

**DETERMINAÇÃO DE PATOLOGIAS ESTRUTURAIS
USANDO MODELAGEM NUMÉRICA E
TRANSFORMADAS DE WAVELET**

RAMON SALENO YURE COSTA SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**DETERMINAÇÃO DE PATOLOGIAS ESTRUTURAIS
USANDO MODELAGEM NUMÉRICA E
TRANSFORMADAS DE WAVELET**

RAMON SALENO YURE COSTA SILVA

ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.DM-001A/11

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2011

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

**DETERMINAÇÃO DE PATOLOGIAS ESTRUTURAIS USANDO
MODELAGEM NUMÉRICA E TRANSFORMADAS DE WAVELET**

RAMON SALENO YURE COSTA SILVA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (UnB)
(Orientador)

Prof. William Taylor Matias Silva, Dr. Ing. (UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Ney Roitman, DSc. (COPPE-UFRJ)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 25 DE FEVEREIRO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, RAMON SALENO YURE COSTA

Determinação de Patologias Estruturais Usando Modelagem Numérica e Transformadas de Wavelet. [Distrito Federal] 2011.

xxv, 117p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2011).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Transformada de Wavelet

2. Wavelets

3. Danos

4. Frequências naturais

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, R. S. Y. C. (2011). Determinação de Patologias Estruturais Usando Modelagem Numérica e Transformadas de Wavelet. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM-001A/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ramon Saleno Yure Costa Silva

TÍTULO: Determinação de Patologias Estruturais Usando Modelagem Numérica e Transformadas de Wavelet

GRAU: Mestre ANO: 2011

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

Ramon Saleno Yure Costa Silva
SHIN CA 11, Lote 7, Casa 09 – Lago Norte
71.503-511 Brasília - DF- Brasil
e-mail: ramon@unb.br

Dedicatória.

Dedico este trabalho à minha mãe, *in memoriam*, e à
minha avó Dilú, *in memoriam*, pelo amor e carinho
incondicional.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter sempre me acompanhado nos momentos de alegria e de tristeza me dando forças para que pudesse continuar seguindo em frente para alcançar os meus objetivos com muita paciência e humildade.

À toda família Itapary, em especial, Wanda, Jonas, Circe, Igor, Cynthia e Vinícius pelo incentivo na tentativa por uma vaga no mestrado da UnB, pelo acolhimento aqui em Brasília e por todo apoio e motivação recebido durante o mestrado.

À minha namorada Adriana pelo amor, respeito, companheirismo e paciência.

Ao PECC pela vaga concedida no programa de mestrado.

Ao meu orientador Luciano Mendes Bezerra pela disponibilidade, dedicação, comprometimento e incentivo na orientação deste trabalho.

Aos professores do PECC, em especial, ao Paul e Graciela pelas sugestões dadas no meu seminário de mestrado e ao professor Taylor pelo estágio de docência na graduação.

Ao Professor Quan Wang da Universidade de Manitoba pelos esclarecimentos e sugestões dadas no início desta pesquisa.

Ao CNPQ pelo suporte financeiro.

A Eva por desempenhar muito bem suas atividades como secretária do PECC contribuindo para o bom andamento das atividades diárias dos alunos e professores do programa.

Aos amigos da UnB Iuri, Rogério, Sebastião, Cecília, Elaine, Jorge, Morgana, Patrícia, Fábio, Alejandro, Marcus Vinícius, Urubatan, Abdala, Henrique, Marcus Alexandre e Uchôa, pelo companheirismo e auxílio durante o mestrado.

E por fim, à todos que de alguma forma contribuíram para que o sonho do mestrado um dia pudesse se tornar uma realidade.

“Quem vive em zona de conforto, nunca se desenvolve”
Autor desconhecido.

RESUMO

DETERMINAÇÃO DE PATOLOGIAS ESTRUTURAIS USANDO MODELAGEM NUMÉRICA E TRANSFORMADAS DE WAVELET

Autor: Ramon Saleno Yure Costa Silva

Orientador: Luciano Mendes Bezerra, PhD

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Janeiro de 2011

Nos últimos anos, observa-se grande interesse por parte da comunidade científica nas pesquisas associadas à detecção de danos em estruturas, utilizando métodos numéricos com objetivo de auxiliar as técnicas não destrutivas aplicadas no monitoramento do desempenho, patologia e da saúde de estruturas civis. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é contribuir para o estudo de detecção de danos em estruturas, utilizando modelagem numérica em elementos finitos e transformadas de wavelet. Para isto, diversas situações de danos foram simuladas numericamente em vigas, treliças e pontes, e, em seguida, sinais de deslocamento e modos de vibração foram utilizados para avaliar a eficiência das transformadas de wavelet na detecção de danos para diferentes condições de contorno e de carregamentos aplicados nestas estruturas. Além disso, foi analisada a influência da introdução do ruído nos sinais usados no processo de detecção do dano. Nas simulações numéricas os programas ANSYS11.0 e SAP2000 foram utilizados para gerar os sinais de deslocamento e, também, modos de vibração de estruturas danificadas e, posteriormente, as transformadas de wavelet destes sinais foram calculadas através do programa MATLAB. Os resultados obtidos mostraram que as transformadas de wavelet são capazes de detectar danos, até mesmo, de pequenas dimensões através dos coeficientes de wavelet que alcançam grandes amplitudes na região danificada, distintamente do que ocorre em regiões sem dano onde estes coeficientes não apresentam grandes amplitudes. Assim sendo, o uso das transformadas de wavelet mostra-se promissor no processo de detecção e monitoramento de danos em estruturas.

ABSTRACT

DETERMINATION OF STRUCTURAL PATHOLOGIES USING NUMERICAL MODELING AND WAVELET TRANSFORM

Author: Ramon Saleno Yure Costa Silva
Supervisor: Luciano Mendes Bezerra, PhD
Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
Brasilia, February of 2011

In recent years, there is a large interest in the scientific community in the researches associated on damage detection in structures using numerical methods with the goal to help in the non-destructive techniques applied to performance monitoring, pathology and structural health of civil structures. In this sense, the objective of this research is to contribute for the study of damage detection in structures using numerical finite element modeling and wavelet transforms. For this, many damage scenarios were simulated numerically in beams, trusses and bridges and then displacements signals and mode shapes were used to evaluate the efficiency of wavelet transforms in detecting damages for different boundary conditions and loadings applied to such structures. Moreover, it was analyzed the influence of noise introduction in the signals used for damage detection process. In the numerical simulations the ANSYS11.0 and SAP2000 programs were used to generate the signals of displacement and also mode shapes in damaged structures and after that, the wavelet transforms of these signals were computed using MATLAB program. The results shows that the wavelet transforms are able to detect even small damages through wavelet coefficients which achieve large amplitudes in the damaged region, differently of what takes place in regions without damage where these coefficients do not show large amplitudes. Therefore, the use of wavelet transform appears to be promising in the process of detection and monitoring damaged structures.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	2
1.2	OBJETIVOS	4
1.3	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	6
2.1.1	Influência dos danos numa estrutura	6
2.1.2	Patologias provocadas por processos construtivos.....	6
2.1.3	Patologias provocadas pela ação de cargas externas.....	7
2.2	DESCRIÇÃO GENÉRICA DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DANO.....	8
2.3	USO DAS WAVELETS PARA DETECÇÃO DE DANOS	11
3	MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DANOS.....	17
3.1	MÉTODOS EXPERIMENTAIS	17
3.2	MÉTODOS NUMÉRICOS.....	19
3.2.1	Método da mudança de flexibilidade	20
3.2.2	Método da curvatura.....	21
3.2.3	Assinaturas estruturais	22
3.2.4	MÉTODOS BASEADOS EM WAVELETS	24
3.2.4.1	Wavelets e Transformada de Fourier.....	25
3.2.4.2	Propriedades das wavelets	27
3.2.4.3	Wavelets mãe.....	27
3.2.4.4	Transformada Contínua de Wavelet (TCW)	30
3.2.4.5	Transformada Discreta de Wavelet (TDW).....	32
3.3	DISTRIBUIÇÃO DO ERRO	34
3.3.1	Métodos de regularização	36
4	SIMULAÇÕES DE DANOS E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	38
4.1	DETECÇÃO DE DANOS EM VIGAS.....	38
4.1.1	Viga em Balanço	41
4.1.1.1	Análise estática	41
4.1.1.2	Análise modal	47

