



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROBLEMAS INVERSOS APLICADOS À
INSPEÇÃO PREDIAL**

SÉRGIO LABARRÈRE DE ALBUQUERQUE

Brasília, 08/08/2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**PROBLEMAS INVERSOS APLICADOS A INSPEÇÃO
PREDIAL**

SÉRGIO LABARRÈRE DE ALBUQUERQUE

ORIENTADOR: LUCIANO BEZERRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS

BRASÍLIA / DF: agosto/2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROBLEMAS INVERSOS APLICADOS A INSPEÇÃO
PREDIAL**

SÉRGIO LABARRÈRE DE ALBUQUERQUE

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

LUCIANO BEZERRA, Dsc. (UnB)
(ORIENTADOR)

ALVARO MARTINS DELGADO NETO, Msc. (UnB)
(EXAMINADOR)

RAMON SALENO YURE RUBIM COSTA SILVA, Dsc. (UnB)
(EXAMINADOR)

DATA: BRASÍLIA/DF, 08 do agosto de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

ALBUQUERQUE, SÉRGIO LABARRÈRE DE

Problemas Inversos Aplicados à Inspeção Predial [Distrito Federal] 2018.

xiii, 58 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 1990)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|----------------------------------|----------------------------|
| 1. Inspeção Predial | 2. Identificação de Danos |
| 3. Métodos Estáticos e Dinâmicos | 4. Transformada de Wavelet |
| 5. Elementos de Contorno | I. ENC/FT/UnB |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALBUQUERQUE, S. L. de. (2019). Problemas Inversos Aplicados à Inspeção Predial. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 58 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Sérgio Labarrère de Albuquerque

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Problemas Inversos Aplicados à Inspeção Predial.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

SÉRGIO LABARRÈRE DE ALBUQUERQUE

SQS 302 Bloco G Apto 502

70338070 - Brasília/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a meu pai, Hálcio, que pode não estar encarnado fisicamente comigo, mas é quem mais me guia, está sempre comigo e me ensinou que presença e apoio é muito mais que presença física.

À minha mãe, Ana, e irmãs, Marina e Adriana, sem as quais não sou nada, que sempre quiseram meu bem e estão do meu lado quando preciso, com suas palavras de apoio como “não fez mais que a obrigação”.

À minha avó, Neusa, exemplo de amor e compreensão que levarei para a vida, sem sombra de dúvidas o ser humano que mais admiro neste mundo.

Aos meus amigos do coração, Rafael Aquino, Gustavo Bertozzi, João Chaud, Daniel Di Pilla, Marcus Vinicius, Rafael Herani, Erismar de Moura, Henrique Rocha, Raoni Pinheiro, Diego Gondim, Daniel Britto, Gustavo Amantéa, Victor Minaya, Lucas Lambert, dentre muitos outros que tentaram me desvirtuar, mas eu permaneci firme e forte.

Ao meu primo e colega da Engenharia Civil, Natan Labarrère, cuja companhia durante projetos e estudos, auxílio e companheirismo para todo o curso foi um grande suporte para minha graduação.

Aos meus colegas de curso, em especial: Leonardo Clementino, Matheus Teixeira, Wilson Evaristo e David Pires, que descontraíram a vida acadêmica e cujo mau exemplo me fez querer ir além.

Ao doutor Ramon Saleno Silva e futuro doutor Álvaro Delgado Neto, que me orientaram e ajudaram na elaboração desta monografia.

E finalmente ao meu orientador, Luciano Bezerra, pela oportunidade e aprendizado além dos campos da engenharia, cujo imenso conhecimento contrasta com tamanha humildade e generosidade.

ABSTRACT

Structural Health Monitoring, in Brazil, is a growing topic bringing innovation in nondestructive testing and low cost techniques. Therefore, the use of wavelet transform methods in detecting and evaluating damage in concrete or steel structures is a promising technique, capable of detecting not just the location of the damage but also its severity without the need for the previous response of the undamaged structure or a high cost of implementation. The focus of this research is to raise and evaluate the different wavelet transform techniques of detecting damage in concrete or steel beams and bridges, pointing out each one singularities with all its advantages compared to traditional methods and looking to surpass its limitations, making use of experimental data gathered from modelling structures in softwares.

RESUMO

A Inspeção Predial é uma área que vem ganhando visibilidade no Brasil, e com ela, técnicas não destrutivas e de baixo custo também. Neste contexto, a utilização das transformadas de wavelet na localização e quantificação de danos em estruturas de concreto e aço é um método promissor, capaz de detectar a localização e severidade do dano sem a necessidade das respostas da estrutura intacta e com baixo custo de aplicação. A proposta deste trabalho é levantar e avaliar as diferentes formas de aplicar as transformadas de wavelet na identificação de danos em tabuleiros e longarinas de pontes, apontando as particularidades de cada uma com todas suas vantagens aos métodos convencionais e procurando ultrapassar suas limitações, utilizando a modelagem em softwares na obtenção de dados experimentais.

RÉSUMÉ

La surveillance de l'état des structures, au Brésil, est un sujet qui est de plus en plus en vogue, et qui innove en matière d'essais non destructifs et de techniques à faible coût. Dans ce cadre, l'utilisation d'une transformée en ondelettes pour détecter et quantifier des dommages dans des structures en béton ou en acier est une technique prometteuse, apte à préciser la localisation et la gravité des dommages, tout en dispensant la réponse des structures préservées et à un bas coût de mise en œuvre. L'objet de ce travail c'est d'identifier et d'évaluer les différentes façons d'utiliser la transformée en ondelettes pour identifier des tabliers de ponts ou poutres endommagés. On souligne les particularités de chacune, leurs avantages par rapport aux

méthodes traditionnelles et on cherche à surmonter leurs limitations en utilisant des données de tests numériques et réels issues de la bibliographie.

1. SUMÁRIO

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. INTRODUÇÃO.....	1
1.2. MOTIVAÇÃO.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. OBJETIVOS GERAIS	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. ESTADO DA ARTE: IDENTIFICAÇÃO DE DANOS E USO DAS TRANSFORMADAS DE WAVELET.....	5
2.2. IDENTIFICAÇÃO DE DANOS	20
2.2.1. DETECÇÃO POR MÉTODOS ESTÁTICOS.....	20
2.2.2. DETECÇÃO POR MÉTODOS DINÂMICOS.....	20
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
3.1. MÉTODOS DE ASSINATURA	21
3.2. ELEMENTOS DE CONTORNO.....	22
3.3. TRANSFORMADAS DE WAVELET (TCW).....	24
3.3.1. TRANSFORMADA CONTÍNUA DE WAVELET (TCW).....	24
3.3.2. FAMÍLIAS	26
3.3.3. TRANSFORMADA DISCRETA DE WAVELET (TDW).....	29
4. INTERPOLAÇÃO	30
4.1. POLINÔMIOS VS. SPLINES.....	30
4.2. SPLINES CÚBICOS	33
5. SOFTWARES	36
5.1. BEMLAB2D.....	36
5.1.1. BEMCRACKER2D	38
5.2. MATLAB	38

5.3.	WAVELET TOOLBOX.....	39
5.3.1.	FLUXOGRAMA.....	40
5.4.	DESCRIÇÃO DAS PLACAS E VIGAS.....	41
5.4.1.	PLACA 1.....	42
5.4.2.	PLACA 2.....	43
5.4.3.	PLACA 3.....	44
5.4.4.	VIGA BALANÇO 1.....	45
5.4.5.	VIGA BALANÇO 2.....	46
6.	RESULTADOS.....	47
6.1.	PLACA 1.....	48
6.1.1.	FACE SUPERIOR.....	48
6.1.2.	FACE LATERAL.....	49
6.2.	PLACA 2.....	50
6.2.1.	FACE SUPERIOR.....	50
6.2.2.	FACE LATERAL.....	51
6.3.	PLACA 3.....	52
6.3.1.	FACE SUPERIOR.....	52
6.3.2.	FACE LATERAL.....	53
6.4.	VIGA BALANÇO 1.....	54
6.5.	VIGA BALANÇO 2.....	55
7.	CONCLUSÕES.....	56
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 – (a) The Westbound Cross County Highway Bridge, Cincinnati; (b) Ponte metálica treliçada (Aktan et al, 1994).....	6
Figura 2.2 - Força vs Deflexão antes e depois do dano (Aktan et al, 1994)	7
Figura 2.3 - Sinal decomposto sem limiarização (Moyo e Brownjohn, 2000)	8
Figura 2.4 - Sinal decomposto com redução de ruído (Moyo e Brownjohn, 2000).....	9
Figura 2.5 - Análise de resultados da resposta do terremoto através das transformadas de wavelet (Hou, et al, 2000)	10
Figura 2.6 - Sistemas experimentados: (a) Viga; (b) Pórtico (Ovanesova e Suarez, 2004).....	11
Figura 2.7 - Deflexões das vigas biengastadas 0,048 segundos após carregamento dinâmico (Ovanesova e Suarez, 2004).....	12
Figura 2.8 – Resposta dinâmica pela wavelet brior6.8: (a) dano no nó 9; (b) dano no nó 4 (Ovanesova e Suarez, 2004).....	12
Figura 2.9 - Resposta estática pela wavelet brior6.8, Viga intacta (Ovanesova e Suarez, 2004)	12
Figura 2.10 - Resposta estática pela wavelet brior6.8, Dano localizado no nó 42 (Ovanesova e Suarez, 2004).....	13
Figura 2.11 - Viga B47 (Estrada, 2008)	14
Figura 2.12 – Posição do dano na viga B47: (a) dano 1; (b) dano 2 (Estrada, 2008)	14
Figura 2.13 - Avaliação dos métodos de detecção de danos: (a) Dano 1; (b) Dano 2 (Estrada, 2008).....	15
Figura 2.14 - Planta da Ponte de Övik (Estrada, 2008).....	16
Figura 2.15 - Secções: (a) Longitudinal; (b) Transversal (Estrada, 2008)	17
Figura 2.16 - Cenários de dano: (a) Primeiro teste de dano; (b) Teste final de ruptura (Estrada, 2008).....	18
Figura 2.17 - Esquemática de sensores (Estrada, 2008)	18
Figura 2.18 – Wavelets para 2 modos de vibração: (a) Transformada Discreta; (b) Transformada Contínua (Estrada, 2008).....	19
Figura 3.1 - Comparação entre funções: (a) Transformada de Fourier; (b) Transformada Janelada de Fourier; (c) Transformada de Wavelet.(Silva, 2015).....	24
Figura 3.2 - Função Haar domínio do tempo.	26
Figura 3.3 - Funções Wavelet Daubechies	27

Figura 3.4 - Funções Wavelets Biortogonais (Palechor, 2018).....	28
Figura 3.5 - Funções Wavelets Symlets (Palechor, 2018)	29
Figura 4.1 - Spline de grau 0	32
Figura 4.2 - Spline de grau 1	32
Figura 4.3 - Spline Cúbico	35
Figura 5.1 – BEMLAB	37
Figura 5.2 – BEMCracker2D	38
Figura 5.3 - Interface da Wavelet Toolbox	39
Figura 5.4 - Família das Wavelets Disponíveis.....	40
Figura 5.5 - Fluxograma de Processos	40
Figura 5.6 - PLACA 1, dimensões, carga aplicada e dano induzido.....	42
Figura 5.7 - PLACA 2, dimensões, carga aplicada e dano induzido.....	43
Figura 5.8 - PLACA 3, dimensões, carga aplicada e dano induzido.....	44
Figura 5.9 - VIGA BALANÇO 1, dimensões, carga aplicada e dano induzido	45
Figura 5.10 – VIGA BALANÇO 2, dimensões, carga aplicada e dano induzido.....	46
Figura 6.1 - PLACA 1, Face Superior.....	48
Figura 6.2 – Wavelet PLACA 1,face superior	48
Figura 6.3 – PLACA 1, Face Lateral.....	49
Figura 6.4 – Wavelet PLACA 1, face lateral	49
Figura 6.5 - PLACA 2, Face Superior.....	50
Figura 6.6 – Wavelet PLACA 2, face superior	50
Figura 6.7 - PLACA 2, Face Lateral	51
Figura 6.8 – Wavelet PLACA 2, face lateral	51
Figura 6.9 - PLACA 3, Face Superior.....	52
Figura 6.10 – Wavelet PLACA 3, face superior	52
Figura 6.11 - PLACA 3, Face Lateral	53
Figura 6.12 – Wavelet PLACA 3, face lateral	53
Figura 6.13 - VIGA BALANÇO 1, vão detalhado	54
Figura 6.14 - Wavelet da Viga Balanço 1	54
Figura 6.15 - VIGA BALANÇO 2, vão detalhado	55
Figura 6.16 - Wavelet da Viga Balanço 2	55

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

I -	momento de inercia
P -	carga
y -	deslocamentos
s -	Regularidade de uma função
nl -	número de elementos
M -	momento
U -	energia de deformação
Nt -	número de nós
F5 -	assinatura
$f(w)$ -	Transformada de Fourier da função $f(t)$
w -	frequência
$w(t)$ -	função janela
C -	coeficientes wavelet
a -	parâmetro de escala
b -	parâmetro de posição
$W\psi f$ -	Transformada de Wavelet
$F(w)$ -	Transformada de Fourier
kN-	kilonewton

LISTA DE GREGAS

δ -	deslocamentos unitários
$\Delta\mu_x^j$ -	diferenças deslocamentos eixo x
Δu_y^j -	diferenças deslocamentos eixo y
Δw -	diferenças entre as frequências
λ -	parâmetro adimensional utilizado para o cálculo da frequência natural;
ν -	coeficiente de Poisson
ρ -	massa específica
σ -	desvio padrão das deformações
$\psi_{a,b}$ -	funções wavelet-mãe
ϕ -	modos de vibração estrutura intacta
ϕ^* -	modos de vibração estrutura danificada
ψ -	modo de vibração, estrutura intacta
ψ^* -	modo de vibração, estrutura danificada
ω -	frequência que cada componente oscilatória inerente ao sinal apresenta
ω_a -	frequências naturais depois frequência natural
ω_b -	frequência natural antes da frequência natural
ω_r -	frequência natural

LISTA DE ABREVIACÕES

ENC -	Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB
NDT -	<i>Nondestructive testing</i>
NBR -	Norma Brasileira Regulamentadora
UnB -	Universidade de Brasília
SAP -	<i>Structural Analysis Program</i>
TF -	Transformada de Fourier
SHM -	<i>Structural Health Monitoring</i>
TCW -	Transformada Contínua de Wavelet
TDW -	Transformada Discreta de Wavelet
TJF -	Transformada Janelada de Fourier
TPW -	Transformada Pacote de Wavelet
TW -	Transformada de Wavelet

1. INTRODUÇÃO

1.1.INTRODUÇÃO

Na ciência, quando surpresos por problemas, geralmente os resolvemos com uma teoria e um modelo matemático bem definido que utilizamos para chegar à solução do problema, partimos da causa e chegamos aos efeitos. Essa questão é observada em ondas eletromagnéticas, forças gravitacionais, forças de contato, entre outros – a estes problemas, denominamos problemas diretos.

Infortunadamente, nem sempre temos a disposição modelos e teorias para todos os problemas que encontramos, alguns, mais complexos, não possuem equações ou teoremas formulados e assim os resolvemos a partir do estudo dos resultados, ou efeitos, para assim chegar-se na causa ou modelo matemático. A estes problemas, denominamos problemas inversos. Esse tipo de problema, por sua vez, nem sempre possui solução única ou sequer solução. Nestes casos, embora não haja uma classificação formal, os chamamos de problemas inversos mal postulados (KABANIKHIN,2008).

Os problemas inversos e mal postulados embora não possuam solução definida, são resolvidos de forma que a resposta seja tão aproximada quanto se necessita, porém estará sempre susceptível a erros. Por exemplo, no próprio processo de aprendizado humano pode-se dizer que o cérebro utiliza de problemas inversos para resolver questões que a princípio não possuem solução, pois, aprende-se de experiências passadas (resultados) e quanto maior for a quantidade de dados ou resultados coletados (banco de dados), mais preparados e aptos a agir se está (modelo matemático), mas se está sempre sujeitos a erros (não possuem solução única ou exata).

Problemas inversos são mais comuns do que parecem e suas aplicações se estendem a todos os campos da ciência. São facilmente notados em uma tomografia, espectrômetros variados (massa, emissão atômica, emissão ótica), ao reconstruir uma cena do crime, o médico ao diagnosticar um paciente, são todos exemplos de problemas inversos do cotidiano que são resolvidos satisfatoriamente devido ao extenso e finito banco de dados para cada caso.

Desta forma, é possível utilizar de problemas inversos para detectar danos e irregularidades na construção civil, seja em tabuleiro de pontes, pilares, vigas metálicas ou de concreto armado.

Há, na prática, inúmeros métodos de avaliação da integridade de uma estrutura. Estes métodos podem ser classificados como destrutivos e não destrutivos. Os métodos destrutivos são aqueles que danificam, modificam ou deixam marcas na estrutura. A extração de testemunhos do

concreto por meio de brocas diamantadas e a avaliação visual da armadura que requer a remoção do concreto de cobertura, são exemplos de métodos de inspeção destrutivos, pois necessita-se da remoção de uma parte da estrutura. Evidencia-se métodos não destrutivos que podem estimar até a resistência à compressão do concreto como, a emissão de ultrassom através do concreto e a utilização do esclerômetro, que mede dureza superficial e possuem correlações também com a resistência à compressão.

Os métodos não destrutivos, por sua vez, podem necessitar ou não de assinatura, isto é, um método que necessita de ensaio realizado logo que a estrutura é construída, ainda intacta, para se guardar os resultados e futuramente compará-los com os ensaios sucessores. Assinaturas de destaque na literatura, bem como suas fórmulas, serão discutidas mais detalhadamente na seção 3. Alguns métodos necessitam desta resposta da estrutura não danificada para que sejam conclusivos quanto a sua segurança e desempenho, o que pode atrapalhar na sua implementação quando uma estrutura sem assinatura necessitar de diagnóstico.

Avaliar as condições estruturais de uma viga ou placa por meio das Transformadas de Wavelet (TW) é um método vantajoso, não destrutivo e que não requer assinatura. Este método resume-se em avaliar as pequenas discontinuidades provocadas na vibração da estrutura que por sua vez são decorrentes de falhas, danos ou fragilidades localizadas. Vale ressaltar, também, que essa metodologia é facilmente aplicada a locais de difícil acesso e não demanda alto custo de implementação, pois exige apenas a massa móvel capaz de induzir as vibrações e os sensores capazes de captá-las.

Desta forma, a proposta deste trabalho é utilizar dados e estudos encontrados na bibliografia, comparar e avaliar as metodologias atuais e não clássicas quanto à sua efetividade e aplicabilidade, apontando limitações e eventuais vantagens e desvantagens do método.

1.2.MOTIVAÇÃO

A inspeção predial, no Brasil, é uma área que vem ganhando muita visibilidade na última década devido a acidentes recentes como as quedas do viaduto e da garagem do edifício residencial em Brasília. Atualmente, o Brasil anda defasado com o resto dos países com desenvolvimento científico mais avançado, como EUA, Canadá, Europa e China, em termos de legislação e segurança de edificações (PACHECO et al. 2013). Avaliar as condições estruturais de utilização e sustentação de uma estrutura após algum dano grave ou após muito tempo de sua utilização já é obrigatoriedade por lei em diversos países como também no Brasil. É possível

avaliar as condições que a estrutura se encontra estudando tanto os seus efeitos dinâmicos quanto os efeitos estáticos provocados por causas padronizadas. A detecção de danos em estruturas na engenharia civil é um tema que está cada vez mais discutido e frequente dentre os atuantes. As legislações e normas na área estão em evolução, e o monitoramento da saúde de estruturas SHM (“*Structural Health Monitoring*”) cada vez mais comum, chegando até a obrigar empresas a certificarem a saúde estrutural de pontes periodicamente em alguns países asiáticos. O ponto negativo da maioria destes métodos é que a estrutura necessita ter sido avaliada quando ainda intacta para futuramente ser comparada com os resultados posteriores, e assim, tornar possível a detecção de danos ou fissuras.

Como estruturas de grande porte estão sujeitas a solicitações excessivas e carregamentos cíclicos e conseqüente fadiga, é natural que ocorra a formação de fissuras, porém, do ponto de vista da segurança é de grande importância monitorá-las quanto a formação, evolução e magnitude. Assim sendo, os métodos mais comuns de inspeção predial para concreto e aço são ultrassom, ensaios de carga e a inspeção visual, método subjetivo muito utilizado hoje em dia que depende do conhecimento e experiência do avaliador. Esse método não está apenas sujeito a erros humanos, como também é limitado a locais acessíveis, o que leva a grandes incertezas quanto a integridade estrutural e a sua real capacidade.

Neste contexto, o método de avaliação da integridade de estruturas através das Transformadas de Wavelet, é um método não destrutivo, de baixo custo, que não necessita que a estrutura seja avaliada quando ainda intacta e pode ser aplicado para locais de difícil acesso.

Essa pesquisa será direcionada ao estudo do método de avaliação estrutural baseado na variação da resposta estática, isto é, de deslocamentos provocados por aplicação de cargas adicionais em vigas e placas metálicas aplicadas às Transformadas de Wavelet, para que sejam identificadas fissuras e irregularidades com mais assertividade, devido as vantagens da metodologia, e assim, compará-las com métodos atuais e não clássicos, na mensuração e constatação de dano.

1.3.OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo desta pesquisa é contribuir com os métodos de inspeção predial existentes, através do estudo dos métodos atuais que se utilizam da Transformada de Wavelet para

identificar danos, fissuras, irregularidades e possíveis defeitos em uma viga metálica utilizando-se da variação dos deslocamentos provocados pela aplicação de uma carga adicional.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar da literatura métodos matemáticos de inspeção predial e apontar vantagens e desvantagens, comparando-os com o da Transformada de Wavelet.
- Testar resultados encontrados na bibliografia com os métodos acima e avaliar as metodologias com métodos matemáticos e validá-los apontando suas limitações, vantagens, desvantagens e aplicabilidade.
- Modelar e experimentar com o auxílio de softwares que fazem uso do método dos elementos de contorno, estruturas determinadas e com danos induzidos e averiguar o método das Transformadas de Wavelet na identificação e localização dos danos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção irá tratar a evolução dos métodos de avaliação de danos baseados na variação da rigidez da estrutura, com atenção especial para os métodos que se utilizam das transformadas de wavelet. Apresenta brevemente estudos e teses desde a resolução de problemas por problemas inversos, até o surgimento das wavelets e futuramente sua implementação nos métodos atuais.

