

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GIULIANNA VALVASSORI CAMARGO
JOSÉ MATHEUS OLSZEWSKI

**DETECÇÃO E ACOMPANHAMENTO DE FALHAS EM ESTRUTURAS
UTILIZANDO O MÉTODO *WAVELETS***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

GIULIANNA VALVASSORI CAMARGO

JOSÉ MATHEUS OLSZEWSKI

**DETECÇÃO E ACOMPANHAMENTO DE FALHAS EM ESTRUTURAS
UTILIZANDO O MÉTODO *WAVELETS***

Proposta de Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Nilson Barbieri

CURITIBA

2013

RESUMO

CAMARGO, Giulianna V. e OLSZEWSKI, José M. Detecção e acompanhamento de falhas em estruturas utilizando o método *wavelets*. 2013. 59 f. Monografia – Graduação em Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Danos e pequenas falhas em estruturas podem levar a catástrofes e grandes problemas na indústria e estruturas em geral. Para que isso não ocorra, são feitas manutenções preventivas e preditivas. Muitos equipamentos exigem técnicas precisas e a quantidade de métodos de análise de falhas fica reduzida, sendo limitado o uso de métodos sofisticados. A presente proposta descreve um método que está sendo muito usado na análise de falhas. O método utiliza a transformada *wavelet* e é baseado em sinais vibratórios do sistema ou estrutura. Normalmente os dados são coletados em dois momentos da vida da estrutura, sem e com falha. Este projeto é baseado em ensaios em vigas de aço excitadas através de um martelo de impacto. Danos são inseridos nas amostras na tentativa de localização dos mesmos bem como do grau de severidade. Com a aplicação de um método de otimização são obtidos e apresentados dados otimizados para a posição do dano e sua severidade.

Palavras-chave: *Wavelet*, falhas, vibrações, vigas.

ABSTRACT

Damage and minor failures in structures can lead to catastrophes and major problems in the industry structure in general. Preventive and predictive maintenance act to avoid this. Many devices require technical methods and the number of damage control tools reduces, becoming limited to sophisticated methods. This proposal describes a method that is widely used in failure analysis. The method uses the wavelet transformation, which is based on vibration al signals of the system or structure. Usually the data is collected at two moments in the life of the structure, with and without failure. This project is based on tests on steel beams excited by an impact hammer. Damage samples are inserted in the attempt to find the location of the damage and its severity. With the application of an optimization method is obtained and presented data optimized for the position of the damage and its severity.

Key-Words: *Wavelet*, crack, vibration, beams

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Deslocamento do primeiro modo em uma viga em balanço.....	16
Figura 2 – Deslocamento do segundo modo em uma viga em balanço.....	16
Figura 3 – Deslocamento do terceiro modo em uma viga em balanço.....	16
Figura 4 – Bandas de análise das transformadas de Fourier (esquerda) e Wavelets (direita)	19
Figura 5 – Cobertura do espectro de frequência de Fourier (acima) e Wavelet (abaixo)	20
Figura 6 – Dimensões em centímetros da viga retangular a ser usada nos ensaios	28
Figura 7 – Posição dos acelerômetros na barra com fixação engaste-engaste	29
Figura 8 – Posições dos acelerômetros na barra com fixação engaste-livre	29
Figura 9 – Posições dos acelerômetros e das roscas na barra para a fixação livre-livre.....	29
Figura 10 – Sinal da força de impacto.....	33
Figura 11– Sinal de um acelerômetro	33
Figura 12 – Curva FRF.....	34
Figura 13 - Variações de energia para a situação engaste-engaste e dano na posição 1.....	35
Figura 14 - Variações de energia para a situação engaste-engaste e dano na posição 2.....	35
Figura 15 - Variações de energia para a situação engaste-livre e dano na posição 1	36
Figura 16 - Variações de energia para a situação engaste-livre e dano na posição 2	36
Figura 17 - Variações de energia para a situação livre-livre e dano na posição 1	37
Figura 18 - Variações de energia para a situação livre-livre e dano na posição 2	38

Figura 19 - Primeiro modo de vibrar (viga engastada/livre, dano na posição 1)	42
Figura 20 - Segundo modo de vibrar (viga engastada/livre, dano na posição 1)	42
Figura 21 - Terceiro modo de vibrar (viga engastada/livre, dano na posição 1).....	43
Figura 22 - Primeiro modo de vibrar (viga engastada/engastada, dano na posição 2)	43
Figura 23 - Segundo modo de vibrar (viga engastada/engastada, dano na posição 2)	44
Figura 24 - Terceiro modo de vibrar (viga engastada/engastada, dano na posição 2)	44
Figura 25 - Primeiro modo de vibrar (viga livre/livre, dano na posição 1).....	45
Figura 26 - Segundo modo de vibrar (viga livre/livre, dano na posição 1).....	45
Figura 27 - Terceiro modo de vibrar (viga livre/livre, dano na posição 1).....	46
Figura 28 – Variação da primeira frequência natural (viga engastada-livre)	47
Figura 29 – Variação da segunda frequência natural (viga engastada-livre)	48
Figura 30 – Variação da segunda frequência natural (viga engastada-livre)	48
Figura 31 – Curva de coeficiente da transformada Wavelet para a viga engastada/livre.....	51
Figura 32 - Curva tridimensional de coeficiente da transformada Wavelet para a viga engastada/livre.....	52
Figura 33 – Comparação da energia normalizada dos coeficientes a1 a a8 em diferentes escalas para a viga engaste/livre	53
Figura 34 - Curva de coeficiente da transformada Wavelet para a viga livre/livre.....	53
Figura 35 - Curva tridimensional de coeficiente da transformada Wavelet para a viga livre/livre	54
Figura 36 - Comparação da energia normalizada dos coeficientes a1 a a8 em diferentes escalas para a viga livre/livre.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros reais dos danos nos corpos de prova	30
Tabela 2 - Freqüências naturais (viga engastada/livre, dano na posição 1)	39
Tabela 3 - Freqüências naturais (viga engastada/livre, dano na posição 2)	39
Tabela 4 - Freqüências naturais (viga engastada/engastada, dano na posição 1) ...	39
Tabela 5 - Freqüências naturais (viga engastada/engastada, dano na posição 2) ...	39
Tabela 6 - Freqüências naturais (viga livre/livre, dano na posição 1).....	40
Tabela 7 - Freqüências naturais (viga livre/livre, dano na posição 2).....	40
Tabela 8 - Parâmetros otimizados (engaste-livre – dano na posição 1).....	49
Tabela 9 - Parâmetros otimizados (engaste-livre – dano na posição 2).....	49
Tabela 10 - Parâmetros otimizados (engaste-engaste – da nona posição 1)	49
Tabela 11 - Parâmetros otimizados (engaste-engaste – dano na posição 2)	50
Tabela 12 - Parâmetros otimizados (livre-livre – dano na posição 1).....	50
Tabela 13 - Parâmetros otimizados (livre-livre – dano na posição 2).....	50

LISTA DE SIGLAS

FRF	Função Resposta em Freqüência
PO	Professor Orientador
PrTCC	Professor Coordenador de TCC
TCTF	Transformada de Curto Tempo de Fourier
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TCW	Transformada Contínua de <i>Wavelet</i>
TF	Transformada de Fourier
TW	Transformada de <i>Wavelet</i>
WPER	<i>Wavelet Packet Energy Rate</i>
WPT	<i>Wavelet Packet Transform</i>
WPS	<i>Wavelet Packet Signature</i>
MEF	<i>Método de Elementos Finitos</i>
RFP	<i>Rational Fraction Polynomial</i>
MAC	<i>Modal Assurance Criterion</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ω	Freqüência
$\psi(t)$	Wavelet mãe
$\psi'(\omega)$	Transformada de Fourier de $\psi(\omega)$
t	Tempo
α	Parâmetro de dilatação
β	Parâmetro de translação
$C(a, b)$	Transformada contínua de Wavelet
$\psi_{j,k}^i$	Pacote de Wavelet
$f_j^i(t)$	Sinal de componente de pacote Wavelet
$c_{j,k}^i$	Coefficientes do pacote Wavelet
$E_{f,j}$	Energia do sinal
$\Delta(E_{f_i})$	Taxa do sinal da energia do pacote Wavelet
k	Índice de tempo discreto
v	Velocidade na partícula i
x	Posição da partícula i
p	Melhor posição encontrada pela partícula i
G	Melhor posição encontrada por <i>swarm</i>
$\{\emptyset_A\}$	Modo numérico
$\{\emptyset_X\}$	Modo experimental
$\{\varepsilon_\emptyset\}$	Indicador geral para o valor de <i>MAC</i>
ω_{ei}	Frequência natural experimental
ω_{ni}	Frequência natural numérica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	CONTEXTO DO TEMA	11
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	11
1.3	OBJETIVOS.....	12
1.4	JUSTIFICATIVA.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	ANÁLISE MODAL.....	15
2.2	ANÁLISE HARMÔNICA.....	17
2.2.1	Série de Fourier.....	17
2.2.2	Método de <i>Wavelets</i>	17
2.2.2.1	Introdução ao Método de <i>Wavelets</i>	17
2.2.2.2	Teoria de <i>Wavelets</i>	20
2.3	MÉTODO PSO	22
2.4	PARÂMETROS MODAIS	23
2.5	ESTADO DA ARTE	24
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA.....	28
3.1.1	Planejamento experimental e execução.....	28
3.1.2	Equipamentos de execução	30
4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	32
4.1	ANÁLISE MODAL.....	32
4.1.1	Sinais de entrada	32
4.1.2	Variações de Energia	34
4.1.3	Frequências naturais.....	38
4.1.3	Modos de vibrar.....	41
4.2	PARÂMETROS OTIMIZADOS	47
4.3	<i>WAVELETS</i>	51
5	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DO TEMA

Qualquer estrutura mecânica está sujeita a sofrer modificações estruturais ao longo da sua vida. Muitas estruturas com o passar do tempo têm suas cargas mantidas ou aumentadas, mesmo sofrendo desgastes físicos e químicos. Para essas estruturas é preciso estabelecer um acompanhamento para determinar quando se pode condená-las devido à falta de segurança em sua utilização.

Na literatura podem-se achar diversas formas de análise e detecção de dano, tanto locais quanto globais. Os métodos locais tendem a ser mais confiáveis, porém necessitam de mais detalhes na inspeção se comparados aos métodos globais.

Uma das formas de detecção global destas modificações é o emprego de análises vibratórias. Para isto é preciso analisar dois tempos distintos: sistema original e sistema modificado. O tema do projeto é a aplicação do estudo de vibrações mecânicas em diversas estruturas com a finalidade de detectar falhas nas mesmas.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Existem vários ensaios mecânicos e métodos para se detectar trincas e possíveis falhas em uma estrutura mecânica. Uma das dificuldades das indústrias está em realizar estes ensaios de forma a obter resultados precisos e não-destrutivos. O ensaio destrutivo gera um custo alto e muitos ensaios não-destrutivos, como o ensaio por líquidos penetrantes, são ensaios com resultados mais visuais, sendo não mensuráveis quantitativamente.

Também se vê na prática uma dificuldade em estabelecer, de forma global, informações sobre o dano. Os resultados proporcionados por um sistema de identificação são das seguintes ordens: determinação da presença do dano, localização do dano e severidade do dano.

Formas locais de identificação como visuais, acústicas e campo magnético, necessitam do conhecimento do local do dano antes da análise. Existe esta necessidade para que a identificação seja efetiva e a porção da estrutura a ser examinada deve ser acessível.

No projeto foi usado o método *wavelets* para a detecção de falhas; um método não-destrutivo baseado em sinais vibratórios que apresenta resultados mais precisos tanto do acompanhamento quanto da detecção das falhas. Este é um método global que pode ser realizado com a estrutura completa, isto é, sendo mais rápido e prático que um método local.

A dificuldade na identificação do dano por vibrações está em determinar parâmetros que sofrerão mudanças de acordo com a presença, profundidade ou localização do dano. Através da literatura é possível determinar que as energias livres, freqüências naturais e os modos de vibrar são alguns destes parâmetros e podem ser utilizados para tal finalidade.

1.3 OBJETIVOS

Como objetivo geral do projeto tem-se a aplicação do método *wavelets* na detecção de falhas. Têm-se como objetivos específicos os seguintes:

- Aplicação do método *wavelets* na viga de aço carbono para diferentes formas de fixação (engaste-engaste, engaste-livre e livre-livre);
- Maior compreensão do método, sua aplicação e resultados;
- Determinar a ordem de precisão para a determinação da localização do dano e sua severidade.

1.4 JUSTIFICATIVA

O método pela Transformada de *Wavelet* (TW) tem sido muito utilizado em diversas aplicações. Cruz e Salgado (2008) apresentam alguns métodos de detecção de danos baseados em monitoramento de vibração. Estes métodos são avaliados com dois estudos de caso. No primeiro estudo são obtidos parâmetros modais e simulação dinâmica de uma ponte com falha. Os autores avaliam os métodos para estruturas com trincas, falhas de diferentes profundidades, extensões e ruídos. No segundo caso os testes são feitos para uma ponte de concreto armado. Esta ponte foi deliberadamente danificada em duas fases. Utilizou-se a TW e chegou-se a conclusão de que um dos métodos no qual se aplica a *Wavelet Packet Signature* (WPS) apresenta maior eficiência dentre os outros métodos aplicados quando na presença de ruídos.

A detecção de falhas em estruturas em uso não é uma tarefa simples, principalmente a detecção de falhas incipientes. A escolha do método de detecção baseado em sinais vibratórios e análise através do uso de *wavelet* devem-se ao fato de ser um ensaio não-destrutivo e com a possibilidade de aplicação do mesmo com o sistema em funcionamento. A aplicação do método *wavelet* visa adquirir conhecimentos técnicos na área de instrumentação e análise estrutural (dinâmica), visando, também, facilitar a detecção de falhas e prolongar a vida útil das estruturas mecânicas. Com o maior conhecimento deste método é possível aplicá-lo em estruturas diversas sujeitas a diferentes situações em vários ramos da indústria. Este tipo de ensaio pode ser usado em um sistema de manutenção preditiva e/ou controle de qualidade de produtos.

No projeto são envolvidas diferentes áreas de conhecimento, como as citadas a seguir:

- Mecânica estrutural;
- Instrumentação, no que se diz respeito a sinais eletrônicos de vibrações apresentados pelo método *wavelets*;
- Qualidade, particularmente na qualidade do produto. Área que será impactada também na aplicação do método.

Alguns fatores importantes motivaram os integrantes da equipe a escolher o problema em questão e a definir os objetivos apresentados.

- Revisar conceitos adquiridos durante o curso de Engenharia Mecânica;
- O projeto em questão envolve duas grandes áreas diferentes que caminham juntas, Análise estrutural (Dinâmica) e Instrumentação. Aumentando, assim, os conhecimentos dos integrantes da equipe em novas áreas da engenharia;
- Aprofundar os conhecimentos na área de vibrações e detecção de falhas, levando em consideração que os integrantes da equipe têm grande interesse na área estrutural;
- Obter maior conhecimento em um método de análise de falhas antes desconhecido pelos integrantes da equipe;
- A consideração de que a realização de testes utilizando o método *wavelets* poderá contribuir positivamente na detecção de falhas estruturais;
- Possibilidade em contribuir tecnicamente para o desenvolvimento de novos métodos na indústria.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados definições e conceitos que serão utilizados no decorrer do trabalho. Além disso, é apresentado um breve levantamento do atual estado da arte sobre métodos de detecção e monitoramento de falhas através da análise de vibrações.