4.1.2	Viga Biengastada	54
4.1.2.1	Análise estática	54
4.1.2.2	Análise modal	58
4.2	DETECCÃO DO DANO EM UMA TRELIÇA.....	64
4.2.1	Análise estática.....	65
4.2.2	Detecção de dano com sinal regularizado	68
4.3	DETECCÃO DO DANO EM UMA PONTE	69
4.3.1	Análise estática.....	77
4.3.1.1	Desplacamento na viga principal.....	79
4.3.1.2	Desplacamento no tabuleiro	81
4.3.2	Análise modal.....	85
4.3.2.1	Desplacamento na viga principal.....	88
4.3.2.2	Desplacamento no tabuleiro	90
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	94
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	94
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
	APÊNDICE A – SCRIPT UTILIZADO PARA GERAÇÃO DA ANÁLISE ESTÁTICA DA PONTE SOBRE RIO PADEIRO.....	103
	APÊNDICE B – SCRIPT UTILIZADO PARA GERAÇÃO DA ANÁLISE MODAL DA PONTE SOBRE RIO PADEIRO	107
	APÊNDICE C – ROTEIRO EM MATLAB PARA CALCULAR AS TDW	110
	ANEXO A - RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DA PONTE SOBRE O CÓRREGO PADEIRO.....	112
	ANEXO B – FICHA DE INSPEÇÃO	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo das propriedades das famílias de <i>wavelets</i>	30
Tabela 4.1- Propriedades das vigas	39
Tabela 4.2- Situações de dano	40
Tabela 4.3 - Coeficientes discretos de Wavelet para os casos com erro, $\times 10^{-7}$	47
Tabela 4.4 - Frequência fundamental (Hz) da viga em balanço	48
Tabela 4.5 – Frequência natural (Hz) da viga sem fissura	48
Tabela 4.6 - Frequência fundamental (Hz) da viga biengastada	58
Tabela 4.7 – Frequência natural da viga biengastada sem fissura (Hz)	59
Tabela 4.8 – Propriedades da treliça.....	65
Tabela 4.9 – Propriedades dos materiais utilizados na ponte	71
Tabela 4.10 – Ocorrência de Patologias em superestrutura	73
Tabela 4.11 – Casos de dano utilizados na ponte	74
Tabela 4.12 – Ações permanentes	75
Tabela 4.13 – Pesos dos veículos e valores das cargas distribuídas.....	75
Tabela 4.14 – Características dos veículos-tipo	76
Tabela 4.15 - Comparação entre as frequências naturais (Hz)	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Pontes de destaque no Brasil.....	1
Figura 1.2- Rachadura na ponte dos Remédios	2
Figura 1.3- Desabamento de um trecho da ponte Capivari.	2
Figura 2.1- (a) Fissura de retração por secagem de uma laje,(b) Vista inferior da laje do tabuleiro mostrando o deslocamento do concreto e a corrosão das armaduras,(c) ataque por sulfatos em pilares.....	7
Figura 2.2- Representação dos tipos de fissuras que podem ocorrer no concreto.....	8
Figura 2.3- Classificação dos métodos de detecção de dano.....	10
Figura 2.4 – Modelo em elementos finitos da viga em balanço fissurada na borda.....	11
Figura 2.5 – Viga biapoiada com uma fissura e submetida a um carregamento estático... ..	12
Figura 2.6 – Placa contendo uma fissura.....	12
Figura 2.7 – Viga em balanço contendo uma fissura transversal	12
Figura 2.8 – Modelo numérico da viga usando elemento SOLID45.....	13
Figura 2.9 – Esquema da viga em balanço fissurada.....	14
Figura 2.10 – Viga biengastada submetida à carga estática ou dinâmica.....	14
Figura 2.11 – Pórtico submetido à carga estática.	14
Figura 2.12 – Viga com molas rotacionais na seção com o dano.....	15
Figura 2.13 – Viga utilizada no experimento.	15
Figura 2.14 – Geometria da ponte utilizada como exemplo.....	16
Figura 3.1- Detecção de danos usando a técnica de ultrassom.....	17
Figura 3.2 - Figura Detecção de danos usando a técnica de raio-x.	18
Figura 3.3 – Problema direto em elastostática.....	20
Figura 3.4 – Função periódica senoidal e função wavelet de Daubechies com 10 momentos nulos.....	26
Figura 3.5 – Wavelet-mãe Haar.....	28
Figura 3.6 – Família de wavelets db1 a db9	28
Figura 3.7 - Família de <i>wavelets</i> biorthogonais.....	29
Figura 3.8- Dilação e translação de funções wavelet.	31
Figura 3.9 - Números aleatórios gerados com distribuição Gaussiana.....	36
Figura 4.1 - Modelo da viga em balanço.	39
Figura 4.2 – Modelo viga biengastada.....	39
Figura 4.3-Elemento finito PLANE42.....	40

Figura 4.4 – Discretização do modelo em elementos finitos da viga em balanço.....	40
Figura 4.5 - Discretização do modelo em elementos finitos da viga biengastada.....	41
Figura 4.6 - Deformada da viga em balanço obtida no ANSYS.	41
Figura 4.7 - Deflexão da viga em balanço submetida à carga estática.....	42
Figura 4.8- Coeficientes de wavelet da situação 1 usando db2 (L/4).....	42
Figura 4.9- Coeficientes de wavelet da situação 1 usando bior6.8 (L/4).	43
Figura 4.10 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando db2 (L/2).	43
Figura 4.11 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando bior6.8 (L/2).....	43
Figura 4.12 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando db2 (L/4).	44
Figura 4.13 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando bior6.8 (L/4).....	44
Figura 4.14 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando db2 (L/2).	44
Figura 4.15 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando bior6.8 (L/2).....	45
Figura 4.16 – Coeficientes de wavelet da situação 1 caso 1 usando db2 (L/4).....	45
Figura 4.17 – Coeficientes de wavelet da situação 1 caso 1 usando bior6.8 (L/4).....	46
Figura 4.18- Coeficientes de wavelet da situação 1 caso 2 usando db2 (L/4).....	46
Figura 4.19 – Coeficientes de wavelet da situação 1 caso 2 usando bior6.8 (L/4).....	47
Figura 4.20 - Primeiro modo de vibração da viga em balanço obtido no ANSYS.	49
Figura 4.21 – Segundo modo de vibração da viga em balanço obtido no ANSYS.....	49
Figura 4.22 - Terceiro modo de vibração da viga em balanço obtido no ANSYS.....	50
Figura 4.23 - Primeiro modo de vibração da viga em balanço.....	50
Figura 4.24- Segundo modo de vibração da viga em balanço.....	51
Figura 4.25 - Coeficientes de wavelet da situação 1 usando db2 (L/4).....	51
Figura 4.26 – Coeficientes de wavelet da situação 1 usando bior6.8 (L/4).....	52
Figura 4.27 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando db2 (L/2).	52
Figura 4.28 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando bior6.8 (L/2).....	52
Figura 4.29 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando db2 (L/4).	53
Figura 4.30 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando bior6.8 (L/4).....	53
Figura 4.31 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando db2 (L/2).	53
Figura 4.32 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando bior6.8 (L/2).....	54
Figura 4.33 - Deformada da viga biengastada obtida no ANSYS.....	54
Figura 4.34 – Deslocamento da viga biengastada submetida à carga estática.	55
Figura 4.35 – Coeficientes de wavelet da situação 1 usando db2 (L/4).	55
Figura 4.36 – Coeficientes de wavelet da situação 1 usando bior6.8 (L/4).....	56
Figura 4.37 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando db2 (L/2).	56