2.1. ESTADO DA ARTE: IDENTIFICAÇÃO DE DANOS E USO DAS TRANSFORMADAS DE WAVELET.

O primeiro relato documentado da aplicação de problemas inversos através de vibrações induzidas em estruturas, é de quando Leonardo da Vinci notou as vibrações das cordas de sua harpa tocando devido a vórtices induzidos pelo vento. Desta forma, Leonardo se deparou com os resultados cujo causa desconhecida propôs-se a descobrir. Posteriormente, em 1878, Strouthal descobriu que os “*Aeolian Tones*”, que é como são chamados estes tons da harpa, gerados pela corda no vento são proporcionais a velocidade do vento sobre a espessura da corda. Também observou que o som aumentava substancialmente quando os tons naturais da corda coincidiam com os “*Aeolian Tones*”. (BLEVINS, R. D. 2001)

As wavelets, por sua vez, foram introduzidas na literatura em 1909 por Alfréd Haar, e são funções matemáticas que decompõem um sinal em seus componentes de frequência. Foi, posteriormente aprofundada por diversos cientistas ao longo do século XX. Em 1982 quando Jean Morlet, engenheiro geofísico, que utilizou dessa ferramenta em uma análise de atividade sísmica, e assim aprofundada por Alex Grossmann, que criou uma fórmula de inversão exata para as Transformadas de Wavelet (DEBNATH, L. 1998), que o estudo das wavelets se aprofundou e difundiu para as outras áreas do conhecimento. Este conceito pode ser interpretado como uma síntese de diferentes ideias de diferentes áreas da engenharia, física e matemática. Desde então muitas pesquisas na área e muitos avanços trouxeram desenvolvimento para as transformadas.

A teoria de wavelet foi inovadora pois providenciou um método alternativo ao método de Fourier na decomposição de uma função ou sinal. Atualmente é uma ferramenta vantajosa na

análise de frequências temporais utilizada num vasto campo de processamento de sinais como, sismologia, turbulência, computação gráfica, processamento de imagens, estruturas da galáxia e do Universo, comunicação digital, engenharia biomédica, teoria da matrix, teoria do operador, equações diferenciais, análise numérica, dentre outros. A descoberta das Wavelets e sua crescente utilização nos diferentes campos da ciência vem trazendo avanços significativos, como o pesquisador das wavelets, Meyer, descreveu o período atual:

Hoje as fronteiras entre matemática e processamento de sinais e imagens se extinguíram, e matemáticos tem se beneficiado da redescoberta das wavelets por experts de outras disciplinas. O desvio do processamento de sinais e imagens foi o caminho mais direto que levava das bases de Haar até as wavelets de Daubechies. (DEBNATH, 1998)

Em 1994, Aktan, Lee, Chuntavan e Aksel se propuseram a discutir a definição e conceito de dano estrutural e integridade da estrutura. Analisaram duas pontes metálicas submetida a testes verticais e horizontais a fim de calibrar dois modelos 3D em elementos finitos. A primeira ponte, construída em 1990 de viga metálica contínua com vãos livre de 17, 24 e 17 metros, respectivamente. A segunda, construída em 1914, também metálica, treliçada com vão livre de aproximadamente 46 metros. Ambas as pontes são ilustradas na figura Figura 2.1.

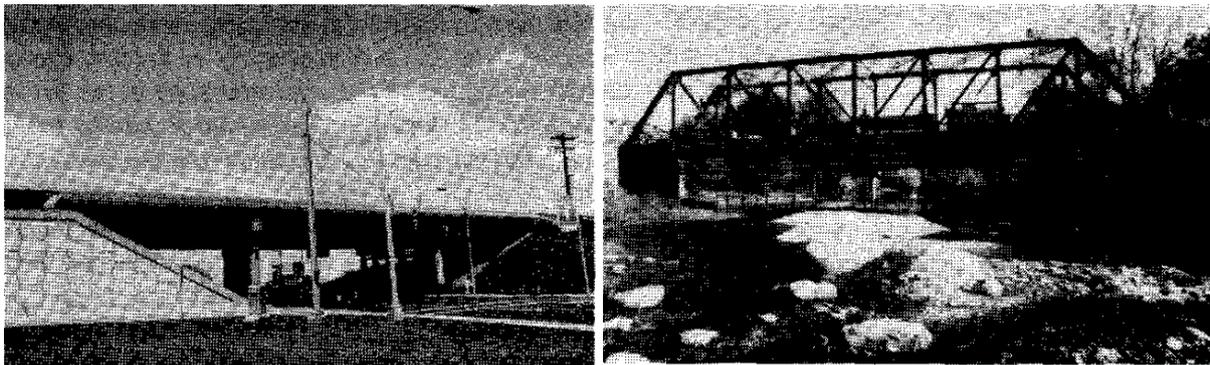


Figura 2.1 – (a) The Westbound Cross County Highway Bridge, Cincinnati; (b) Ponte metálica treliçada (Aktan et al, 1994)

Os modelos então foram utilizados para estudar parâmetros que serviriam como índices sensíveis de dano estrutural. Para a ponte treliçada, o gráfico apresentado na Figura 2.2 exemplifica que, a diferença de 35% entre os dois perfis de deflexão claramente indica que deve haver um dano significativo nas proximidades da região onde a carga concentrada é aplicada.

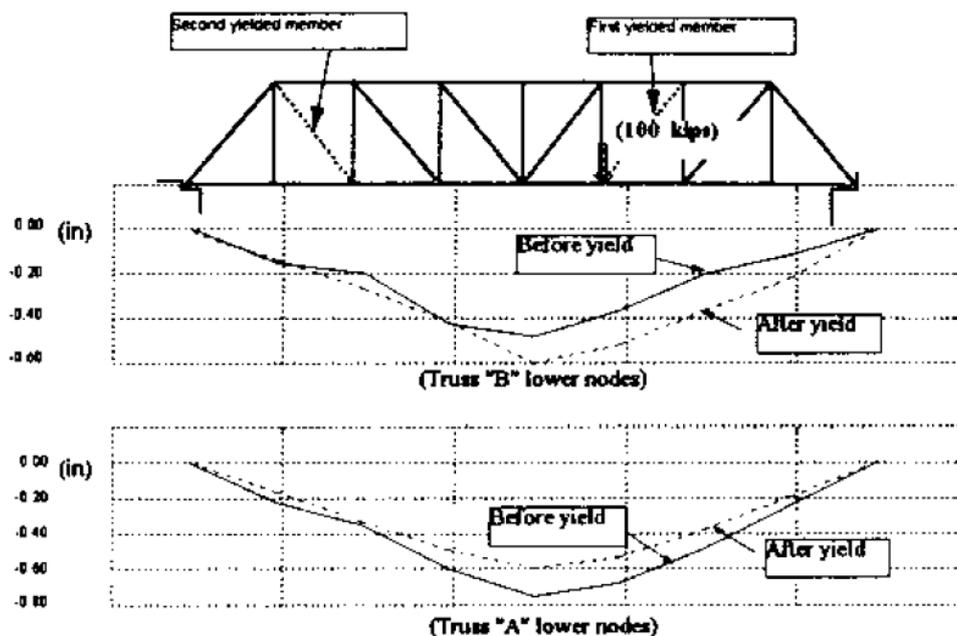


Figura 2.2 - Força vs Deflexão antes e depois do dano (Aktan et al, 1994)

Concluíram que o aumento da flexibilidade local de uma estrutura pode servir como índice na localização de danos, e a confiabilidade da flexibilidade modal obtida no modelo foi assegurada comparando-as com as deflexões medidas em campo através da prova de carga.

No ano de 2000, Pilate Moyo e James Brownjohn propõem que a habilidade das transformadas de wavelet de detectar o início e fim de mudanças sutis e mudanças abruptas nos sinais, fazem desta uma ótima ferramenta no monitoramento da saúde estrutural de pontes. Com esta finalidade ambos monitoraram, em intervalos de hora em hora, a construção da ponte Second Link em Singapura, cuja construção foi em concreto protendido moldado in loco pelo método dos avanços sucessivos, e notaram eventos conhecidos, como concretagem, protensão e movimentações, nos sinais de deformação coletados.

Utilizaram-se das propriedades de localização e tempo das transformadas de wavelets para revelar mudança nos sinais detectados por extensômetros, acelerômetros e sensores de temperatura e pressão, devido aos eventos conhecidos. Notou-se que é possível localizar danos devido a mudanças bruscas nos sinais, porém não se tornou conclusivo devido aos ruídos e interferências que não foram totalmente extraídos dos sinais, o que pode levar a resultados falso positivos. Assim, aplicaram métodos de limiarização dos sinais recebidos, a fim de eliminar ou minimizar os ruídos captados. Os resultados são apresentados na Figura 2.3 e Figura 2.4, e os

eventos indicados, onde, C## representa a concretagem do segmento número ## da ponte, F## a troca de guindastes metálicos utilizados no método do balanço sucessivo no segmento número ## da ponte, e S## a protensão do aço no segmento número ##.

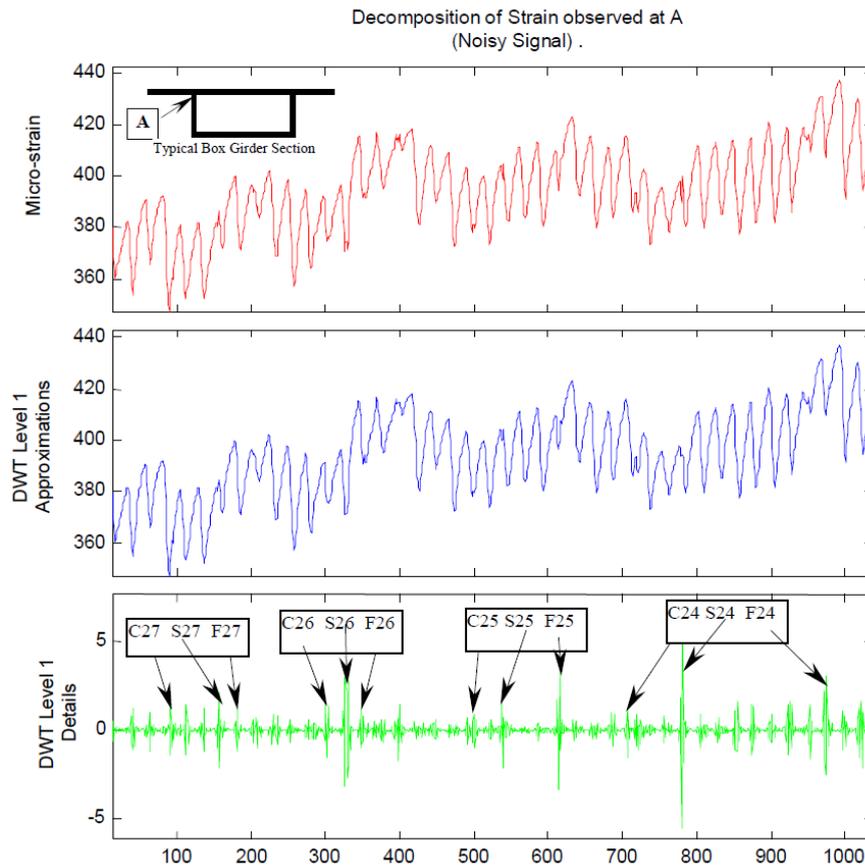


Figura 2.3 - Sinal decomposto sem limiarização (Moyo e Brownjohn, 2000)

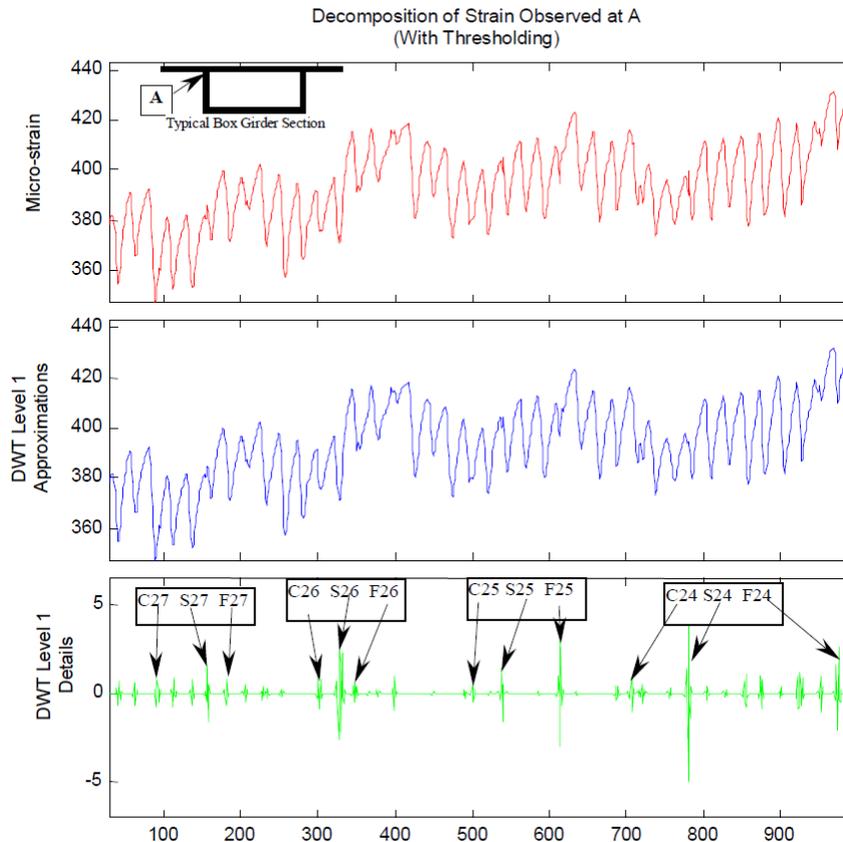


Figura 2.4 - Sinal decomposto com redução de ruído (Moyo e Brownjohn, 2000)

Ainda em 2000, Z. Hou, M. Noori e R. St. Amand propuseram uma metodologia baseada nas wavelets para a identificação de danos. A metodologia é então aplicada a dados simulados de um modelo estrutural simples sujeito a uma excitação de um harmônico simples. O modelo é feito de múltiplas molas que podem sofrer danos irreversíveis caso sujeitas a ciclos maiores que o limite de fadiga ou quando a sollicitação atinge um valor limite estipulado. Conclui-se que a metodologia é eficaz em determinar a ocorrência e o momento do dano tanto para o caso que o dano ocorre gradativamente por fadiga quanto para o dano brusco.

Testou-se então a metodologia proposta para um edifício localizado a 22.53km do epicentro de um terremoto real ocorrido em Los Angeles, California. O terremoto de San Fernando ocorreu em 1971 e teve magnitude de aproximadamente 6.7. Os dados foram retirados da cobertura do Banco da Califórnia, um edifício de 12 pavimentos e 48,46m de altura, construído em concreto armado, cuja dimensão plana dos pavimentos é de 18,28m por 48,77m. O dano estrutural sofrido foi principalmente trincas e rachaduras nas colunas e viga. Os dados da aceleração original registrada no 7º andar do edifício e os resultados preliminares da análise por wavelet.

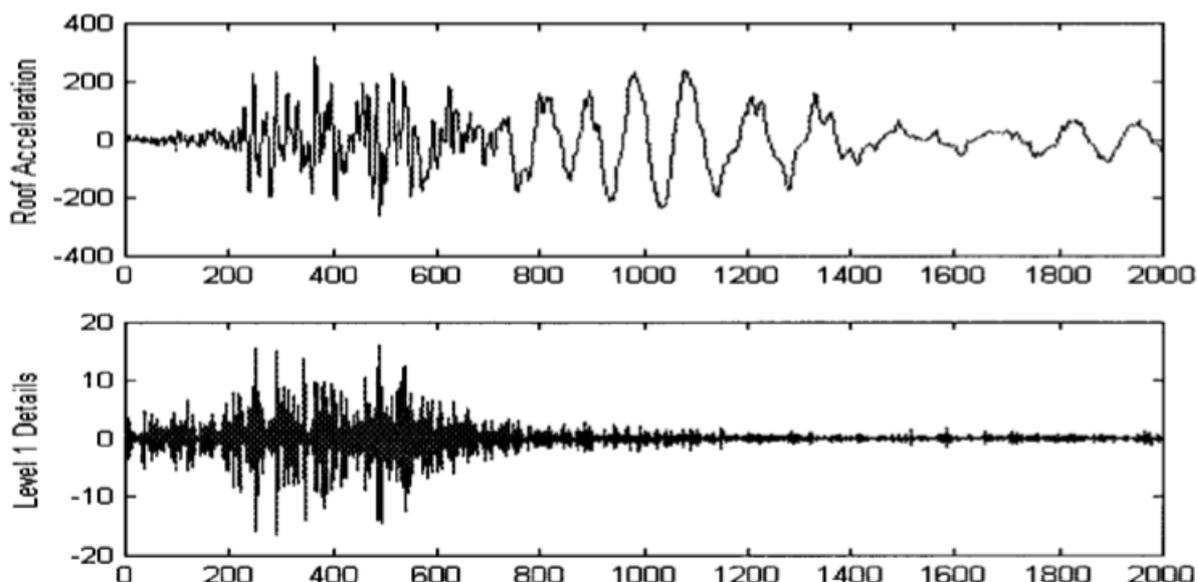


Figura 2.5 - Análise de resultados da resposta do terremoto através das transformadas de wavelet (Hou, et al.,2000)

As características das discontinuidades da decomposição da wavelet DB4 apresentaram-se de acordo com a observação em campo, constatando que, as trincas e rachaduras nas colunas e vigas podem ter ocorrido em decorrência do terremoto. Os autores concluem que a transformação por wavelets são uma proposta promissora no monitoramento online de estruturas, porém advertem que alguns problemas devem ser endereçados. Os sinais registrados podem vir contaminados com ruídos advindos de diversos motivos, e a metodologia das wavelets aplicada deve ser corretamente calibrada para que seja sensível ao nível de dano da estrutura.

Anna Ovanesova e Luis Suarez, em 2004, desenvolveram um método não destrutivo com uso das wavelets. Após um rápido resumo das wavelets em seu estudo, apresenta os critérios na escolha das wavelets mais apropriadas, que são as wavelets biortogonais com maior regularidade, ou seja, define-se a wavelet bior6.8 como a mais apropriada. O método analisa dois tipos de resposta de duas estruturas diferentes, a resposta estática e dinâmica de uma viga (Figura 2.6a) biengastada e a resposta estática de um pórtico (Figura 2.6b) também biengastado. Ambas as análises foram feitas por modelo analítico em elementos finitos. O carregamento dinâmico consistia em um impulso de formato meia-senóide de magnitude 4,5kN, e o carregamento estático ao qual a viga foi submetida foi de 3,5kN, ambos aplicados no meio do vão.

As posições dos danos induzidos variaram conforme o experimento e as dimensões dos danos, embora mantiveram a ordem de grandeza em milímetros também variaram. O comprimento da viga analisada foi de 3m, e de secção transversal quadrada de lado 0,15m. O módulo de elasticidade do material foi de 31GPa, a densidade de 2,3kg/m³ e o coeficiente de Poisson 0,2.

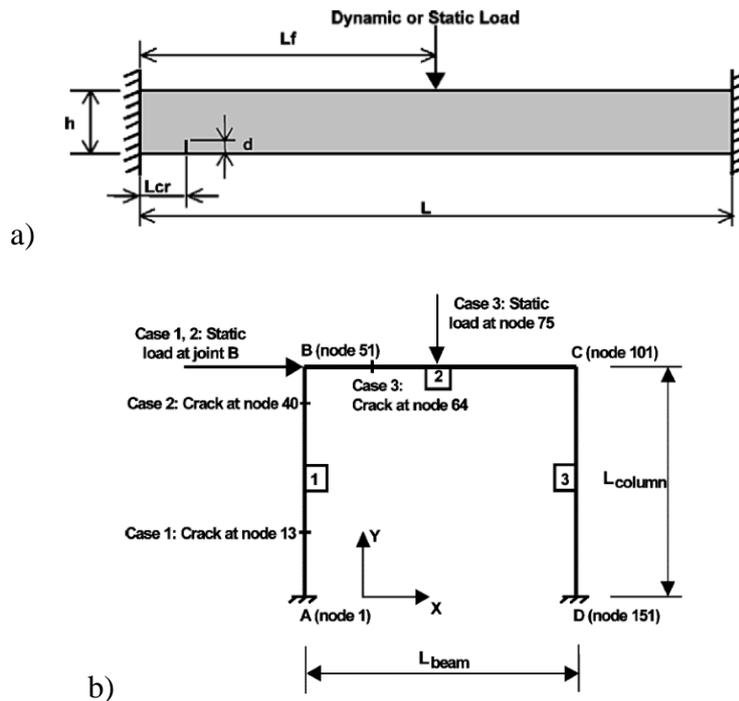


Figura 2.6 - Sistemas experimentados: (a) Viga; (b) Pórtico (Ovanesova e Suarez, 2004)

Desta forma, nota-se na Figura 2.7 que a deflexão da viga com o dano é dificilmente notada pois implica em pequenas perturbações próximas da rachadura. Quando os sinais de deflexão da viga defeituosa são analisados pela TDW (Transformada Discreta de Wavelet), essas pequenas perturbações tornam-se visíveis e bem definidas quanto a posição do dano (Figura 2.8a e Figura 2.8b).

