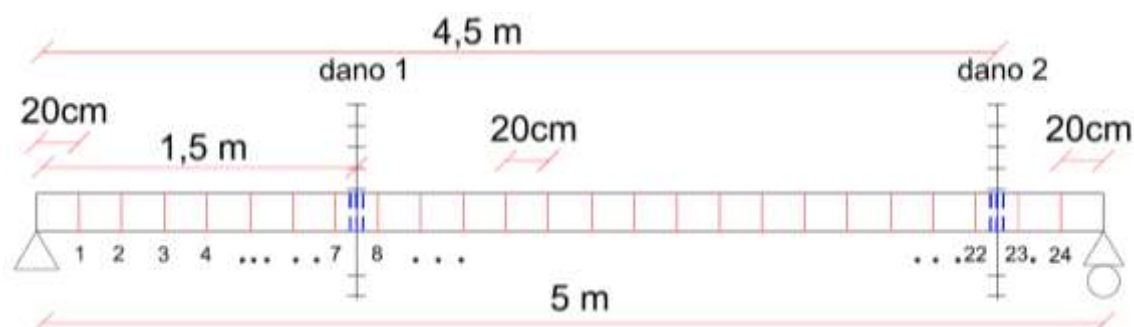


Figura 6- Posições dos danos Caso 2.

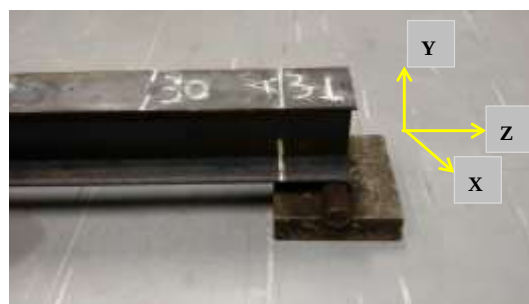
De acordo com a discretização apresentada na Figura 5 o Dano-1 e o Dano-2, estão localizados entre os nós nº7 e nº8 e entre os nós nº22 e nº23, respectivamente.

3.2 Apoios

As vigas ensaiadas, como dito antes, estavam em condição biapoiada e para garantir as restrições dos suportes utilizaram-se dois roletes de aço apoiados sobre chapas de aço (Figura 7). No apoio do primeiro gênero foi utilizado um rolete sobre uma chapa lisa (Figura 7a), restringindo os deslocamentos nas direções X e Y. Para o apoio do segundo gênero foi utilizado o mesmo rolete sobre uma chapa de aço, porém tal chapa com um entalhe para evitar o deslocamento também ao longo do eixo Z (Figura 7b) - restringindo os deslocamentos da viga nas três direções (X, Y e Z).



a) Apoio segundo gênero.



b) Apoio primeiro gênero.

Figura 7- Sistema de apoios da viga

3.3 Instrumentação

Para a realização dos ensaios dinâmicos foram utilizados os seguintes equipamentos: (a) Condicionador de sinal Ni Compact DAQ, modelo NI cDAQ-91; (b) Acelerômetro modelo 352C34 da PCB, com sensibilidade 99,7 mV/g ; (c) Acelerômetro modelo 352C33 da PCB, com sensibilidade 100,5 mV/g; (d) Martelo instrumentado PCB modelo 086C0, com capacidade para desenvolver uma força máxima de 100lbf= 444,82N aproximadamente. E finalmente, (e) Computador com o software Lab-View para aquisição de dados.

A Figura 8 apresenta o esquema de ensaio montado no Laboratório de Vibração e Dinâmica de Sistemas da Universidade de Brasília.



a) Viga biapoiada.



b) Sistema de aquisição montado.

Figura 8 – Sistema de ensaio completo.

Durante a realização dos ensaios, foram utilizados dois acelerômetros para capturar as acelerações. Um dos acelerômetros foi localizado na metade do vão ($L/2$) e o segundo acelerômetro foi localizado em $L/4$ (Figura 9).

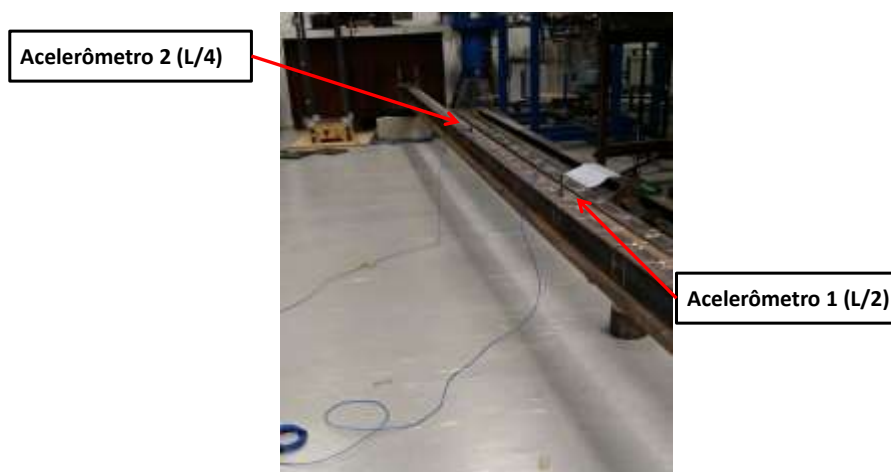
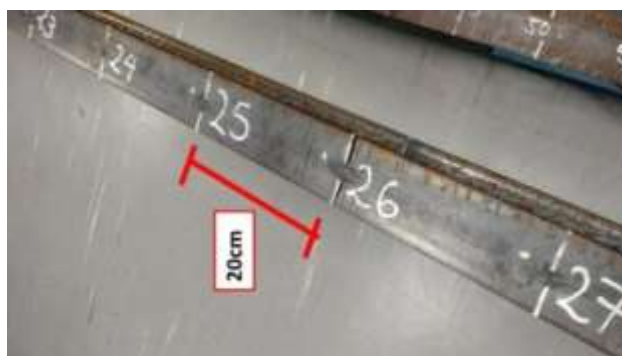


Figura 9 – Posicionamento dos acelerômetros.