2.1 ANÁLISE MODAL

Uma das áreas dentro da análise estrutural é a análise modal de estruturas, ou seja, o levantamento numérico e experimental das propriedades próprias do sistema. Dentro da análise modal procura-se obter os autovalores e autovetores (modos de vibrar).

Taylor (2000) relata que pelos autovalores é possível a obtenção de parâmetros (vibratórios) físicos do sistema, como frequências naturais; frequências amortecidas e fator de amortecimento. A maioria das técnicas experimentais de obtenção dos parâmetros modais é baseada nas curvas da Função Resposta em Frequência (FRF). Essas curvas são obtidas através da excitação do sistema (*shaker* ou martelo de impacto; no caso deste estudo foi utilizado apenas o segundo) e obtenção dos sinais vibratórios através de sensores (normalmente acelerômetros) colocados na estrutura. Nessas curvas ficam evidenciadas regiões de concentração de energia próximas dos modos de vibrar do sistema. Rao (1995) mostrou que através de métodos de identificação de parâmetros (baseados em técnicas de ajuste) são possíveis as obtenções dos autovalores e seus componentes e dos modos de vibrar.

Os modos de vibrar de um sistema relacionam as amplitudes dos graus de liberdade (variáveis) e dá uma visão do comportamento próprio do sistema. Os modos de vibrar são compostos por curvas e nós. Um nó ou um ponto nodal é o lugar onde o sistema não tem movimento. Analisando a forma modal é possível verificar onde existem as regiões de máxima amplitude. Para vigas em balanço,

nota-se na Figura 1 o primeiro modo de vibrar, na Figura 2 o segundo modo de vibrar e o terceiro modo de vibrar na Figura 3.

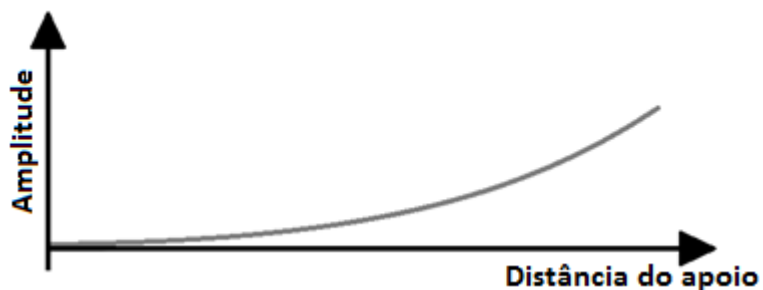


Figura 1 – Deslocamento do primeiro modo em uma viga em balanço.

Fonte: Autoria própria

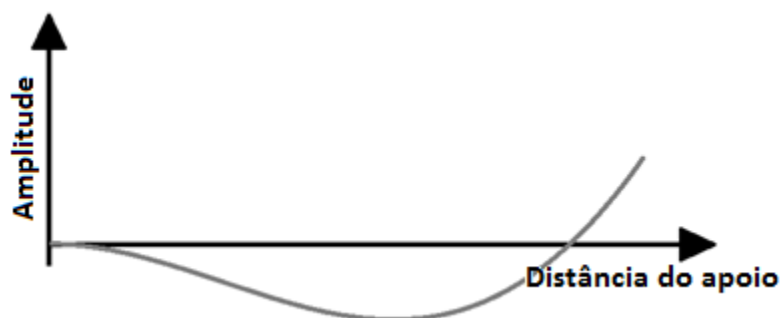


Figura 2 – Deslocamento do segundo modo em uma viga em balanço.

Fonte: Autoria própria

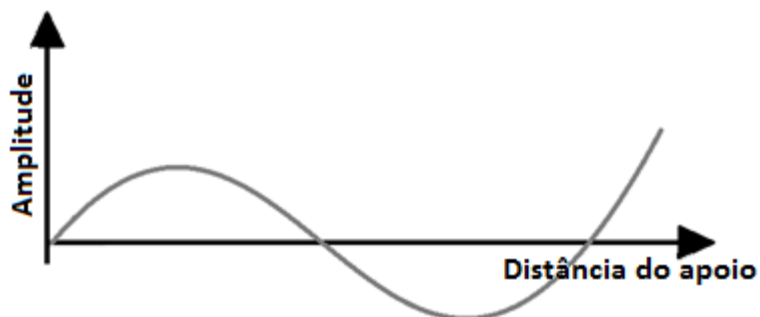


Figura 3 – Deslocamento do terceiro modo em uma viga em balanço.

Fonte: Autoria própria

2.2 ANÁLISE HARMÔNICA

2.2.1 Série de Fourier

A ferramenta mais conhecida de análise de sinal tem sido a análise de Fourier, a qual utiliza um somatório de componentes harmônicos. Considerando um período grande, é possível utilizar a técnica de Fourier para qualquer sinal.

Yanilmaz (2007) constata que esta decomposição permite a transformação da função de vibração periódica do domínio do tempo para o domínio da frequência. Grande parte das técnicas de análise modal é baseada no sinal do domínio da frequência.

2.2.2 Método de *Wavelets*

2.2.2.1 Introdução ao Método de *Wavelets*

Desde o início do século XIX, quando Fourier através da soma de funções (harmônicas) de senos e cossenos representou sinais periódicos, já se tem buscado novas formas de representar funções que apresentem uma boa aproximação sem a necessidade de uma grande quantidade de coeficientes. Presezniak (2007) observa que a TW apresenta grande eficácia devido a sua característica de ter facilidade em representar funções que variam seu caráter periódico ao longo do tempo.

Quando um sinal contém diversas características não estacionárias: mudanças, começo e fim de evento, tendências e outros mais, um dos métodos escolhidos é o de *wavelets*.

A idéia de utilizar *wavelets* foi mostrada primeiramente por Gabor (1944). No seu artigo é citado sobre as transmissões de dados e tenta através da Transformada de Fourier (TF) definir uma ferramenta que mantenha informações sobre o domínio do tempo e da frequência simultaneamente. Essa relação é denominada relação de incerteza e é conhecida como Princípio de Incerteza de Heisenberg. Gabor (1944)

conseguiu fazer a TF com uma janela móvel, porém o comprimento desta janela ainda é fixo.

Quem surgiu com o conceito de janelas variáveis foram Morlet e Grossmann (1984). Este conceito ficou conhecido então como método de *wavelets*. Assim o método trazia através de janelas flexíveis, as quais ficavam mais largas quando a frequência era menor e também ficavam mais finas em altas frequências.

Uma *wavelet* tem um formato de onda no qual a média dos valores de período efetivo é zero, assim:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

A função $\psi(t)$ é chamada de *wavelet* mãe e deve satisfazer a condição de admissibilidade:

$$\int_0^{+\infty} \frac{|\Psi'(\omega)|^2}{\omega} * d\omega < \infty \quad (2)$$

Onde $\Psi'(\omega)$ é a Transformada de Fourier (TF) de $\psi(\omega)$, sendo ω a frequência.

Embora a TW esteja baseada na TF, estas análises apresentam características diferentes. A TW procura por detalhes, ao contrário da TF que procura por frequências que estão relacionadas com a frequência do sinal, tendo como resultado a relação inversa entre a frequência do sinal e o tamanho apresentado pelo detalhe. Yanilmaz (2007) cita que enquanto a análise de Fourier consiste em quebrar o sinal dentro de várias ondas harmônicas, o método de *wavelets* transforma os vários sinais proporcionais a sua frequência. O núcleo da *wavelet* pode ser expresso por:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} * \psi * \frac{t-\beta}{\alpha} \quad (3)$$

Usualmente, α é o valor do parâmetro de dilatação (expansão e compressão) que será tratado como a escala e β é o parâmetro da translação que será o tempo, assim se faz uma análise tempo-escala. O grau de correlação é calculado como um valor numérico e representa o grau de similaridade entre a teoria e o real.

Ovanesova e Suarez (2004) fundamentam que a Transformada Contínua de *Wavelet* (TCW) é o somatório sobre todo o tempo dos sinais multiplicados pelas escalas e versões modificadas da *wavelet* mãe.

Pode-se utilizar uma Transformada de Curto Tempo de Fourier (TCTF) para a análise da ocorrência de diferentes freqüências. A TCTF analisa tanto as freqüências altas quanto as freqüências baixas com a mesma resolução, devido ao fato do plano tempo-freqüência estar dividido de forma constante e regular (porções de mesma dimensão). Já a TW se difere da TCTF por analisar as freqüências altas numa resolução diferente das freqüências baixas (Faria 1997). Na Figura 4 é apresentada uma comparação geométrica entre a TW e a TF através das janelas de análise.

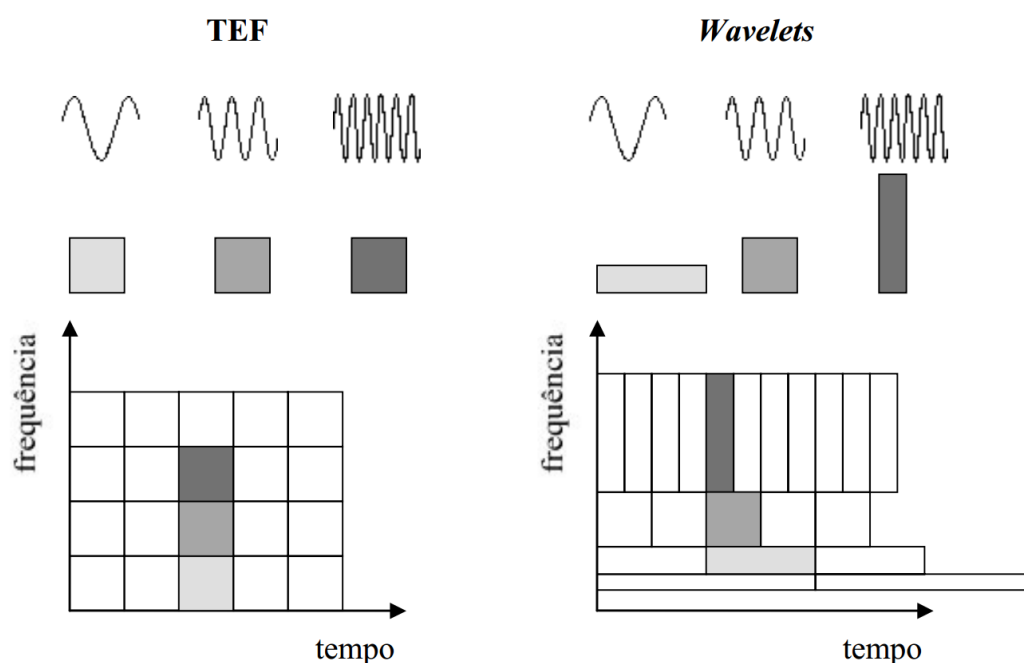


Figura 4 – Bandas de análise das transformadas de Fourier (esquerda) e Wavelets (direita)

Fonte: Faria (1997)

É possível afirmar que a utilização da resolução em freqüência é melhor para freqüências baixas, que apresenta uma segmentação de espectro mais fina. Já para a resolução de *wavelets* pode-se concluir que a resolução é mais fina para análise de freqüências mais altas que para freqüências baixas. A Figura 5 apresenta a segmentação do espectro.

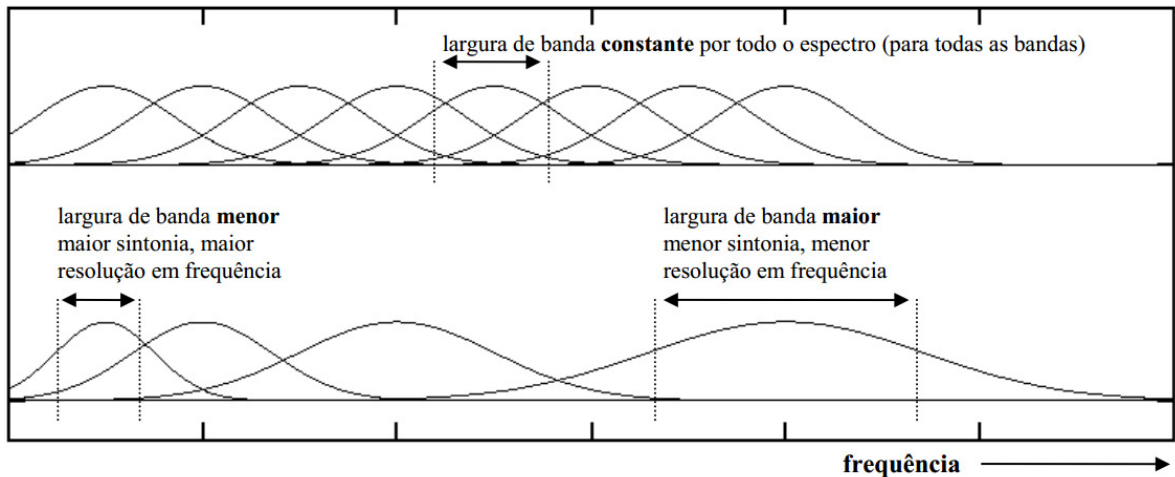


Figura 5 – Cobertura do espectro de frequência de Fourier (acima) e Wavelet (abaixo)

Fonte:Faria (1997)

Na ilustração é possível afirmar que para maiores freqüências empregam-se *wavelets* mais finas e de menor duração, sendo essas de melhor resolução temporal. Pode-se dizer o contrário para freqüências mais baixas onde se tem menos detalhes na resolução para *wavelets* mais largas.

2.2.2.2 Teoria de *Wavelets*

A transformada contínua de *wavelet* é definida pela equação que segue

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (4)$$

onde o núcleo da *wavelet* já foi expresso na equação 3 e $f(t)$ é a função em questão. Esta é uma função de janela chamada de *wavelet* mãe. O termo *wavelet* significa uma pequena onda. A diferencial, dt , refere-se à condição de que esta função (janela) é de comprimento finito (compactamente suportado). A onda refere-se à condição oscilatória da função. O termo mãe implica que as funções com diferente região de suporte, que são utilizadas no processo de transformação, são derivadas de uma função principal, conhecida como *wavelet* mãe. Em outras palavras, a *wavelet* mãe é um protótipo para gerar as outras funções janela.