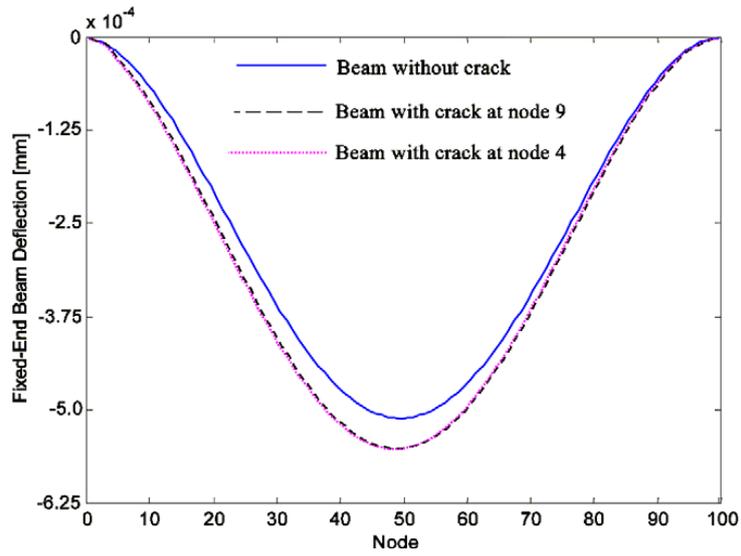


Figura 2.7 - Deflexões das vigas biengastadas 0,048 segundos após carregamento dinâmico (Ovanesova e Suarez, 2004)

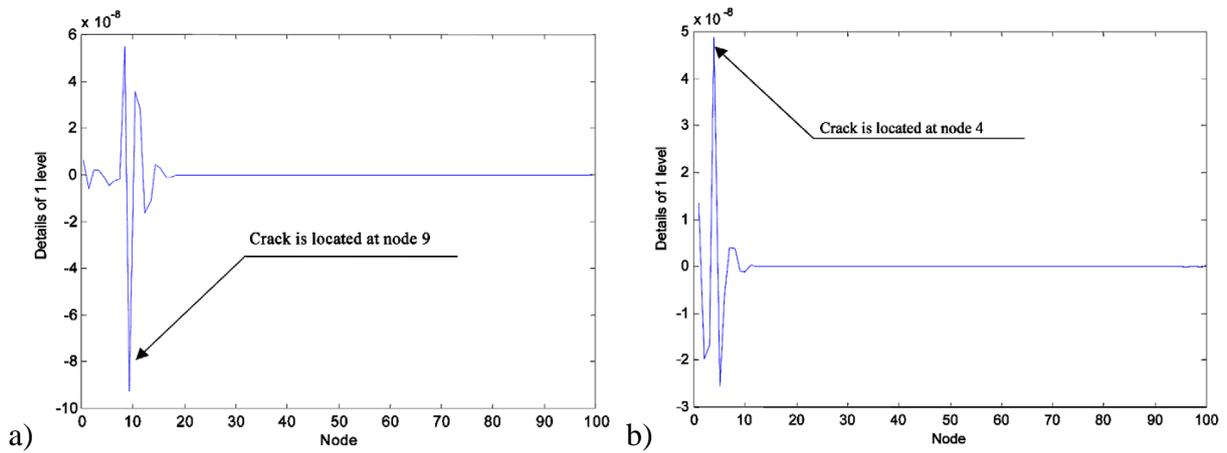


Figura 2.8 – Resposta dinâmica pela wavelet bior6.8: (a) dano no nó 9; (b) dano no nó 4 (Ovanesova e Suarez, 2004)

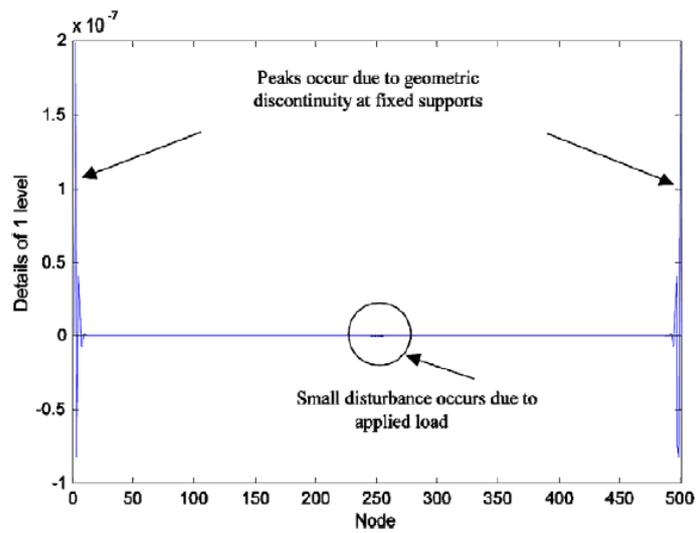


Figura 2.9 - Resposta estática pela wavelet bior6.8, Viga intacta (Ovanesova e Suarez, 2004)

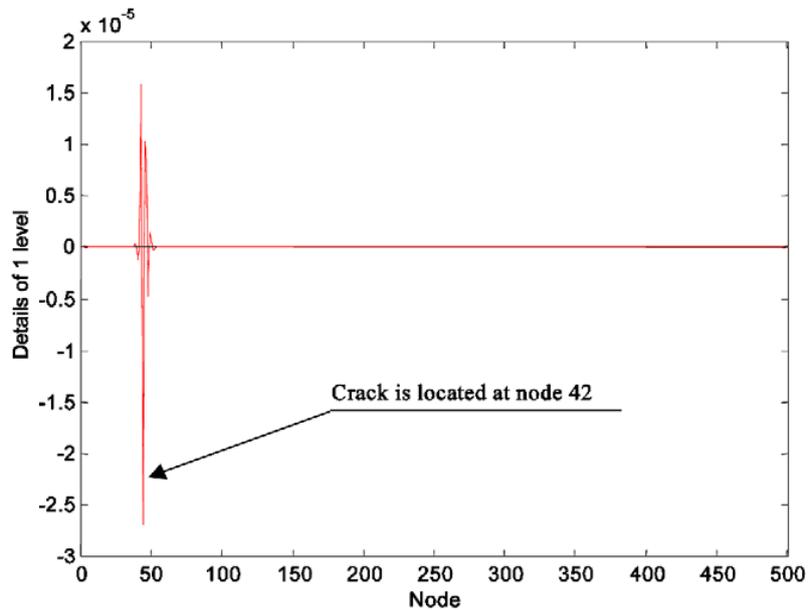


Figura 2.10 - Resposta estática pela wavelet brior6.8, Dano localizado no nó 42 (Ovanesova e Suarez, 2004)

Concluíram que os métodos baseados nas Wavelets podem ser aplicados não só para membros estruturais como também para estruturas inteiras, e pode ser utilizado com a resposta estática da estrutura, muito menos onerosa e fácil de se obter comparado a resposta dinâmica. A pequena perturbação no meio do vão na Figura 2.9 deve-se ao carregamento aplicado no meio do vão. Vale ressaltar também que, a descontinuidade geométrica de quinas e apoios provoca as variações apresentadas nas extremidades da Figura 2.9 e não necessariamente representa defeitos. Contudo, esse comportamento requer uma atenção especial para danos ou defeitos próximos aos apoios.

Um dos artigos mais completos sobre as wavelets, e por este motivo é descrito com mais detalhe, foi produzido em 2008 por Rolando Salgado Estrada. A tese de Estrada apresenta uma análise bem detalhada dos métodos mais importantes de detecção de danos em pontes baseados nos modos de vibração. Assim como este trabalho, Estrada focou especialmente em métodos cuja resposta da estrutura intacta não são necessários.

O atual doutor selecionou os métodos de avaliação de danos baseados nas Análise de Wavelets, Curvatura das Formas Modais, e Modificação da Matriz Rigidez da estrutura, que posteriormente foram avaliados em três situações distintas detalhadas abaixo.

- 1) Os diferentes cenários de danos são simulados por métodos numéricos para estruturas danificadas.

- 2) Teste experimentais são realizados em laboratórios com vigas metálicas e de concreto reforçadas com polímeros laminados de fibra de carbono
- 3) Pontes em escalas reais são testadas sob diferentes cenários de dano

A comparação dos métodos de identificação de dano é feita por diversas vigas e danos diferentes, a viga em análise ilustrada e danos simulados pelos métodos mencionados são detalhados na Figura 2.11 e Figura 2.12, respectivamente. A comparação dos métodos é apresentada pela Figura 2.13, onde CWT é a transformada contínua de wavelet, DWA, a análise discreta de wavelet, e WPS, a assinatura pacote de wavelet.

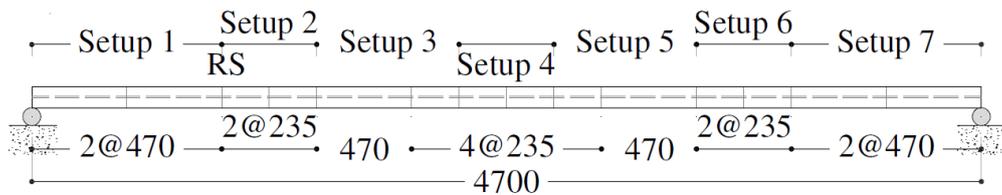


Figura 2.11 - Viga B47 (Estrada, 2008)

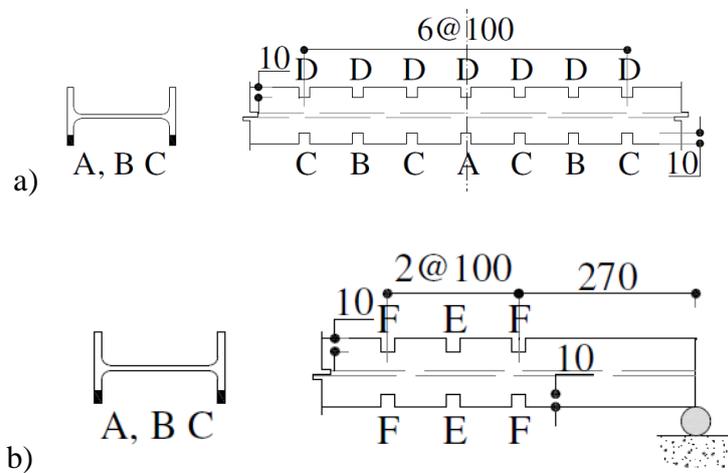
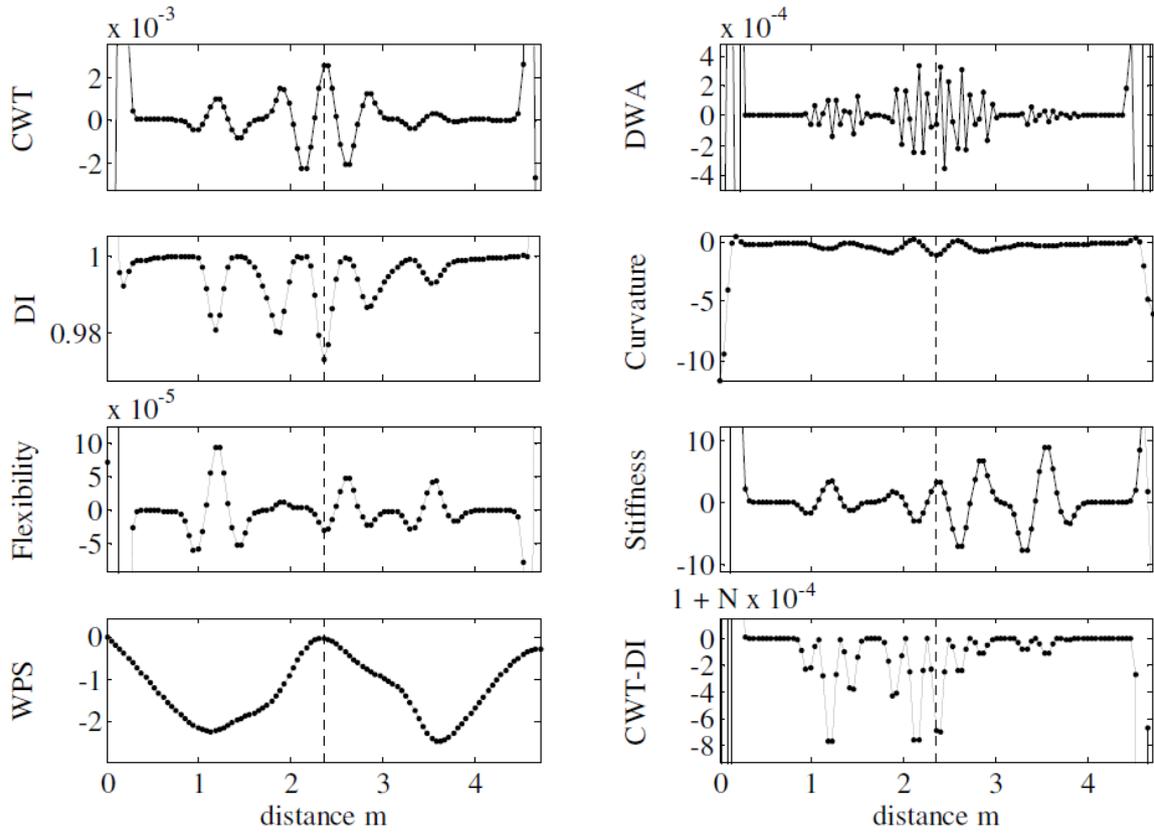
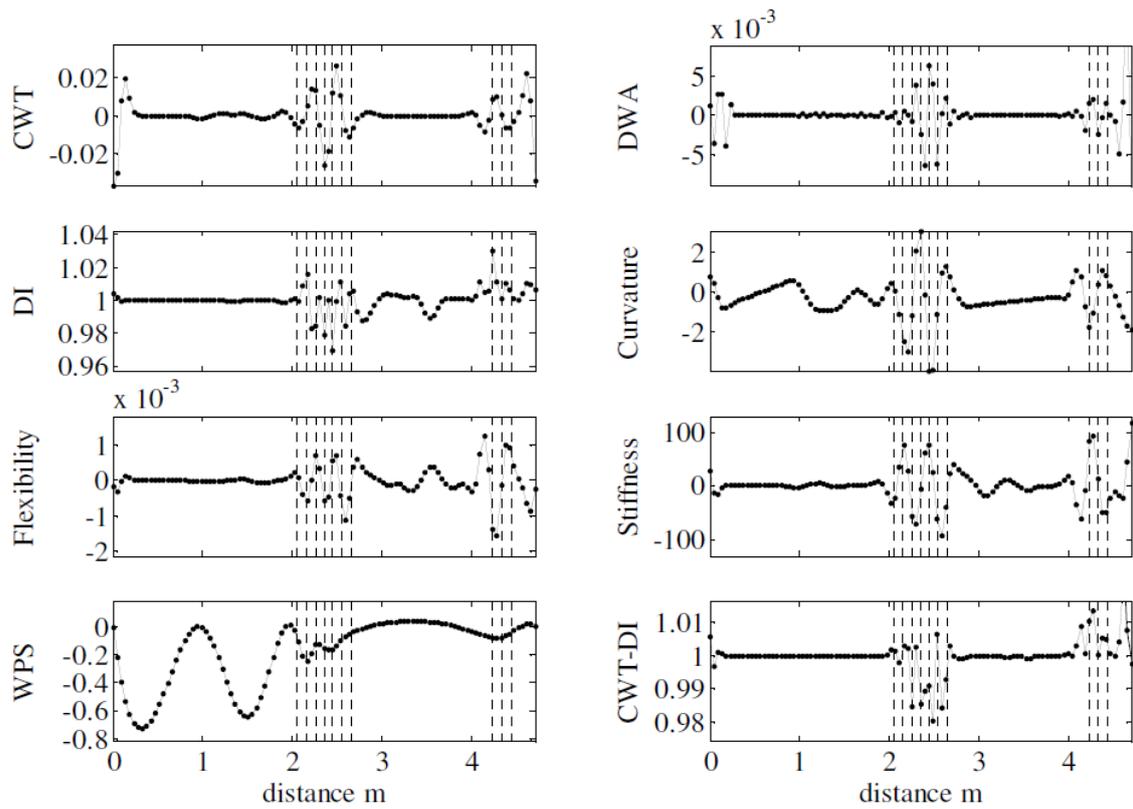


Figura 2.12 – Posição do dano na viga B47: (a) dano 1; (b) dano 2 (Estrada, 2008)



a)



b)

Figura 2.13 - Avaliação dos métodos de detecção de danos: (a) Dano 1; (b) Dano 2 (Estrada, 2008)

Como conclusão de estudo, Estrada exemplifica e avalia a aplicabilidade dos métodos de detecção de danos em pontes através de testes dinâmicos executados na ponte de Övik. Neste exemplo, os métodos foram avaliados sob o teste da vibração ambiente tanto para o Estado Limite Último (ELU) quanto para o Estado Limite de Serviço (ELS). A ponte em questão foi construída em 1955 e fica localizada ao norte da Suécia, na cidade chamada Örnköldsvik. A estrutura da ponte é de concreto armado composta por dois vãos simétricos de aproximadamente 12 metros cada. Sua secção transversal é composta por duas vigas simétricas de concreto protendido ligadas através de uma laje. A planta e secção transversal são mostradas na Figura 2.14 e Figura 2.15, respectivamente.

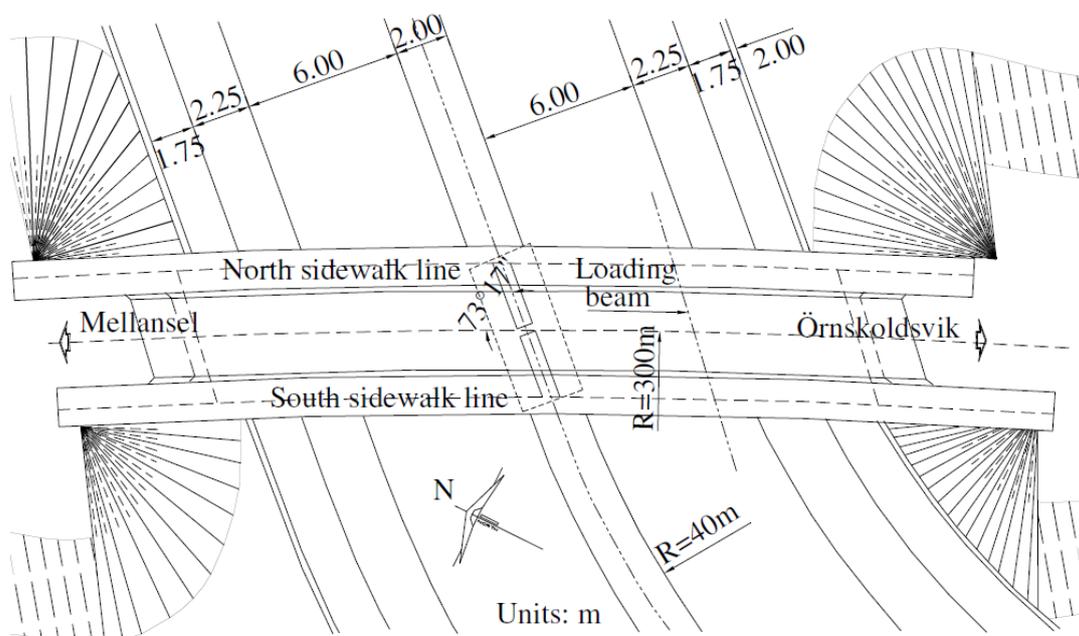


Figura 2.14 - Planta da Ponte de Övik (Estrada, 2008)

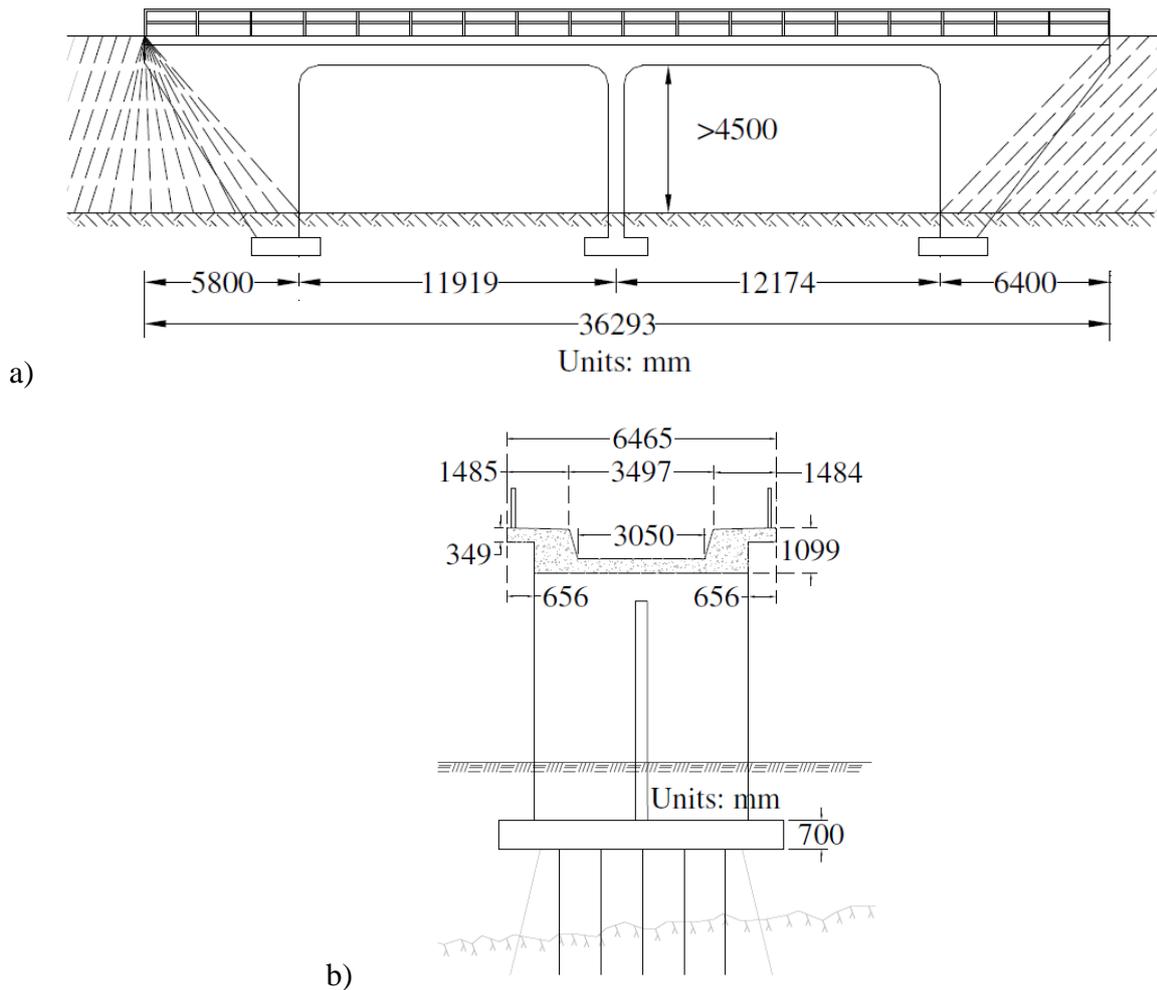


Figura 2.15 - Secções: (a) Longitudinal; (b) Transversal (Estrada, 2008)

A ponte foi então avaliada em dois cenários diferentes, nomeados como “Primeiro teste de dano” e “Teste final de ruptura”. Ao primeiro caso, a ponte foi carregada até que atinja o Estado Limite de Serviço com a carga aplicada atingindo entre 1 e 2MN. Uma inspeção visual após o teste notou que o dano consistia basicamente de pequenas rachaduras que não deveriam alterar significativamente a rigidez geral da ponte.