Figura 4.38 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando bior6.8 (L/2).....	56
Figura 4.39 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando db2 (L/4).....	57
Figura 4.40 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando bior6.8 (L/4).....	57
Figura 4.41 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando db2 (L/2).....	57
Figura 4.42 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando bior6.8 (L/2).....	58
Figura 4.43 - Primeiro modo de vibração da viga biengastada obtido no ANSYS.....	59
Figura 4.44 - Segundo modo de vibração da viga biengastada obtido no ANSYS.....	60
Figura 4.45 -Terceiro modo de vibração da viga biengastada obtido no ANSYS.	60
Figura 4.46- Primeiro modo de vibração da viga biengastada.	61
Figura 4.47- Segundo modo de vibração da viga biengastada.	61
Figura 4.48 - Coeficientes de wavelet da situação 1 usando db2 (L/4).....	62
Figura 4.49 – Coeficientes de wavelet da situação 1 usando bior6.8 (L/4).....	62
Figura 4.50 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando db2 (L/2).....	62
Figura 4.51 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando bior6.8 (L/2).....	63
Figura 4.52 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando db2 (L/4).....	63
Figura 4.53 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando bior6.8 (L/4).....	63
Figura 4.54 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando db2 (L/2).....	64
Figura 4.55 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando bior6.8 (L/2).....	64
Figura 4.56 – Elemento de barra (FRAME).....	65
Figura 4.57 – Treliça analisada.....	65
Figura 4.58 - Deslocamentos nodais para a treliça linearizada.	66
Figura 4.59 – Coeficientes de wavelet para a treliça sem o dano usando db2.	66
Figura 4.60 - Coeficientes de wavelet para a treliça com o dano usando db2.....	67
Figura 4.61 – Diferença dos deslocamentos nodais com o dano e sem o dano.....	67
Figura 4.62 – Coeficientes de wavelet aplicado no sinal da diferença dos deslocamentos com o dano e sem o dano usando Db2.....	68
Figura 4.63 - Deslocamentos nodais regularizados para $\beta=100$	68
Figura 4.64 – Coeficientes de wavelet aplicado nos deslocamentos regularizados sem o dano usando db2.	69
Figura 4.65 - Coeficientes de wavelet aplicado nos deslocamentos regularizados com o dano usando Db2.	69
Figura 4.66 – Planta baixa da ponte sobre o córrego padeiro.....	70
Figura 4.67 – Corte A-A da ponte sobre o córrego padeiro.	70
Figura 4.68 – Corte B-B da ponte sobre o córrego padeiro.....	71

Figura 4.69 – Elemento sólido SOLID65.....	71
Figura 4.70 – Ponte sobre o Córrego Padeiro.....	72
Figura 4.71 – Perspectivas da ponte sobre o Córrego Padeiro.	72
Figura 4.72 – Discretização do modelo em elementos finitos da ponte sobre o Córrego Padeiro.	73
Figura 4.73 – Caso 1: Desplacamento na viga principal.	74
Figura 4.74 – Caso 2: Desplacamento no tabuleiro.....	75
Figura 4.75 – Características dos veículos-tipo.....	76
Figura 4.76 – Trem tipo da NBR:7188(1984).	76
Figura 4.77 – Modelo em elementos finitos da ponte sob carregamento estático.....	77
Figura 4.78 - Deformada da ponte.....	77
Figura 4.79 – Tensões normais na direção x (σ_x).	78
Figura 4.80 – Deslocamentos verticais na direção y (U_y).....	78
Figura 4.81 – Deslocamentos nodais da viga principal com e sem deslocamento.	79
Figura 4.82 – Coeficientes de wavelet para deslocamento na viga principal usando Db2.....	79
Figura 4.83 - Coeficientes de wavelet para deslocamento na viga principal com regularização usando db2.....	80
Figura 4.84 - Coeficientes de wavelet para deslocamento na viga principal com sinal da diferença com o dano e sem dano usando db2.....	81
Figura 4.85 – Deformada da ponte com deslocamento no tabuleiro.	81
Figura 4.86 – Tensões normais na direção x com deslocamento no tabuleiro.....	82
Figura 4.87 – Deslocamentos verticais na direção y com deslocamento no tabuleiro.....	82
Figura 4.88 - Deslocamentos nodais no tabuleiro com e sem deslocamento.	83
Figura 4.89 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro usando bior6.8....	83
Figura 4.90 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro com 1% de erro no sinal estático e usando bior6.8.	84
Figura 4.91 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro com 2% de erro no sinal estático e usando bior6.8.	84
Figura 4.92 – Primeiro modo de vibração sem o dano.....	85
Figura 4.93 – Segundo modo de vibração sem o dano.....	85
Figura 4.94 – Terceiro modo de vibração sem o dano.	86
Figura 4.95 - Primeiro modo de vibração com deslocamento na VP.	86
Figura 4.96 - Segundo modo de vibração com deslocamento na VP.	87
Figura 4.97 - Terceiro modo de vibração com deslocamento na VP.....	87

Figura 4.98 – Primeiro modo de vibração sem o dano e com o dano na VP.....	88
Figura 4.99 - Coeficientes de wavelet para deslocamento na VP usando db2.	89
Figura 4.100 - Coeficientes de wavelet para deslocamento na VP com regularização usando db2.	89
Figura 4.101 - Coeficientes de wavelet para deslocamento na viga principal com sinal da diferença entre dano e sem dano usando db2.	90
Figura 4.102 – Primeiro modo de vibração com deslocamento no tabuleiro da ponte.	90
Figura 4.103 - Segundo modo de vibração com deslocamento no tabuleiro da ponte.	91
Figura 4.104 - Terceiro modo de vibração com deslocamento no tabuleiro da ponte.....	91
Figura 4.105 – Primeiro modo de vibração sem o dano e com o dano no tabuleiro.	92
Figura 4.106 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro usando bior6.8..	92
Figura 4.107 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro com 1% de erro no sinal modal e usando bior6.8.	93
Figura 4.108 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro com 2% de erro no sinal modal e usando bior6.8.	93
Figura A.1 – Vista frontal – estaca inicial.....	112
Figura A.2 – Vista lateral a montante.....	112
Figura A.3 – Vista inferior da ponte.....	113
Figura A.4 – Leito do rio.....	113
Figura A.5 – Vista do encontro E1.....	114
Figura A.6 – Vista do encontro E2.....	114
Figura A.7 – Ferragem exposta na parte inferior do tabuleiro.....	115
Figura A.8 – Tabuleiro com proteção lateral danificada.....	115
Figura A.9 – Vista lateral a jusante.....	116
Figura A.10 – Vista frontal – estaca final.....	116

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

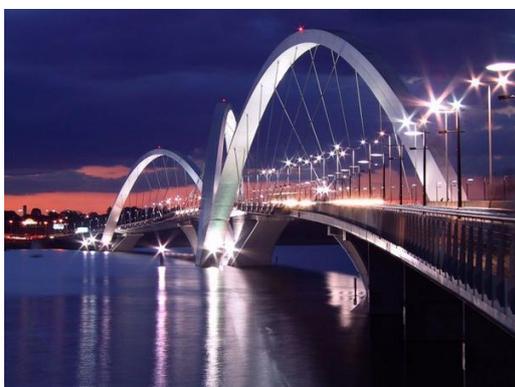
B -	largura da viga
$C_{a,b}$ -	coeficientes de <i>wavelet</i>
E -	módulo de elasticidade do material
F -	matriz de flexibilidade
H -	altura da viga
I -	momento de inércia;
K -	matriz de rigidez
L -	comprimento da viga
M -	matriz de massa
S-	área da seção transversal
Z -	conjunto dos números inteiros
a -	parâmetro de escala
a' -	tamanho da fissura
b -	parâmetro de translação
d -	localização da fissura
i -	índice de escala
k -	índice de translação
m -	massa por unidade de comprimento;
t -	tempo
Φ -	matriz dos modos de vibração
Ω -	matriz diagonal com os quadrados das frequências naturais de vibração;
ω_i -	frequências naturais
$\Psi_{a,b}$ -	função wavelet
ρ -	massa específica
η_i -	porcentagem de erro admitida
σ_i -	desvio padrão
Ψ_t -	<i>wavelet</i> -mãe
ν -	coeficiente de Poisson
ν'' -	curvatura da seção
μ_i -	média dos valores aleatórios
ψ_{ik} -	valores aleatório de erros

ψ_{ik} -	valores verdadeiros de deslocamento e modos de vibração obtidos na análise estática e modal respectivamente
$\hat{\psi}_{ik}$ -	valores de deslocamento e modos de vibração obtidos na análise estática e modal respectivamente somados com o erro aleatório
Δu -	diferença entre os deslocamentos nodais da estrutura intacta (u^i) e da estrutura danificada (u^d)
$\Delta \omega$ -	quadrados das diferenças entre as frequências naturais obtidas com a estrutura intacta (ω^i) e com a estrutura danificada (ω^d)
λ -	parâmetro adimensional utilizado para o cálculo da frequência natural;
CEB -	Comitê Euro-Internacional do Concreto
COMAC -	Coordinate Modal Assurance Criterion
TCW-	Transformada Contínua de Wavelet
TDW	Transformada Discreta de Wavelet
DNIT -	Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes
EI -	Rigidez à flexão
ENC -	Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB
MEC -	Método dos Elementos de Contorno
MEF -	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PECC -	Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
SHM-	Structural Health Monitoring
TF -	Transformada de Fourier
UnB-	Universidade de Brasília
kN-	kilonewton
MPa-	megapascal
1D-	uma dimensão
2D-	duas dimensões
3D-	três dimensões

1 INTRODUÇÃO

As pontes são construções de grande importância para o desenvolvimento econômico e social do país, visto que as mesmas encurtam caminhos, transpõem obstáculos e servem para dar continuidade às vias, proporcionando o trânsito de pessoas e o escoamento da produção de uma região, ou mesmo, de um país.