3.4 Discretização da viga

Durante o processo de escolha dos melhores parâmetros e configurações necessárias para aplicar o método proposto, escolheu-se, para o Casos 1 e 2 (Figuras 3 a 5), e para a aplicação da massa adicional móvel na viga, posições variando a cada 20cm (Figura 10).



a) Discretização a cada 20 cm.

Figura 10 – Discretização da viga – Ensaios experimentais.

3.5 Força de excitação

A viga foi submetida a uma carga de impacto que desenvolveu uma força de aproximadamente 400N, aplicada na região central, próxima da metade do vão (Figura 11).

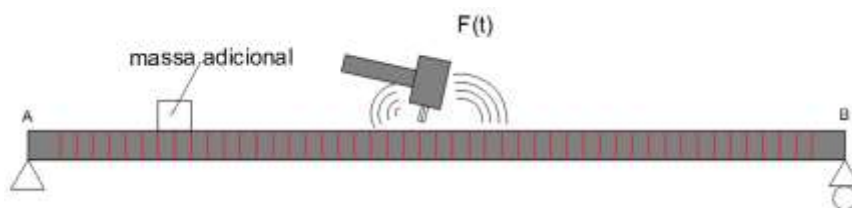


Figura 11 – Força de excitação ensaio experimental.

3.6 Características e escolha de parâmetros ensaios

A resolução da frequência é muito importante considerando que a variação que acontece por causa do deslocamento da massa adicional, gera pequenas mudanças no valor das frequências naturais. Assim, nesta pesquisa após de serem feitos vários testes iniciais escolheu-se o passo de tempo (Δt) de aquisição depois da excitação, número de dados analisados (N) e a frequência de amostragem (F_s), com os seguintes valores: $F_s = 1653 \text{ Hz}$; $t = 9,9\text{s}$; $\Delta t = 0,000605 \text{ seg}$; $N = 16384 (2^{14})$.

Nos testes iniciais para a escolha dos parâmetros anteriormente mencionados foi observado uma grande sensibilidade do método ao ruído presente nos equipamentos de aquisição de dados. Os testes foram desenvolvidos tentando diminuir ao máximo o atrito entre os apoios, mas existem ruídos inerentes que dificilmente podem ser eliminados, dessa forma os testes

iniciais serviram como ferramenta para determinar a configuração mais adequada do equipamento que foi utilizado nesse trabalho.

4 Tratamento sinal

Após a obtenção dos espectros de acelerações $a(t)$ correspondentes às posições da massa adicional sobre os nós definidos na discretização, foi aplicada uma técnica de janelamento de cada sinal temporal. Esta técnica simples pode melhorar as características do sinal e diminuir efeitos como o ruído inerente dos equipamentos eletrônicos ou o efeito de vazamento espectral. Existem vários tipos de funções de janela que podem ser aplicadas dependendo do sinal. Cada função de janela tem suas próprias características e aplicações.

Devido o sinal gerado no teste de impacto (transiente) ser não estacionário, apresentando decaimento devido ao amortecimento da estrutura, optou-se por aplicar a janela exponencial (Figura 12). A função de janela exponencial utilizada é apresentada na Eq.(1), com um decaimento $f = 1e - 6$ (Figura 12).

$$w[n] = e^{\left(\frac{n \ln f}{N-1}\right)}, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: N representa o tamanho da janela e f o valor final da curva exponencial.

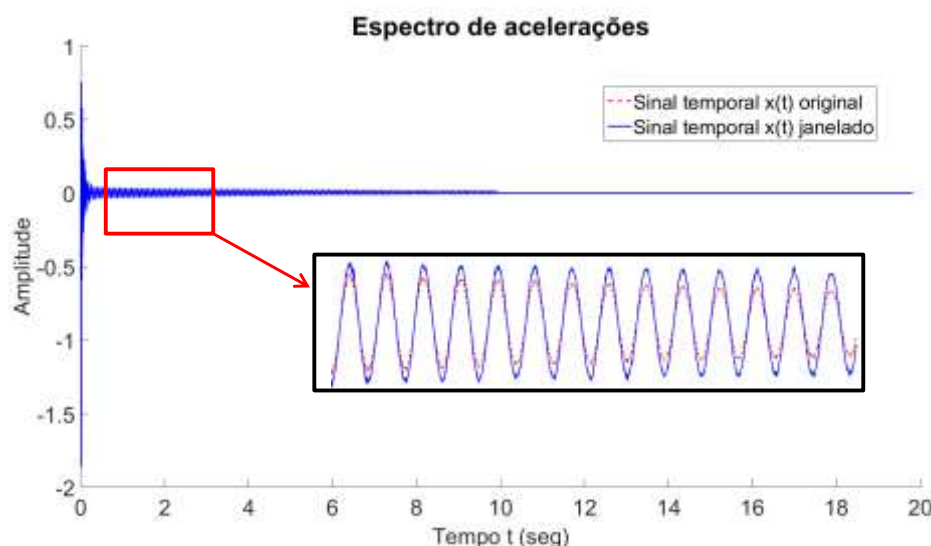


Figura 12 - Sinal temporal $a(t)$ janelado.