Na segunda parte do teste, a ponte foi carregada da mesma forma que no primeiro teste, e apresentou ruptura por cisalhamento ao longo do ponto de aplicação da carga com carregamento entre 6 e 10MN.

Os dois cenários de dano são representados na Figura 2.16.

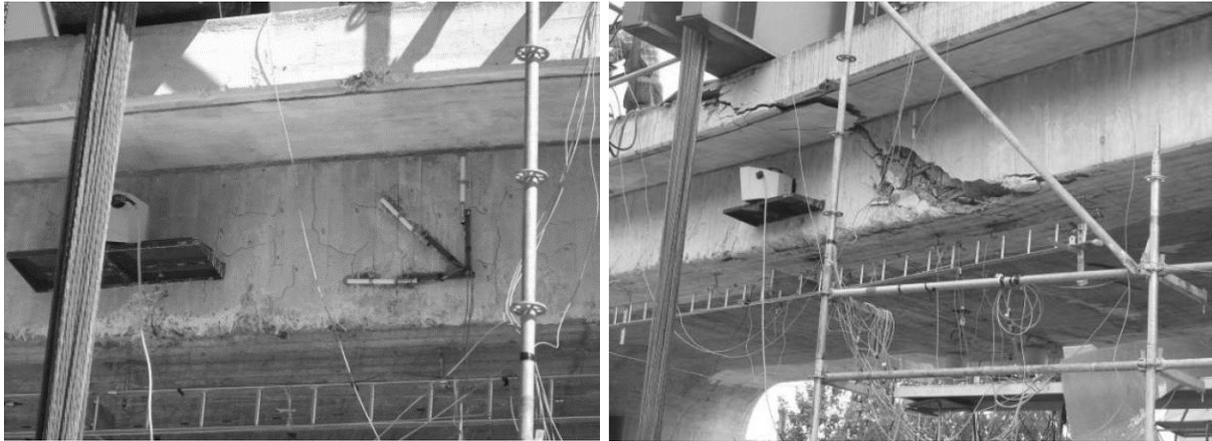


Figura 2.16 - Cenários de dano: (a) Primeiro teste de dano; (b) Teste final de ruptura (Estrada, 2008)

Os sensores foram localizados como esquematizado na Figura 2.17, que utilizou mais de 30 pontos de medida. Para cobrir todos os pontos escolhidos com os cinco acelerômetros disponíveis, foram necessárias 11 configurações diferentes, nomeadas de S-1 até S-11, onde dois dos sensores foram utilizados como referenciais longitudinal (r-x) e vertical (r-z). Ao total foram analisados a aceleração vertical em 22 pontos sob as passarelas laterais da ponte, e 8 pontos mediram a aceleração longitudinal localizada nos pilares laterais. Concluiu-se que todos os métodos foram bem sucedidos em detectar os danos.

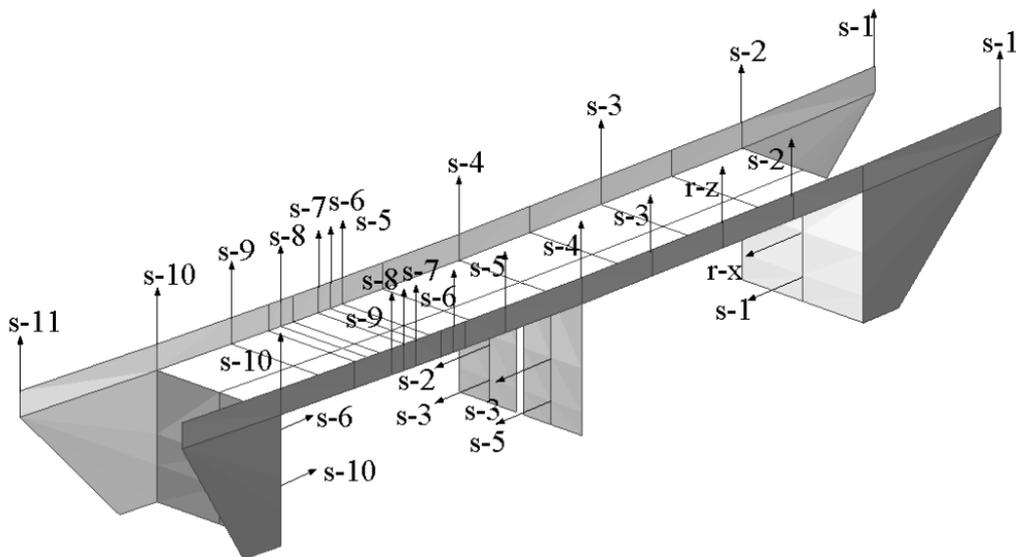


Figura 2.17 - Esquematização de sensores (Estrada, 2008)

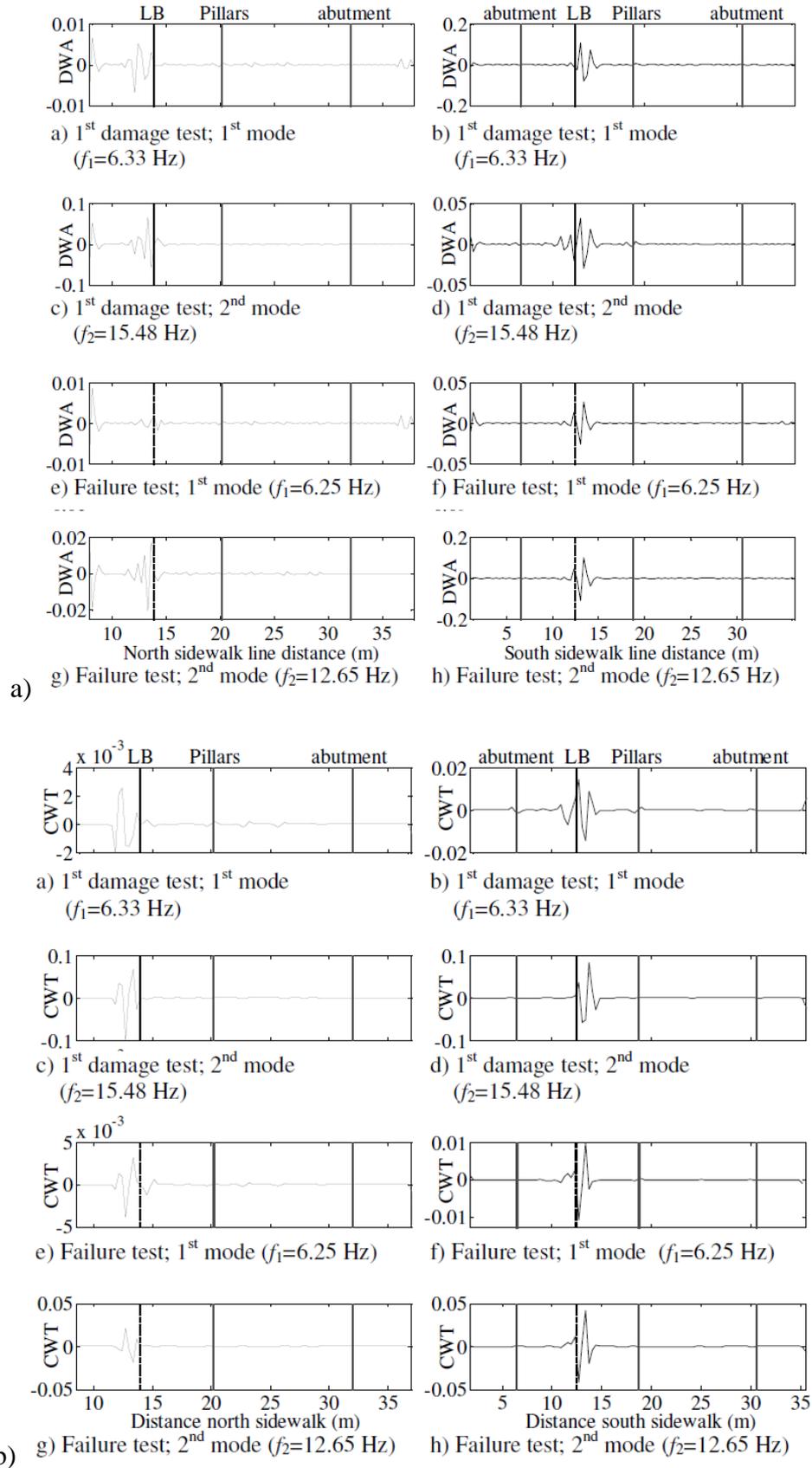


Figura 2.18 – Wavelets para 2 modos de vibração: (a) Transformada Discreta; (b) Transformada Contínua (Estrada, 2008)

2.2.IDENTIFICAÇÃO DE DANOS

A identificação de danos em estruturas, atualmente, é feita através da resposta dinâmica, análise das frequências e modos de vibração da estrutura, ou da resposta estática, deslocamentos provocados pelo carregamento estático da estrutura. Em sua grande maioria, estes métodos necessitam da assinatura da estrutura sem danos, o que dificulta a sua implementação visto que esses dados são raramente conhecidos em condições reais.

Vale ressaltar ainda que, devido a particularidade de cada construção e suas inúmeras variáveis que influenciam no seu comportamento, não se tem um consenso geral na área quanto a eficiência ou coleta de dados dos métodos.

2.2.1. DETECÇÃO POR MÉTODOS ESTÁTICOS

Métodos de detecção de danos pela resposta estática da estrutura partem da premissa de que o deslocamento ou deformações apresentadas pela estrutura estão diretamente ligadas à sua rigidez, e que, a redução da rigidez por sua vez, é causada por danos ou defeitos estruturais. Existem, na prática, inúmeros métodos com diferentes dados de entrada, alguns ainda limitados pela assinatura estática da estrutura.

2.2.2. DETECÇÃO POR MÉTODOS DINÂMICOS

Os métodos de detecção de danos pela resposta dinâmica da estrutura, baseiam-se também na premissa de que a rigidez e flexibilidade do ponto na estrutura estão diretamente ligados com a presença de danos, porém, os dados de entrada são as frequências naturais e modos de vibração da estrutura, e não mais os deslocamentos e deformações.

Estes métodos nem sempre podem ser efetivos, pois o dano pode não influenciar significativamente nos modos de vibração menores da estrutura e, a remoção do ruído no sinal coletado também pode tornar o método inviável. Desta forma, algumas assinaturas que auxiliam na conclusão dos resultados são encontradas na literatura, porém, atrapalham na implementação do método visto que para aplicá-las, são necessárias as respostas com e sem danos da estrutura.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta seção da tese apresenta brevemente fundamentação teórica dos métodos de detecção de dano por meio das assinaturas e o método proposto das transformadas de wavelet. Apresenta sucintamente a diferença entre a Transformada Discreta de Wavelet e a Transformada Contínua, bem como as wavelets mais comuns na literatura. Também apresenta um breve resumo das vantagens e desvantagens do cálculo numérico através do método dos elementos de contorno em relação ao método dos elementos finitos.

3.1.MÉTODOS DE ASSINATURA

Os métodos que possuem assinaturas estruturais são métodos que utilizam da resposta dinâmica ou estática da estrutura ainda intacta, e a comparam com o a resposta da estrutura danificada. Algumas assinaturas comparadas por Brito (2008) e Caldeira (2009) são apresentadas abaixo.

$$F_1 = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\Delta u_x^j}{\Delta \omega_1^2} \right) + \left(\frac{\Delta u_x^j}{\Delta \omega_2^2} \right) + \left(\frac{\Delta u_y^j}{\Delta \omega_1^2} \right) + \left(\frac{\Delta u_y^j}{\Delta \omega_2^2} \right) \quad (3.1)$$

onde,

Δu_x é a diferença entre os deslocamentos na direção x de cada ponto j da estrutura intacta e da estrutura danificada para todos os n pontos medidos;

Δu_y é a diferença entre os deslocamentos na direção y de cada ponto j da estrutura intacta e da estrutura danificada para todos os n pontos medidos;

$\Delta \omega_1$ é a diferença entre as frequências naturais medidas na estrutura intacta e a estrutura danificada, considerando apenas a primeira frequência natural de vibração da estrutura;

$\Delta \omega_2$ é a diferença entre as frequências naturais medidas na estrutura intacta e a estrutura danificada, considerando apenas a segunda frequência natural de vibração da estrutura. (Bezerra, 1993).

A segunda assinatura F_2 , de forma análoga a primeira, também utiliza a diferença de deslocamentos na direção x e y e as diferenças das frequências naturais, porém, também é aplicada para as k primeiras frequências naturais medidas. A fórmula cujos parâmetros são os mesmos da anterior é apresentada a seguir.

$$F_2 = \frac{\sum_{j=1}^n (\Delta u_x^j + \Delta u_y^j)}{\sum_{j=1}^k \Delta \omega_j^2} \quad (3.2)$$

A terceira assinatura, diferentemente das demais, baseia-se no produto dos quadrados das diferenças entre resposta intacta e resposta avaliada para as k primeiras frequências naturais, como descrito pela fórmula a seguir.

$$F_3 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^k \Delta u_j^2 \Delta \omega_k^2 \quad (3.3)$$

A última assinatura F_4 é chamada de COMAC (*Coordinate Modal Assurance Criterion*). Esse método mede as diferenças dos deslocamentos do nó i de uma série de modos de vibração. Caso não haja nenhuma diferença entre os deslocamentos modais, este valor assume valor de 1 e decresce quanto maior for a discrepância dos sinais (Ndambi et al., 2002). É calculado pela seguinte fórmula:

$$F_4 = \frac{[\sum_{j=1}^n |\phi_{ij} \phi_{ij}^*|]^2}{\sum_{i=1}^n \phi_{ij}^2 \sum_{i=1}^n \phi_{ij}^{*2}} \quad (3.4)$$

onde,

Φ_{ij} são os modos de vibração para o j -ésimo nó do i -ésimo modo para a estrutura intacta;

Φ_{ij}^* , os modos de vibração para o j -ésimo nó do i -ésimo modo para a estrutura danificada.

3.2.ELEMENTOS DE CONTORNO

O cálculo analítico de tensões e deformações através dos elementos de contorno é um método que emergiu como uma alternativa poderosa ao método dos elementos finitos particularmente em casos onde é requerido uma maior precisão devido à concentração de tensões ou quando o domínio é infinito. Assim, Dr. rer. nat. Heinz Antes, da Universidade em Brunsvique diz:

A característica mais importante dos elementos de contorno é, diferentemente dos métodos de domínio finito, a metodologia de formular problemas de valores limite, pois as equações integrais de contorno descrevem os problemas apenas com equações que possuem condições de contorno conhecidas ou não. Desta forma, o método requer a discretização apenas do contorno e não do volume, o que diminui a dimensão do problema em uma unidade, e reduz significativamente o esforço da discretização, fazendo com que as malhas sejam facilmente

geradas e mudanças nas características não requerem necessariamente uma completa remodelagem (ANTES, 2010).

Assim, em comparação com o método dos elementos finitos, as vantagens do método dos elementos de contorno podem ser resumidas em:

- Menor tempo de preparação ou modelagem
- Alta precisão das tensões, pois nenhuma aproximação é imposta na resolução dos pontos internos, a solução é exata e contínua dentro do domínio.
- Maior rapidez e menor esforço computacional, pois utiliza um menor número de nós e elementos para uma mesma precisão.
- Menor quantidade de informação desnecessária, pois como a maioria dos problemas de engenharia a situação mais desfavorável ocorre geralmente na superfície ou nas fronteiras e contornos, modelar um corpo tridimensional com elementos finitos e calcular os esforços para cada nó é ineficiente visto que apenas um pequeno número destes valores são realmente necessários para a análise. Caso seja necessário avaliar pontos internos do problema, pode-se focar apenas numa região específica visto que pontos internos em elementos de contorno são opcionais.

As desvantagens do método, comparado ao método dos elementos finitos são:

- O interior deve ser discretizado e modelado em problemas não lineares
- Matriz Soluções são completamente populadas e assimétricas, embora no método dos Elementos Finitos as matrizes são maiores, elas são fracamente populadas, o que reduz o espaço necessário na memória do computador, porém, esta desvantagem não é muito significativa visto que o método dos elementos de contorno possui um número relativamente menor de nós e elementos dada uma mesma precisão, como visto anteriormente nas vantagens do método.
- Fraca análise de estruturas tridimensionais esbeltas. Isso se dá devido às imprecisões causadas nas integrações numéricas devido à proximidade dos pontos nodais de cada lado do contorno da estrutura, e a grande razão entre superfície e volume da estrutura analisada (ANTES, 2010).

3.3. TRANSFORMADAS DE WAVELET

3.3.1. TRANSFORMADA CONTÍNUA DE WAVELET (TCW)

Esta seção apresenta um breve resumo da Transformada de wavelet, o objetivo deste trabalho é focar na sua aplicação e não no seu desenvolvimento e teoria, uma análise mais profunda pode ser vista em Daubechies et al. (1992) e Chui (1992). A transformada de wavelet é uma operação matemática que decompõe uma função ou sinal em suas componentes de frequência. É muito utilizada pois, diferentemente da Transformada de Fourier, as informações temporais e espaciais não são perdidas no resultado. A função wavelet é uma função que decai rapidamente e cujo valor médio da função é nulo, e difere da transformada de Fourier pois o número de oscilações permanece constante para diferentes larguras de janelas dentro do domínio do espaço ou tempo, enquanto que na transformada de Fourier, o número de oscilações muda enquanto o tamanho das janelas permanece constante. Essa propriedade é facilmente observada a seguir na figura Figura 3.1.

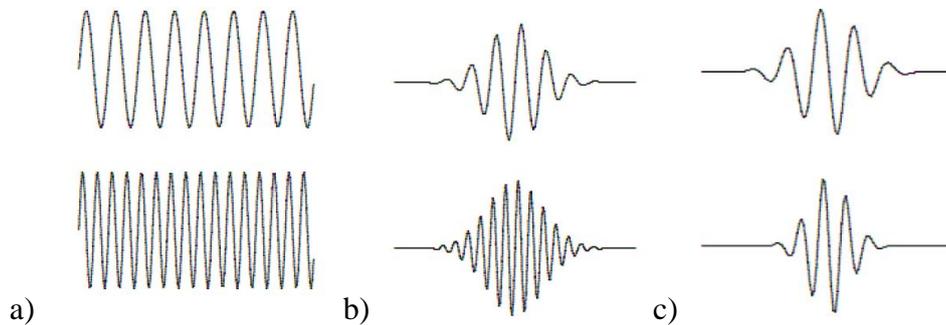


Figura 3.1 - Comparação entre funções: (a) Transformada de Fourier; (b) Transformada Janelada de Fourier; (c) Transformada de Wavelet. (Silva, 2015)

A Transformada de Wavelet do sinal coletado, $f(x)$, é definida como:

$$w_{\psi}^f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi^* \left(\frac{x-b}{a} \right) dx \quad (3.5)$$

E pode ser descrita como uma função analítica que depende dos parâmetros a e b que mudam continuamente dentro de seu domínio. Desta forma, o sinal, $f(x)$, é multiplicado por uma função de duas variáveis, dada por:

$$\psi_{a,b(x)} = |a|^{-1/2} \psi^* \left(\frac{x-b}{a} \right) \quad (3.6)$$

Onde a e b são os parâmetros de dilatação e translação, respectivamente. O parâmetro de translação, b , indica a localização da janela na transformada de wavelet. Mudando a janela ao longo do eixo do tempo(x) implica em examinar o sinal nas proximidades da janela atual. O parâmetro de dilatação, a , indica a largura da janela. Um valor alto de a implica em uma janela de menor precisão, ou seja, o sinal é examinado através de uma janela maior em uma escala maior. O asterisco em ψ^* , indica o complexo conjugado da função ψ .

Existem, na prática, diversas funções $\psi^{a,b}$, essas funções são chamadas de wavelet-mãe ou wavelets, e são responsáveis pela precisão e adequação da transformada na detecção de danos. Dentre as mais conhecidas estão as wavelets da família de Daubechies de ordem N , Meyer, Haar, Symlets de ordem N , Gaussian e a Coiflets de ordem N , estas wavelets serão tratadas na seção 0. Foram desenvolvidos diversos tipos de wavelets e sua aplicabilidade varia baseado nas suas propriedades associadas. Algumas das propriedades mais relevantes são:

1. Regularidade: É definida como “se r é um número inteiro e a função é contínua e diferenciável no ponto X_0 , então a sua regularidade é r , se r não é um número inteiro, então que n seja um número inteiro tal que $n < r < n+1$ ”. Essa propriedade é a propriedade que garante uma maior suavidade no sinal transformado.
2. Suporte de uma função é o menor intervalo fora do qual a função assume o valor de 0.
3. Momentos de decaimento é a propriedade que determina a ordem do polinômio que pode ser aproximado e é útil na seleção da wavelet mais adequada a detecção de danos.
4. Simetria de uma wavelet ajuda a evitar a defasagem no processamento de imagens.

Em geral, o processamento de sinal pelas transformadas de wavelet é feito de maneira muito mais eficiente quando os parâmetros a e b utilizados são valores diádicos. Neste caso, a transformada é chamada de Transformada Discreta de Wavelet (TDW), pois os valores dos parâmetros são discretos em potência de base 2.

3.3.2. FAMÍLIAS

Para que uma função seja considerada uma wavelet-mãe, é necessário que ela satisfaça algumas condições. Este tipo de função necessita pertencer ao espaço L^2 pertencente ao domínio dos números reais, ter valor médio igual a zero e energia finita. Estas propriedades ficam mais explícitas ao se exemplificar as diferentes wavelets disponíveis.

3.3.2.1. HAAR

A wavelet de Haar é nomeada em homenagem ao matemático húngaro Alfréd Haar, que a descobriu em 1909. Esta wavelet foi a primeira e mais simples das wavelets, se assemelha a uma função degrau e é definida e ilustrada como se segue:

$$\psi(x) = \begin{cases} 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 1/2 \\ -1 & \text{para } 1/2 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{demais casos} \end{cases} \quad (3.7)$$

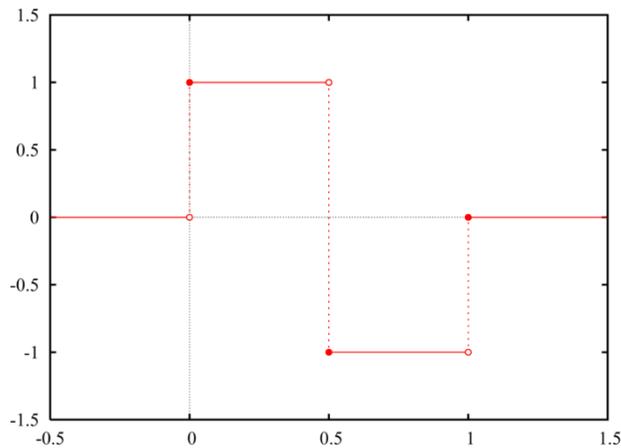


Figura 3.2 - Função Haar domínio do tempo.