Os pacotes de *wavelets* consistem de um conjunto habitual de funções *wavelet* linearmente combinados. Estes pacotes recebem as propriedades como uma localização tempo-freqüência de suas funções *wavelets* correspondentes. Um pacote wavelet $\psi_{j,k}^i$ é uma função com três índices, i, j e k que são modulação, escala e parâmetros de conversão, respectivamente.

$$\psi_{j,k}^i(t) = 2^{\frac{j}{2}} \psi^j(2^j t - k), \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

O sinal de componente de pacote de *wavelet*, $f_j^i(t)$, pode ser representado por uma combinação linear de funções wavelet, $\psi_{j,k}^i(t)$, da seguinte forma:

$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k}^i(t) \psi_{j,k}^i(t) \quad (6)$$

Onde os coeficientes do pacote *wavelet*, $c_{j,k}^i$, podem ser obtidos das seguintes equações:

$$c_{j,k}^i(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (7)$$

e

$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t) \quad (8)$$

O índice de energia do pacote *wavelet* é usado para identificar as localizações iniciais do dano. Neste caso, a energia do sinal $E_{f,j}$, do nível j é primeiro definida como:

$$E_{f,j} = \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(t) dt = \sum_{m=1}^{2^j} \sum_{n=1}^{2^j} \int_{-\infty}^{+\infty} f_j^m(t) f_j^n(t) dt \quad (9)$$

Após realizar algumas manipulações é possível encontrar o componente do pacote *wavelet* $E_{f_j^i}$ como a energia armazenada no sinal do componente $f_j^i(t)$:

$$E_{f_j^i} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_j^i(t)^2 dt \quad (10)$$

O índice da taxa de energia do pacote de *wavelet* é usado para indicar a localização do dano estrutural. A taxa do sinal da energia do pacote *wavelet* $\Delta(E_{f_i})$, no nível j é definida como:

$$\Delta(E_{f_j}) = \sum_{i=1}^{2j} \frac{|(E_{f_j^i})_b - (E_{f_j^i})_a|}{(E_{f_j^i})_a} \quad (11)$$

Onde $(E_{f_j^i})_a$ é a energia do sinal do componente $(E_{f_j^i})$ no nível j sem dano, e $(E_{f_j^i})_b$ é a energia do sinal do componente $(E_{f_j^i})$ com algum dano.

2.3 MÉTODO PSO

Os parâmetros físicos de uma viga de aço engastada-livre; engastada-engastada e viga livre-livre são estimados usando as FRF. Os modelos matemáticos são obtidos utilizando o método dos elementos finitos (MEF). Para aproximar os dados da FRF experimental e numérica, o método *Particle Swarm Optimizer* (PSO) é usado.

O algoritmo PSO é baseado em um conjunto de possíveis soluções que evoluem para se aproximar de uma solução conveniente (ou conjunto de soluções) para um problema. No uso do PSO, o objetivo é encontrar uma solução ótima de uma função real (função ajustada) definida em um espaço determinado.

No algoritmo PSO cada indivíduo é chamado de uma "partícula", e está sujeita a um movimento no espaço multidimensional que representa o espaço válido. As partículas têm memória, mantendo, assim, parte de seu estado anterior. Não existe nenhuma restrição das partículas em compartilhar o mesmo ponto no espaço válido, mas em qualquer caso a sua individualidade é preservada. Cada movimento da partícula é composto de uma velocidade inicial aleatória e duas influências aleatoriamente ponderadas: a individualidade, tendência em voltar à melhor posição anterior da partícula; e socialização, tendência em se mover em direção a melhor posição anterior da vizinhança.

A versão "contínua" usa um espaço multidimensional de valor real como espaço válido, e envolve a posição de cada uma das partículas nesse espaço através das seguintes equações:

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \gamma_{1i}(p_i - x_i(k)) + \gamma_{2i}(G - x_i(k)) \quad (12)$$

e

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (13)$$

onde, i é o índice da partícula; k é o índice de tempo discreto; v é a velocidade na partícula i ; x é a posição da partícula i ; p é a melhor posição encontrada pela partícula i ; G é a melhor posição encontrada pelo enxame (global e individual); $\gamma_{1,2}$ são números aleatórios no intervalo $[0,1]$ aplicados na partícula i .

2.4 PARÂMETROS MODAIS

Na identificação dos danos (mudanças estruturais) são utilizados também métodos que consideram as mudanças modais. Um método de análise modal, *Modal Assurance Criterion* (MAC), é usado para comparar os pares de modos. A matriz dos coeficientes é obtida pelo equacionamento:

$$MAC_{i,j} = \frac{(\{\phi_A\}_i^T \{\phi_A\}_j^*)^2}{\{\phi_A\}_i^T \{\phi_A\}_i^* \{\phi_X\}_j^T \{\phi_X\}_j^*} \quad (14)$$

Onde $\{\phi_A\}$ e $\{\phi_X\}$ denotam o modo numérico e experimental; o símbolo sobrescrito T denota a transposta de um vetor e o símbolo * denota o vetor conjugado complexo.

Um valor de MAC próximo de 1 indica que os dois modos são bem correlacionados. Um indicador geral pode ser calculado a partir de:

$$\varepsilon_\phi = \left[1 - \frac{1}{L} \sqrt{\sum_{i=1}^L (MAC)_i^2} \right] \times 100 \quad (15)$$

Finalmente se faz um ajuste da possível localização do dano baseado nas variações das frequências naturais e num índice de desempenho calculado pela equação 16, onde L é o comprimento do corpo no qual o modo de vibrar está sendo analisado. Para ajustar a posição do dano é feita uma varredura da posição do mesmo ao longo da amostra. A posição é analisada de acordo com a posição dos acelerômetros onde exhibe maior variação de energia obtida pelo método de *wavelet*.

$$IndB = \sum_{i=1}^n b(k, l) \quad (16)$$

2.5 ESTADO DA ARTE

Dimarogonas (1976) e Chondros (1977) mostraram que o dano pode ser analisado como uma variação da flexibilidade local e comparações entre resultados numéricos com valores obtidos por experimentos. Desenvolveu-se desta forma um método utilizando espectros que possibilita a identificação do dano em várias estruturas, relacionando a profundidade do dano com variações nas três primeiras frequências naturais e modos de vibrar.

Cawley e Adams (1979) desenvolveram também um método experimental para estimar a localização e a profundidade do dano com base nas mudanças das frequências naturais.

Liang, Choy, e Hu (1991) desenvolveram um método no qual a equação característica do sistema pode ser determinada sabendo-se a frequência natural do sistema e a localização do dano.

Ahmadian, Mottershead e Friswell (1997) fizeram uma junção entre a base analítica e a experimental resultando em um procedimento de detecção de danos pelos deslocamentos medidos na estrutura.

Ettouney et. al. (1998) fizeram análises comparativas entre as frequências naturais e modos de vibrar de estruturas não danificadas e danificadas.

Liew e Wang (1998), baseando-se em uma solução numérica para o deslocamento em vigas, fizeram um estudo com *wavelets* para identificar os danos. Após a análise foi descoberto que os picos de variação em algumas *wavelets* indicavam a presença de danos.

Kim e Kim (2000) detectaram um dano em uma viga em balanço usando as *wavelets* de Gabor. Também conseguiram obter a severidade do dano.

Okafort e Dutta (2000) aplicaram o método da TW através do uso de um sistema de laser para a detecção de mudança nas propriedades de vigas de alumínio em balanço. As vigas foram modeladas usando método de elementos

finitos através do *software* ANSYS 5.3 e os seis primeiros modos de vibração para os casos da viga danificada e não danificada. Um modelo diferente de elementos finitos foi usado em uma viga de teste para validar o modelo proposto. Numa viga de alumínio, fabricada com dimensões semelhantes à viga utilizada no modelo numérico, obtiveram os modos de vibrar através de um sistema a laser de medição de vibração. Depois de ter sido criado um entalhe (simulando uma trinca), através de usinagem na viga semelhante à numérica, foram obtidas imagens da localização dessas falhas a partir dos coeficientes da TW, apresentando assim uma estreita correlação com os correspondentes resultados na viga experimental.

Chang e Chen (2003) analisaram as equações de flexão em vigas apresentadas por Timoshenko com o método de *wavelets* e concluíram que os danos podiam ser detectados, mesmo sendo muito pequenos.

Aydogan (2003) apresentou um método de detecção e identificação de danos em sistemas com muitos graus de liberdade usando a FRF não linear.

Kim e Mehlem (2003) apresentaram uma revisão das técnicas utilizadas na detecção de dano usando *wavelets*, classificadas em três categorias: variação dos coeficientes (mudança das propriedades do sistema), perturbação local dos coeficientes no domínio do espaço (irregularidade perto do dano) e onda refletida devido um dano local.

Han, Ren, e Sun (2005) propuseram um novo índice para detecção de danos nas estruturas de viga, *Wavelet Packet Energy Rate (WPER)*. O procedimento baseia-se na decomposição de sinais dinâmicos medidos nos componentes das *wavelets* e a taxa de energia envolvida.

Law, Li, Zhu e Chan (2005) confirmam a eficácia do método por eles proposto a partir de resultados experimentais de uma viga de aço. O método utilizado, *Wavelet Packet Transform (WPT)*, é baseado na sensibilidade e então utilizado para a detecção de falhas nas estruturas. Os resultados são apresentados tanto numericamente quanto analiticamente.

Poudel, Fu e Ye (2005) utilizaram vídeo digital para a detecção de falhas em estruturas. Foi utilizada primeiramente a teoria da medição de vibrações estruturais usando imagens de alta resolução. Em seguida é utilizado um conceito

implementado através de uma câmera de vídeo de alta velocidade. Assim são obtidos modos de vibração a partir da série de tempo, que são submetidos à TF para a determinação das falhas. No artigo apresentado os resultados mostram que a abordagem proposta é capaz de identificar as falhas e suas localizações.

Li et al (2006), utilizaram *wavelets* como função de forma por elementos finitos para análise de uma trinca modelada em uma viga. Foram apresentados bons resultados a partir de dois elementos separados por uma mola torcional e com a presença da trinca, referentes a variações de frequências naturais.

Bayissa, Haritos, Thelandersson (2007) aplicam a TCW com nova aplicação para os coeficientes da análise de *wavelet*. Essa técnica é baseada nas respostas de vibrações no domínio do tempo. A grande vantagem é que a análise tempo-frequência usando *wavelet* fornece uma ferramenta poderosa para caracterizar uma resposta determinada ou aleatória e pode ser usada para detectar pequenas alterações nas características das respostas e variações locais.

Ovanesova e Suarez (2004) apresentam uma simples aplicação da TF para detectar danos em vigas e estruturas planas. O método requer o conhecimento de apenas uma resposta da estrutura danificada, sendo necessário um sinal de resposta de cargas estáticas ou dinâmicas para a detecção da localização da falha.

Grabowska, Palacz, Krawczuk (2008), mostram que cada sistema de identificação de dano disponível consiste no hardware e no software. O estudo lida com o último, que é baseado em medições de propagação da onda. Ele foi desenvolvido especialmente para tipos diferentes de distinção dos danos. O uso da TW com a propagação das ondas para a distinção de diferentes falhas é a novidade mais importante da pesquisa feita.

Yan, Duan, Ou e Stefano (2010) desenvolveram um método baseado em *wavelet* que não só apresenta a posição do dano como também apresenta informações do momento de ocorrência do dano. O método define uma força residual de *wavelet* que irá determinar a posição e o momento do dano. O método proposto é simulado através de simulações numéricas

Radzienski, Krawczuk, Palacz (2011) fizeram a tentativa de apresentar um novo método para a detecção de danos estruturais com base em parâmetros modais

obtidos experimentalmente. O método é adequado para a detecção de danos por fadiga que ocorrem em uma viga de alumínio em balanço. Foram utilizados indicadores de danos com base em parâmetros modais medidos. No entanto os resultados não foram satisfatórios, o que motivou o estudo de novos indicadores (híbridos) utilizando a variação de frequências naturais. Foi demonstrado que o método desenvolvido é adequado para localização de dano em estruturas do tipo viga.

Nguyen, Ngo, Tran, Choi (2013) apresentam um novo método de localização de danos por feixe, com base em um algoritmo que é uma combinação de uma estrutura nebulosa neural e um coeficiente da TW do sinal de vibração do feixe. Este é dividido em elementos e excitado para ser vibrado. O sinal de vibração para cada elemento é medido, filtrado e transformado em sinais de ondas. A eficácia da abordagem é demonstrada pela experiência em conjuntos de dados medidos em uma estrutura de aço do tipo feixe em vibração.

3 METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

O projeto diz respeito a um trabalho experimental. Para tal, divide-se a descrição da metodologia nos seguintes itens:

- Planejamento experimental e execução: dimensões, fixação e preparação dos corpos de prova.
- Obtenção dos resultados: posicionamento do sensor e padronização dos procedimentos; transposição do sinal de vibração do domínio do tempo para o domínio da frequência.
- Análise dos resultados: comparação dos modos de vibrar usando o método de *wavelet* e frequências naturais do modelo real e modelo teórico.

3.1.1 Planejamento experimental e execução

Uma viga retangular de comprimento útil aproximado de 75 cm; largura de 2,54 cm e altura de 1,27 cm, feita de aço SAE 1020 conforme Figura 6, é o corpo de prova nos testes de vibração.

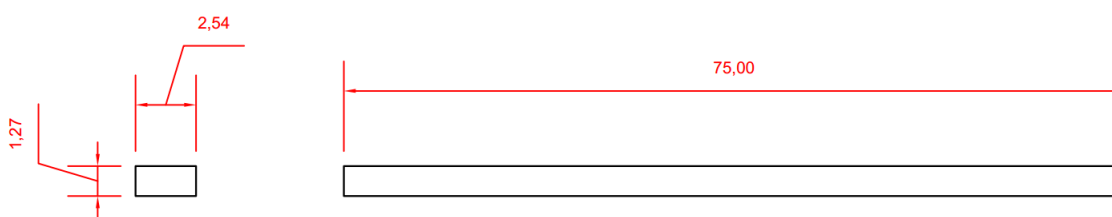


Figura 6 – Dimensões em centímetros da viga retangular a ser usada nos ensaios

Fonte: Autoria própria

Os ensaios envolveram três tipos de fixação: engaste-engaste, engaste-livre e livre-livre. Para o ensaio engaste-engaste foram utilizados suportes fixos em cada extremidade da amostra, conforme Figura 7. Já na Figura 8 é apresentada a forma como foi feita a fixação engaste-livre, sendo uma das extremidades livre do suporte. Para a simulação da situação livre-livre foram utilizados fios presos nas barras por parafusos. Foram usinadas roscas nos corpos de prova conforme Figura 9 e usados parafusos para auxiliar na fixação. Nas figuras é possível observar a posição dos danos representados por dois entalhes.