Foi utilizada uma técnica para interpolar o sinal no domínio da frequência que consiste em aumentar o sinal temporal $a(t)$ adicionando um vetor de zeros no final, o que gera uma diminuição do intervalo (Δf) no espectro de frequências. Para realizar esta interpolação foi considerado o tamanho do vetor como uma potência de 2 (2^n) para facilitar a aplicação da TRF (Transformada Rápida de Fourier). Neste caso, o vetor de acelerações experimentais obtidos tinha um tamanho de 2^{14} leituras e foram adicionados zeros no final do vetor aumentando para 2^{19} elementos.

O aumento do número de dados (N) na TRF gera um intervalo de frequências (Δf) mais próximo, portanto um maior número de linhas espectrais dentro do lóbulo principal, facilitando assim, uma maior aproximação da frequência real da viga (Figuras 13 a 15).

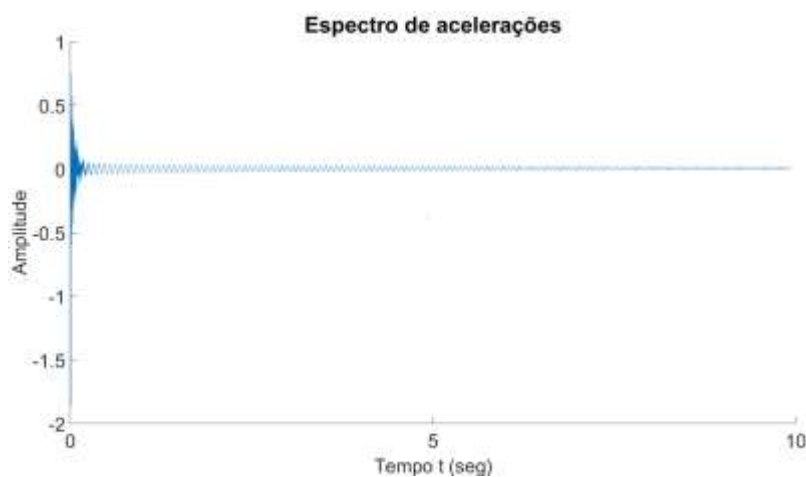


Figura 13- Espectro de acelerações

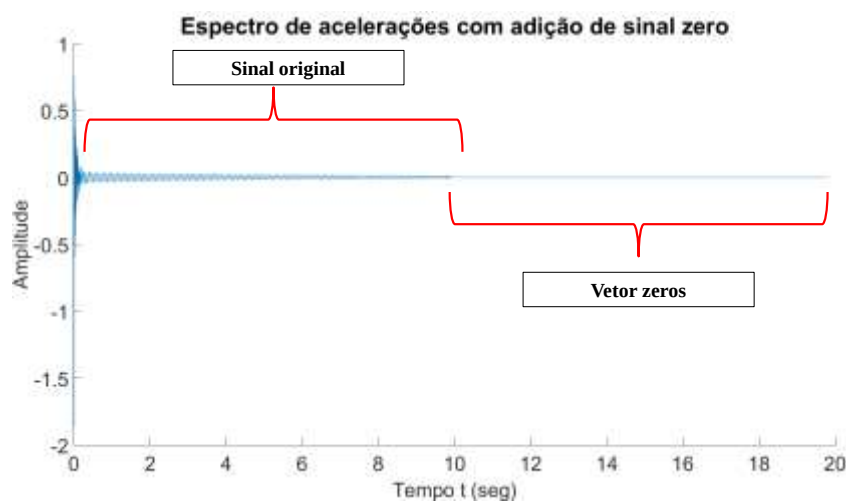


Figura 14- Espectro de acelerações com incremento do vetor zeros.

Esta técnica de interpolação do sinal no domínio da frequência é efetiva e prática, devido a diminuição do intervalo sem inclusão de ruído no sinal, gerando com isto uma aproximação maior da frequência real da estrutura.

Após a aplicação da janela exponencial nos sinais temporais $a(t)$, foi calculada a Transformada Rápida de Fourier (TRF). No domínio da frequência foram identificados os picos correspondentes ao acúmulo de energia correspondente à primeira frequência natural da estrutura.

Na Figura 15 é apresentado um dos espectros de frequência janelado e o espectro de frequências sem a aplicação da janela exponencial. Nesta é claramente visível a diminuição de ruído e a estabilização do sinal devido ao uso da janela exponencial.

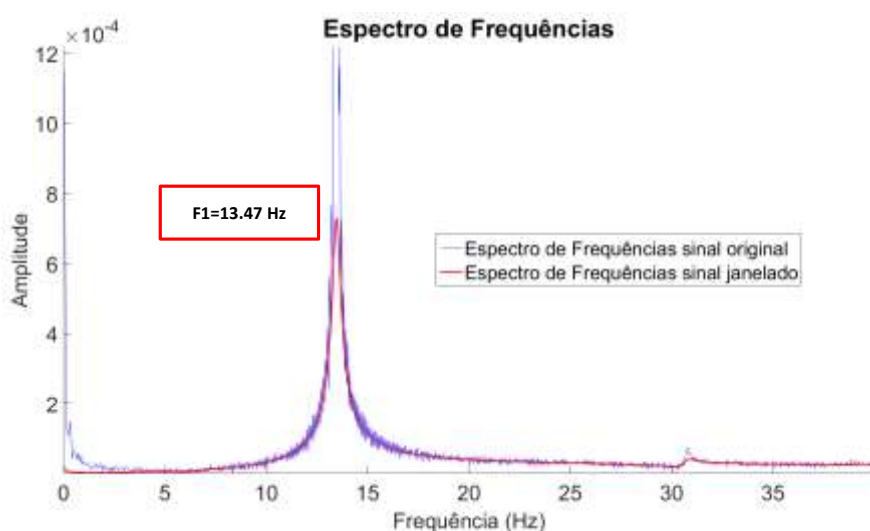


Figura 15- Espectro de frequências.