3.3.2.2. DAUBECHIES

As wavelets de Daubechies, também nomeadas em homenagem a sua criadora, física e matemática belga Ingrid Daubechies, são escritas da forma “dbN”, onde N é a ordem e db o “sobrenome” da wavelet, pois se refere a família Daubechies de wavelets. As primeiras 10 funções dbN são mostradas a seguir, com exceção da db1 que é exatamente igual a wavelet de Haar.

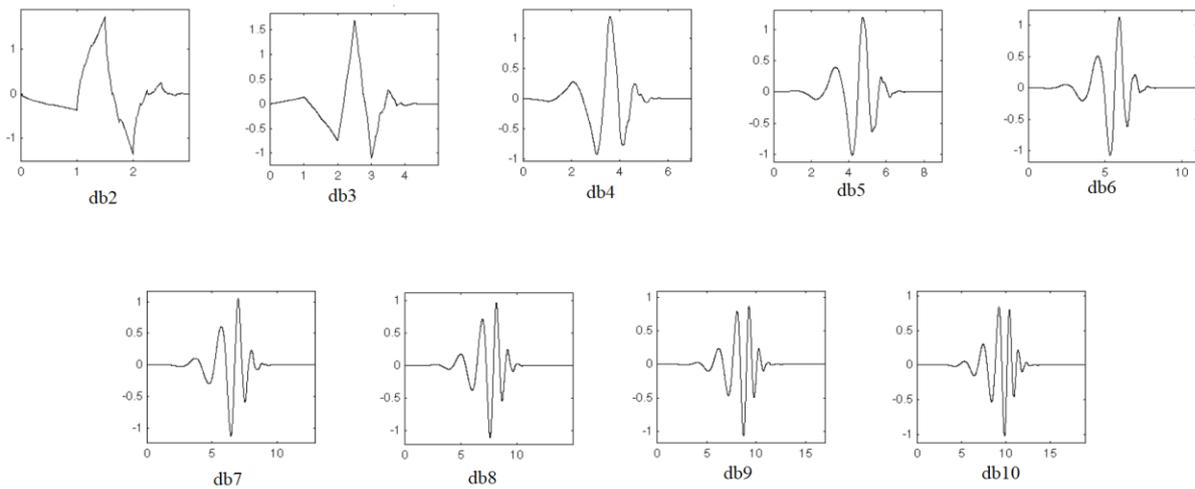


Figura 3.3 - Funções Wavelet Daubechies

As wavelets de Daubechies são ortogonais, isto é, o produto interno nas suas transformadas é igual a zero, o que implica que o erro no sinal não cresce com a sua transformada. Ingrid Daubechies é um grande nome quando o assunto é Transformadas de Wavelet, também criou transformadas biortogonais, simétricas, dentre outras.

3.3.2.3. BIORTOGONAL

As wavelets biortogonais foram introduzidas também por Ingrid Daubechies, porém, estas wavelets se diferenciam das outras por serem simétricas. A Figura 3.4, abaixo, apresenta as principais wavelets biortogonais.

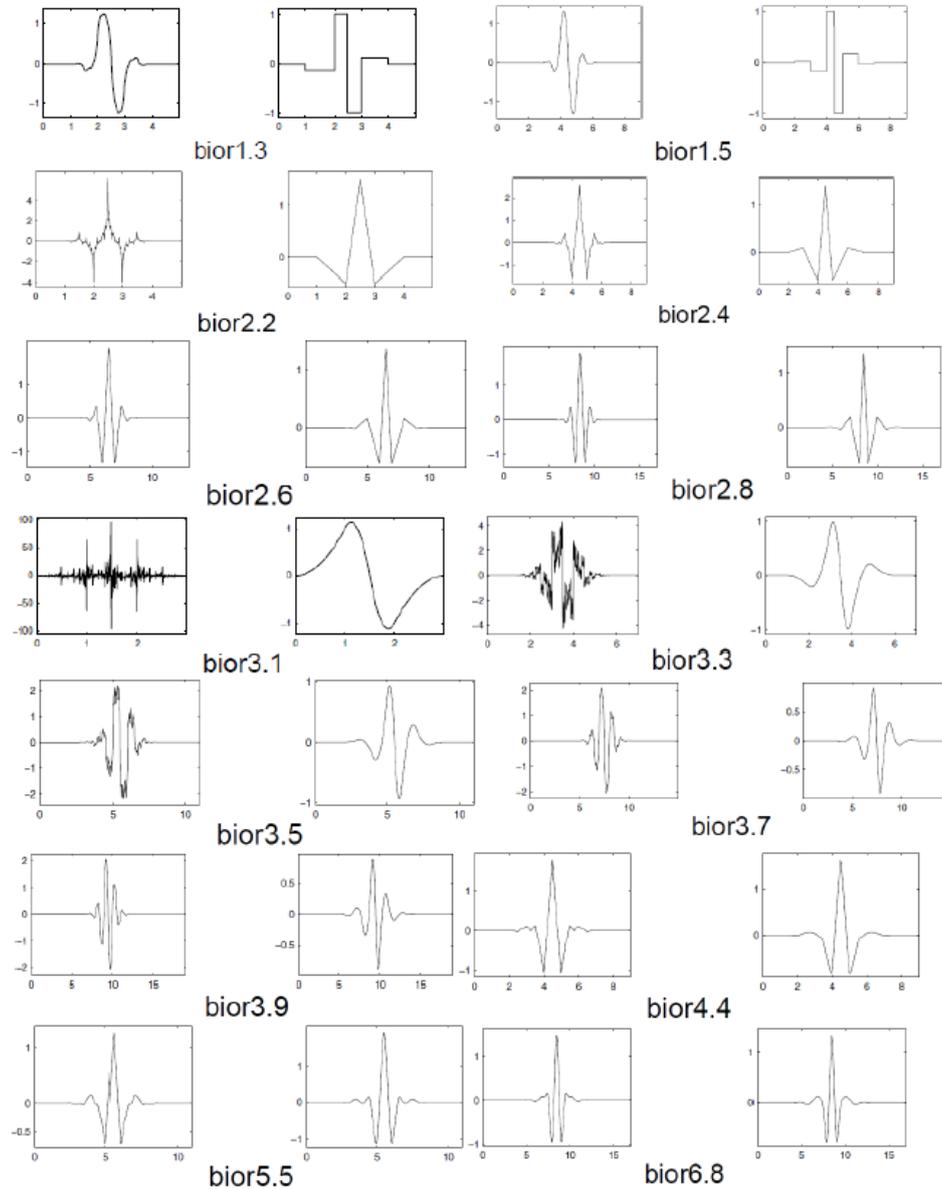


Figura 3.4 - Funções Wavelets Biortogonais (Palechor, 2018)

3.3.2.4. SYMLETS

As funções symlets foram propostas também por Ingrid Daubechies. São funções muito parecidas com a as da família dbN, com propriedades semelhantes, porém, estas tendem a ser simétricas, como representadas na Figura 3.5.

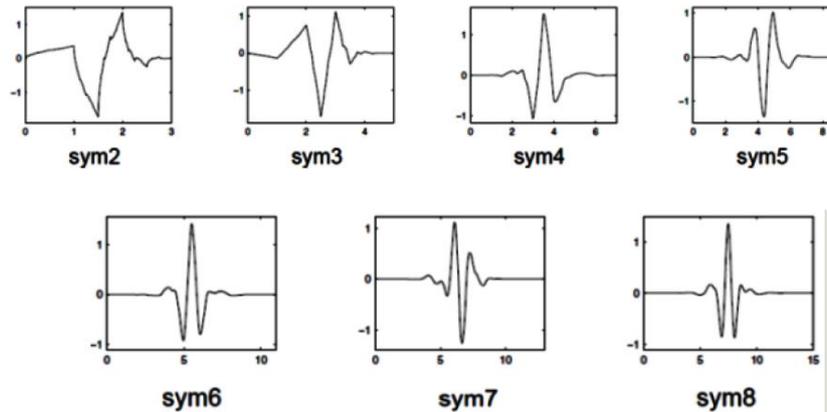


Figura 3.5 - Funções Wavelets Symlets (Palechor, 2018)

3.3.3. TRANSFORMADA DISCRETA DE WAVELET (TDW)

As Transformadas Discretas de Wavelet (TDW) é um caso particular onde os parâmetros a e b das Wavelets (ψ) são inteiros escalados na potência de base 2 como representado pelas equações abaixo.

$$a = 2^j; \quad b = 2^j * k; \quad \text{onde } j, k \in \mathbb{Z}$$

Este tipo de Wavelet é mais eficiente pois reduz a complexidade e o esforço computacional necessário no cálculo, pois o número de coeficientes gerados durante a análise é muito menor comparado a transformada contínua. Este caso particular pode ser descrito pela fórmula a seguir.

$$TDW_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\psi(2^{-j}x - k) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\psi_{j,k}(x) dx \quad (3.8)$$

4. INTERPOLAÇÃO

Para identificar danos utilizando as Wavelets, é necessário que se obtenha uma função contínua de deslocamento, e como os sensores são medidores pontuais, isso só seria possível, na prática, com um número infinito de sensores. Desta forma, faz-se a interpolação dos pontos entre cada sensor para que sejam obtidos um número maior de dados e com isso uma curva de deslocamento, possibilitando, assim, os métodos de aplicação de danos. A aplicabilidade da Transformada Discreta de Wavelet se limita a pelo menos 100 dados pontuais, e 1000 para a Transformada Contínua (SILVA, R. 2015).

4.1.POLINÔMIOS vs. SPLINES

A interpolação polinomial é a aproximação por uma função escolhida quando uma função suave é aproximada localmente. Por exemplo, a série de Taylor definida pela equação (4.1) fornece uma aproximação satisfatória para a função $f(x)$ se f é suficientemente suave e x é suficientemente próximo de a .

$$\sum_{i=0}^n (x - a)^i D^i f(a)/i! \quad (4.1)$$

Porém, caso deseja-se aproximar a função para um intervalo maior, o grau, n , do polinômio aproximado poderá ser inaceitavelmente grande. A alternativa, então, é subdividir este intervalo de aproximação $[a,b]$ em intervalos suficientemente menores (equação (4.2)), de forma que para cada intervalo, um polinômio, p_j , de grau relativamente baixo pode fornecer uma boa aproximação para f . Esta função polinomial aproximada por intervalos é chamada de Spline.

A interpolação por splines consiste na interpolação por polinômios entre cada intervalo de dois pontos conhecidos (dados obtidos experimentalmente ou analiticamente), ou seja, é formado um polinômio de grau k , para cada dois pontos consecutivos, que chamaremos de nós t_i onde:

$$a = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n = b \quad (4.2)$$

Assim, uma função spline S de grau k deve satisfazer as seguintes condições:

- i. Entre cada intervalo $(t_{i-1}, t_i]$, S é um polinômio de grau menor ou igual a k .
- ii. A derivada de S é contínua em $[t_0, t_n]$ e tem ordem $(k - 1)$.

Desta forma, um spline de grau 0 são funções constante entre os nós, e um spline de grau 1 é composto por retas, como definido pelas equação (4.3) e equação (4.4).

$$S \begin{cases} S_0(x) = c_0 & x \in [t_0, t_1] \\ S_1(x) = c_1 & x \in [t_1, t_2] \\ \quad \cdot \\ \quad \cdot \\ S_{n-1}(x) = c_{n-1} & x \in [t_{n-1}, t_n] \end{cases} \quad (4.3)$$

$$S \begin{cases} S_0(x) = a_0x + b_0 & x \in [t_0, t_1] \\ S_1(x) = a_1x + b_1 & x \in [t_1, t_2] \\ \quad \cdot \\ \quad \cdot \\ S_{n-1}(x) = a_{n-1}x + b_{n-1} & x \in [t_{n-1}, t_n] \end{cases} \quad (4.4)$$

O gráfico de um spline de grau 0 da função $\text{sen}(x)$ com nós espaçados de 2 em 2 unidades é ilustrado na Figura 4.1, e o gráfico do spline de grau 1 da mesma função com os mesmos nós é apresentado na Figura 4.2.

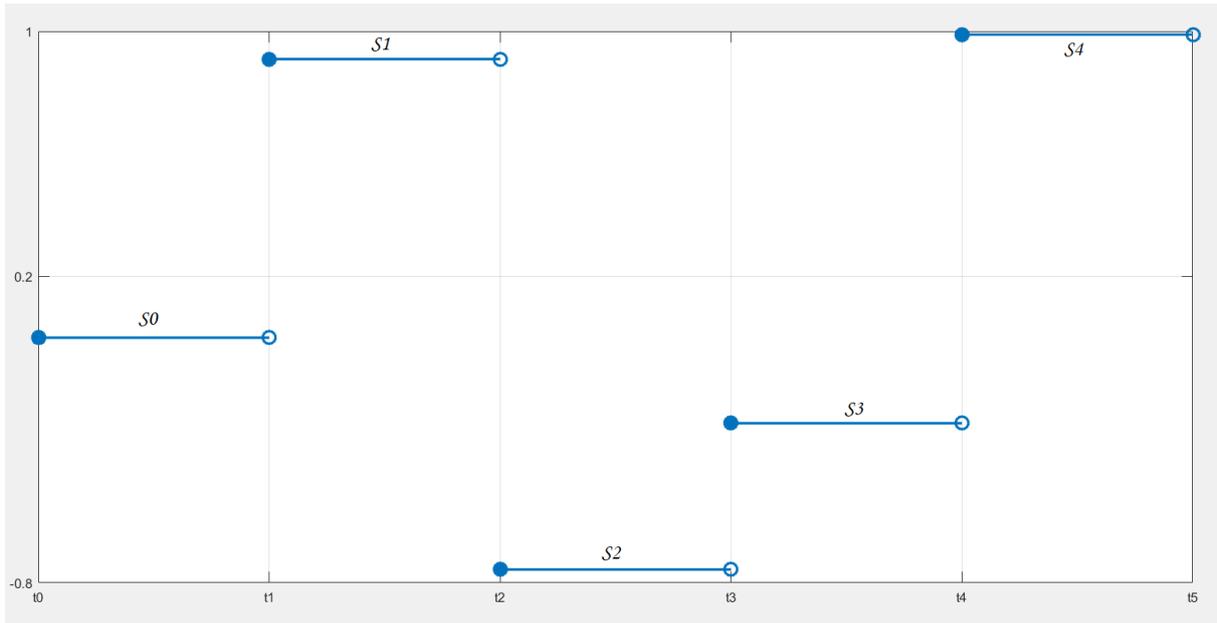


Figura 4.1 - Spline de grau 0

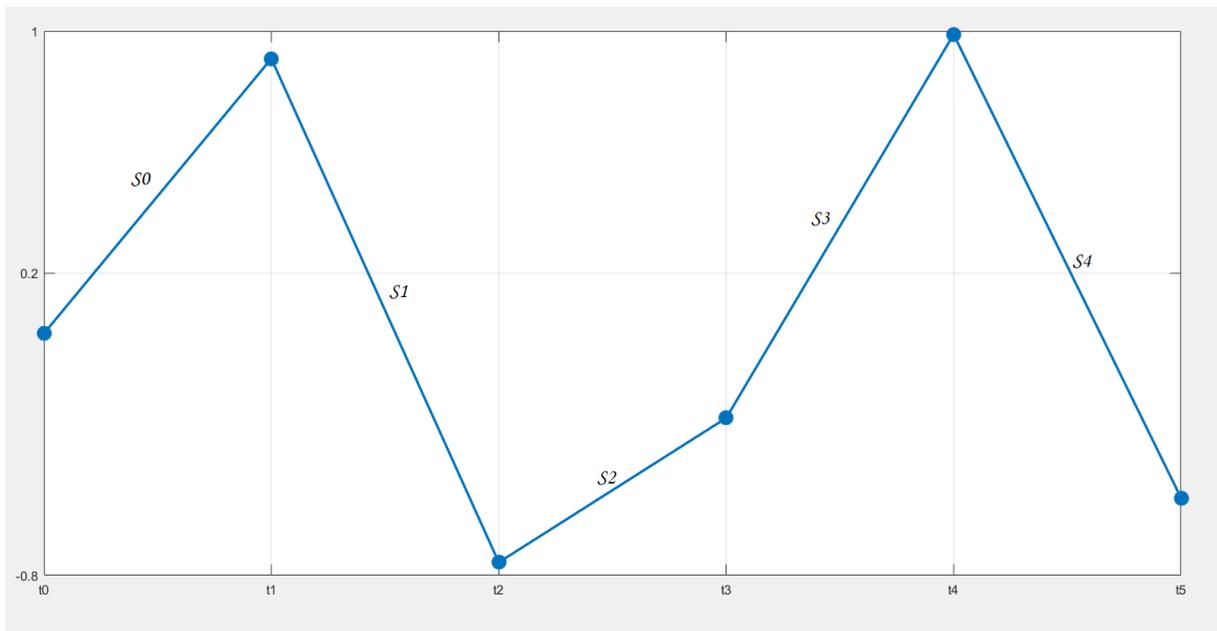


Figura 4.2 - Spline de grau 1

4.2.SPLINES CÚBICOS

Tipicamente, a aproximação por polinômios seccionados de grau 3 é a mais utilizada por se tratar de um polinômio de grau relativamente baixo, ou seja, possui cálculos mais simples, além de proporcionar uma aproximação muito boa e contínua dos pontos. Da mesma forma que os splines anteriores, também possui uma função, S_i , entre cada nó, porém de grau 3, o que proporciona a vantagem de possuir a derivada de primeira ordem, S'_i , e a derivada de segunda ordem, S''_i , exatamente iguais as respectivas derivadas da função seguinte, S_{i+1} .

Matematicamente, pode-se formular as condições descritas acima da seguinte forma:

i. $S(x)$ é um polinômio cúbico de forma

$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3$, indicado por $S_i(x)$ e de domínio dentro do intervalo $[x_i, x_{i+1}]$, para cada $0 \leq i \leq n - 1$;

ii. $S(x_i) = f(x_i)$, para cada $0 \leq i \leq n$;

iii. $S_i(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1})$, para cada $0 \leq i \leq n - 2$;

iv. $S'_i(x_{i+1}) = S'_{i+1}(x_{i+1})$, para cada $0 \leq i \leq n - 2$;

v. $S''_i(x_{i+1}) = S''_{i+1}(x_{i+1})$, para cada $0 \leq i \leq n - 2$;

Chamando $x_{i+1} - x_i = h_i$ temos,

$$a_{i+1} = a_i + b_i h_i + c_i h_i^2 + d_i h_i^3, \quad 0 \leq i \leq n - 1; \quad (4.5)$$

Definindo $b_n = S'(x_n)$ e lembrando que $S'_i(x_{i+1}) = S'_{i+1}(x_{i+1})$ temos,

$$b_{i+1} = b_i + 2c_i h_i + 3d_i h_i^2, \quad 0 \leq i \leq n - 1; \quad (4.6)$$

Definindo $c_n = S''(x_n)/2$ e lembrando que $S''_i(x_{i+1}) = S''_{i+1}(x_{i+1})$ temos,

$$c_{i+1} = c_i + 3d_i h_i^2, \quad 0 \leq i \leq n - 1; \quad (4.7)$$

Isolando d_j na equação (4.7) e substituindo na equação (4.6) e (4.5), para cada $0 \leq i \leq n$ obtemos,

$$a_{i+1} = a_i + b_i h_i + \frac{h_i^2}{3} (2c_i + c_{i+1}), \quad (4.8)$$

$$b_{i+1} = b_i + h_i (c_i + c_{i+1}). \quad (4.9)$$

Resolvendo o sistema acima obtemos a seguinte equação (4.10), que é sempre um sistema possível e determinado, onde as únicas incógnitas são c_i , visto que h_i e a_i são dados iniciais da interpolação.

$$h_{i-1}c_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i)c_i + h_ic_{i+1} = \frac{3}{h_i}(a_{i+1} - a_i) - \frac{3}{h_{i-1}}(a_i - a_{i-1}) \quad (4.10)$$

Resolvendo a equação (4.10) para um spline natural, isto é, um spline onde a segunda derivada dos extremos são iguais a 0, ou seja, $S''(x_0) = S''(x_n) = 0$, fazendo com que $c_n = c_0 = 0$. Sendo assim, temos as seguintes matrizes envolvidas no sistema.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ h_0 & 2(h_0 + h_1) & h_1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & h_1 & 2(h_1 + h_2) & h_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & h_{n-2} & 2(h_{n-2} + h_{n-1}) & h_{n-1} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{3}{h_1}(a_2 - a_1) - \frac{3}{h_0}(a_1 - a_0) \\ \vdots \\ \frac{3}{h_{n-1}}(a_n - a_{n-1}) - \frac{3}{h_{n-2}}(a_{n-1} - a_{n-2}) \end{bmatrix}$$

Para o caso de um spline restrito, isto é, quando as primeiras derivadas nos pontos inicial e final da função original, $f'(x_0)$ e $f'(x_n)$, são respectivamente iguais às primeiras derivadas nos pontos inicial e final da função interpolada, $S'(x_0)$ e $S'(x_n)$, as matrizes envolvidas são as mesmas, exceto pelas primeiras e últimas linhas das matrizes A e b , que são, respectivamente:

$$A_0 = [2h_0 \quad h_0 \quad 0 \quad \dots \quad \dots \quad 0]$$

$$A_n = [0 \quad \dots \quad \dots \quad 0 \quad h_{n-1} \quad 2h_{n-1}]$$

e

$$b_0 = \frac{3}{h_0}(a_1 - a_0) - 3f'(a)$$

$$b_n = 3f'(b) - \frac{3}{h_{n-1}}(a_n - a_{n-1})$$

A interpolação por spline cúbico é exemplificada na Figura 4.3, na qual as curvas S0, S1, S2, S3 e S4 são curvas de grau 3 que interceptam todos os 6 pontos iniciais do problema.