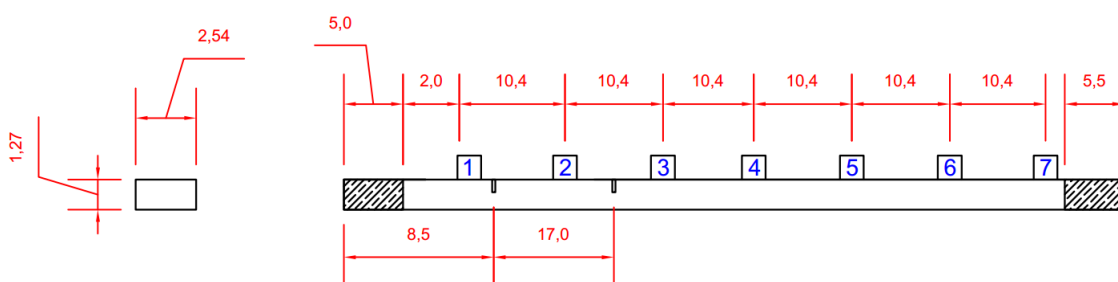


Figura 7 – Posição dos acelerômetros na barra com fixação engaste-engaste

Fonte: Autoria própria

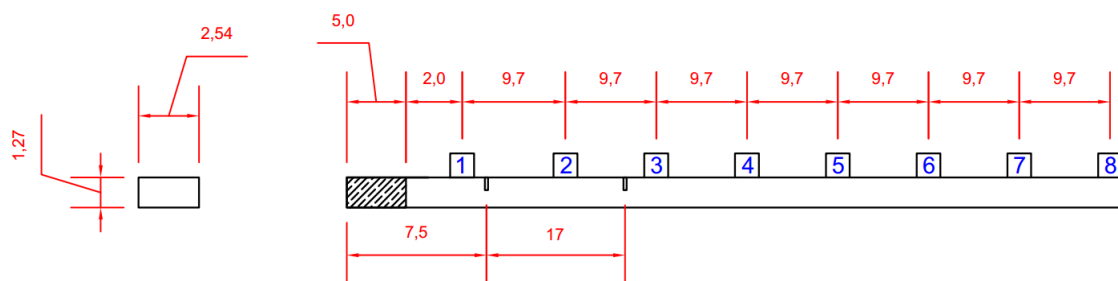


Figura 8 – Posições dos acelerômetros na barra com fixação engaste-livre

Fonte: Autoria própria

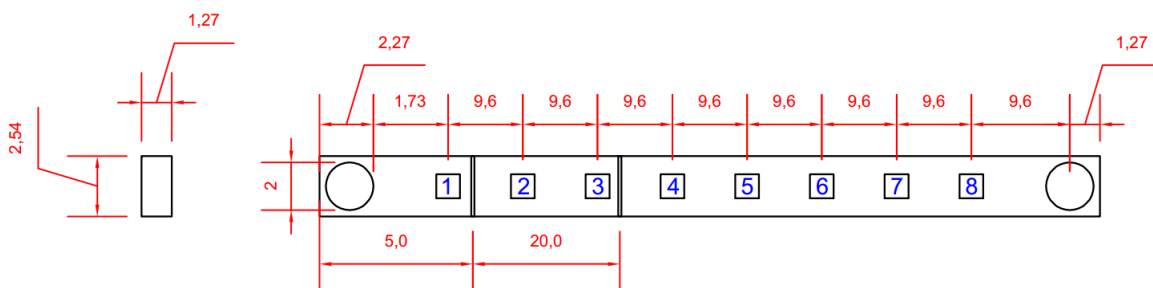


Figura 9 – Posições dos acelerômetros e das roscas na barra para a fixação livre-livre

Fonte: Autoria própria

Um impulso é aplicado verticalmente com um martelo de impacto, obedecendo aos padrões estabelecidos para todos os ensaios.

O procedimento é feito primeiramente para a amostra em boas condições. Depois dos ensaios a amostra (viga) é retirada e um dano é inserido na posição predeterminada. Este dano tem seção retangular e é feito com uma serra-fita.

Este procedimento é repetido para danos com diferentes profundidades. Os parâmetros dos ensaios estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros reais dos danos nos corpos de prova

	Posição (m)	Comprimento (m)	Profundidade (m)
Viga engaste-engaste			0,0010
Dano na posição 1	0,085	0,001	0,0025
			0,0045
Viga engaste-engaste			0,0010
Dano na posição 2	0,255	0,001	0,0025
			0,0045
Viga engaste-livre			0,0010
Dano na posição 1	0,075	0,001	0,0025
			0,0045
Viga engaste-livre			0,0010
Dano na posição 2	0,245	0,001	0,0025
			0,0045
Viga livre-livre			0,0010
Dano na posição 1	0,050	0,001	0,0025
			0,0045
Viga livre-livre			0,0010
Dano na posição 2	0,250	0,001	0,0025
			0,0045

3.1.2 Equipamentos de execução

Para a realização dos experimentos são utilizados os seguintes equipamentos:

- Acelerômetro ICP PCB (análise modal) modelo 333b.
- Martelo de Impacto PCB 086C03.

- Analisador de Sinais HP 3566/67 com 16 canais de 12,4 kHz.

Para o tipo de fixação engaste-engaste são necessários 7 acelerômetros simultâneos e para engaste-livre e livre-livre 8 acelerômetros. Esta diferença se deve pelo espaço físico ocupado pelos engastes.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISE MODAL

4.1.1 Sinais de entrada

Os sinais são obtidos pelos acelerômetros dispostos ao longo da viga. Desta forma, dados são coletados nas diversas situações de dano e de fixação.

Os sinais tanto dos acelerômetros quanto do martelo de impacto são transmitidos para o analisador de sinais, o qual armazena estes sinais em um arquivo no formato HP. Estes arquivos contendo os sinais vibratórios no domínio do tempo são convertidos para o formato Matlab ®. No ambiente Matlab ® são obtidas as curvas da FRF e desenvolvidas as análises dos dados experimentais e as análises numéricas.

A Figura 10 mostra o sinal da força de impacto e a Figura 11 mostra o sinal obtido por um acelerômetro. A FRF é obtida através da resposta do sistema (sinal do acelerômetro) dividido pelo sinal de entrada (martelo) no domínio da frequência. Uma curva da FRF está mostrada na Figura 12.

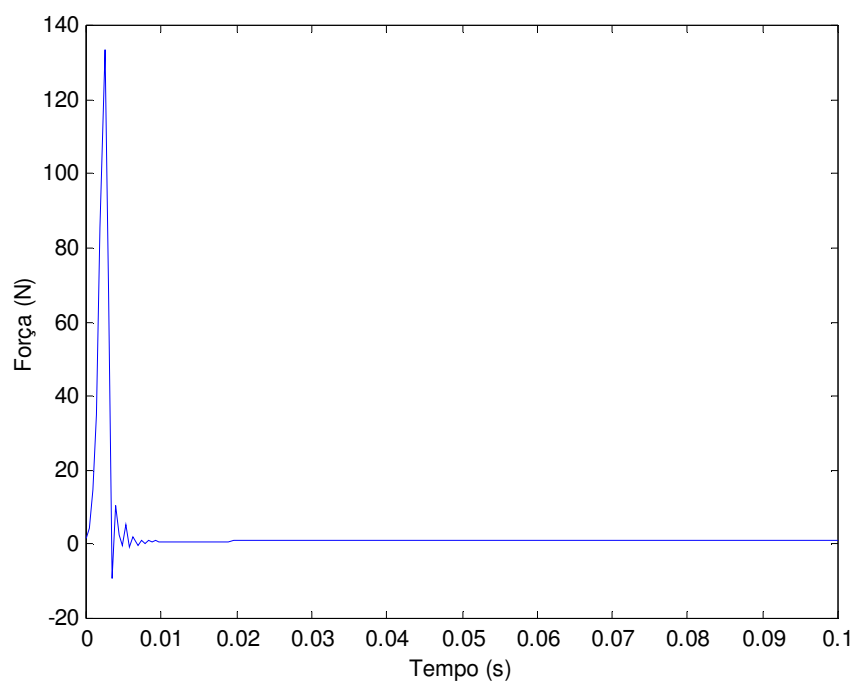


Figura 10 – Sinal da força de impacto

Fonte: Autoria própria

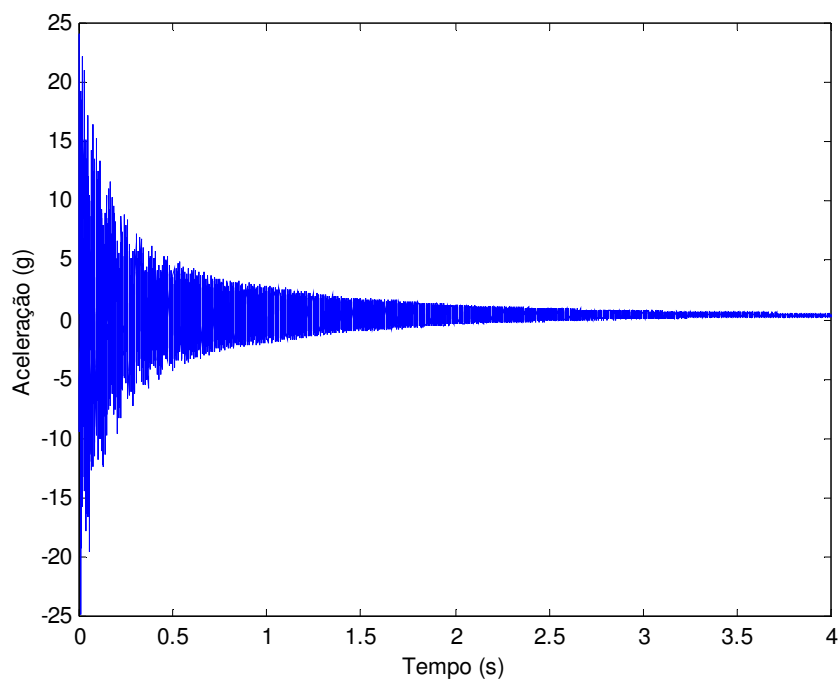


Figura 11– Sinal de um acelerômetro

Fonte: Autoria própria

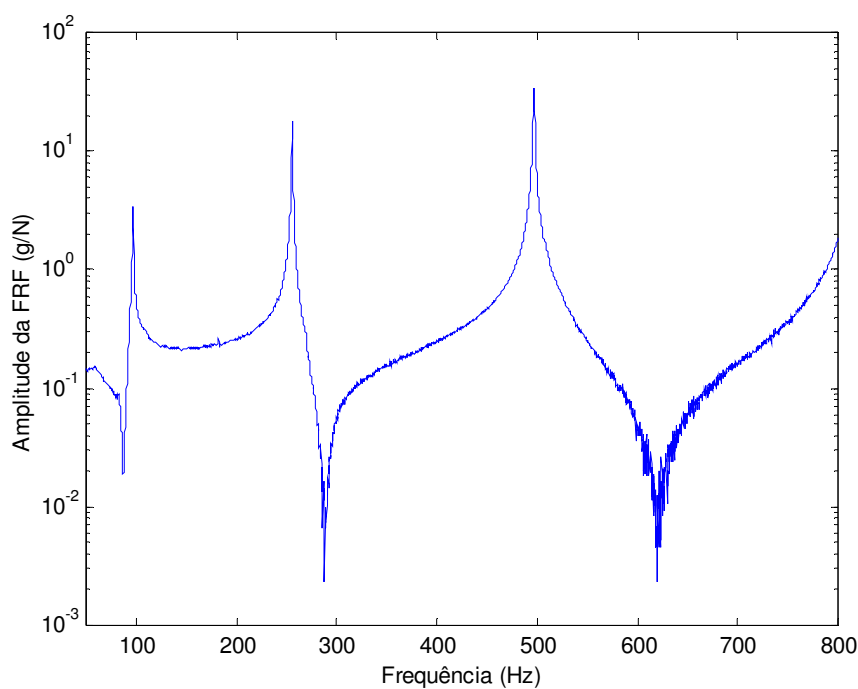


Figura 12 – Curva FRF

Fonte: Autoria própria

4.1.2 Variações de Energia

As frequências naturais para as vigas, em todas as situações, são obtidas com o auxílio do software MATLAB R2006a ® *wavelet4* toolbox. Todos os sinais do acelerômetro em cada ponto de medição, contendo os três primeiros modos de vibrar de interesse, são processados pela TCW contida na caixa de ferramentas do software MATLAB R2006a ®. É desenvolvida uma rotina computacional para cálculo das diferenças de energia, conforme Equação 11. Estas diferenças de energia podem ser vistas nas Figuras 13 a 16.

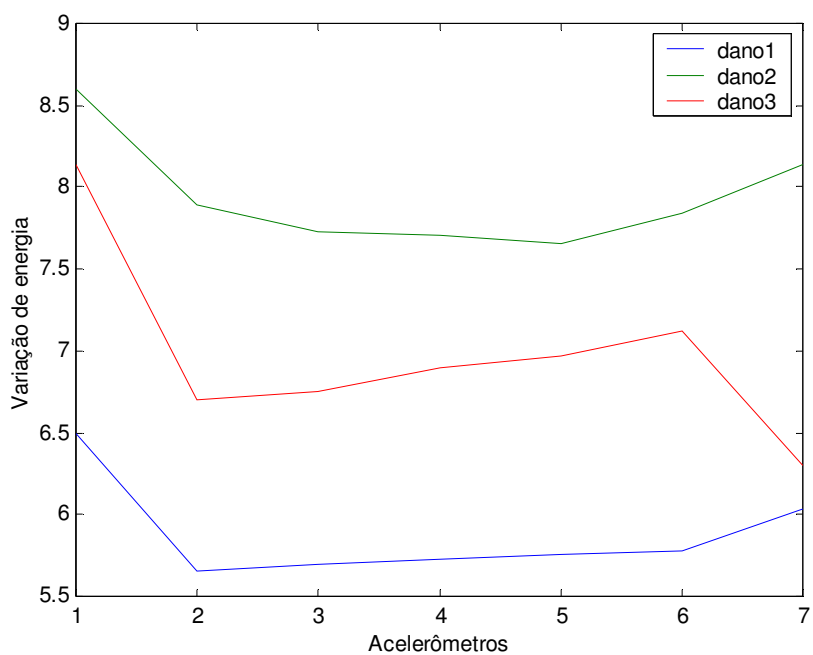


Figura 13 - Variações de energia para a situação engaste-engaste e dano na posição 1

Fonte: Autoria própria

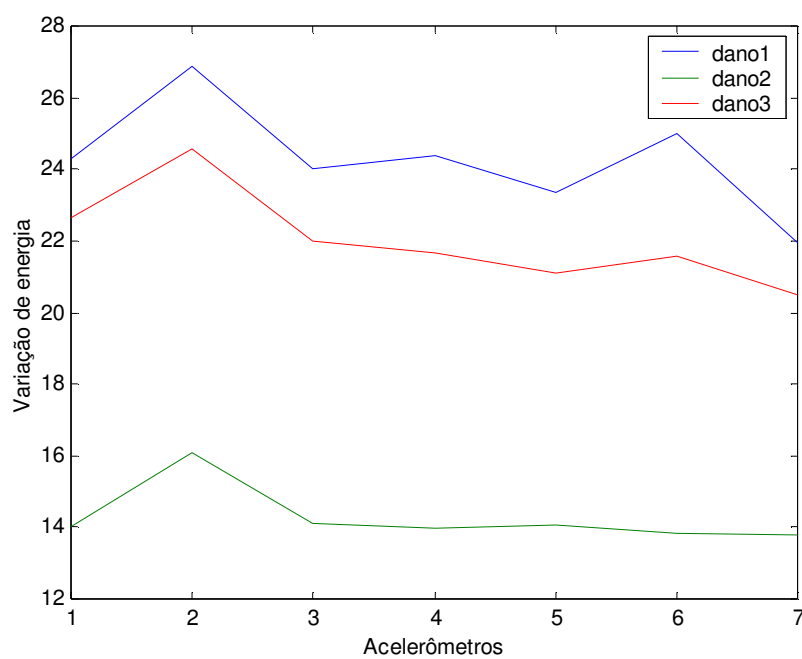


Figura 14 - Variações de energia para a situação engaste-engaste e dano na posição 2