A arte de construir pontes tem evoluído bastante nos últimos tempos em função dos avanços tecnológicos que proporcionaram o uso de novos materiais e criação de ferramentas computacionais, capazes de realizar análises estruturais complexas de estruturas ousadas com um elevado grau de precisão. De posse dessas ferramentas, os arquitetos e engenheiros têm concebido belíssimas pontes com sistemas estruturais arrojados e desafiadores. Como exemplo aqui no Brasil, podemos citar: a ponte JK em Brasília (Figura 1.1a), e a ponte Octavio Frias de Oliveira em São Paulo (Figura 1.1b).



(a)



(b)

Figura 1.1 – Pontes de destaque no Brasil: (a) Ponte JK em Brasília (Flickr,2010), (b) Ponte Octavio Frias de Oliveira em São Paulo (Conhecasaopaulo, 2010).

Infelizmente, nossos governantes e administradoras de rodovias ainda não desenvolveram plenamente a mentalidade estratégica da manutenção e conservação de pontes, viadutos, passarelas, entre outras estruturas. Este descaso dá-se ainda de forma mais crítica em nosso país, onde a manutenção de pontes não é prioritária nem mesmo no DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes).

A manutenção no Brasil, quando ocorre, geralmente é corretiva e só vem a ser realizada quando a obra está no limiar do seu estado limite de colapso ou de utilização. O tema conservação só fica em evidência quando acontece um acidente estrutural com alguma obra importante, como foi o caso da ponte dos Remédios sobre o rio Tietê em São Paulo

(Figura 1.2) que, em 1997, entrou em processo de colapso pelo fato de não receber manutenção desde a sua construção em 1968. Outro acidente de destaque no Brasil foi o desabamento de um trecho da ponte sobre a represa de Capivari (Figura 1.3), na rodovia Regis Bittencourt (BR-116/PR), com a perda de vidas humanas, cuja causa foi a ausência de manutenção dos aterros das cabeceiras ao longo dos 40 anos de utilização (Vitório, 2008).

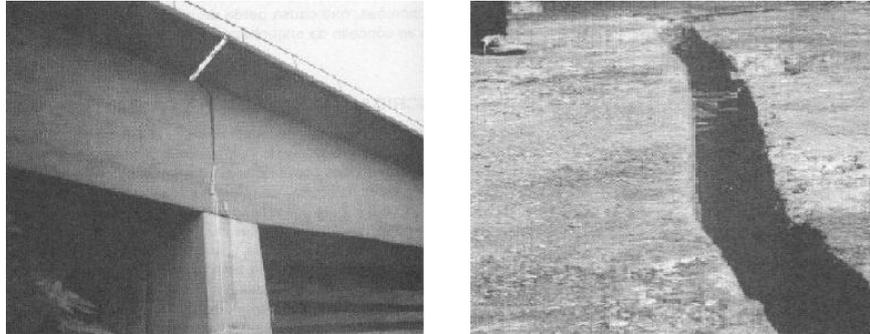


Figura 1.2- Rachadura na ponte dos Remédios (Cunha et al., 1998).



Figura 1.3- Desabamento de um trecho da ponte Capivari (Folhaonline, 2005).

1.1 MOTIVAÇÃO

A performance estrutural de uma ponte diminui ao longo de sua vida útil devido a muitos processos de deterioração, entre eles, fadiga, carbonatação, deslocamento do concreto, corrosão de armaduras, e oxidação de estruturas metálicas. Assim, a falha de uma importante parte da estrutura pode causar perdas econômicas significantes e também perda de vidas humanas, o que é mais grave ainda (Estrada, 2008).

Diversas pontes no Brasil apresentam danos supostamente relacionados ao excesso de carga rodoviária, pois estão submetidas a carregamentos superiores àqueles para os quais foram projetadas. É o caso, por exemplo, das pontes que foram projetadas até 1981,

quando o trem-tipo máximo adotado era de 36t. A adoção do trem-tipo de 45t pela a NBR 7188:1984 foi feita a partir de 1982, sendo que continuam em uso as pontes antes projetadas com o trem tipo de 36t. Portanto, uma parcela significativa das pontes no Brasil projetadas com cargas móveis defasadas ainda continuam em uso sem nenhum reforço para fazer frente ao aumento do trem tipo (Vitório, 2008).

Segundo Vitório (2008), das 40 pontes usadas no seu estudo, destacam-se as seguintes ocorrências de patologias na superestrutura: 77,5% das pontes apresentaram deslocamento do concreto das vigas principais (VP) e 87,5% nas lajes do tabuleiro.

Existem diversos métodos de detecção de danos, entre eles podemos citar: os ensaios destrutivos e os não destrutivos, pois tais ensaios permitem determinar falhas, ou mesmo, mudanças nas propriedades dos materiais constituintes da estrutura. Existem ainda os métodos numéricos para a determinação de danos em diversas estruturas e que utilizam, em grande parte, o método dos elementos finitos via cálculo da variação das frequências naturais e modos de vibração, antes e após o surgimento do dano. De posse desses parâmetros, podemos detectar um dano em uma estrutura, já que os mesmos indicam alterações nas propriedades de rigidez e de massa da estrutura, fazendo com que os parâmetros de vibração também sejam alterados.

Para detectar o dano usando métodos modais, muitas vezes é necessária uma análise dinâmica completa que, geralmente, é realizada pelo método dos elementos finitos e tal análise pode vir a auxiliar na localização e identificação do dano. Entretanto, este procedimento apresenta várias dificuldades. Nem sempre é possível ou conveniente medir a resposta de vibração da estrutura antes do dano surgir. Muitas vezes não é viável conduzir uma análise dinâmica detalhada de toda a estrutura. As vezes é difícil obter com precisão os dados geométricos e as propriedades dos materiais e modelar as ligações estruturais para uma análise dinâmica precisa. Também, não é fácil extrair informações locais causadas por um dano de pequena dimensão, mas não menos importante é detectar o dano a partir de parâmetros modais que caracterizem o comportamento global da estrutura (Wang e Deng, 1999).

Entre outras ferramentas de cálculo para a determinação do dano, tem-se o COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion), mudança de flexibilidade, curvatura e índice de

dano que são métodos que comparam parâmetros estruturais, antes e após o surgimento de um dano. Métodos que podem detectar dano, somente com informações obtidas da condição danificada da estrutura, seriam mais apropriados, já que a condição antes do dano é raramente conhecida ou conservada como um dado estrutural. Neste contexto, a aplicação dos métodos baseados em *wavelets* pode ser muito útil, pois este método pode detectar singularidades presentes nos parâmetros modais ou deslocamentos causados pelo dano e, conseqüentemente, não requerem a condição da estrutura antes do dano (Estrada, 2008).

Portanto, a motivação deste trabalho é a utilização de *wavelets* para se conhecer o comportamento estrutural de pontes, sob as condições de mecanismos de deterioração e, desta forma, possibilitar uma melhor solução para recuperação estrutural. Além disso, enfatiza-se que o uso de *wavelets* para detecção de danos é uma ferramenta alternativa aos métodos modais tradicionais que já foram usados por vários pesquisadores, inclusive, na UnB (Honório, 1997; Brasiliano, 2001; Brito, 2008; Caldeira, 2009), entre outros.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral contribuir para o estudo de detecção de danos em vigas, treliças e pontes, aplicando as transformadas de *wavelet* na resposta danificada da estrutura.

Dentro deste objetivo geral, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

- Simular as patologias que levam ao desgaste de peças de concreto e de aço;
- Detectar danos em vigas com diferentes condições de contorno, por meio de uma análise estática e modal, utilizando as transformadas de *wavelet*;
- Detectar danos em treliça plana, utilizando as transformadas de *wavelet*;
- Detectar danos na superestrutura de pontes, utilizando a transformada de *wavelet*.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para alcançar os objetivos propostos, esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. No primeiro capítulo, apresento uma abordagem geral da pesquisa, com a introdução do tema, a motivação deste estudo e os objetivos do mesmo.

O segundo capítulo mostra alguns conceitos fundamentais relacionados à área da pesquisa; uma descrição geral dos métodos de detecção de danos e, além disso, são apresentados alguns trabalhos já desenvolvidos na área de detecção de danos, utilizando as *wavelets*.

O terceiro capítulo relata de forma mais detalhada alguns dos métodos tradicionais de detecção de danos e, em seguida, apresenta os métodos de detecção de danos baseados em *wavelets*.