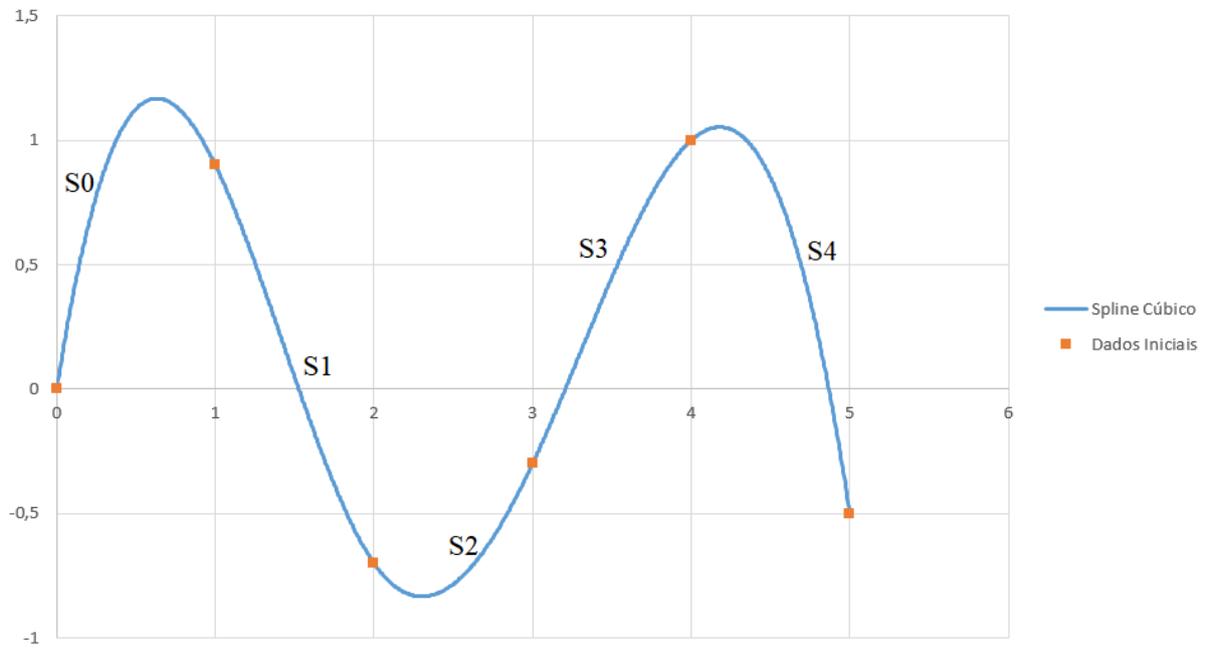


Figura 4.3 - Spline Cúbico

5. SOFTWARES

Esta sessão descreve brevemente os softwares utilizados e como foram utilizados na elaboração do experimento. Ao final, descreve as placas e vigas que serão modeladas e testadas nos programas citados.

5.1. BEMLAB2D

O BEMLAB é um conjunto de algoritmos construídos na linguagem M-CODE e cujo funcionamento é dependente da existência do MATLAB no computador. Sua funcionalidade é tornar intuitivo o processo de criação da malha a ser analisada, e o resultado produzido, um arquivo com a malha disposta apropriadamente para utilização no BEMCracker2D, com suas devidas matrizes de solicitações, nós, elementos e condições de contorno, todas atribuídas no BEMLAB. (DELGADO NETO, A. M. 2017)

A interface do BEMLAB é simples e intuitiva, e a modelagem da malha segue os passos dispostos a seguir:

- i. Atribui-se as coordenadas dos pontos nodais, tanto da malha principal como de trincas abertas e fechadas, e define-se uma escala a ser visualizada que englobe todos os pontos criados.
- ii. Cria-se as linhas, círculos e arcos do contorno, atentando-se para a ordem e sentido em que foram criadas.
- iii. Seleciona-se as zonas, ou regiões delimitadas por cada linha, atribuindo seu módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson ou se o segmento se trata de uma trinca aberta ou fechada.
- iv. Discretiza-se cada segmento definindo a quantidade de elementos para o caso de segmentos contínuos, e para segmentos descontínuos como trincas, a razão dos elementos que formarão este segmento.
- v. Atribui-se as condições de contorno para cada nó, bem como restrições de translação para cada eixo (o número referente a cada elemento é atribuído de forma crescente na ordem e direção em que os segmentos foram criados)
- vi. Atribui-se as tensões aplicadas, bem como carregamento distribuído e cargas pontuais.

- vii. Escolhe-se o tipo de problema. Define-se se a análise será realizada para um modelo no Estado Plano de Tensão ou Estado Plano de Deformação.
- viii. Gera-se a malha selecionando um dos três tipos de análise possíveis (análise padrão sem trincas, com trincas sem a propagação das trincas, com trincas e suas devidas propagações).

A Figura 5.1 apresenta a interface do BEMLAB com as respectivas descrições dos comandos necessários para criação da malha.

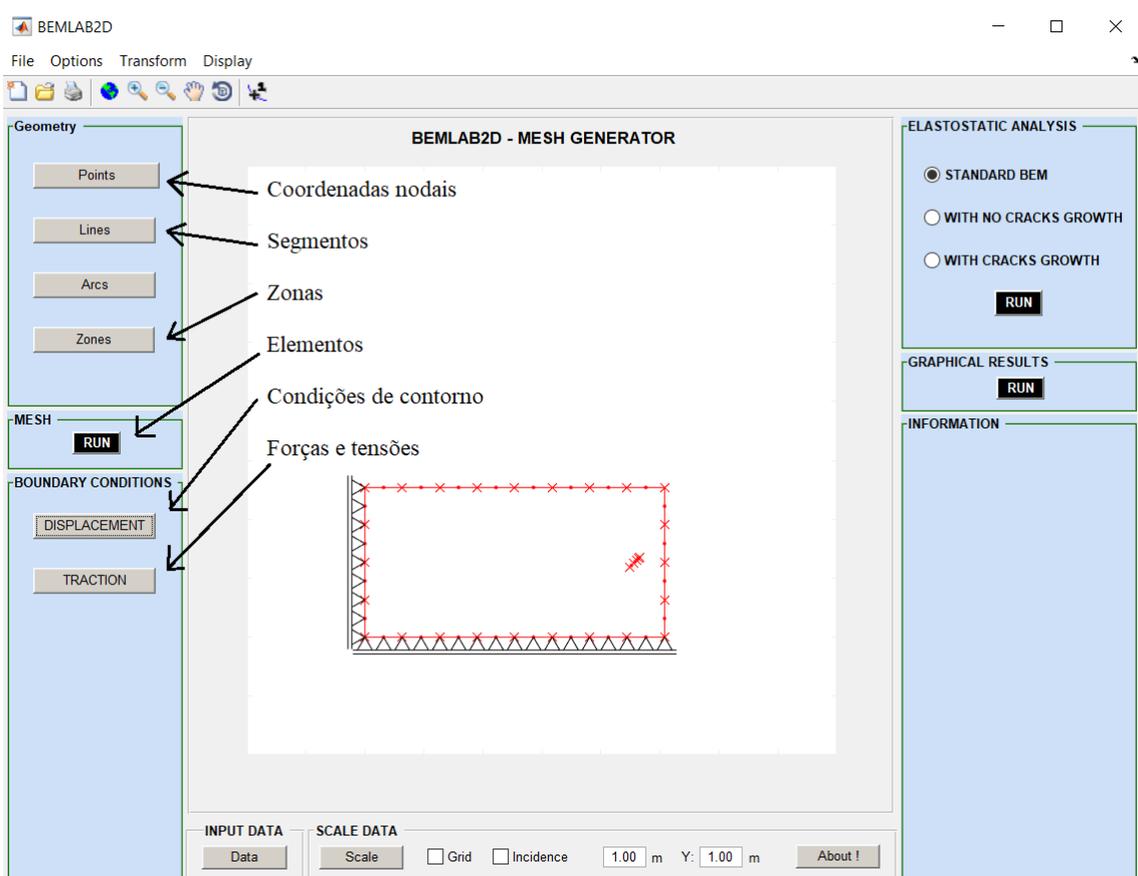
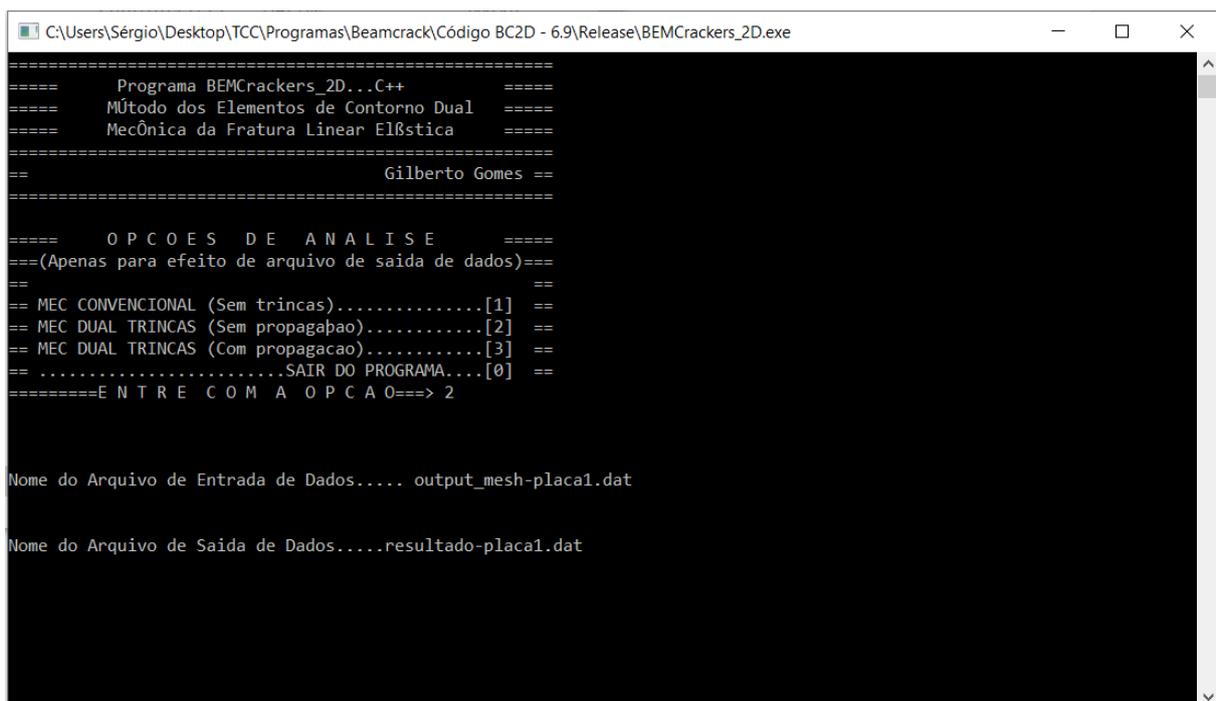


Figura 5.1 – BEMLAB

Com as matrizes que definem malha prontas e exportadas em um único arquivo, aplica-se o método dos elementos de contorno à estrutura modelada através do BEMCracker, como demonstrado pela Figura 5.2.

5.1.1. BEMCRACKER2D

O software BEMCracker é um software de cálculo numérico bidimensional desenvolvido pelo professor Gilberto Gomes, doutor em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília. O software é construído na linguagem C++, e necessita de um arquivo de entrada em formato *.dat* com os dados da malha a ser analisada, que pode ser criado a mão, ou com o auxílio de outros programas, como o BEMLAB. O programa é capaz de processar em elementos de contorno e hibridamente em elementos finitos.



```
=====  
Programa BEMCrackers_2D...C++      =====  
Método dos Elementos de Contorno Dual  =====  
Mecânica da Fratura Linear Elástica  =====  
=====  
Gilberto Gomes ==  
=====  
OPCOES DE ANALISE      =====  
== (Apenas para efeito de arquivo de saída de dados) ==  
==  
== MEC CONVENCIONAL (Sem trincas).....[1] ==  
== MEC DUAL TRINCAS (Sem propagacao).....[2] ==  
== MEC DUAL TRINCAS (Com propagacao).....[3] ==  
== .....SAIR DO PROGRAMA....[0] ==  
=====  
E N T R E C O M A O P C A O ==> 2  
  
Nome do Arquivo de Entrada de Dados..... output_mesh-placa1.dat  
  
Nome do Arquivo de Saída de Dados..... resultado-placa1.dat
```

Figura 5.2 – BEMCracker2D

5.2. MATLAB

O MATLAB é um programa extremamente robusto de cálculo numérico capaz de fazer análises iterativas, complexas, multidimensionais e matriciais. O software combina o processo de análise e planejamento com uma linguagem de programação própria, chamada de M-CODE ou simplesmente M. O programa é amplamente utilizado com propósitos tanto acadêmicos e científicos como profissionais e industriais em todas as áreas da ciência, como engenharias, matemática, física, computação, processamento de imagens e sinais, *machine learning*, análise de dados, finanças, planejamento de riscos, robótica, etc.

O programa, por se tratar de um programa com uma extensa variedade de funcionalidades e afim de reduzir o espaço necessário em disco a depender do caso que será utilizado, é construído em módulos e esses módulos são disponibilizados em bibliotecas online. Estes módulos são denominados *toolbox*, ou *add-ons*, que são pacotes compostos de algoritmos e interfaces adequadas e específicas para a sua utilização.

5.3. WAVELET TOOLBOX

A wavelet toolbox é um pacote adicional do programa MATLAB que possui uma interface única e permite que as mais diversas análises de wavelets sejam feitas interativamente e com elevada praticidade. A Figura 5.3 demonstra a interface do programa e os diferentes tipos possíveis de análise através das wavelets, enquanto a Figura 5.4 apresenta as famílias das wavelets disponíveis para análise, onde as marcadas com um asterisco, *, são as passíveis de análise unidimensional.

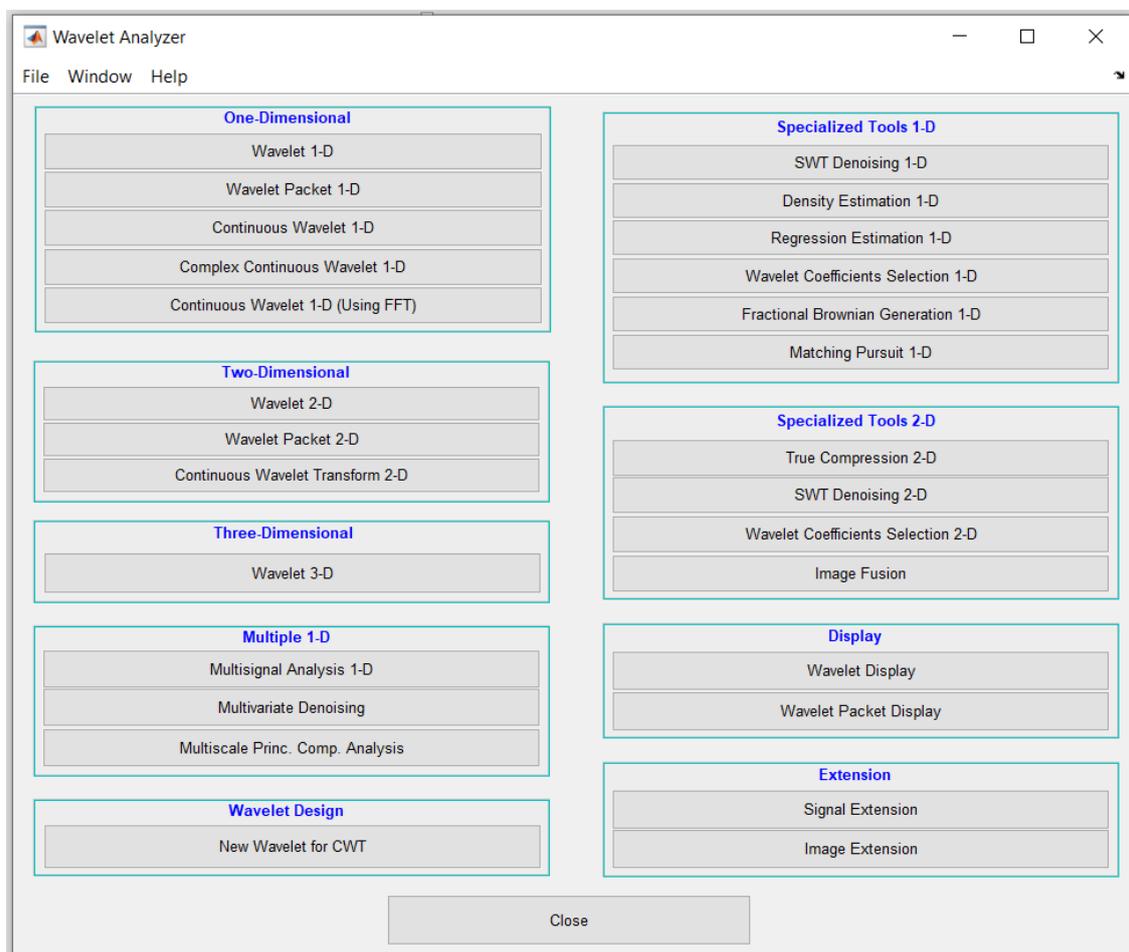


Figura 5.3 - Interface da Wavelet Toolbox

Haar	haar*
Daubechies	db*
Symlets	sym*
Coiflets	coif*
BiorSplines	bior*
ReverseBior	rbio*
Meyer	meyr
DMeyer	dmey*
Gaussian	gaus
Mexican_hat	mexh
Morlet	morl
Complex Gaussian	cgau
Shannon	shan
Frequency B-Spline	fbsp
Complex Morlet	cmor
Fejer-Korovkin	fk*

Figura 5.4 - Família das Wavelets Disponíveis

5.3.1. FLUXOGRAMA

O fluxograma da Figura 5.5 ilustra resumidamente o processo de modelagem, trabalho de dados e aplicação das wavelets descritos nos itens anteriores.

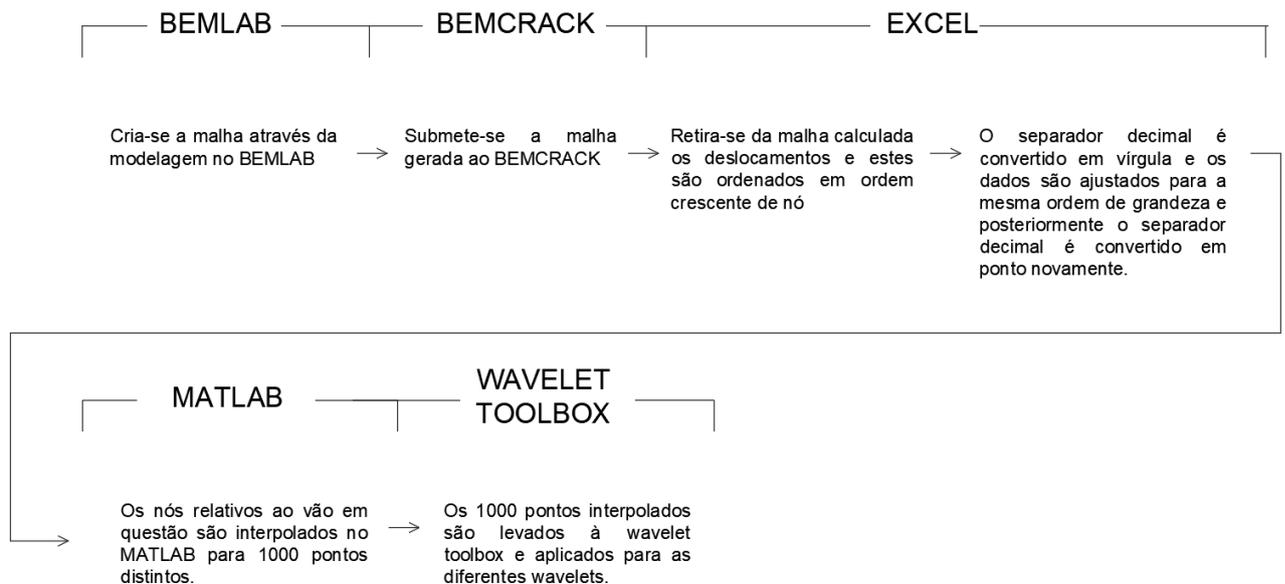


Figura 5.5 - Fluxograma de Processos

5.4.DESCRICÃO DAS PLACAS E VIGAS

As vigas e placas foram modeladas e carregadas conforme detalhado no item 5.1 e calculadas através do BEMCracker. Os resultados foram organizados e trabalhados em EXCEL para que sejam compatibilizados com o MATLAB. Como o BEMCracker e o BEMLAB utilizam a vírgula como caractere decimal, alguns dados são lidos no EXCEL com grandeza 10^8 vezes superior ao dado real, assim, estes dados cujo valores são discrepantes são convertidos para a ordem de grandeza real, são organizados em ordem crescente de nó.

Em seguida, os valores de posição e deslocamento para cada nó foram interpolados pelo método dos splines cúbicos através da função spline do MATLAB, totalizando 1000 pontos além do ponto de origem (0,0).

Os valores interpolados foram, então, analisados pelo método das wavelets específico para cada viga detalhado na sessão seguinte, através da Wavelet Toolbox descrita no item 5.3.

5.4.1. PLACA 1

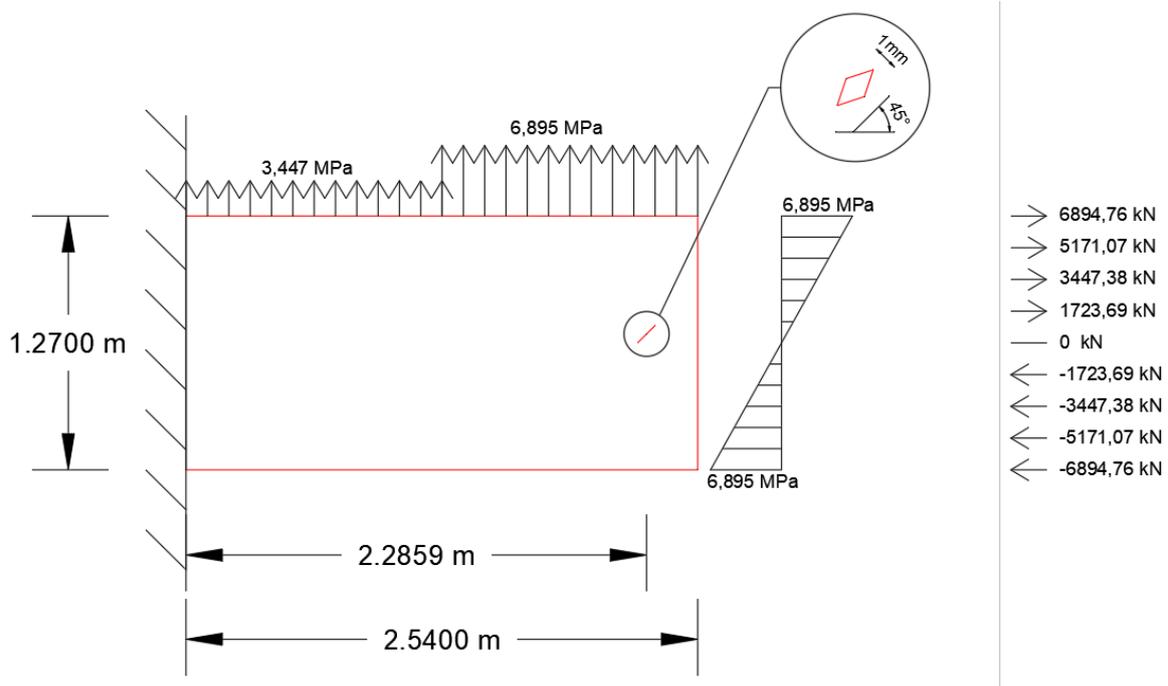


Figura 5.6 - PLACA 1, dimensões, carga aplicada e dano induzido

A placa 1 é uma placa em balanço engastada em uma de suas extremidades e discretizada em 8 por 4 elementos de contorno. A placa foi submetida a dois carregamentos distribuídos variáveis diferentes, um ao longo de seu comprimento e outro ao longo de sua altura. Como o carregamento é feito aplicando-o nos nós da estrutura, o carregamento triangular de sua lateral foi simplificado com um conjunto de forças pontuais aplicadas, também detalhado na Figura 5.6.