Fonte: Autoria própria

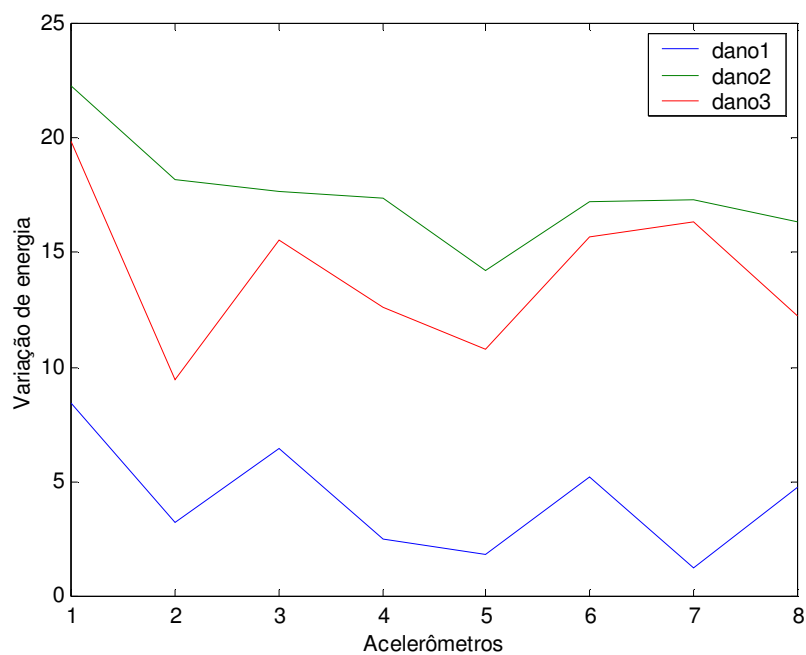


Figura 15 - Variações de energia para a situação engaste-livre e dano na posição 1

Fonte: Autoria própria

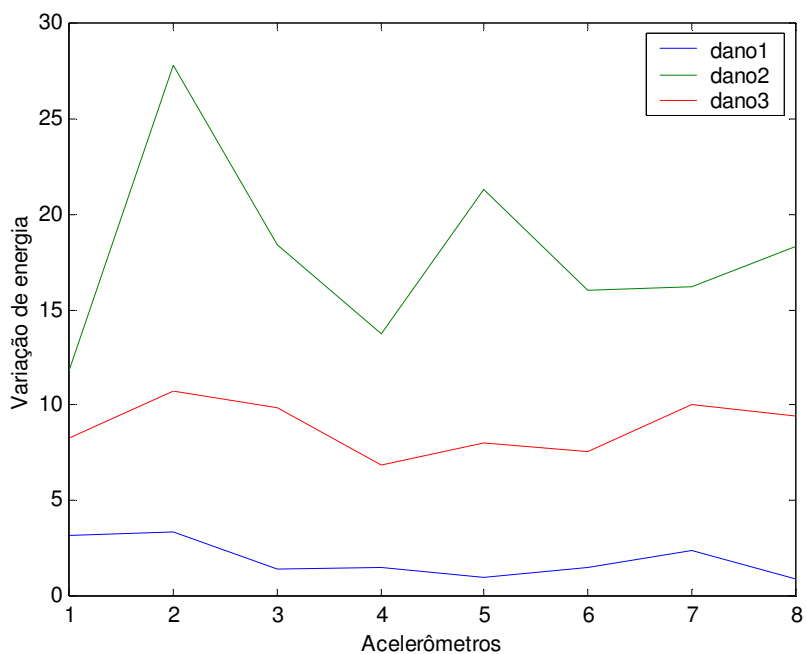


Figura 16 - Variações de energia para a situação engaste-livre e dano na posição 2

Fonte: Autoria própria

Como apresentadas, as variações de energia para a situação engaste-engaste estão apresentadas nas Figuras 13 e 14, e para engaste-livre nas Figuras 15 e 16. Observa-se que em ambas as situações têm-se o primeiro acelerômetro com uma maior variação na primeira posição de dano e o segundo acelerômetro uma maior variação na segunda posição de dano, representado pelo maior pico nas figuras. Isto já era esperado, pois conforme mostrado nas Figuras 7 e 8, o dano está próximo destes acelerômetros.

Já na Figura 17, para a fixação livre-livre, são apresentadas maiores variações no acelerômetro 1. O pico observado nesta figura indica que existe um dano próximo a este acelerômetro conforme apresentada a posição experimental do dano na Figura 9.

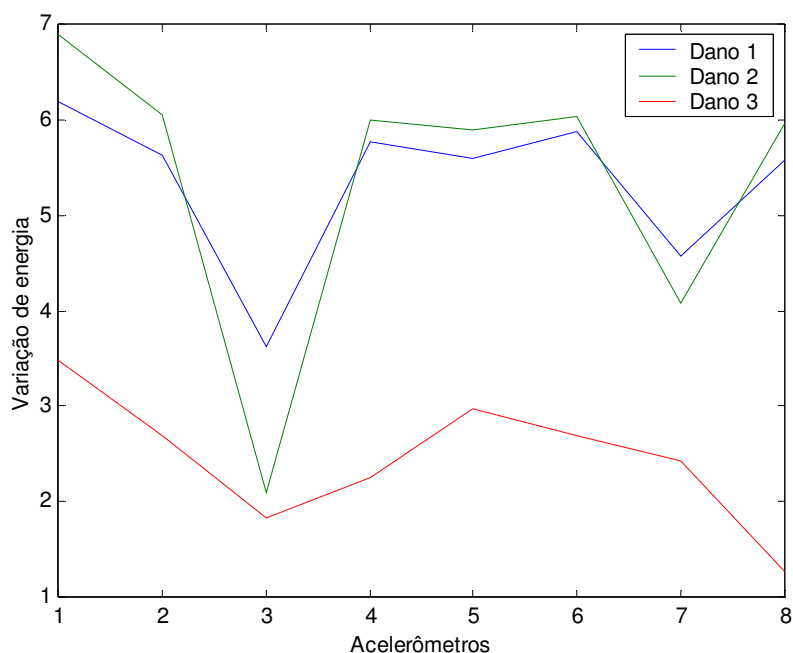


Figura 17 - Variações de energia para a situação livre-livre e dano na posição 1

Fonte: Autoria própria

Este gráfico possui descontinuidades abruptas que interferem na análise de variação de energia. Isto acontece pois o acelerômetro foi posicionado perto de um ponto nodal, fazendo com que a aceleração deste ponto varie com maior facilidade devido aos valores serem muito próximos a zero.

Na Figura 18 é possível fazer a mesma análise, mas para o pico na região do acelerômetro 3, indicando, também, um dano próximo deste acelerômetro, como previsto.

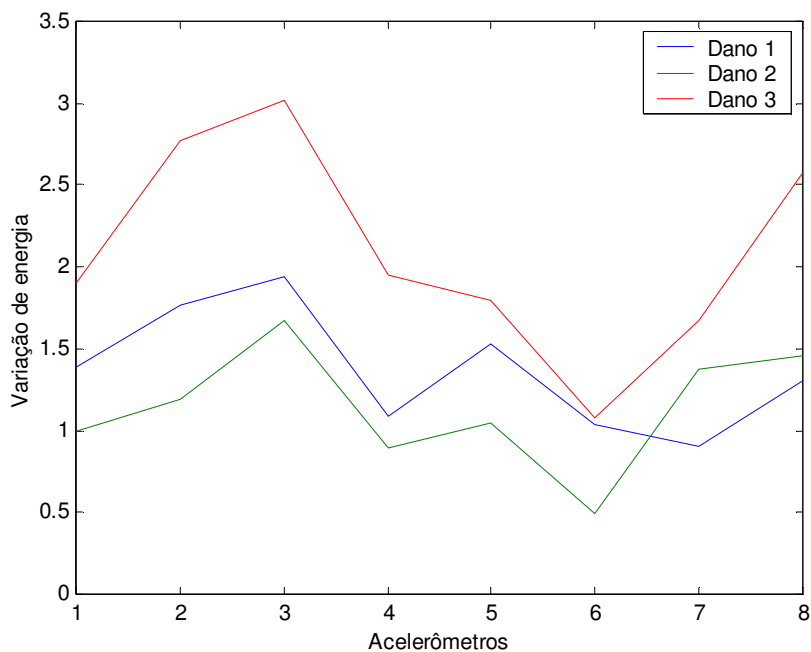


Figura 18 - Variações de energia para a situação livre-livre e dano na posição 2

Fonte: Autoria própria

4.1.3 Frequências Naturais

Para obtenção das frequências naturais experimentais para diferentes severidades é utilizado o método da Fração Racional Polinomial (FRP). Este método é bastante utilizado por analisar os dados no domínio da frequência (Novak 2003). As Tabelas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 apresentam os resultados das frequências naturais (em Hz) para os diferentes tipos de engastes e posições do dano.

Tabela 2 - Freqüências naturais (viga engastada/livre, dano na posição 1)

Sistema	Primeiro modo	Segundo modo	Terceiro modo
Sem dano	15,6255	95,4520	275,3000
Dano 1	15,5980	95,3784	275,2344
Dano 2	15,4620	95,0732	274,9741
Dano 3	15,0912	94,0005	274,2500

Tabela 3 - Freqüências naturais (viga engastada/livre, dano na posição 2)

Sistema	Primeiro modo	Segundo modo	Terceiro modo
Sem dano	15,7105	95,8289	276,2359
Dano 1	15,6953	95,7910	274,9540
Dano 2	15,6400	95,7140	273,6512
Dano 3	15,4139	94,3784	269,9700

Tabela 4 - Freqüências naturais (viga engastada/engastada, dano na posição 1)

Sistema	Primeiro modo	Segundo modo	Terceiro modo
Sem dano	42,4015	170,4084	378,8815
Dano 1	42,3974	170,3058	378,5085
Dano 2	42,3655	169,9673	377,4174
Dano 3	42,1201	168,8633	373,4515

Tabela 5 - Freqüências naturais (viga engastada/engastada, dano na posição 2)

Sistema	Primeiro modo	Segundo modo	Terceiro modo
Sem dano	42,4785	170,5196	378,4164
Dano 1	42,4426	170,3060	378,3444
Dano 2	42,3168	169,4087	378,2915
Dano 3	42,8685	167,3105	378,0550

Tabela 6 - Freqüências naturais (viga livre/livre, dano na posição 1)

Sistema	Primeiro modo	Segundo modo	Terceiro modo
Sem dano	97.36	255.77	498.00
Dano 1	97.09	255.87	497.81
Dano 2	96.99	255.84	497.89
Dano 3	97.01	255.82	496.90

Tabela 7 - Freqüências naturais (viga livre/livre, dano na posição 2)

Sistema	Primeiro modo	Segundo modo	Terceiro modo
Sem dano	97.23	256.07	499.73
Dano 1	97.21	255.81	498.88
Dano 2	96.76	254.60	497.95
Dano 3	96.19	251.35	495.64

É possível ver pela análise destas tabelas que existe uma mudança significativa nas freqüências naturais conforme o dano foi aprofundado. A redução na freqüência natural é de aproximadamente 1% para as situações subseqüentes de dano, mantendo os mesmos parâmetros. Existem exceções na máxima profundidade de dano no estado engastada-engastada para o primeiro modo e também para o estado livre-livre.

Também é possível ressaltar que as freqüências naturais permanecem as mesmas para impactos consecutivos, isto verifica que o sistema não está sendo alterado para diferentes impactos.

Para ensaios consecutivos a freqüência natural não se modifica, porém para um aumento de profundidade no dano ou fixação diferente ela se modifica em um fator de 1% em média. Sabendo disso, pode-se afirmar que a análise de freqüências naturais é capaz de informar se há um dano ou não, porém não pode afirmar qual a posição do mesmo, nem tampouco a sua severidade.

4.1.4 Modos de Vibrar

Para simulação numérica do sistema são obtidos modelos numéricos a partir do MEF. É utilizada, também, a teoria de elasticidade bidimensional.

Os danos são incluídos no modelo matemático como rasgos de largura de 1 mm e profundidades variando de 1 a 5 mm. Para ajuste da posição correta utiliza-se a minimização de um parâmetro (Erro) dado pela equação 17 levando-se em conta a variação das freqüências naturais dos três primeiros modos de vibrar, ou seja:

$$Erro = \sum_{i=1}^3 \omega_{ei} - \omega_{ni} \quad (17)$$

Onde ω_{ei} é a freqüência natural experimental e ω_{ni} é a freqüência natural numérica.

Através da minimização deste parâmetro é possível ajustar a posição correta do dano e sua severidade. Os modelos matemáticos são validados levando-se em consideração o parâmetro MAC.

São obtidas curvas de comportamento dos modos de vibrar para as diversas fixações, posições do dano e modos de vibrar. Para fins ilustrativos são apresentadas apenas algumas destas condições nas Figuras 19 a 27. Estas figuras, portanto, mostram o comportamento dos modos de vibrar reais e o teórico sem dano.