O quarto capítulo apresenta as propriedades geométricas e dos materiais constituintes das vigas, treliça e de uma ponte, assim como os tipos de elementos utilizados, carregamentos aplicados nos modelos numéricos e a descrição das diversas simulações de danos. Além disso, são apresentados e discutidos os resultados obtidos na aplicação das transformadas de *wavelet* na detecção de danos em estruturas.

O quinto e último capítulo reporta às conclusões obtidas neste trabalho e às sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1.1 Influência dos danos numa estrutura

Alguns danos em estruturas podem causar diminuição da vida útil da estrutura. Define-se vida útil como o período de tempo durante o qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada sem necessidade de intervenções não previstas CEB-FIP, (1990). As pontes, por exemplo, estão sujeitas às condições ambientais que alteram suas propriedades físicas e químicas comprometendo a sua durabilidade e favorecendo o surgimento de patologias. A NBR 6118:2003 define durabilidade como a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Entende-se ainda por patologia a queda de desempenho de um produto, componente, ou construção, ao longo do tempo, devido a erros de: planejamento, projeto, execução, uso e deterioração proveniente de sua interação com o meio ambiente (Nepomuceno e Teatini, 2009).

As ações sobre as estruturas são parâmetros fundamentais a serem considerados no projeto e incidem diretamente na durabilidade, serviço, estabilidade e/ou na resistência. Por esta razão, quando nos deparamos com uma falha, é essencial determinar a causa que a origina, muitas vezes esta causa pode também estar associada a uma ação excessiva sobre a estrutura (Helene e Pereira, 2007).

2.1.2 Patologias provocadas por processos construtivos

As patologias associadas a processos construtivos não comprometem o comportamento mecânico das estruturas, mas afetam a durabilidade e, com o tempo, aceleram o processo de degradação.

Dentro deste contexto existem as fissuras provocadas por: assentamento plástico, retração plástica, autógena e por secagem. A presença destas fissuras facilita o processo de deterioração, pois facilita a penetração de agentes agressivos no interior do elemento estrutural degradando tanto o concreto quanto as armaduras.

Além destas fissuras, temos quatro fenômenos associados às reações químicas expansivas, que são: ataque por sulfato, reação álcali-agregado, hidratação tardia de CaO e MgO livres e corrosão da armadura de concreto.

As Figuras 2.1a, 2.1b e 2.1c ilustram algumas das patologias que possivelmente poderão ser modeladas.

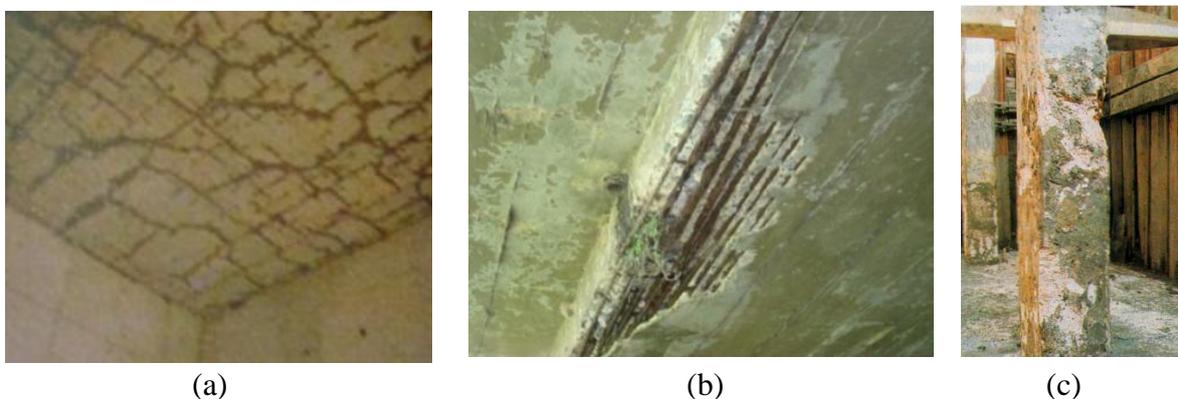


Figura 2.1- (a) Fissura de retração por secagem de uma laje. Fonte: (Husni, 2005), (b) Vista inferior da laje do tabuleiro mostrando o deslocamento do concreto e a corrosão das armaduras, (c) Ataque por sulfatos em pilares (Coutinho, 2001).

2.1.3 Patologias provocadas pela ação de cargas externas

A ação das cargas externas gera um complexo estado de tensões. Se analisarmos um elemento qualquer de uma estrutura de concreto armado, comprovamos que cada uma das seções está submetida a uma sollicitação simples de flexão ou a uma sollicitação composta por compressão, cisalhamento e torção. A existência de uma deficiência em uma estrutura de concreto armado se manifesta, na maioria dos casos, através de uma configuração de fissuras que dependerá do tipo de sollicitação atuante (Helene e Pereira, 2007).

As fissuras provocadas por carregamentos externos comprometem as estruturas, do ponto de vista mecânico, podendo levar a mesma à ruína. A Figura 2.2 ilustra alguns tipos de fissuras.

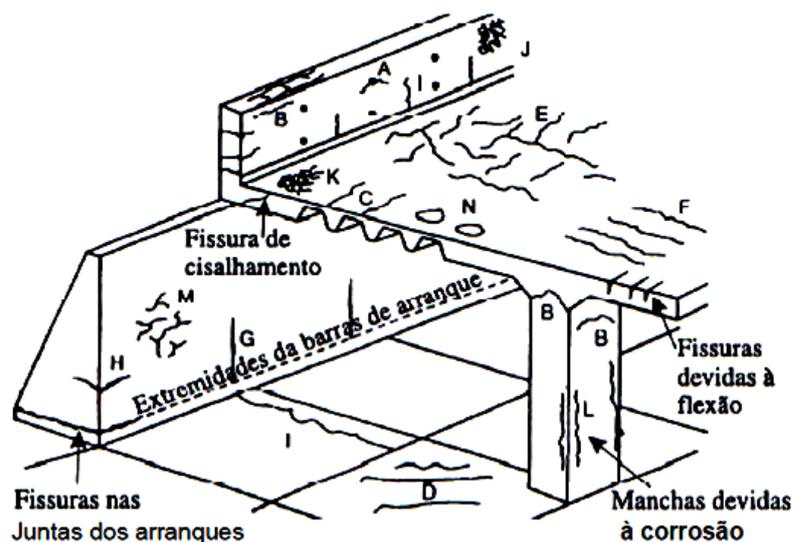


Figura 2.2- Representação dos tipos de fissuras que podem ocorrer no concreto (Neville, 1997).

2.2 DESCRIÇÃO GENÉRICA DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DANO

A implementação de uma estratégia de detecção de danos para a indústria aeroespacial, engenharia mecânica e infraestruturas de engenharia civil é também conhecida como Monitoramento da Saúde Estrutural (*Structural Health Monitoring*, ou SHM) (Sohn et al., 2003, Leme et al., 2007). Neste contexto, os métodos de detecção de danos em estruturas podem ser classificados em diversos níveis tais como (Rytter, 1993):

- Nível I: detecção do dano;
- Nível II: localização do dano;
- Nível III: avaliação da severidade do dano;
- Nível IV: determinação da vida útil remanescente devido ao dano.

Métodos nível I consideram somente a determinação se a estrutura apresenta dano ou não; Métodos nível II consideram se a estrutura está danificada e a localização do dano; no nível III, a detecção e localização devem ser quantificadas em extensão e severidade e no nível IV, a vida útil remanescente da ponte deve ser determinada considerando o dano quantificado.

Para propor uma avaliação da condição estrutural, o dano é definido como mudanças no material e/ou das propriedades geométricas das estruturas, nas condições de contorno,

conectividade entre elementos, geometria da seção transversal, carregamento, propriedades dos materiais e qualquer outro fator capaz de provocar um comportamento estrutural incomum em uma estrutura (Doebbling et al., 1996).

Existem diversos métodos de detecção de danos, entre eles, os métodos destrutivos que são aqueles nos quais se deve extrair parte da estrutura para a realização de identificação e avaliação do dano. Os métodos de detecção de danos não destrutivos incluem emissão acústica, sensores de fibra ótica, ondas ultrassônicas guiadas, radiografia, inspeção visual e os baseados em vibrações. Estes métodos podem ser classificados em local e global (Estrada, 2010).

Métodos de detecção de dano local são mais adequados para avaliar a performance estrutural em pequenas áreas da estrutura, enquanto que os métodos de detecção global tiram vantagem das mudanças globais causadas pelo dano.