Após a identificação do primeiro pico de frequência foi aplicado um método para corrigir o lóbulo principal. Este método fundamentalmente se baseia na altura das linhas espectrais que se encontram em volta do pico de frequência e realizam uma aproximação mais detalhada do valor máximo que aquele lóbulo principal atinge, resultando assim em valor de frequência próximo do verdadeiro. Este fato é muito importante nesta pesquisa, devido estar baseado nas pequenas variações da frequência gerada pela aplicação da massa adicional e pela diminuição da rigidez nos locais danificados. Desta forma a frequência pode ser determinada para uma resolução maior do que a dada pela TRF, realizando uma média ponderada das frequências em torno de um pico detectado no espectro (Eq. (2))(National instruments 2009).

$$Frequência Estimada = \frac{\sum_{i=j-m}^{j+m} Power(i) \Delta f}{\sum_{i=j-m}^{j+m} Power(i)} \quad \Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: j representa o índice do pico aparente da frequência e $Power(i)$ representa o valor da amplitude da linha espectral após a aplicação da TRF.

Uma vez obtidas as frequências corrigidas, estes valores são plotados e interpolados (com *splines* cúbicos), para obter um vetor com um maior número de dados e assim calcular os coeficientes Wavelets.

5 Transformadas Discretas de Wavelets.

As Wavelets têm sido amplamente utilizadas para analisar os sinais no domínio do tempo. Para a análise Wavelet de sinais de domínio espacial, podemos simplesmente substituir o tempo por uma coordenada espacial $f(x)$, correspondente aos modos de vibração ou deslocamentos devidos à carga estática. (Wu and Wang 2011).

Semelhante à transformada de Fourier por janelas, a Transformada de Wavelet unidimensional projeta um sinal em um espaço bidimensional, e é definida como Eq.(3):

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

Onde:

a e b são a escala e a translação, respectivamente;

$f(x)$ representa o sinal analisado;

$\psi^*(.)$ indica o conjugado complexo de $\psi(.)$ e é assumido que o valor médio da função $\psi(x)$ desaparece numa integração de +/- infinito – ver esta condição na Eq.(4):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (\text{Equação 4})$$

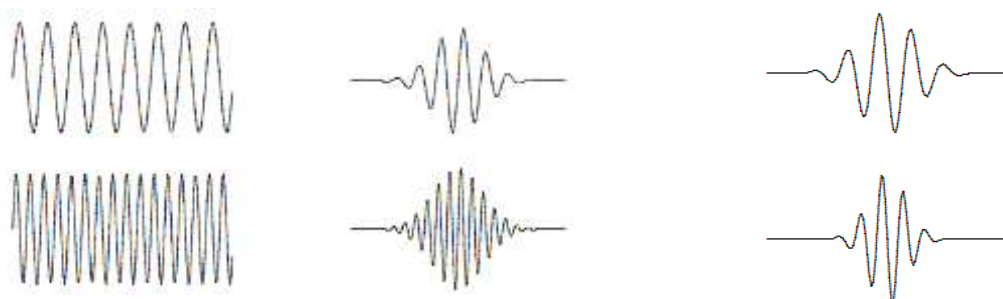
Tanto na transformação por Fourier por janelas quanto na Transformada por Wavelet, o sinal $f(x)$ é multiplicado por uma função peso de duas variáveis. No caso das variáveis da transformada de Fourier por janelas, a função peso é a Eq.(5):

$$w^{w,\tau}(x) = \frac{1}{2\pi} w(x - \tau) e^{-iwx} \quad (\text{Equação 5})$$

A respectiva função para a transformada de Wavelet é dada por Eq.(6):

$$\psi^{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \psi^* \left(\frac{x - b}{a} \right) \quad (\text{Equação 6})$$

As funções $\psi^{a,b}$ são chamadas de Wavelets ou funções Wavelet-mãe. As funções da transformada de Fourier por janelas usualmente oscilam e decaem rapidamente. Em contraste com as funções $\psi^{a,b}(x)$, o número de oscilações permanece constante com a mudança de janela. Isso significa que uma wavelet é “esticada” ou “dilatada” ao longo do eixo do tempo (se $\psi^{a,b}(t)$) ou do eixo espacial x (se $\psi^{a,b}(x)$). Para a transformação de Fourier com janelas, o tamanho da janela permanece constante, enquanto o número de oscilações muda. Este princípio é ilustrado na Figura 16.



(a) Funções-Transformada de Fourier. (b) Funções-Transformada de Fourier por janelas (c) Função- transformada de Wavelet.

Figura 16- Comparação sinais: Transformada Fourier - Transformada de Wavelet (Misiti and Poggi 2001).

Para a análise da Transformada Wavelet, $\psi(x)$ é a função complexa de valores localizada no domínio espacial e a partir da qual são gerados os coeficientes wavelet por translação e

dilatação (Wu and Wang, 2011). A translação a partir da wavelet-mãe pode ser definida pela Eq.(7):

$$\psi_{a,b}(x) = 2^{\frac{a}{2}}\psi(2^a x - b) \quad (\text{Equação 7})$$

Onde a e b são a escala e a translação, respectivamente.