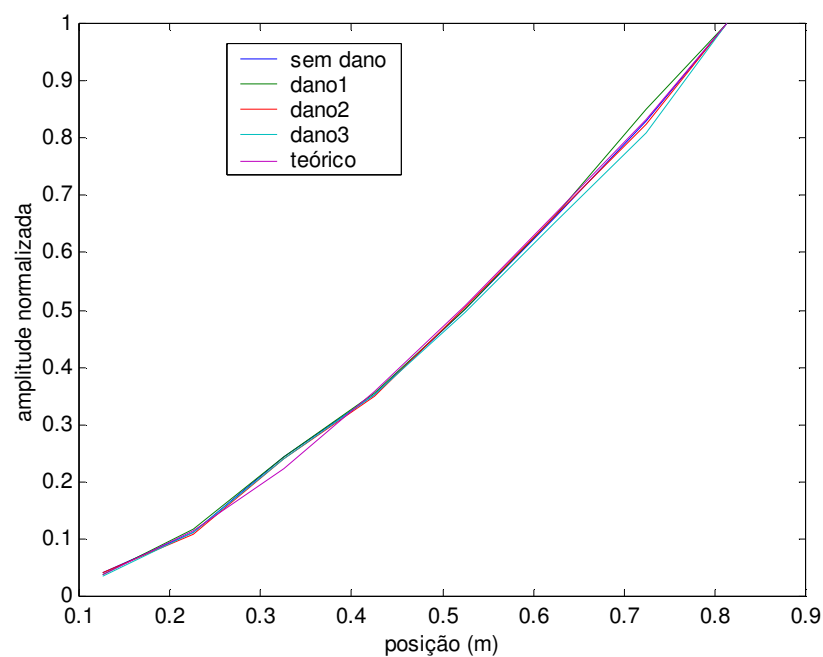


Figura 19 - Primeiro modo de vibrar (viga engastada/livre, dano na posição 1)

Fonte: Autoria própria

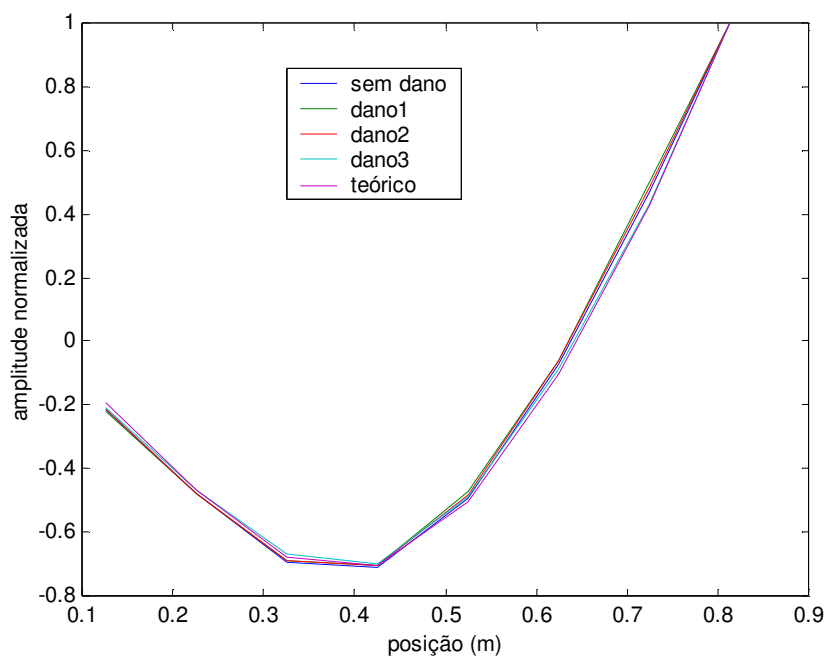


Figura 20 - Segundo modo de vibrar (viga engastada/livre, dano na posição 1)

Fonte: Autoria própria

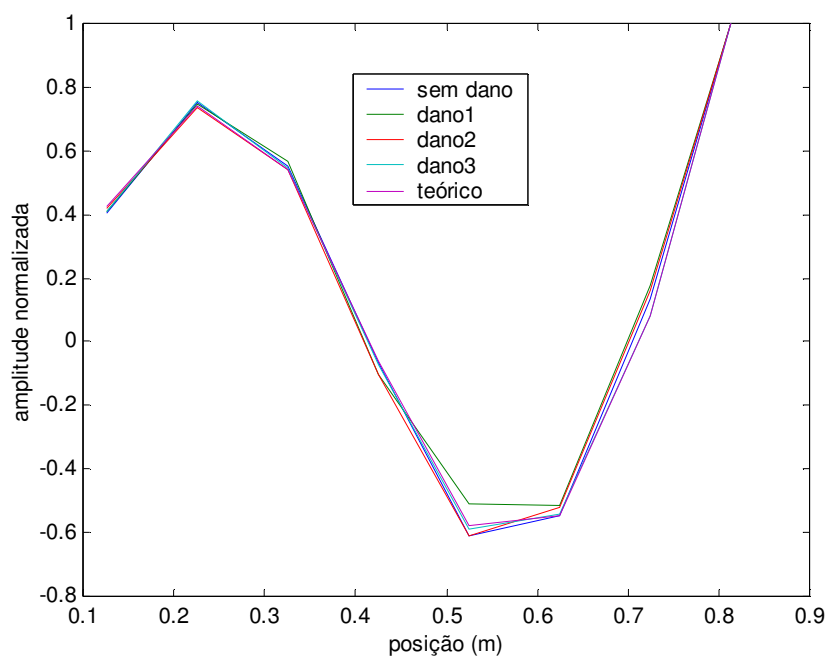


Figura 21 - Terceiro modo de vibrar (viga engastada/livre, dano na posição 1)

Fonte: Autoria própria

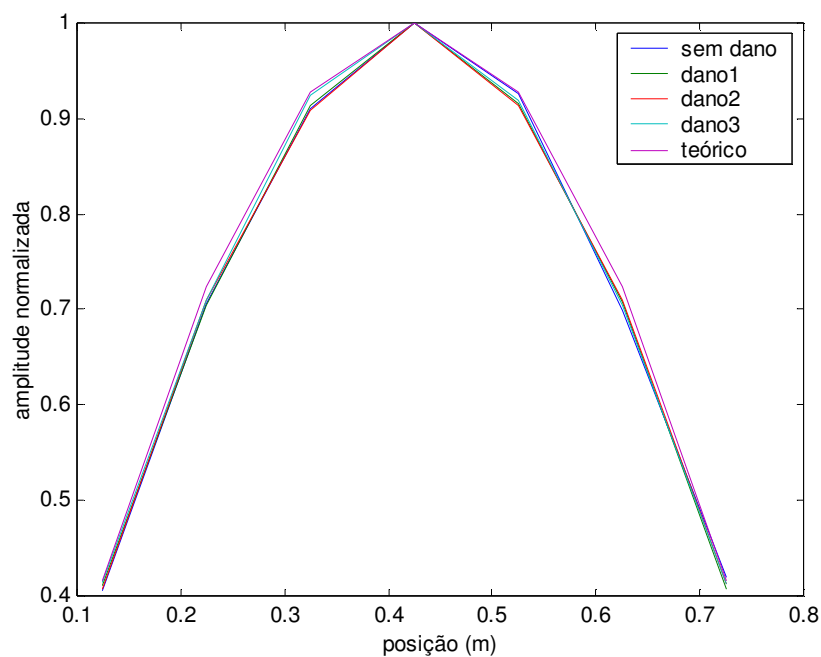


Figura 22 - Primeiro modo de vibrar (viga engastada/engastada, dano na posição 2)

Fonte: Autoria própria

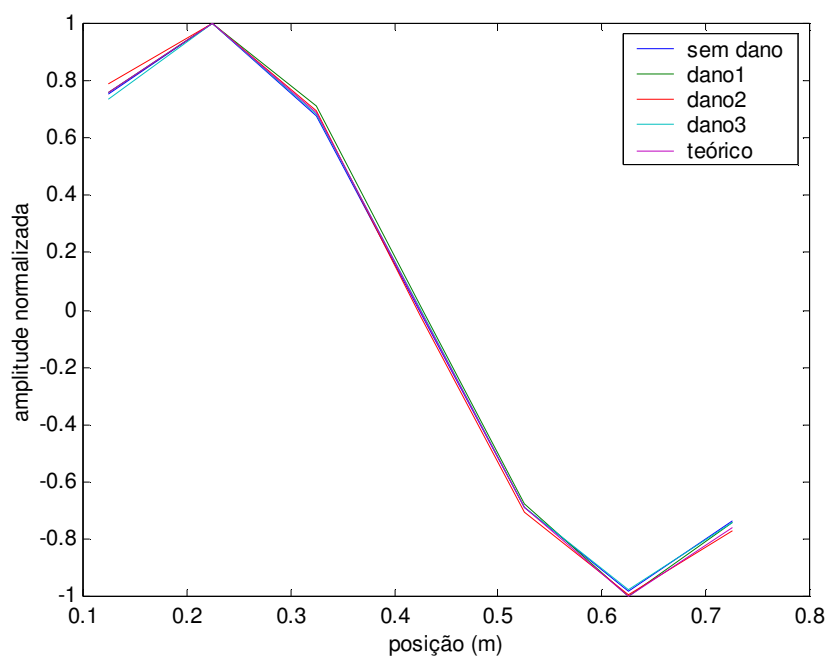


Figura 23 - Segundo modo de vibrar (viga engastada/engastada, dano na posição 2)

Fonte: Autoria própria

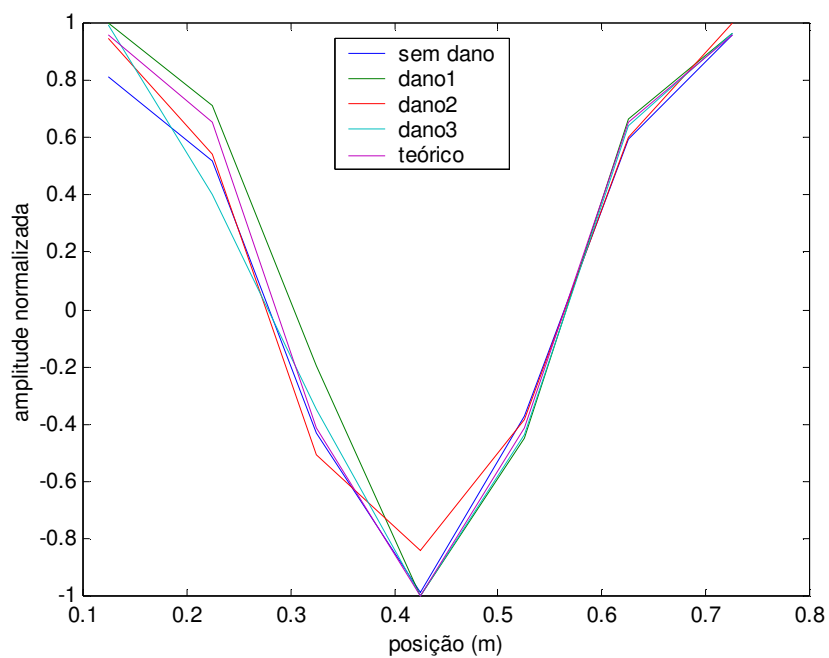


Figura 24 - Terceiro modo de vibrar (viga engastada/engastada, dano na posição 2)

Fonte: Autoria própria

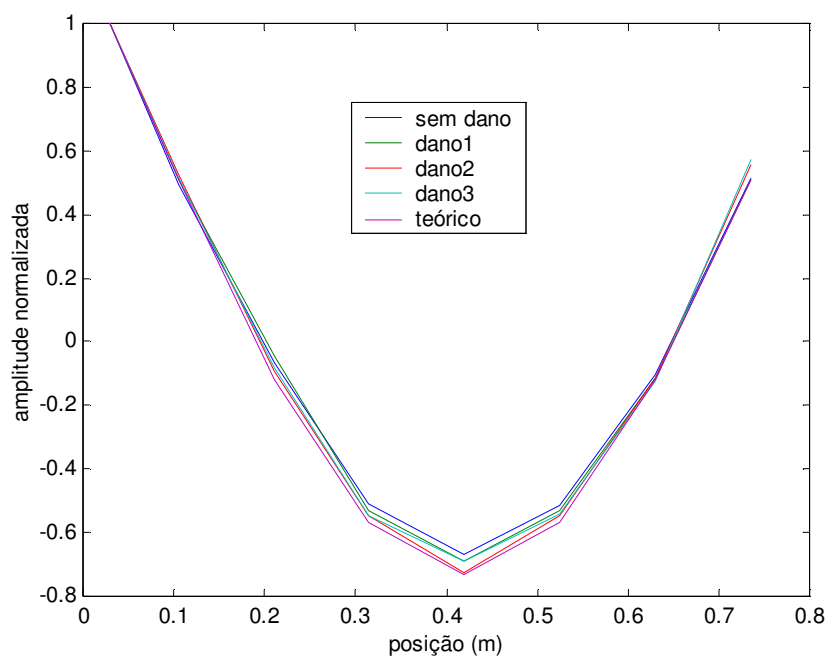


Figura 25 - Primeiro modo de vibrar (viga livre/livre, dano na posição 1)

Fonte: Autoria própria

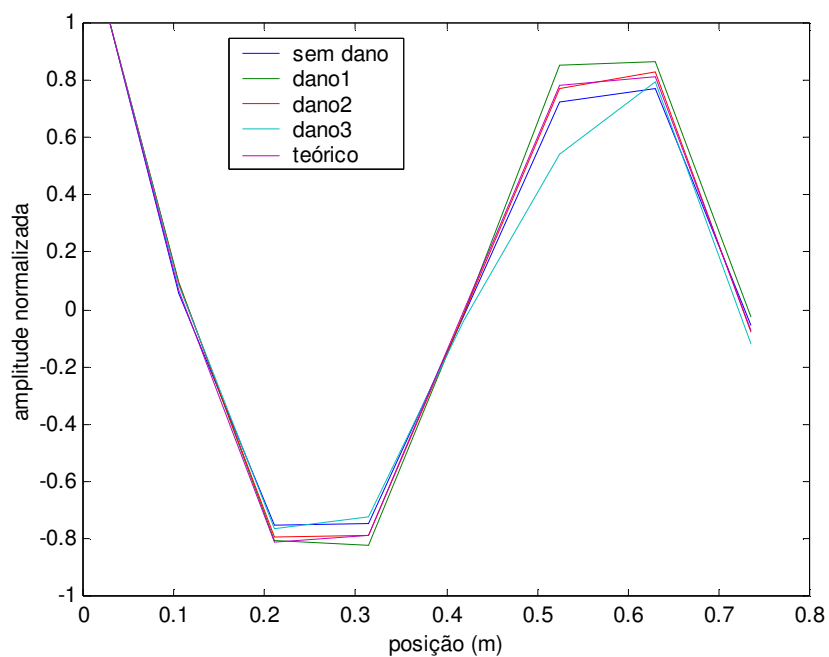


Figura 26 - Segundo modo de vibrar (viga livre/livre, dano na posição 1)

Fonte: Autoria própria

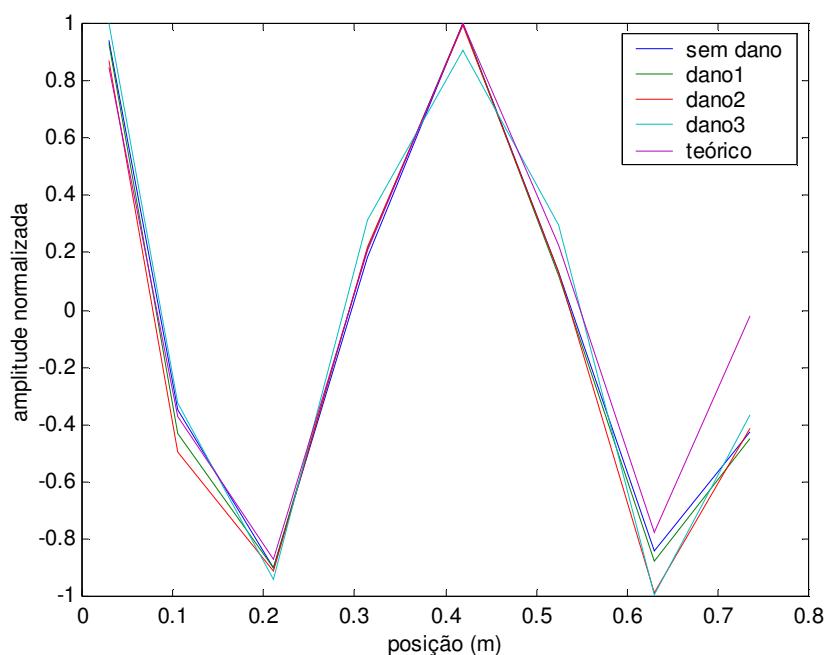


Figura 27 - Terceiro modo de vibrar (viga livre/livre, dano na posição 1)

Fonte: Autoria própria

Vê-se que os modos de vibrar não alteram significativamente suas formas conforme o dano foi sendo aumentado. Nem tampouco as amplitudes nos pontos medidos são modificadas a ponto de que se possam tirar conclusões sobre a presença do dano.