Os danos podem ainda ser detectados por métodos numéricos com formulações lineares ou não lineares. Grande parte dos estudos realizados adota métodos lineares para a detecção de danos. Tais métodos lineares consideram que a estrutura permanece em regime linear elástico, mesmo após o aparecimento do dano. Entretanto, essa consideração é uma simplificação da realidade, já que na verdade a estrutura apresenta comportamento não linear com bastante frequência devido à presença de fissuras, excesso de cargas, etc.

Os métodos não lineares de detecção de danos, por sua vez, consideram que o comportamento da estrutura passa a ser não linear após a introdução do dano. Estes métodos representam de forma mais realista o estado da estrutura, porém apresentam grandes dificuldades matemáticas para a sua resolução.

Grande parte desses métodos é baseada no monitoramento das vibrações. Esses métodos se fundamentam na suposição de que os danos estruturais causam variação nos parâmetros estruturais (massa, rigidez, flexibilidade), que provoca uma mudança nos parâmetros dinâmicos da estrutura (frequências naturais, modos de vibração, relação de amortecimento). No entanto, essas mudanças frequentemente são muito pequenas para serem medidas e para o sucesso na identificação do dano. Esses métodos, entretanto, vêm sendo crescentemente usados na detecção de danos, pois estão baseados na variação das

vibrações e ganharam popularidade devido aos avanços significativos nos métodos de análise modal e nas tecnologias de monitoramento (Estrada, 2008).

A maioria dos métodos compara o comportamento da estrutura antes e após o aparecimento do dano, mas existem métodos de detecção de danos baseados na análise estática (ou dinâmica) e que são capazes de localizar o dano em estruturas somente com a informação fornecida pela estrutura já danificada. Os métodos de análise de *wavelet* estão nesta última categoria. Existem ainda outros métodos de detecção de danos que estão simplificados na Figura 2.3 e cujos detalhes, vantagens e desvantagens encontram-se na referência (Ramos, 2007). Alguns métodos de detecção de danos são descritos abaixo.

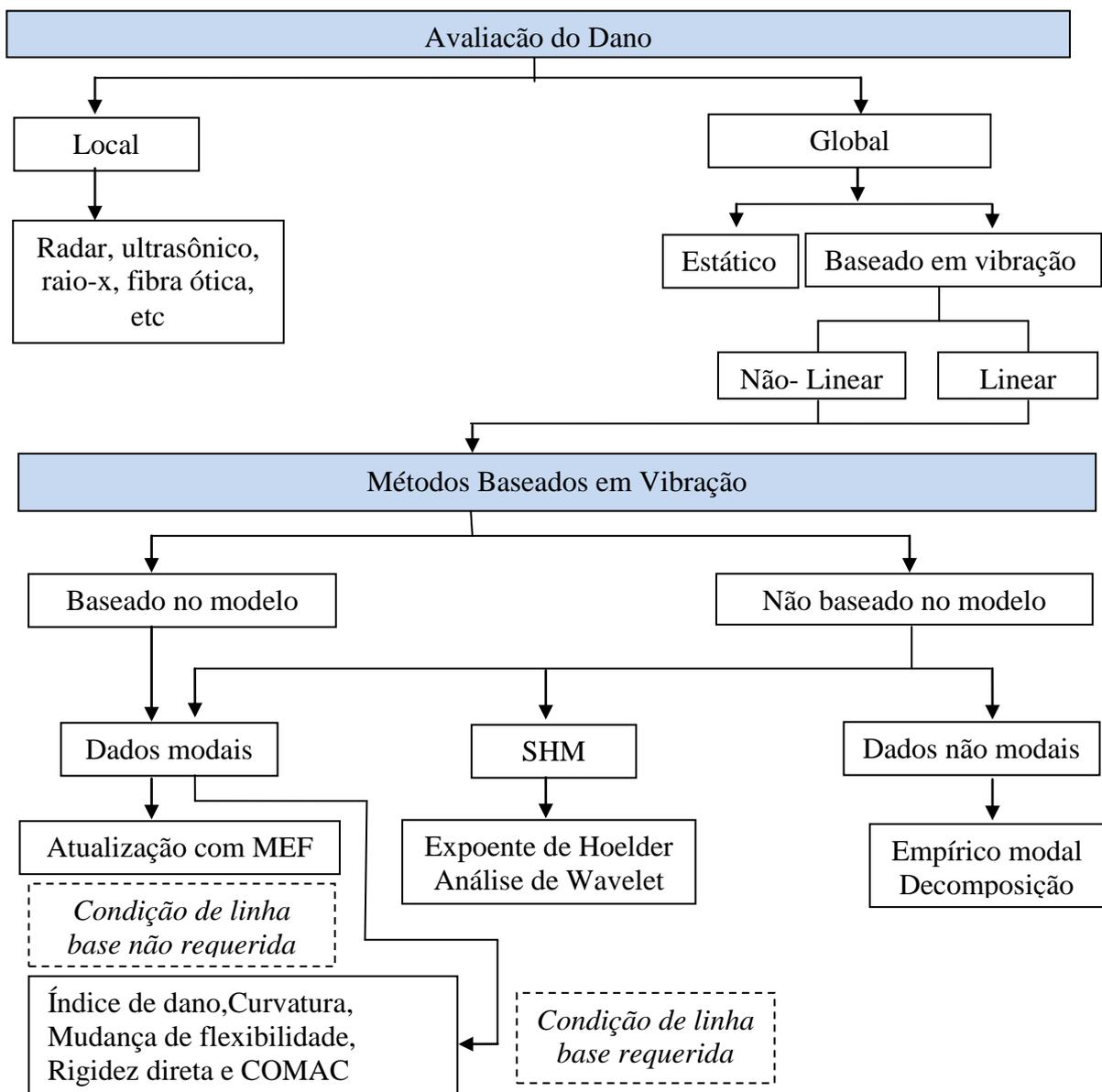


Figura 2.3- Classificação dos métodos de detecção de dano (modificado - Ramos, 2007).

2.3 USO DAS WAVELETS PARA DETECÇÃO DE DANOS

A seguir será apresentada uma revisão da literatura que abrange vários estudos anteriores a fim de selecionar resultados e conclusões que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

O primeiro estudo no qual as *wavelets* foram utilizadas para executar análise de detecção de danos foi de Surace e Ruotolo (1994). Estes autores simularam uma viga em balanço fissurada submetida a um carregamento dinâmico usando um modelo simples em elementos finitos, conforme ilustra a Figura 2.4.

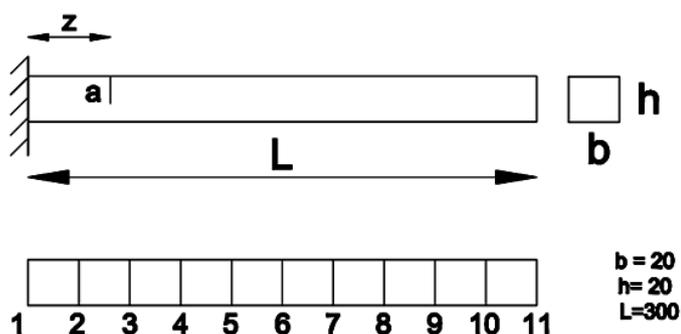


Figura 2.4 – Modelo em elementos finitos da viga em balanço fissurada na borda (modificado - Surace e Ruotolo, 1994).

A partir do sinal de vibração obtido na viga, as transformadas de *wavelet* foram calculadas utilizando um código em Fortran desenvolvido pelos autores.

Wang e Deng, (1999) utilizaram as transformadas de *wavelet* para detectar o dano em duas situações. Primeiro, em uma viga biapoiada, contendo uma fissura transversal e submetida a um carregamento estático e de impacto (Figura 2.5) e, segundo, em uma placa sob estado plano de tensão e contendo uma fissura que atravessa a placa (Figura 2.6). A deflexão na viga foi obtida, numericamente, usando o método das diferenças finitas e a resposta de deslocamento da placa foi obtida analiticamente. Os autores concluíram que as respostas dos sinais de deslocamento podem ser analisadas com as transformadas de *wavelet*, com o objetivo de detectar danos estruturais.