Para um sinal espacial $f(x)$ no intervalo $[a, b]$, a sua Transformada Wavelet é dada por Eq.(8):

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{a,b}(x) dx \quad (\text{Equação 8})$$

Onde $C_{a,b}$ é o coeficiente para a Wavelet mãe $\psi_{a,b}(x)$ com escala " a ", e posição " b " (Wu and Wang 2011).

As funções Wavelet mãe utilizadas neste artigo foram as mesmas utilizadas por Palechor em sua dissertação de mestrado (Palechor (2013)). Segundo Palechor as funções Wavelet mãe escolhidas para a aplicação da Transformada Discreta de Wavelet (TDW) e que apresentaram bons resultados na identificação de danos foram: rbio2.6, bior6.8, sym6 e db5 (Palechor et al. 2014).

6 Resultados

A seguir são apresentados os resultados da análise da viga intacta com as mesmas características geométricas e do material das vigas utilizadas nos de dano 1 e 2. A viga intacta foi submetida ao mesmo valor de massa adicional, considerando uma discretização da viga a cada 20 cm como mostrado nas Figuras 17 e 18.

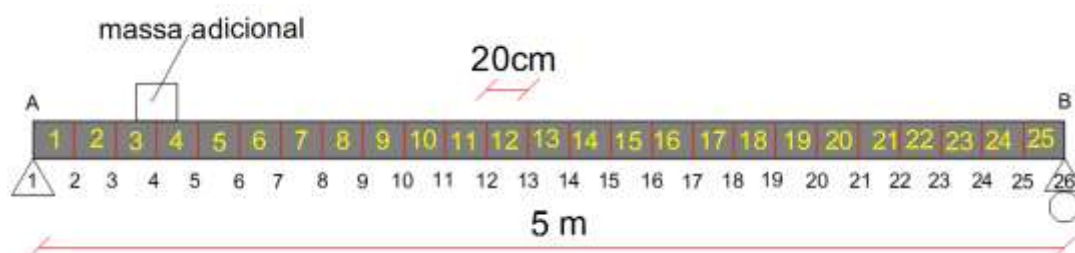


Figura 17- Discretização da viga intacta.



Figura 18- Montagem experimental viga intacta.

Na Figura 19 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

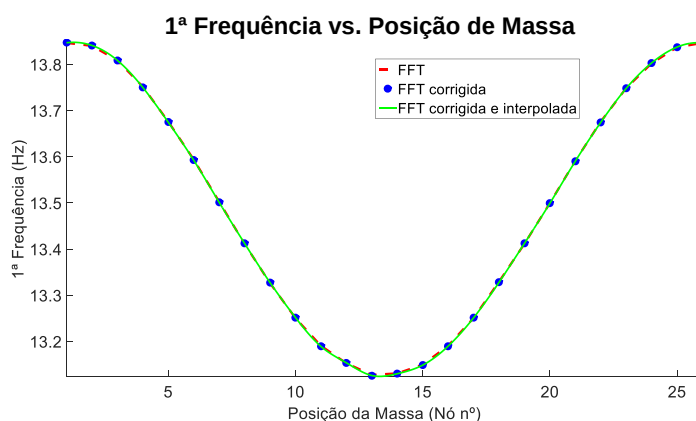


Figura 19- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) – viga intacta.

6.1 Caso 1

Na Figura 20 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg posicionada sobre cada nó.

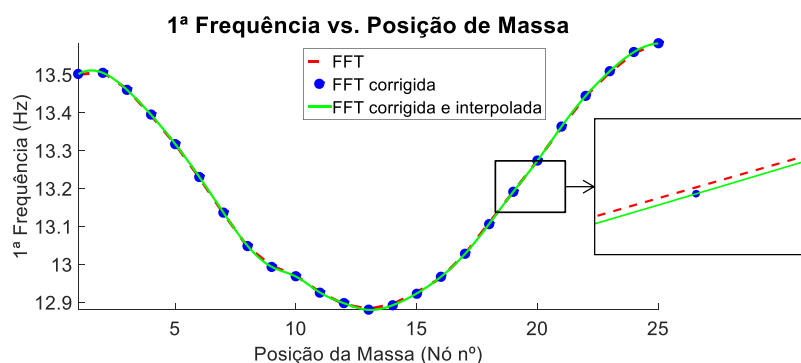
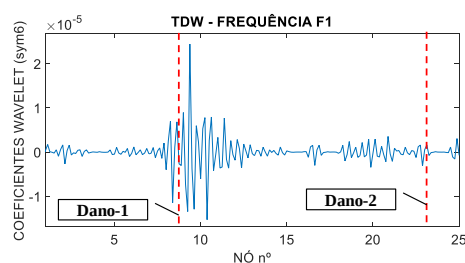


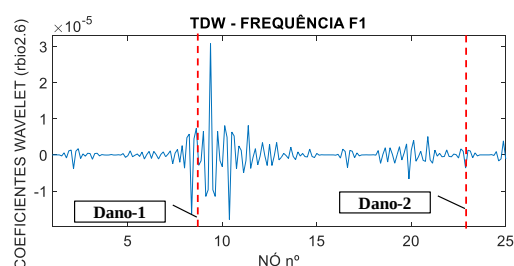
Figura 20- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (f1).

Na Figura 21 podem ser observadas três curvas, a primeira (linha tracejada) representa as frequências dos picos da FFT, a segunda (linha com pontos) representa a frequência corrigida utilizando as linhas espectrais da FFT. A terceira curva (linha contínua) representa a interpolação dos dados das frequências corrigidas pelo método de interpolação cubic spline de terceiro grau que, de acordo com (Palechor 2013), é o método que melhor se adequa no processamento de sinais utilizados para localização de danos em vigas metálicas.