Entretanto, pode-se ver que o experimento foi bem conduzido, pois a curva teórica se aproxima muito dos valores reais encontrados.

Para os modos apresentados nas Figuras 24, 26 e 27 é possível observar uma diferença para os diferentes danos. Acredita-se que esta diferença se dá pela falta de um ambiente e bancada adequada no ensaio, como por exemplo, uma dificuldade na fixação do acelerômetro, ou até mesmo a influência da instrumentação no sinal de entrada.

4.2 PARÂMETROS OTIMIZADOS

A partir de uma posição inicial (posição do acelerômetro com maior variação de energia) procura-se fazer uma varredura da posição do dano no modelo numérico. Esta varredura é feita variando desde a metade da posição do acelerômetro anterior até a metade da posição do acelerômetro posterior ao acelerômetro que apresentava maior variação de energia. Assim são obtidas as curvas mostradas nas Figuras 28, 29 e 30. Estas curvas são obtidas para os três primeiros modos de vibrar e para os sistemas com as três diferentes condições de fixação. Para fins ilustrativos, serão apresentadas apenas as curvas da viga engastada-livre.

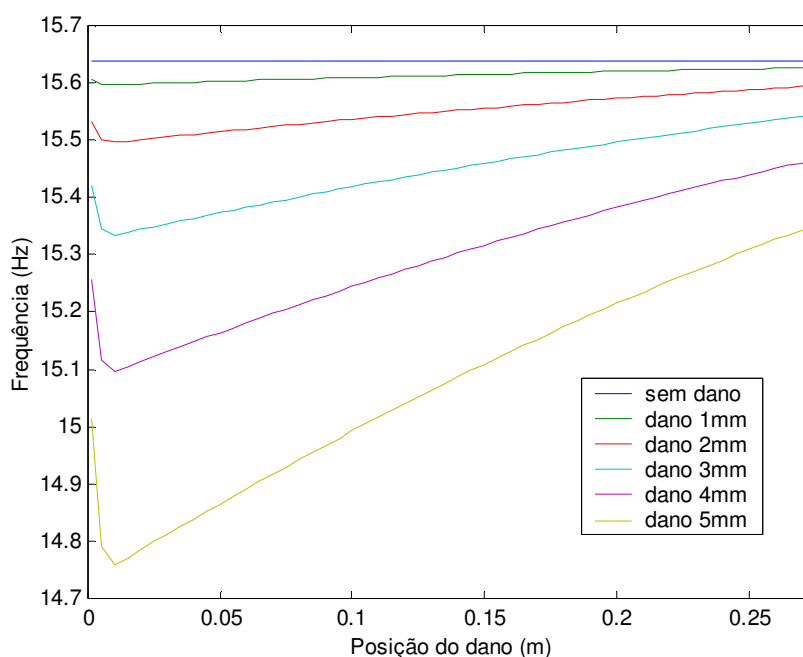


Figura 28 – Variação da primeira frequência natural (viga engastada-livre)

Fonte: Autoria própria

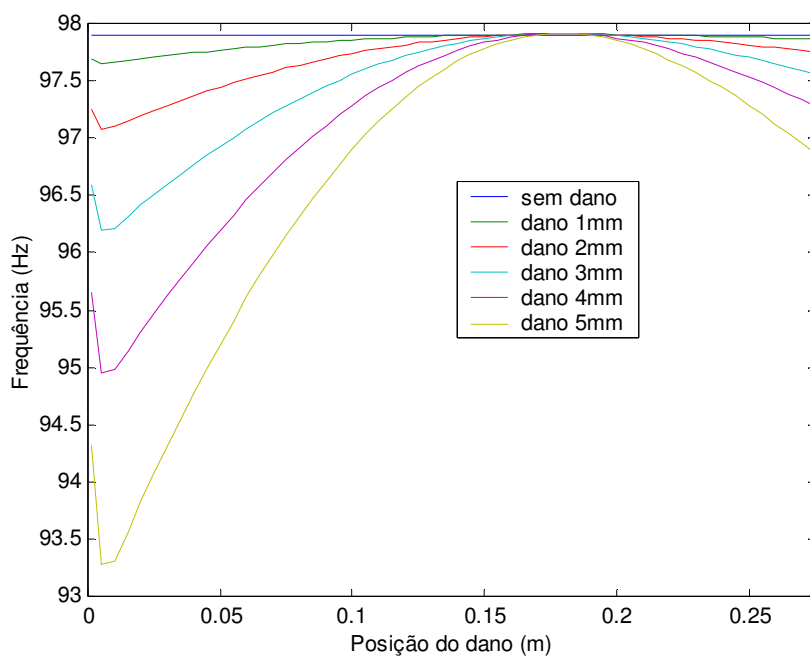


Figura 29 – Variação da segunda frequência natural (viga engastada-livre)

Fonte: Autoria própria

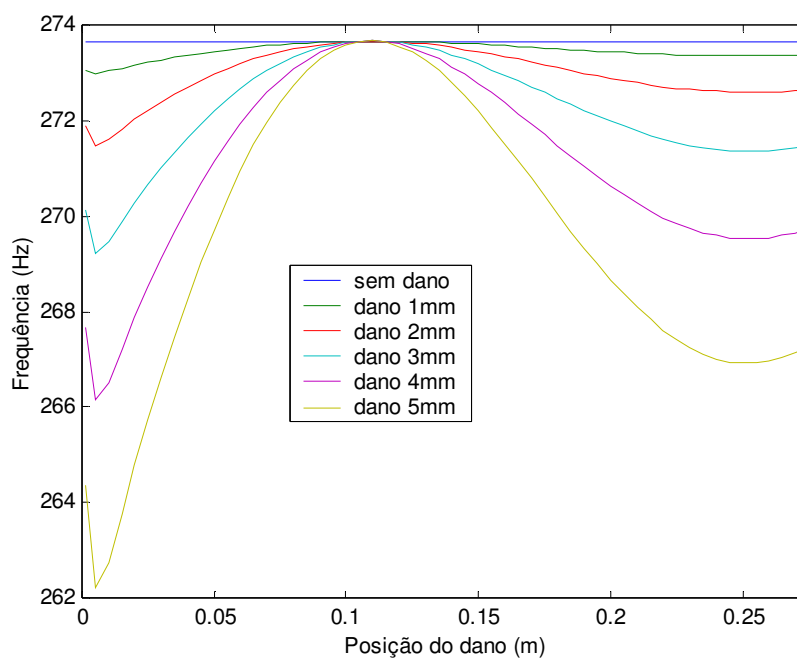


Figura 30 – Variação da segunda frequência natural (viga engastada-livre)

Fonte: Autoria própria

Após a obtenção das freqüências naturais experimentais e das curvas por MEF, é possível minimizar uma função (*Erro*), apresentada na equação 17, utilizando-se um método de ajuste, no caso, PSO. O método resulta nos parâmetros otimizados para cada situação. As Tabelas 8 a 13 mostram os parâmetros ajustados para cada situação, ou seja, posição, largura e profundidade do dano.

Tabela 8 - Parâmetros otimizados (engaste-livre – dano na posição 1)

	Posição (m)	Comprimento (m)	Altura (m)
Dano 1	0.0745	0.001	0.00095
Dano 2	0.0751	0.0011	0.00249
Dano 3	0.075	0.0012	0.0046
Valor referencia	0.075	0.001	0.001 0.0025 0.0045

Tabela 9 - Parâmetros otimizados (engaste-livre – dano na posição 2)

	Posição (m)	Comprimento (m)	Altura (m)
Dano 1	0.2435	0.0009	0.00096
Dano 2	0.2455	0.0012	0.00252
Dano 3	0.246	0.0012	0.00462
Valor referencia	0.25	0.001	0.001 0.0025 0.0045

Tabela 10 - Parâmetros otimizados (engaste-engaste – da nona posição 1)

	Posição (m)	Comprimento (m)	Altura (m)
Dano 1	0.0845	0.0011	0.00097
Dano 2	0.0852	0.001	0.00255
Dano 3	0.0851	0.0011	0.00452
Valor referencia	0.085	0.001	0.001 0.0025 0.0045

Tabela 11 - Parâmetros otimizados (engaste-engaste – dano na posição 2)

	Posição (m)	Comprimento (m)	Altura (m)
Dano 1	0.255	0.0009	0.00011
Dano 2	0.257	0.0011	0.00245
Dano 3	0.258	0.0012	0.00462
Valor referencia	0.25	0.001	0.001 0.0025 0.0045

Tabela 12 - Parâmetros otimizados (livre-livre – dano na posição 1)

	Posição (m)	Comprimento (m)	Altura (m)
Dano 1	0.0505	0.0012	0.00089
Dano 2	0.0511	0.0012	0.00253
Dano 3	0.0512	0.0013	0.00452
Valor referencia	0.05	0.001	0.001 0.0025 0.0045

Tabela 13 - Parâmetros otimizados (livre-livre – dano na posição 2)

	Posição (m)	Comprimento (m)	Altura (m)
Dano 1	0.2508	0.0009	0.00094
Dano 2	0.251	0.0011	0.00254
Dano 3	0.2512	0.0012	0.00449
Valor referencia	0.075	0.001	0.001 0.0025 0.0045

Comparando os parâmetros utilizados com os valores de referência, é possível ver que eles estão muito próximos do real. Fazendo a diferença tem-se que as maiores variações percentuais foram de -3% e +2,6%.

4.3 WAVELETS

As curvas dos coeficientes da TW são mostradas nas Figuras 31 a 36. Podem-se observar os seguintes pontos:

- Conforme ocorre o aumento da escala percebemos uma redução na amplitude dos coeficientes (a1 até a8) isto mostra que baixas escalas, ou seja, modos de vibrar maiores, tem uma presença mais forte porém pouco duradoura.
- Em escalas mais altas fica mais evidente a mudança periódica do sinal do que em escalas mais baixas.
- Sinais com freqüências mais altas possuem mais energia e perduram por mais tempo do que sinais com baixas freqüências.

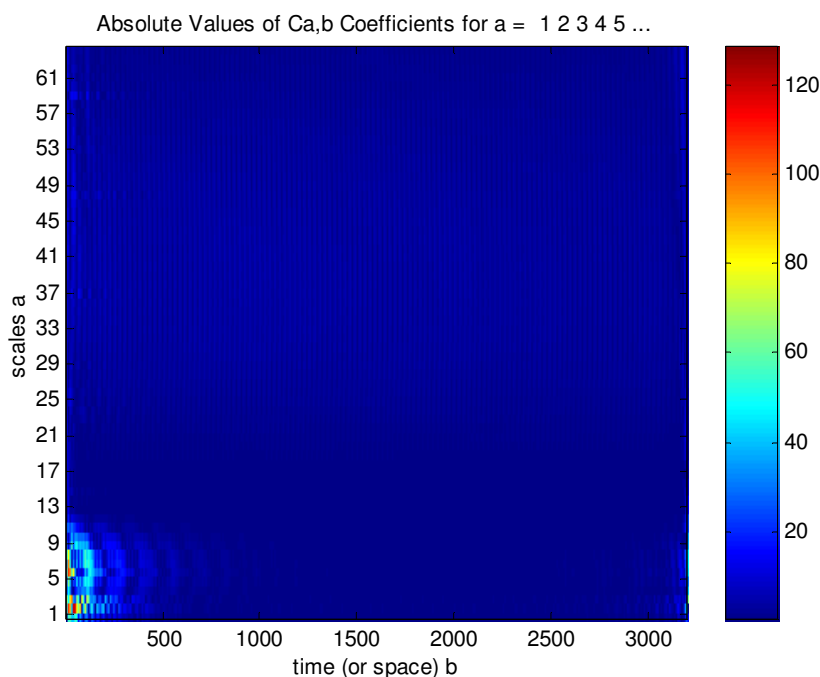


Figura 31 – Curva de coeficiente da transformada Wavelet para a viga engastada/livre

Fonte: Autoria própria

Esta figura mostra a variação do sinal no tempo em função do parâmetro de escala “a”. Na Figura 32 é possível visualizar este comportamento numa forma tridimensional. Nesta figura o eixo denominado “pontos” refere-se ao tempo, escala

“a” (parâmetro da *wavelet*) e amplitude do sinal. É possível notar um grande acúmulo de energia no início e a diminuição desta energia ao longo do tempo (conforme mostrado na Figura 11). Desta forma a Figura 31 é uma visão de topo da Figura 32.

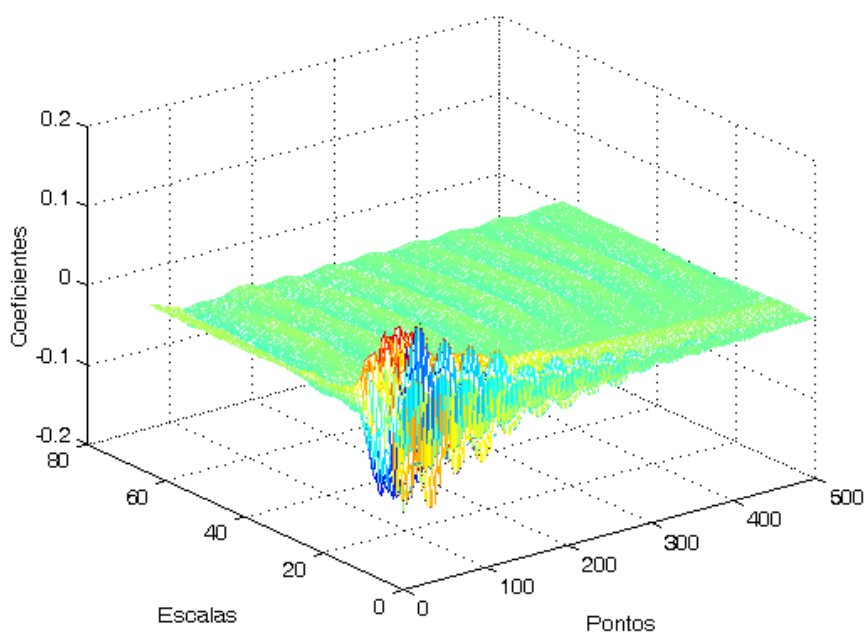


Figura 32 - Curva tridimensional de coeficiente da transformada Wavelet para a viga engastada/livre

Fonte: Autoria própria

Na Figura 33 estão mostradas três regiões de concentração de energia. Notam-se, no início, picos elevados com poucos pontos de escala (terceiro modo de vibrar); depois uma região intermediária (segundo modo de vibrar) e finalmente uma região com picos menores e banda larga (faixa de valores da escala; primeiro modo de vibrar). O mesmo tipo de análise de aplica para as Figuras 34 a 36.