O dano induzido é uma trinca de 12,7cm (5 polegadas) de comprimento por 1mm de espessura localizada no meio da altura e rotacionada em 45°, e foi modelada como um losango onde cada segmento foi discretizado em 4 elementos, pois esta foi a forma encontrada para modelar trincas abertas no software. A posição do centro do dano e suas dimensões, em metros, também são demonstradas na Figura 5.6. O material modelado possui módulo de elasticidade, E, de $1,86 \cdot 10^6$ psi (12824,2536 MPa) e coeficiente de Poisson igual a 0.

5.4.2. PLACA 2

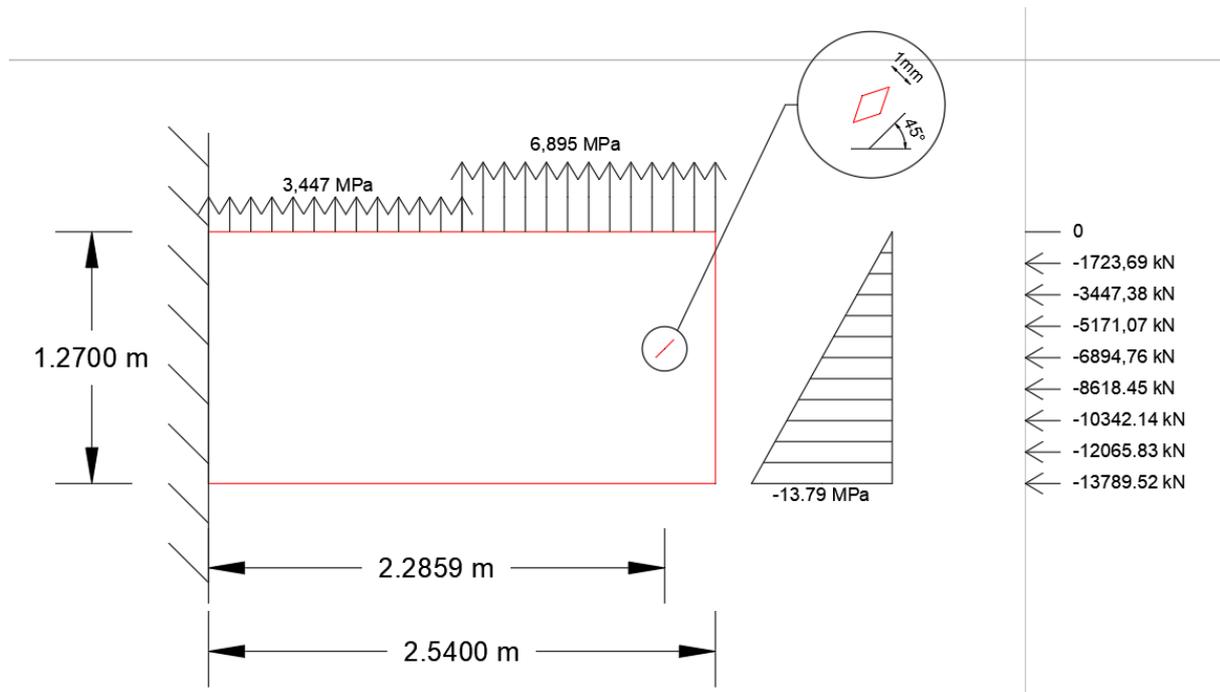


Figura 5.7 - PLACA 2, dimensões, carga aplicada e dano induzido

A Placa 2 é análoga à placa 1 pois possui dimensões, material e dano iguais, porém seu carregamento lateral é substituído por um carregamento triangular para que se evite a existência de nós cujo carregamento é nulo, o que dificulta a análise através das Wavelets. As dimensões, o carregamento, o dano e a forma que o carregamento é aplicado são detalhados na Figura 5.7.

5.4.3. PLACA 3

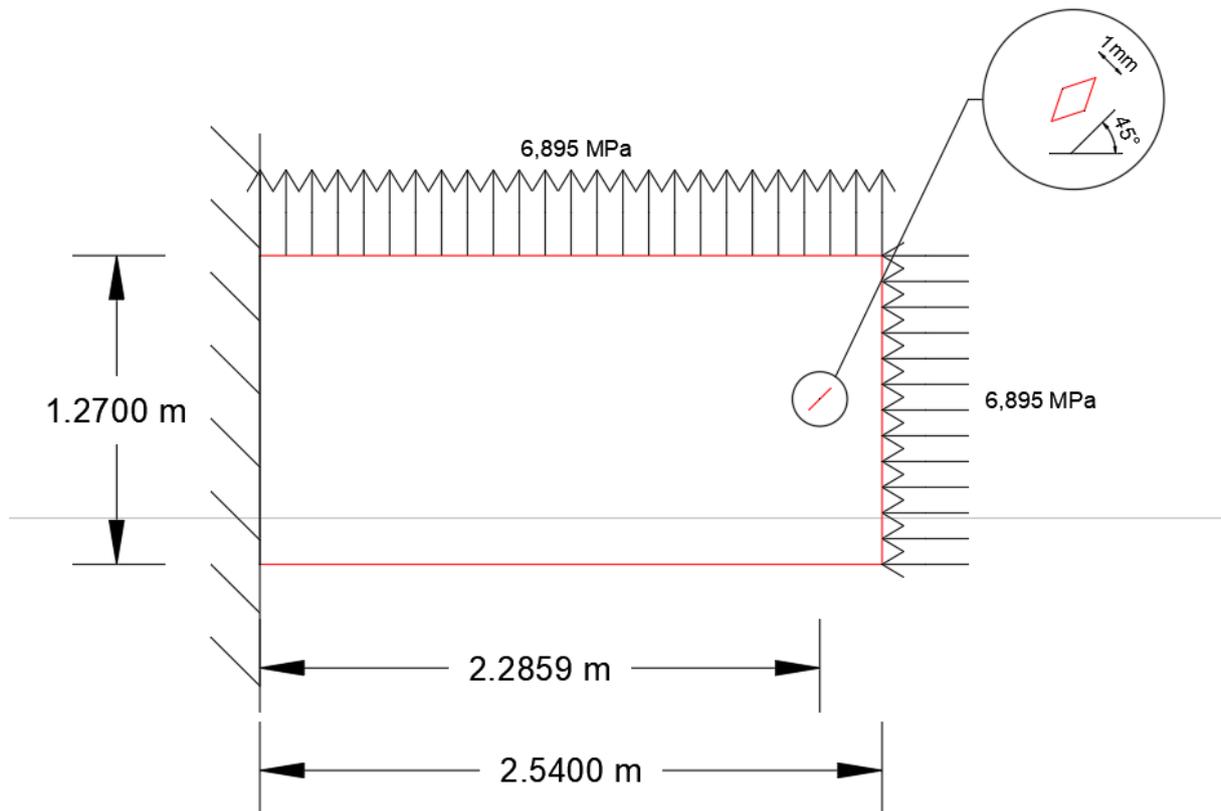


Figura 5.8 - PLACA 3, dimensões, carga aplicada e dano induzido

A Placa 3 possui dimensões, dano, material e condições de contorno iguais as placas 1 e 2, mas seu carregamento foi alterado por um carregamento uniforme para as duas faces carregadas da placa, de forma que as variações nos deslocamentos sejam oriundas apenas do dano e da posição e não de um carregamento variável.

5.4.4. VIGA BALANÇO 1

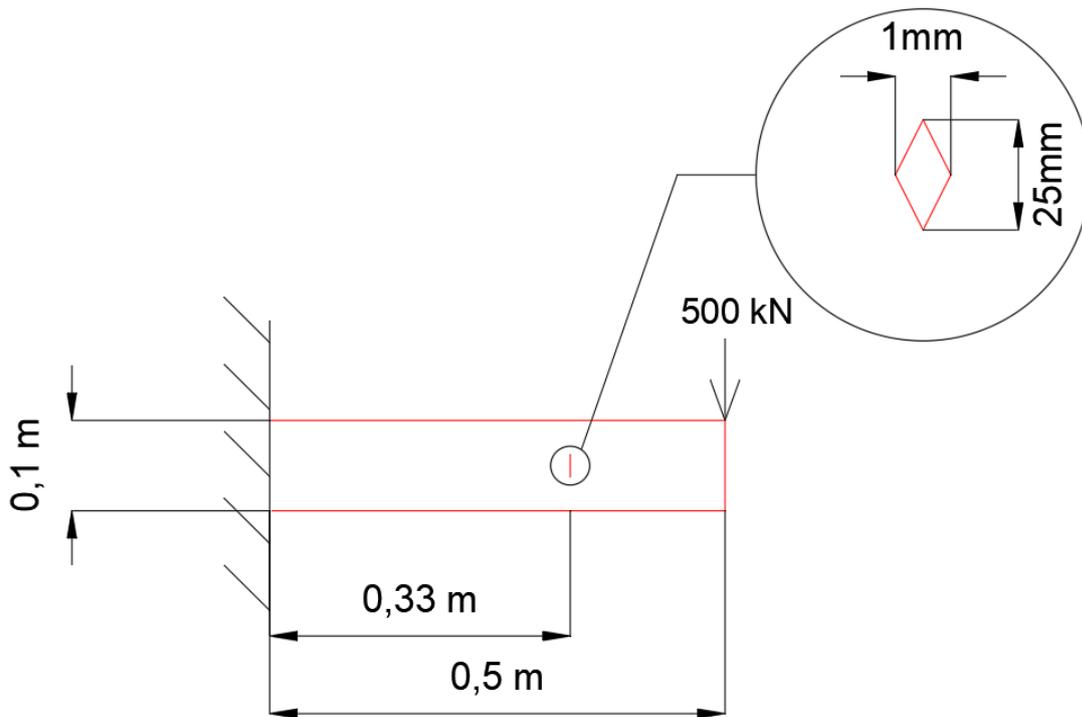


Figura 5.9 - VIGA BALANÇO 1, dimensões, carga aplicada e dano induzido

A Viga Balanço 1 é uma viga de dimensões muito inferiores às placas detalhadas anteriormente e foi submetida a uma carga pontual na extremidade do balanço. O dano simulado é uma trinca de 1mm de espessura por 25mm de comprimento posicionado a 0,33m do engaste. A carga aplicada, detalhes e suas dimensões, em metros, são ilustrados na Figura 5.9.

Diferentemente das placas 1, 2 e 3, esta viga foi discretizada em 25 elementos ao longo de seu comprimento por 12 elementos ao longo de sua altura, cada elemento dividido em 3 nós igualmente espaçados, e o material simulado possui módulo de elasticidade, E , de 20000 MPa e coeficiente de Poisson igual a 0,3.

5.4.5. VIGA BALANÇO 2

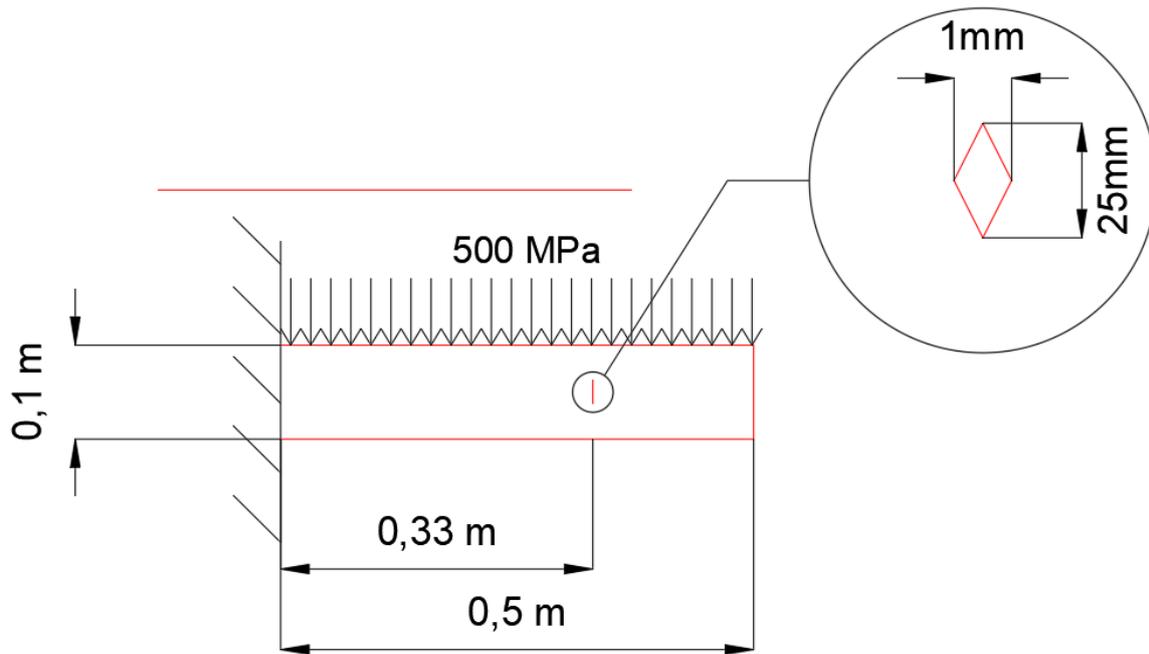


Figura 5.10 – VIGA BALANÇO 2, dimensões, carga aplicada e dano induzido

A Viga Balanço 2, ilustrada na Figura 5.10, possui material, dimensões e dano iguais a viga anterior, porém possui carregamento distribuído uniforme ao longo do vão substituindo a carga concentrada da viga anterior, de forma que a análise através das Wavelets possa ser comparada para os dois tipos de carregamento. Vale ressaltar que esta viga também foi discretizada em 25x12 elementos de contorno.

6. RESULTADOS

A análise dos resultados através das wavelets foi feita interpolando-se os pontos em 1.000 pontos distintos por splines cúbicos. Anteriormente, foi feita uma pré-avaliação do método de interpolação mais adequado, utilizando-se a interpolação para 10.000, 1.000, 500 e 100 pontos para todos os casos, e a interpolação para 1.000 pontos se mostrou a mais adequada por apresentar boa suavização e continuidade do gráfico sem perder as variações que faz das wavelets um método capaz de identificar danos.

As placas tiveram suas faces analisadas separadamente pois possuem carregamentos nas duas direções. Foi aplicada a teoria das wavelets para cada uma das faces utilizando-se os pontos iniciais no eixo em questão (eixo X para vãos superiores e eixo Y para vãos laterais), e os deslocamentos desses pontos provocados pelo carregamento paralelo ao deslocamento (dy para vãos superiores e dx para vãos laterais).

Para a análise das faces superiores foram utilizados os deslocamentos do vão inferior embora os carregamentos foram detalhados e aplicados no vão superior, pois este apresenta uma resposta melhor para a análise das wavelets.

Todas as análises foram feitas com wavelets de diferentes ordens da família Daubechies, na maioria db10, que demonstrou ser a wavelet mais precisa na localização de danos.

6.1.PLACA 1

6.1.1. FACE SUPERIOR

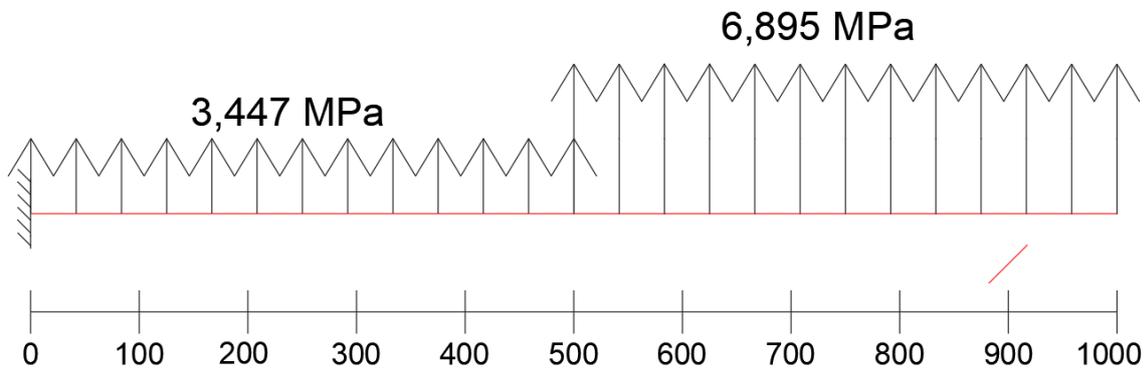


Figura 6.1 - PLACA 1, Face Superior

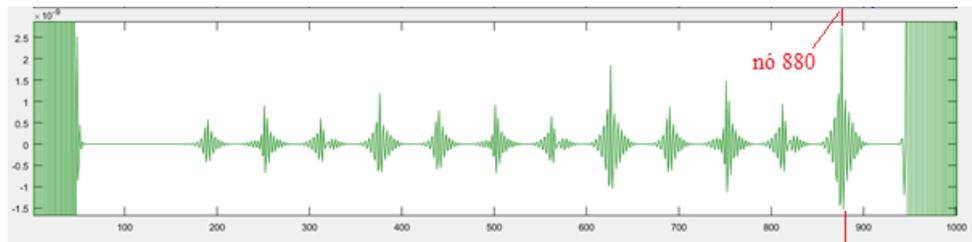


Figura 6.2 – Wavelet PLACA 1,face superior

Nota-se no gráfico da Figura 6.2 que o pico de maior amplitude se localizou no nó 880 do gráfico, ou seja, a análise através das wavelets foi satisfatória ao encontrar a trinca que, no caso, tem seu primeiro ponto no nó 880 e prolonga até o seu último ponto no nó 920, como apresentado na Figura 6.1, que corresponde ao vão superior da placa 1, apresentada na Figura 5.6.

Fica evidente também que, na região dos apoios, até aproximadamente 5% do vão, não é possível analisar a possibilidade de trincas por este método, visto que esta variação nas condições de contorno provoca grandes perturbações nas Wavelets.

6.1.2. FACE LATERAL

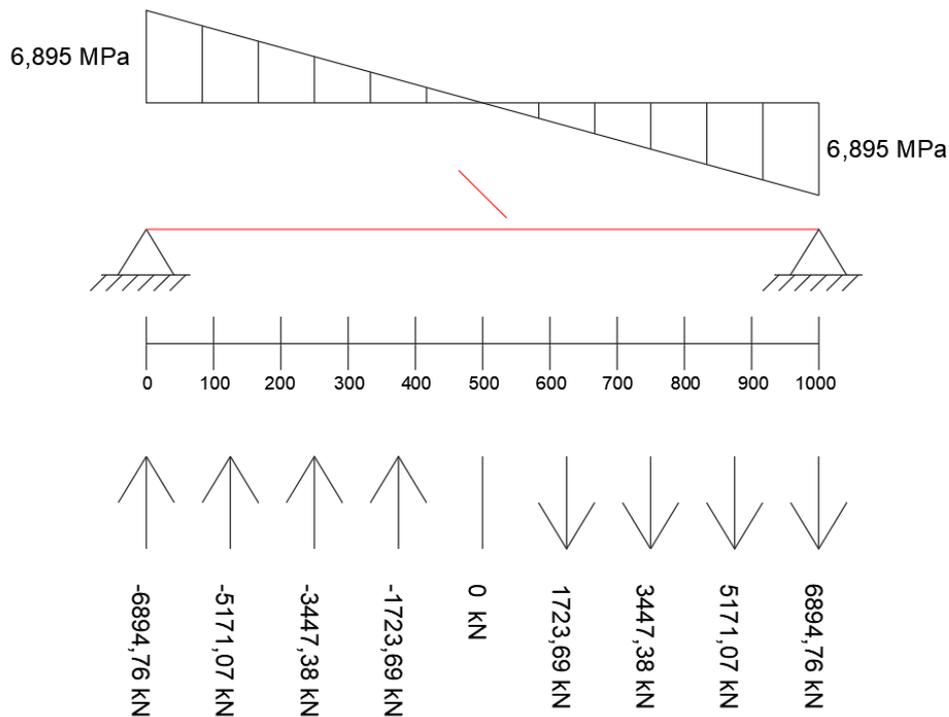


Figura 6.3 – PLACA 1, Face Lateral

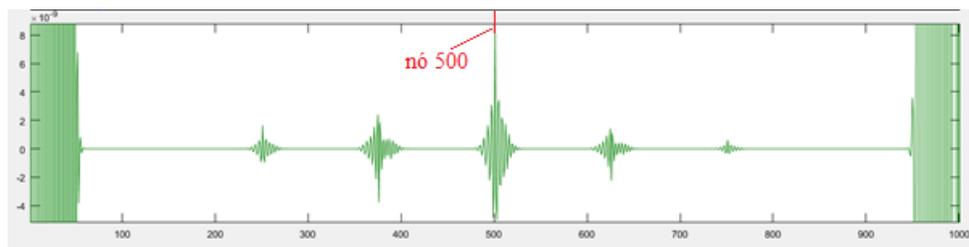


Figura 6.4 – Wavelet PLACA 1, face lateral

Com base no gráfico da Figura 6.4, a análise da face lateral também se provou eficaz, mostrando um grande pico no nó 500, que é o nó coincidente com o centro da trinca, localizada no meio do vão.