As Figuras 22 e 23 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada à curva anterior considerando a utilização de quatro funções Wavelet mãe.

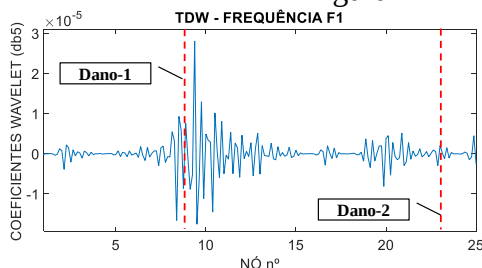


a) Symlet 6

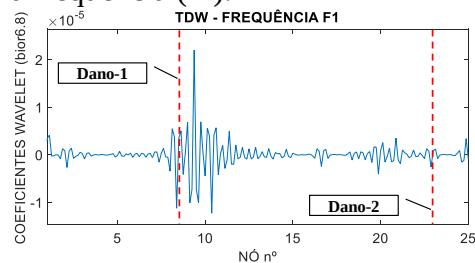


b) rbio2.6

Figura 22- TDW Primeira frequência (f1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 23- TDW Primeira frequência (f1).

Nas figuras anteriores (Figuras 22 e 23), pode-se observar que a maior perturbação foi gerada em volta do nó nº8, coincidindo com o Dano-1, localizado a 1,5 m. O Dano-2, localizado próximo ao apoio direito, não gerou perturbações suficientes para estabelecer sua posição com precisão, mas claramente foram geradas perturbações com amplitudes consideráveis que indicam um possível dano ou enfraquecimento da estrutura naquela região.

6.2 Caso 2

Na Figura 24 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa ao longo dos 24 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

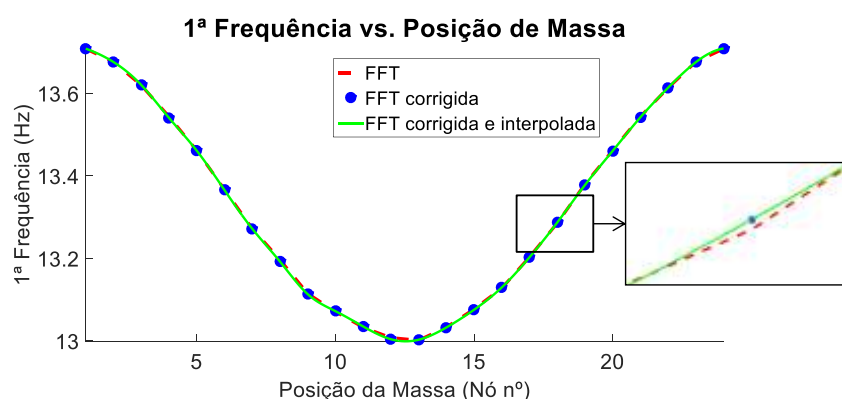
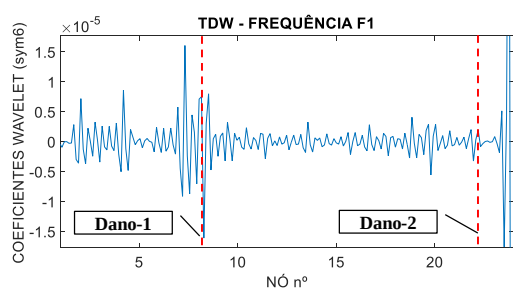
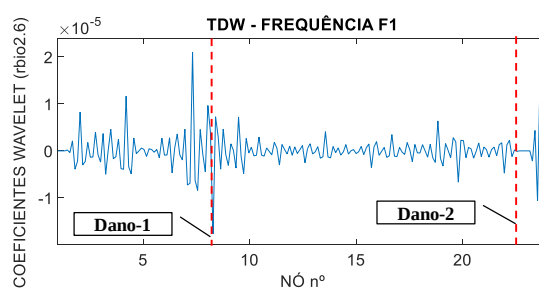


Figura 24- Posição de Massa (M) Vs. Primeira Frequência (f1).

As Figuras 25 e 26 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada à curva anterior considerando a utilização de quatro funções Wavelet mãe.

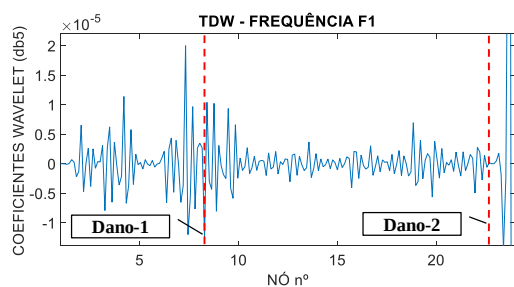


a) Symlet 6

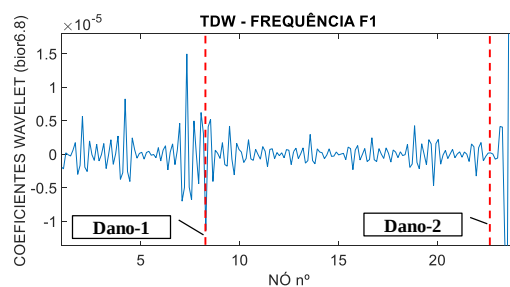


b) rbio2.6

Figura 25- TDW Primeira Frequência (f1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 26- TDW Primeira Frequência (f1).

Nas figuras anteriores (Figuras 25 e 26), pode-se observar que a maior perturbação foi gerada entre os nós nº7 e nº8, coincidindo com o Dano-1, localizado a 1,5m. O Dano-2 localizado próximo ao apoio direito não gerou perturbações com amplitudes consideráveis, impossibilitando assim, a localização do dano.