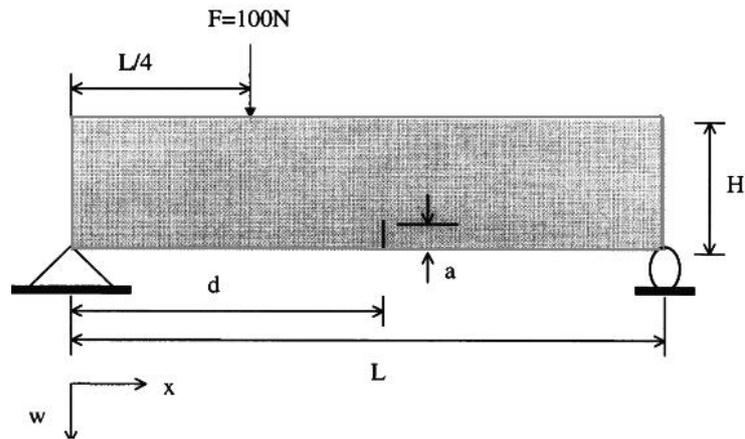


Figura 2.5 – Viga biapoiada com uma fissura e submetida a um carregamento estático (Wang e Deng, 1999).

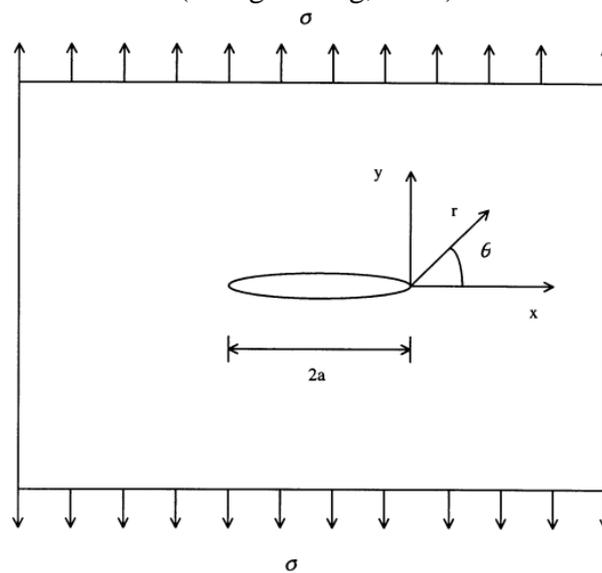


Figura 2.6 – Placa contendo uma fissura (Wang e Deng, 1999).

Wang, Dajun e Xianyue, (1999) utilizaram transformadas de *wavelet* para detectar danos estruturais a partir da resposta de deflexão de uma viga em balanço submetida a um carregamento estático e contendo uma fissura transversal. A viga foi modelada em elementos finitos utilizando o programa ABACUS e está esquematizada na Figura 2.7.

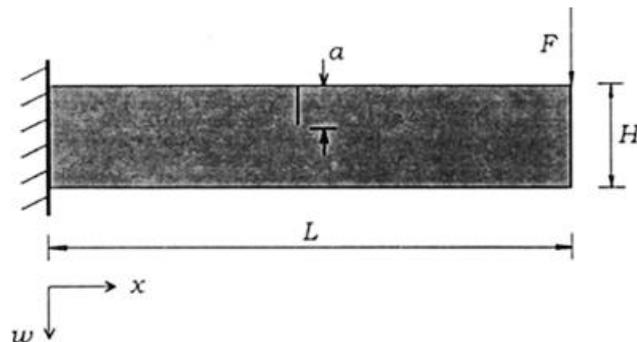


Figura 2.7 – Viga em balanço contendo uma fissura transversal (Wang, Dajun e Xianyue, 1999).

A presença da fissura foi detectada por uma súbita mudança na variação espacial da resposta transformada, usando os deslocamentos nodais da linha inferior da viga.

Okafor e Dutta (2000) modelaram vigas de alumínio em balanço usando o ANSYS 5.3 (Figura 2.8) para obter os seis primeiros modos de vibração para casos com e sem o dano. O dano foi simulado reduzindo a rigidez de um elemento finito, além disso, foi distribuído gaussianamente um ruído de sinal para simular prováveis erros de medida em condições de campo.

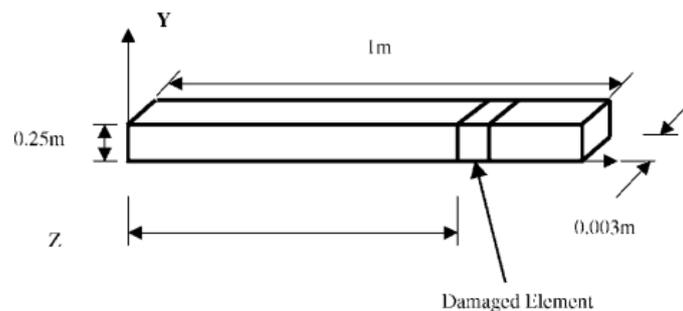


Figura 2.8 – Modelo numérico da viga usando elemento SOLID45 (Okafor e Dutta, 2000).

O dano foi localizado a partir dos coeficientes de *wavelet* e foi observado uma correlação entre a severidade do dano e a magnitude dos coeficientes de *wavelet* na região danificada.

Quek et al., (2001) analisaram a sensibilidade das *wavelets* na detecção de fissuras em vigas. Especificamente, foram estudadas características tais como condições de contorno, *wavelets*-mãe diferentes, comprimento e largura da fissura. Os resultados mostraram que a transformada contínua de *wavelet* é útil para detecção de fissuras em vigas.

Douka et al. (2003) analisaram o modo de vibração fundamental de uma viga em balanço fissurada usando a transformada contínua de *wavelet*. Eles também investigaram o efeito do ruído no processo de detecção introduzindo um erro médio de 1%. A posição da fissura foi localizada por uma súbita mudança na variação espacial da resposta transformada sem o ruído e a resposta transformada com o ruído apresentou vários picos ao longo da viga, porém a fissura foi localizada na posição onde os coeficientes de *wavelet* diminuíram regularmente com a escala.

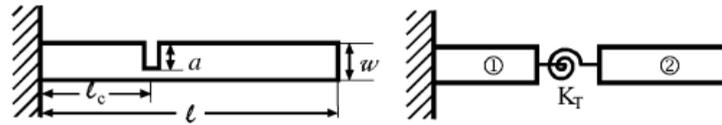


Figura 2.9 – Esquema da viga em balanço fissurada (Douka et al., 2003).

Ovaneso e Suárez (2000) utilizaram as transformadas de *wavelet* contínuas e discretas para detectar fissuras de diferentes tamanhos e posições em vigas e pórticos planos (Figuras 2.10 e 2.11) a partir do sinal de resposta dos carregamentos estáticos e dinâmicos. Neste estudo foram utilizadas duas *wavelets*-mãe diferentes, Haar e a Biorthogonal6.8. Os resultados das simulações mostraram que o método é capaz de extrair informações sobre o dano com uma boa precisão.

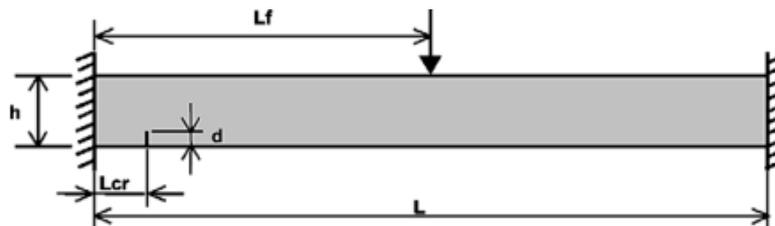


Figura 2.10 – Viga biengastada submetida à carga estática ou dinâmica (Ovaneso e Suárez, 2000).

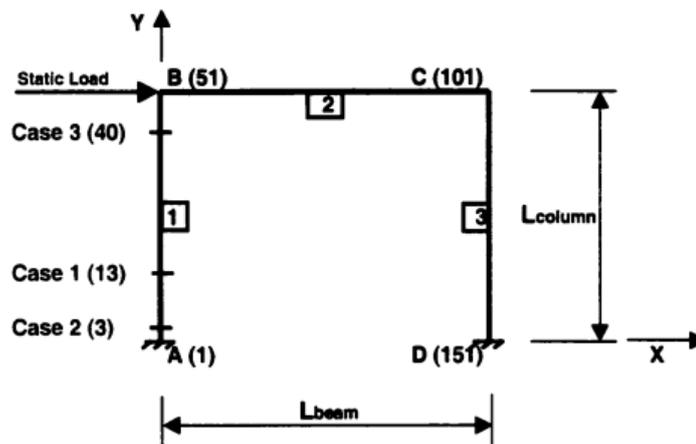


Figura 2.11 – Pórtico submetido à carga estática (Ovaneso e Suárez, 2000).

Zhu e Law (2006) apresentaram um novo método para identificação de fissuras em vigas de pontes submetidas a cargas móveis, baseado na análise de *wavelets*. A fissura foi modelada como uma mola rotacional, conforme mostra a Figura 2.12.