Evidencia-se também que, as pequenas perturbações nos nós 380 e 620 podem ser decorrentes da inversão do carregamento, onde o carregamento passa de 1723kN negativos (comprimindo a placa) para 1723kN positivos (tracionando a placa), como detalhado na Figura 6.3. O mesmo comportamento de picos elevados nas proximidades dos apoios também foi evidenciado.

6.2. PLACA 2

6.2.1. FACE SUPERIOR

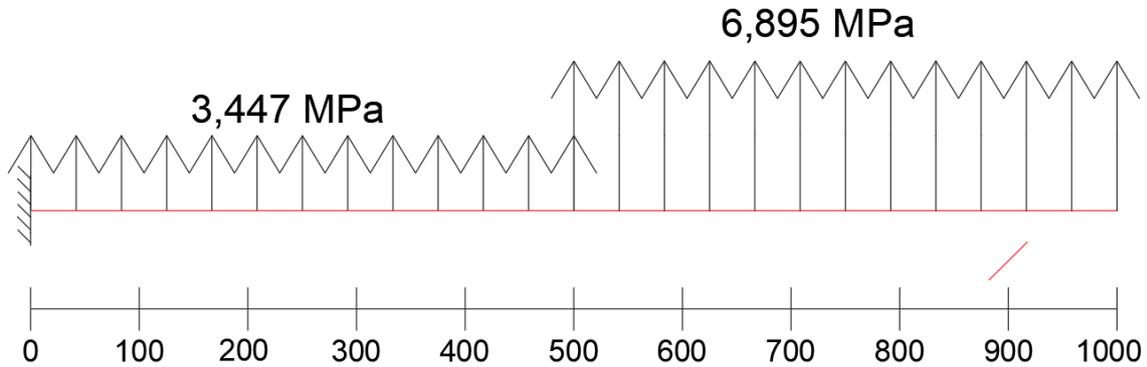


Figura 6.5 - PLACA 2, Face Superior

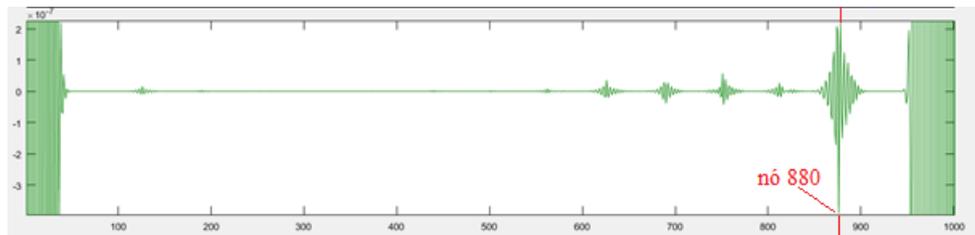


Figura 6.6 – Wavelet PLACA 2, face superior

A placa 2 apresenta face superior exatamente igual à face da placa 1, porém, as diferenças no carregamento lateral tornaram esta análise desejável para que possa ser comparada com a da placa 1. Notou-se que a trinca foi bem localizada no nó 880, porém melhor destacada e evidenciada que no caso anterior que possui a mesma solicitação no vão. Isto se dá, possivelmente, devido à mudança no carregamento lateral que, desta vez, não promove mais esforços de compressão e tração no interior da placa, promove apenas esforços de compressão, o que pode acabar provocando interferências na análise das wavelets.

6.2.2. FACE LATERAL

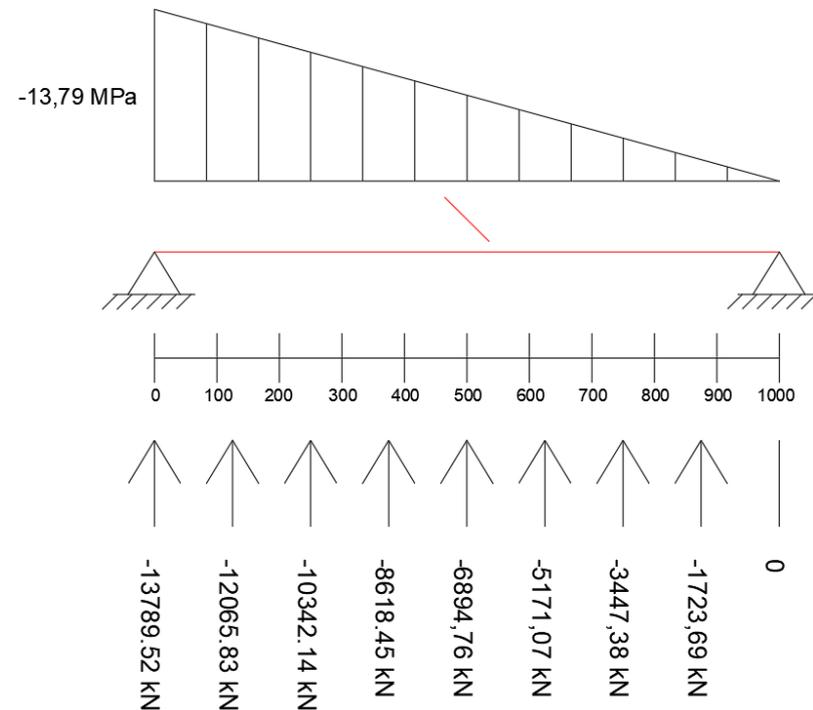


Figura 6.7 - PLACA 2, Face Lateral

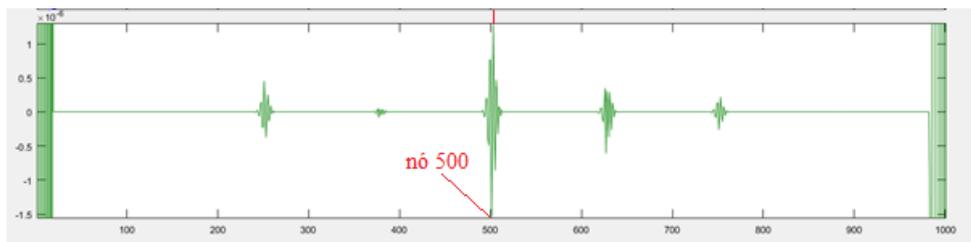


Figura 6.8 – Wavelet PLACA 2, face lateral

O método se apresentou eficaz também na localização de danos mesmo com carregamento distribuído em formato triangular. Em comparação com a placa 1, a placa 2 apresentou picos de maior amplitude mais precisos e pontuais, possivelmente devido ao carregamento que embora também variável, não é nulo no centro do vão e não apresenta inversão de sentido.

6.3.PLACA 3

6.3.1. FACE SUPERIOR

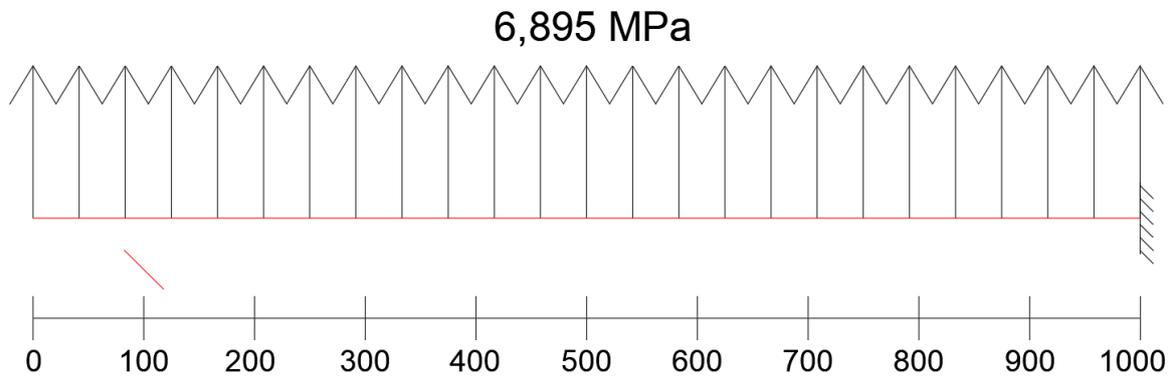


Figura 6.9 - PLACA 3, Face Superior

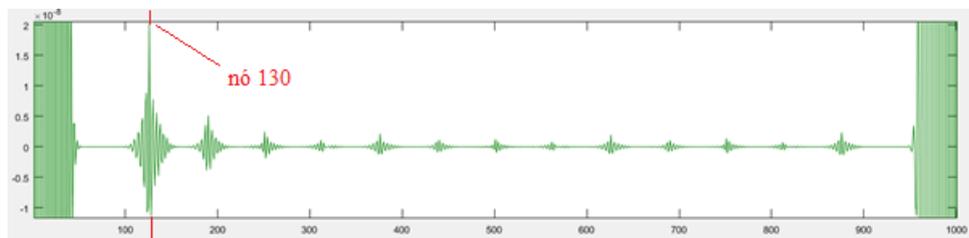


Figura 6.10 – Wavelet PLACA 3, face superior

A face superior da placa 3 também teve seu dano entre os nós 80 e 120 identificado e localizado com picos bem próximos, ou seja, em comparação com as placas 1 e 2, o carregamento distribuído uniformemente ou variando ao longo do vão são ambos válidos para identificação de danos através das wavelets.

6.3.2. FACE LATERAL

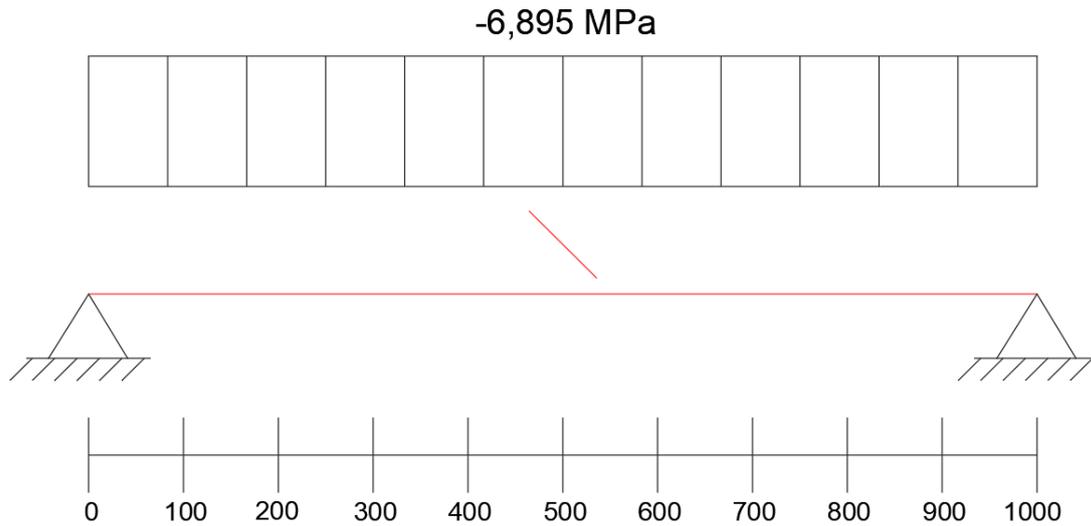


Figura 6.11 - PLACA 3, Face Lateral

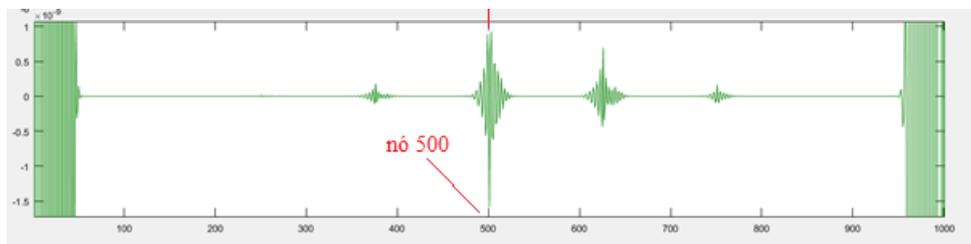


Figura 6.12 – Wavelet PLACA 3, face lateral

A análise pelas wavelets da face lateral da placa 3 identificou e localizou o dano como esperados, visto que os casos da placa 1 e 2 eram os casos mais críticos comparados a este, de carregamento uniforme.

O comportamento dos picos próximos aos apoios, como esperado, permaneceu evidente em todos os casos, seja na face lateral ou superior.

6.4. VIGA BALANÇO 1

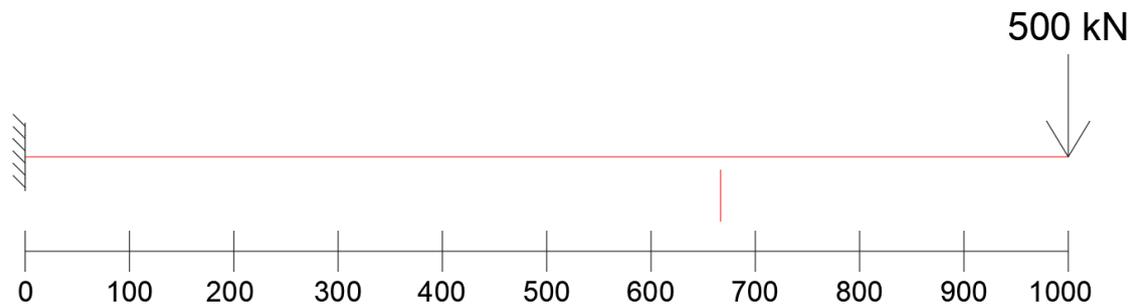


Figura 6.13 - VIGA BALANÇO 1, vão detalhado

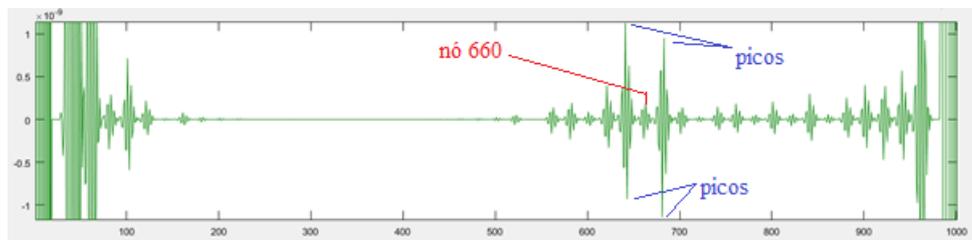


Figura 6.14 - Wavelet da Viga Balanço 1

Este caso, replicado do artigo “*Boundary element and wavelet transform methods for damage detection in 2D structures*” do *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, já possuía resultado conhecido, porém, foi replicado para validar o método aplicado nesta tese, e para comparar os resultados do mesmo caso com o carregamento diferente. As wavelets desta viga apresentaram dois picos, um em cada sentido, bem próximos da trinca, o que também definiu a localização do dano, localizado no nó 660, mas de forma diferente quando comparada aos casos anteriores.

6.5. VIGA BALANÇO 2

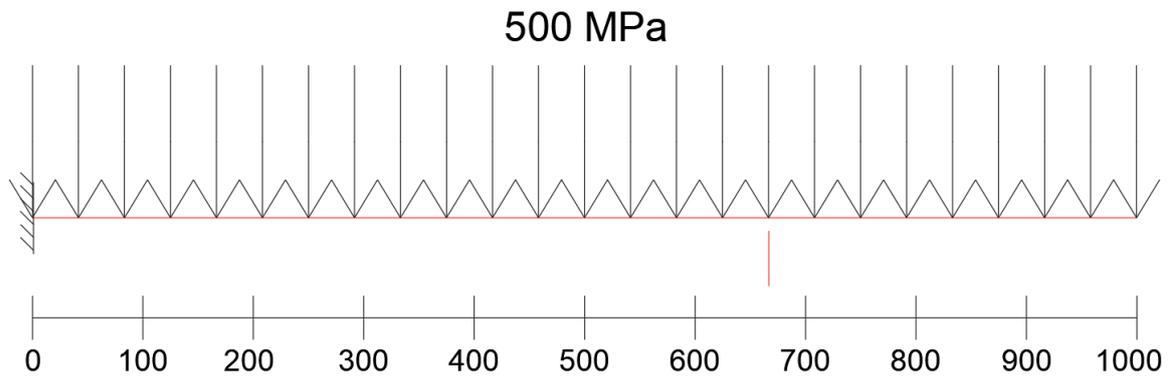


Figura 6.15 - VIGA BALANÇO 2, vão detalhado

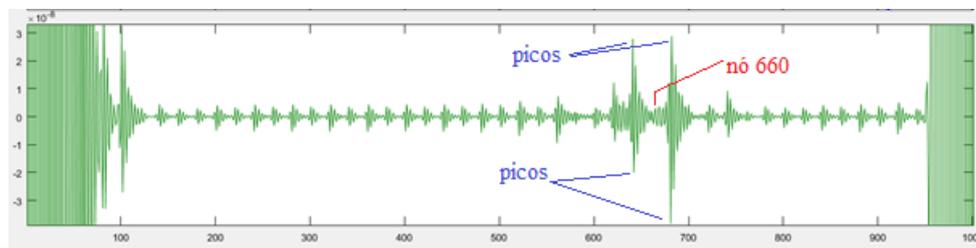


Figura 6.16 - Wavelet da Viga Balanço 2

Como demonstrado pelas Figura 6.15 e Figura 6.16, a análise da Viga Balanço 2 também localizou o dano, porém, notou-se maior interferência, por mais que desprezível, do carregamento distribuído ao longo do vão quando comparado com a Viga Balanço 1, cujo carregamento é pontual e na extremidade livre do balanço. O gráfico das wavelets para esta viga balanço também apresentou dois picos, um em cada sentido, muito próximos à trinca.

7. CONCLUSÕES

Foi utilizado nesta tese o método das Transformadas Discretas de Wavelet para a identificação de trincas em placas e vigas, modeladas em software por elementos de contorno. Os dados utilizados foram a resposta estática da estrutura, ou seja, os deslocamentos provocados pela solicitação da estrutura, e foram interpolados pelo método dos splines cúbicos para um total de 1000 pontos, sem que seja necessária a regularização dos pontos.

O método se mostrou um método confiável e eficaz na localização de trincas mesmo que estas possuam espessura pequena quando comparada com o vão (1mm de espessura para um vão de 2,54m). O método é capaz de identificar a posição da trinca sem que seja necessária a resposta da estrutura intacta, o que amplia sua abrangência e a torna ainda mais aplicável, na prática. Foi testado também, diversas configurações de carregamento diferentes para uma mesma placa ou viga, para que sejam comparadas as análises.

As análises foram feitas para faces diferentes de uma mesma placa, o que permitiu que o dano seja localizado precisamente no interior da estrutura (eixo X e Y), e foi capaz de detectar a posição da trinca com apenas 9 pontos de deslocamentos conhecidos, o que, na prática, significa que é necessária apenas uma pequena quantidade de sensores de deslocamento, pois os outros pontos podem ser interpolados entre os pontos conhecidos.

O método da identificação de danos através da resposta estática da estrutura por meio das Transformadas de Wavelet é um método abrangente e de fácil aplicação, pois necessita apenas dos deslocamentos da estrutura intacta, e é possível de ser aplicado para tabuleiros de pontes, vigas, placas, barragens, entre outros. Esta metodologia, é capaz, também, de identificar danos fora do escopo visível da estrutura, o que representa uma grande vantagem em comparação com os métodos mais usuais. O método requer atenção especial na escolha da wavelet-mãe, pois este fator pode ser determinante na detecção ou não do dano, e ainda não é eficaz nas regiões próximas dos apoios.

Por se tratar de um método relativamente novo, ainda são necessários mais estudos e pesquisas na área. Não se trata de um método criado especificamente para a Engenharia Civil e sim de uma adaptação de um método usado em diversas áreas da ciência, o que poderia trazer grandes benefícios e avanços na área de Inspeção Predial.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- KABANIKHIN, S. I. **Definitions and examples of inverse and ill-posed problems.** 2008, J. Inv. Ill-Posed Problems 16.
- SILVA, R. S. R. C. **Monitoramento e identificação Numérico e Experimental de Danos em Vigas e Pontes de Aço e Concreto Utilizando Transformadas de Wavelet.** 2015, Universidade de Brasília.
- OVANESOVA, A. V.; SUÁREZ, L. E. **Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures.** 2004, Engineering Structures.
- PALECHOR, E. U. L. **Método de Identificação de Danos em Estruturas, baseado na Variação da Frequência Natural Causada pela Aplicação de uma Massa Móvel Adicional.** 2018, Universidade de Brasília.
- DEBNATH, L. **Wavelet Transforms and their Applications,** 1998, University of Central Florida.
- AKTAN, A. E.; LEE, K. L.; CHUNTAVAN, C.; AKSEL, T., 1994, “**Modal Testing for Structural Identification and Condition Assessment of Constructed Facilities,**” in Proc. of 12th International Modal Analysis Conference
- BLEVINS, R. D. **Flow Induced Vibration,** 2001, KRIEGER PUBLISITNG COMPANY MALABAR, FLORIDA.
- HOU, Z.; NOORI, M.; AMAND, R. St., **Wavelet-based Approach for Structural Damage Detection,** 2000, J. Eng. Mech.
- PACHECO, L. S.; OLIVEIRA, C. S. P de.; SILVA FILHO, L. C. P., **Estudo comparativo de leis de inspeção predial no Brasil e na Espanha.** 2013, Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto.
- MOYO, P.; BROWNJOHN, J. M. W., 2000, **Bridge health monitoring using wavelet analysis.** 2nd International Conference on Experimental Mechanics, Singapore.
- SILVA, R. S. Y. C., **Monitoramento e Identificação Numérico e Experimental de Danos em Vigas e Pontes de Aço e Concreto Utilizando Transformadas de Wavelet,** 2015, Universidade de Brasília.
- ESTRADA, R. S. **Damage Detection Methods in Bridges through Vibration Monitoring: Evaluation and Application,** 2008, Universidade do Minho.

Ramon S. Y. R. C. Silva, Luciano M. Bezerra, Luiz A. P. Peña, Gilberto Gomes & Welington V. da Silva. **Boundary element and wavelet transform methods for damage detection in 2D structures**. 2019, International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 20:3, 242-255, DOI: 10.1080/15502287.2019.1631407

Prof. Dr. rer. nat. Heinz Antes, **A Short Course on Boundary Element Methods**, 2010, Institut für Angewandte Mechanik, Technische Universität Braunschweig.

DELGADO NETO, A. M.; GOMES, G.; GUIMARÃES, D. C., **BEMLAB2D: Graphical Interface for Modeling, Viewing and Analysis with Boundary Element – An Application in Elastostatic Problems**, 2016, XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE2016.

Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J. M., **Wavelet toolbox**, 2015, Math Works. Inc., Natick, Massachusetts.