Dos dois casos aqui analisados, a reflexão sobre a física do problema, deixa transparecer porque o Dano-1 foi localizado de forma mais precisa. Isto só foi possível quando se observam as posições dos acelerômetros localizados ao longo da viga testada com os dois casos de danos simulados. Cabe lembrar que a primeira frequência está associada ao primeiro modo de vibração da viga. Por ser uma viga biapoiada, tal modo mostra as amplitudes maiores no trecho central da viga. Portanto a energia associada à primeira frequência é maior neste trecho central, facilitando um melhor tratamento e aproximação do lóbulo principal correspondente à primeira frequência real. Foram feitos testes utilizando a segunda e terceira frequência, mas estes não apresentaram bons resultados como esperado. Conclui-se que a primeira frequência se mostra mais sensível a qualquer eventual enfraquecimento da estrutura pela presença de dano. Quando a massa adicional está próxima ao dano (Dano-1 no Caso 2) ou na região danificada (Dano-1 no Caso 1), isso gera grandes picos nos gráficos dos coeficientes Wavelets para danos localizados no trecho central, isto é; no trecho aproximadamente entre $L/3$ e $2L/3$ – trecho com maiores amplitudes no primeiro modo de vibrar relativo à primeira frequência. Para o dano localizado próximo aos apoios (Dano-2) os picos gerados foram de menor magnitude em relação aos gerados pelo Dano-1, isto para os dois casos de dano analisados (Caso 1 e 2), apresentando amplitudes um pouco maiores no Caso 1, devido a localização do dano coincidir com a posição da massa adicional. O fato do Dano-2 apresentar amplitudes menores nos Coeficientes Wavelets impossibilita a

identificação precisa da localização do dano. Entretanto, o conjunto de picos, mesmo de menor magnitude, dá fortes indicações de que neste trecho poderia existir um dano. Nota-se também que vizinho a estes picos de menor magnitude, há alterações que indicam falsos danos devidos ao ruído inerente à presença dos apoios, equipamento utilizado e influência de agentes externos como vibrações geradas pela passagem de veículos no contorno da edificação. Nota-se ainda que a técnica de interpolação do sinal no domínio da frequência e a técnica de correção do lóbulo principal contribuíram para os bons resultados obtidos. Isso pode ser verificado comparando-se as curvas da primeira-frequência vs. posição-de-massa, com correção e sem correção do lóbulo principal (ver Figura 19, 20 e 24).

7 Conclusões

Este trabalho apresentou um método para a determinação de danos em estruturas de vigas de aço de tamanho comercial com a utilização apenas da resposta da estrutura danificada. O Método adota uma massa itinerante e a medida da frequência fundamental da estrutura com esta massa adicionada em diferentes posições da viga. O sinal da primeira frequência vs. posição da massa itinerante é transformado por diversas Transformadas de Wavelet gerando gráficos em que os picos ou conjunto de picos revelam a posição do dano ou de um conjunto de dano ou mesmo da região onde existem estes danos. Os melhores resultados foram obtidos para o Dano-1 presente nos Casos de dano 1 e 2, localizado a 1,5m do apoio esquerdo, composto de três entalhes espaçados a cada 2.5cm (Figura 3). Cabe ressaltar que as perturbações geradas pelos danos nos gráficos dos coeficientes wavelets apresentaram amplitudes maiores no Caso 1, devido a que, a posição da massa coincide com o local do dano, durante o processo de obtenção da curva frequência vs. posição de massa.

O maior desafio durante a aplicação desse método foi lidar com a presença de ruído no sinal, que após a aplicação da metodologia gerou perturbações consideráveis nos coeficientes wavelets, por isto, foram utilizados filtros de janela (exponencial) e o método de correção de picos de frequência, ferramentas que permitem obter com uma maior precisão as frequências naturais da estrutura e que apresentaram bons resultados para danos localizados no trecho central da viga biapoiada (entre $L/3$ e $2L/3$ aproximadamente).

Para danos localizados próximos aos apoios os resultados não foram tão satisfatórios devido à influência do ruído gerado pelo atrito nos suportes e, também devido a descontinuidade

geométrica apresentada no cálculo dos coeficientes *wavelets* na extremidade da viga. Cabe destacar que mesmo sendo geradas perturbações menores próximas aos apoios é possível estabelecer um possível enfraquecimento da estrutura, ferramenta que de forma prática poderia auxiliar na manutenção de estruturas como pontes e viadutos.

8 Referencias

Aktan, A. E. et al. (1997). Structural Identification for Condition Assessment: Experimental Arts. *Journal of Structural Engineering*, v. 123, n. 12, p. 1674–1684.

Bezerra, L. M. and Saigal, S. A. (1993). Boundary element formulation for the inverse elastostatics problem (IESP) of flaw detection. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 36, p. 2189–2202.

Breysse, D. et al. (2008). How to combine several non-destructive techniques for a better assessment of concrete structures. *Cement and Concrete Research*, v. 38, p. 783–793, 2008.

Buda, G. and Caddemi, S. (2007). Identification of Concentrated Damages in Euler-Bernoulli Beams under Static Loads. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 133, n. 8, p. 942–956, 2007.

Choi, Y. (2002). Damage Identification Techniques for Bridges Using Static Response. Ph.D. Thesis, Hanyang University.

Doebeling, S. W. et al. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics. California: Los Alamos National Laboratory.