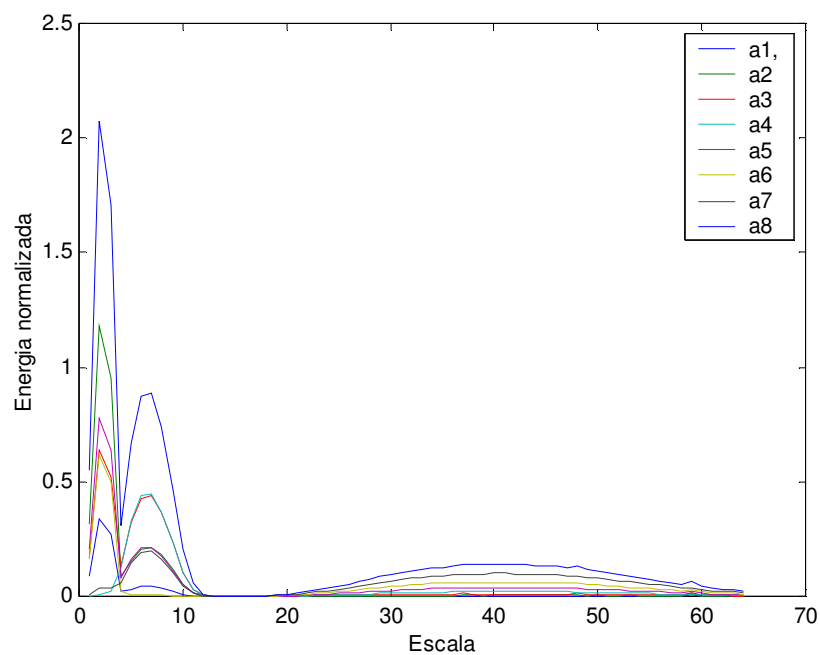


Figura 33 – Comparação da energia normalizada dos coeficientes a1 a a8 em diferentes escalas para a viga engaste/livre

Fonte: Autoria própria

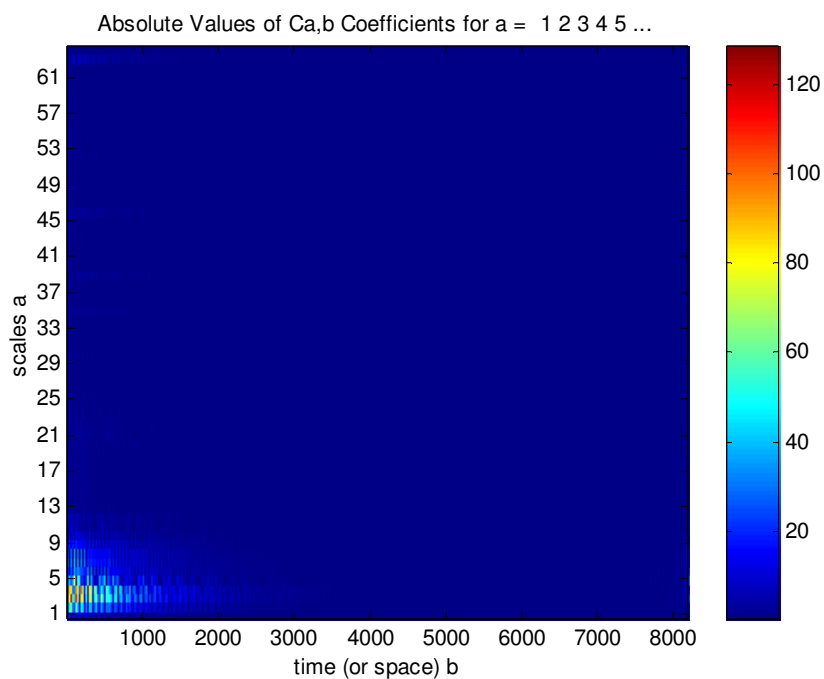


Figura 34 - Curva de coeficiente da transformada Wavelet para a viga livre/livre

Fonte: Autoria própria

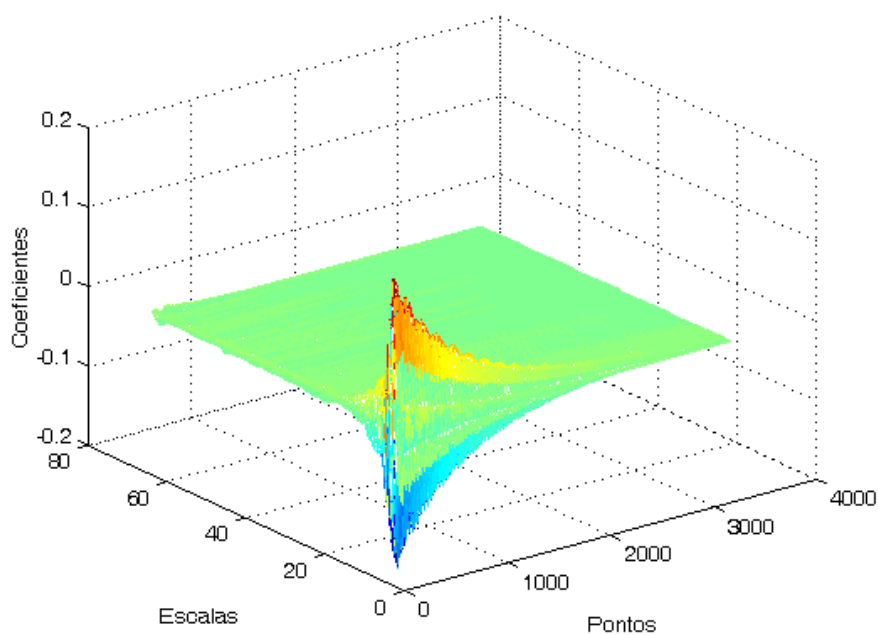


Figura 35 - Curva tridimensional de coeficiente da transformada Wavelet para a viga livre/livre

Fonte: Autoria própria

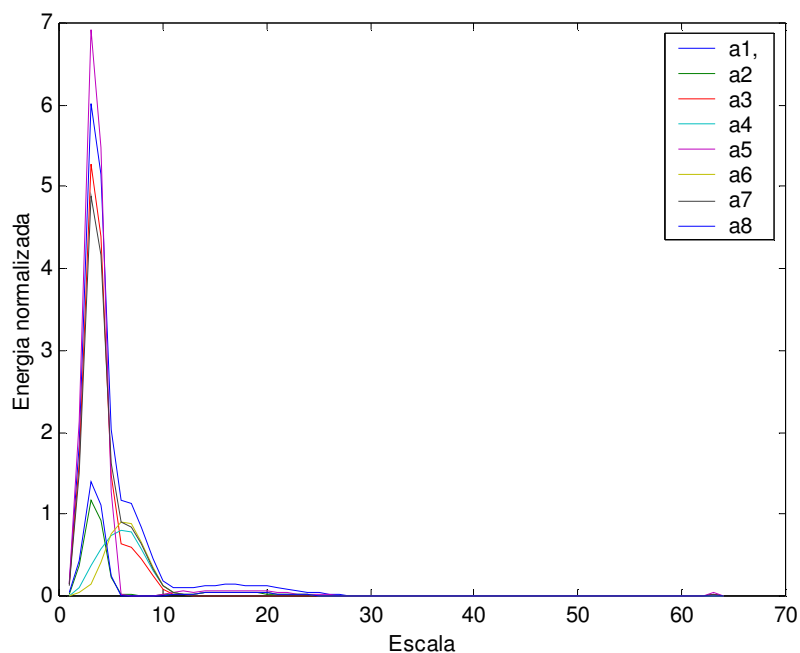


Figura 36 - Comparação da energia normalizada dos coeficientes a1 a a8 em diferentes escalas para a viga livre/livre

Fonte: Autoria

5 CONCLUSÕES

O estudo foi direcionado na análise de falhas em estruturas através da utilização do método de *wavelet*. Foram feitos experimentos em diferentes estados de fixação e com diferentes profundezas de danos.

Através da aquisição de sinais vibratórios (força, acelerações) em diferentes pontos das amostras (acelerômetros disposto ao longo das amostras) foi possível encontrar os valores das frequências naturais, modos de vibrar e das curvas da FRF. Através da comparação de valores experimentais e numéricos do comportamento próprio do sistema foi possível a validação de um modelo matemático obtido pelo MEF.

Para uma localização preliminar do dano, usou-se a TW e um parâmetro de energia baseado no sinal experimental obtidos pelos acelerômetros. Para diminuir o tempo computacional se variou a posição do dano no modelo numérico desde a posição intermediária entre o acelerômetro anterior e a posição intermediária do acelerômetro posterior ao acelerômetro que apresentava maior variação de energia. Preliminarmente se usaram danos com configurações de 1 mm de largura e profundidades variando de 1 a 5 mm. Utilizando uma função objetivo baseada num parâmetro de erro (equação 17) e um método de ajuste (PSO) foi possível ajustar a posição do dano e os valores geométricos dos mesmos. Notou-se que a posição numérica e os parâmetros ajustados estão próximos dos valores de referência para todas as situações.

Os resultados apresentados foram muito satisfatórios. O método pode ser usado para determinar globalmente se uma estrutura apresenta algum tipo de falha, podendo determinar com certa precisão a localização do dano e com o auxílio de uma modelagem finita pode-se também determinar a severidade deste dano na estrutura.

As posições dos sensores também podem ser otimizadas para diminuir a interferência de pontos nodais nas análises. Da mesma forma, podem ser utilizados

sensores a laser de não-contato para evitar interferência de massas e rigidez adicionais.

REFERÊNCIAS

AHMADIAN, Hamid; MOTTERSHEAD, John E.;& FRISWELL, Michael I.; *Substructure Modes for Damage Detection*. **Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures**, Proceedings of DAMAS '97, University of Sheffield, UK 257-268, 1997.

AYDOGAN, Mustafa Ö. **Damage Detection in Structures Using Vibration Measurements**. 2003. Dissertação de Mestrado – Middle East Technical University, Ankara, Turquia, 2003.

BAYISSA, Wirtu. L.; HARITOS, Nicholas.e THELANDERSSON, Sven. *Vibration-based structural damage identification using wavelet transform*. **Mechanical Systems and Signal Processing**. Vol 22, 2008.1194-1215.

CAWLEY, Peter, ADAMS, Robert. D. *Defect location in structures by a vibration technique*. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, 1 de abril de 1979. St. Louis, Missouri. 49-57.

CHANG, Chih-Chieh; CHEN, Lien-Wen. *Vibration damage detection of a Timoshenko beam by spatial wavelet based approach*. **Applied Acoustics**, 1217-1240,2003.

CHONDROS, Thomas G. **Dynamic response of cracked beams**.1977. Dissertação de Mestrado - University of Patras, Patras, Grécia, 1977.

CRUZ, Paulo J. S. e SALGADO, Rolando. *Performance of Vibration-Based Damage Detection Methods in Bridges*. **Computer-Aided Civil Infrastructure Engineering**. Vol 24-1, 19 denov de 2008.62-79.

DIMAROGONAS, Andrew D. **Vibration Engineering**. St. Paul, Massachusetts: West Publishers, 1976.

ETTOUNEY, Mohammed.; DADDAZIO, Raymond; HAPIJ, Adam; ALY, Amr. *Health Monitoring of Complex Structures, Smart Structures and Materials*. **Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies**, Proceedings of SPIE, vol. 3, 368-379, 1998.

GABOR, Dennis. *Theory of Communication*. **IEEE Journal**, 429-457, 25 de nov de 1944.

FARIA, Regis R. A. **Aplicação de Wavelets na Análise de Gestos Musicais em Timbres de Instrumentos Acústicos Tradicionais**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.

GABROWSKA, J.; PALACZ, M. **Damage Identification by Wavelet Analysis**. Mechanical Systems And Signal Processing, 2008, Vol. 22.

HAN, Jiangang; REN, Weixin; SUN, Zengshou. *Wavelet packet based damage identification of beam structures*. **International Journal of Solids and Structures**, 6610-6627,2005.

KIM, Hansang; MEHLEM, Hani. *Damage detection of structures by wavelet analysis*. **Engineering Structures**, 347-362,2003.

KIM, Yoon Y.; KIM, Eung-Hun. **A new damage detection method based on wavelet transformation**. *Proceedings of the International Modal Analysis Conference*,2000.

LAW, S.S., LI, X. Y., ZHU, X. Q., CHAN, S. L. *Structural damage detection from wavelet packet sensitivity*. **Engineering Structures**.Vol 27-9, Agosto de 2005, 1339-1348.

LI, Zheng; XIA, Shuman; WANG, Jun X.; HE, Zhengjia. *Detection of crack localization and size in structures using wavelet finite element methods*.**Journal of Sound and Vibration**, 285, 767-782, 2005.

LIANG, Robert Y.; CHOY Fred K.; HU, Jialou. *Detection of cracks in beam structures using measurements of natural frequencies*. **Journal of the Franklin Institute** 328, 505.1991.

LIEW, Kim M.;& WANG, Q. *Application of Wavelet Theory for Crack identification in Structures*. **Journal of Engineering Mechanics**, 124-152, 1998.

MORLET, Jean. e GROSSMANN, Alexander. *Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape*. **Society for Industrial and Applied Mathematics**. 04 de jul de 1984, 723-736.

NGUYEN, Sy Dzung; NGO, Kieu Nhi; TRAN, Quang Thinh; CHOI, Seung-Bok. **A new method for beam-damage-diagnosis using adaptive fuzzy neuralstructure and wavelet analysis**. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, Vol.39.

OKAFOR, Anthony Chukwujekwu e DUTTA, Abhijit. *Structural damage detection in beams by wavelet transforms*. **Smart Materials and Structures**. Vol 9, 906-917. 2000.

OVANESOVA, Anna V.; SUAREZ Luis E. **Applications of wavelet transform to damage detection in frame structures**. 2004. Mayagüez, USA - University of Puerto Rico. 2004.

POUDEL, Upendra. P.; FU, Gongkang. e YE, Jian. *Structural damage detection using digital video imaging technique and wavelet transformation*. **Journal of sound and vibration**. Vol 286, 2005. 869-895.

PRESEZNIAK, Flavio A. **Identificação de danos e determinação da vida útil em estruturas usando transformada wavelet e conceitos de mecânica da fratura**. Dissertação de Mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RADZIENSKI, Maciej; KRAWCZUK, Marek; PALACZ, Magdalena. **Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, Vol.25.

RAO, S. Singiresu. **Mechanical Vibrations**. 3 ed. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1995.

TAYLOR, James I. **The Vibration Analysis Handbook**. 1 ed. Vibration Consultants. 2000.

YAN, Guirong; DUAN, Zhongdong; OU, Jinping; DE STEFANO, Alessandro. **Structural damage detection using residual forces based on wavelet transform**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, Vol. 24.

YANILMAZ, Hüseyin. **Damage Detection in beams by wavelet analysis**. Dissertação de Mestrado – Middle East Technical University, Ankara, Turquia. 2007.

NOVAK, Paulo Rogerio. **Técnicas de identificação de amortecimento estrutural**. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Brasil. 2003.