Estrada, R. S. (2008). Damage Detection Methods in Bridges through Vibration Monitoring : Evaluation and Application. Ph.D. Thesis, University of Minho.

Eun, H. et al. (2014). Damage Detection using the Variation in the FRF Data Depending on Mass Addition. *Advanced Science and Technology Letters*, v. 47, p. 15–20.

Hu, H. F. et al. (2010). Crack detection using nonlinear acoustics and piezoceramic transducers — instantaneous amplitude and frequency analysis. *Smart Materials and Structures*, v. 19, p. 1 – 10.

Li, H. et al. (2009). Evaluation of earthquake-induced structural damages by wavelet transform. *Progress in Natural Science*, v. 19, n. 4, p. 461–470.

Misiti, M. and Poggi, J. (1997). *Wavelet Toolbox For Use with MATLAB*. Natick, Massachusetts.

National Instruments (2009). *The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement in LabVIEW and LabWindows/CVI* - National Instruments.

Palechor, E. U. L. (2013). *Identificação de Danos em Vigas Metálicas Utilizando Wavelets e Dados Numéricos e Experimentais*. Dissertation, Universidade de Brasília.

Palechor, E. U. L. et al. (2014). Damage Identification in Beams Using Experimental Data. *Key Engineering Materials*, v. 607, p. 21–29.

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

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

IDENTIFICATION OF DAMAGE IN STEEL BEAMS USING ADDITIONAL ROVE MASS: EXPERIMENTAL ANALYSIS.

Abstract

Due to the need for continuous monitoring of structures, such as: bridges, pipelines, buildings, dams, among others, and also the need to search for efficient and practical techniques that could assist in the monitoring of structural systems to identify damages. This paper presents a method for damage identification to steel beams based on the variation of the fundamental frequency caused by the application of an additional rove mass that can be placed along the structure. The application of the proposed method for commercial sized steel beams shows that the method can be used in the detection of damages or regions with structural damages.

Keywords: Damages, Frequencies, Wavelets, Additional mass, steel beam. The results show that the method proposed can detect deterioration of steel beams.

1 Introduction

In this work, it was chosen as fundamental measurement parameter of dynamic properties of steel beams (I profile) the fundamental frequency. Such frequency acts as sensitive indicator of the structural integrity, therefore, constant frequency measurement analyses can be used to monitor bridge integrity. These measurements associated with the Wavelet Transform provide a low cost and highly practical evaluation technique.

2 Additional Mass

The paper proposes a method based on the analysis of the dynamic properties (impact test or transient) of steel beams (I-section profiles) in real scale, subjected to the action of an additional rove mass that generates a progressive change of the natural frequencies. However, the presence of a small change in the stiffness of the structure may not be clear, so it is necessary to use the Wavelet Discrete Transform (TDW) to assist in the process of dynamic properties changes caused by the local loss of stiffness of the structure (Eun et al 2014).

3. Experimental tests

The induced damages simulated in the experimental specimens are thought of as equivalent damages caused by fatigue or corrosion deterioration at the beam cross section. The induced damages were done with a circular saw of 3 mm thickness and located symmetrically at the flanges of the I-section beams. Other simulations may be imagined too.

3.1 Definition of tests parameters

The resolution of the frequency is very important considering that the variation that happens because of the additional mass generates small noises in the natural frequencies. Thus, in this research, after initial tests, the acquisition time step (Δt) after the excitation, the number of analyzed data (N) and the sampling frequency (F_s) were chosen, with the following values: $F_s = 1653$ Hz; $t = 9.9$ s; $\Delta t = 0.000605$ sec; $N = 16384$ (2^{14}).

3.2 Methodology

Figure 11 shows the flowchart followed for the validation of the proposed method for damage identification:

4. Signal treatment

Due to the signal generated in the impact test (transient) be non-stationary, presenting decay due to the damping of the structure, it was decided to apply the exponential window (Figure 12). It was used a technique to make the cubic spline interpolation of the signal in the frequency domain. In addition, to generate a decrease in the interval (Δf) in the frequency spectrum the time signal (t) was increased by adding a vector of zeros at the end of signal, after applying the exponential window on the time signals (t), the Fast Fourier Transform (FFT) was calculated. In the frequency domain, the peaks corresponding to the energy accumulation corresponding to the first natural frequency of the structure were identified. After the identification of the first frequency peak, a method was applied to correct the main lobe. (Eq. (2))

Once obtained at the corrected frequencies, these values are plotted and interpolated with cubic splines, to produce a vector with a greater number of data and thus calculate the wavelet coefficients.

5. Discrete Wavelet Transform

The mother wavelet functions used in this paper were those used by Palechor in his master's thesis (Palechor 2013). According to him, the wavelet-mother functions chosen for the application of the Discrete Wavelet Transforms that presented good results in the identification of damages were: rbio2.6, bior6.8, sym6 and db5 (Palechor et al. 2014). These functions have the following common characteristics: arbitrary degree of regularity, arbitrary number of zero moments, functions are symmetric on the y-y axis and have a compact support.

6. Conclusions

This work proposed a method for the determination of damages in steel beams of commercial size. The method uses a rove mass and the measurement of the fundamental frequency of the structure with this added mass placed in different positions along the beam. The signal of the first frequency vs. the position of the rove mass is transformed by several Wavelet Transformations generating graphs. In such graphs, the peaks or set of peaks reveal the position of damages or at least the region where damages exist. The best results were obtained for the Damage-1 - see (Figure 18 and Figure 19), located at 1.5 m from the left support. This damage is composed of three notches spaced separately every 2.5 cm (Figure 2a). It was possible to clearly identify the damage using the first frequency.