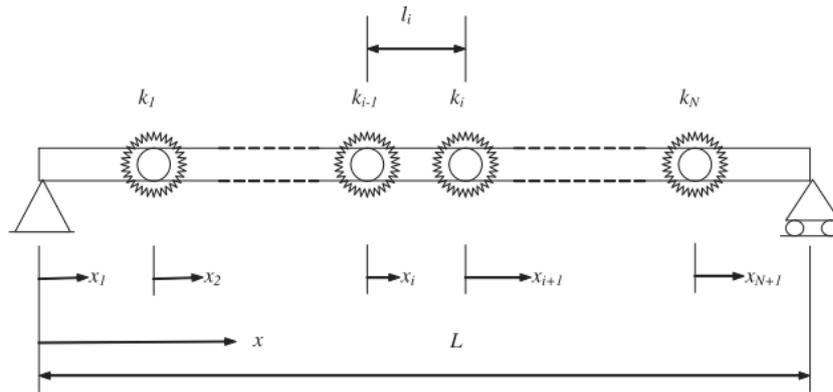


Figura 2.12 – Viga com molas rotacionais na seção com o dano (Zhu e Law, 2006).

A resposta dinâmica da viga foi analisada, usando a transformada contínua de *wavelet* e os resultados mostraram que o método pode detectar com precisão a posição da fissura, mesmo adicionando ruído e variando a velocidade da carga móvel.

Presezniak (2007) fez uma análise numérica e experimental de uma viga livre-livre com uma fissura que foi modelada como uma mola torcional, conforme ilustrado na Figura 2.13. O dano foi identificado através da aplicação da transformada de *wavelet* sobre o primeiro modo de vibração.

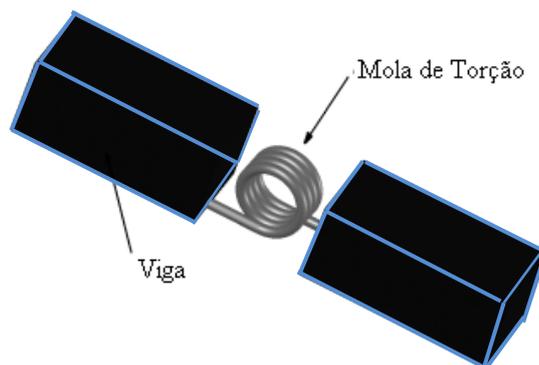


Figura 2.13 – Viga utilizada no experimento (Presezniak, 2007).

Estrada (2008) fez uma análise comparativa detalhada da eficácia dos métodos de detecção de danos em pontes, com uma atenção especial aos métodos baseados na análise de *wavelets*. Os métodos foram avaliados através de três situações distintas: cenários de dano em modelos numéricos de estruturas fissuradas 1D e 2D de vigas e pontes, realização de ensaios experimentais em laboratório de vigas metálicas e de concreto armado reforçado e realização de ensaios dinâmicos em pontes de concreto e madeira. A Figura 2.14 apresenta

uma das pontes utilizadas no estudo, sendo que a mesma foi modelada em 1D. O autor concluiu que a eficácia dos métodos estudados depende de vários fatores como: o número de sensores próximo da zona danificada, o nível de ruído, a extensão e intensidade do dano.

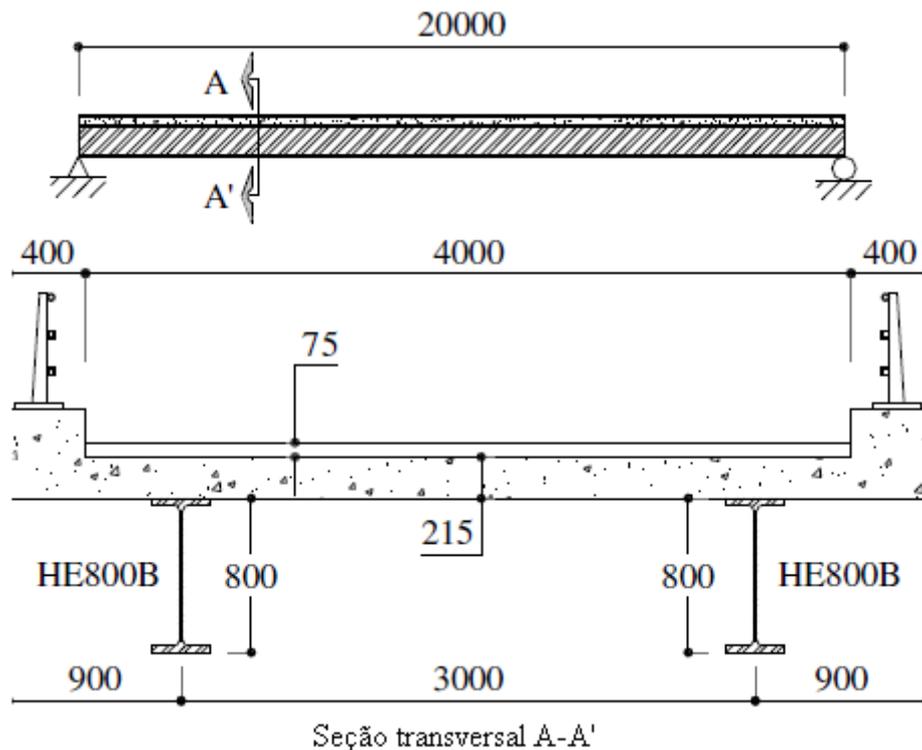


Figura 2.14 – Geometria da ponte utilizada como exemplo (modificado - Estrada, 2008).

Portanto, a partir dos estudos realizados, percebe-se que ocorreu uma evolução nos processos de detecção de danos usando *wavelets* tanto no que diz respeito à forma de obtenção das respostas das estruturas, como no processo de cálculo dos coeficientes de *wavelet*. Além disso, não foram encontrados trabalhos que utilizaram transformadas de *wavelet* para detectar danos em modelos sólidos de pontes

Neste trabalho, um dos estudos de caso a serem analisados será o uso de modelo numérico 3D de uma ponte para simular danos e tentar detectá-los aplicando as transformadas de *wavelet* nos sinais estáticos e modais.

3 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DANOS

3.1 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Em mecânica experimental, várias técnicas são disponíveis para a realização de ensaios não destrutivos de objetos (Halmshaw, 1987; Hull e John, 1988,) como: inspeção visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, corrente de Eddy, ultrassônico e raio-x.

A inspeção visual e o líquido penetrante podem detectar apenas danos que chegam a quebrar até a superfície, enquanto partículas magnéticas podem detectar danos que quebram a superfície e, também, dar indicações dos danos na subsuperfície somente em materiais ferromagnéticos. Para inspeções de grandes componentes, usando partículas magnéticas, grandes correntes para gerar grandes campos magnéticos são requeridas, além disso, cuidado particular é necessário para evitar um aquecimento localizado e queima de superfície nos pontos de contato elétrico. Técnicas de corrente de Eddy(ou Eddy current) são aplicáveis somente em materiais condutores. Testes ultrassônicos podem, às vezes, detectar a posição e o tamanho relativo do dano, mas não é capaz de prever a forma, ver Figura 3.1 (Halmshaw, 1987).

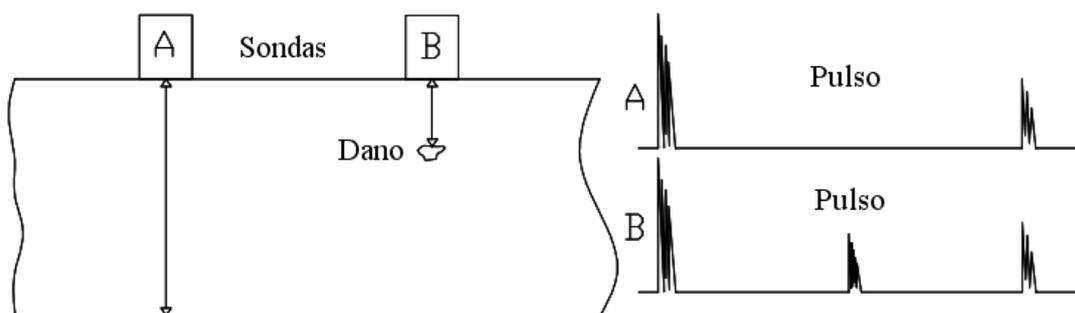


Figura 3.1- Detecção de danos usando a técnica de ultrassom (modificado - Bezerra, 1993).

Muitas precauções devem ser tomadas para obter sucesso na aplicação da técnica de ultrassom, por exemplo, a superfície, onde as sondas são aplicadas tem que ser suavizada para evitar efeitos de espalhamento. Em muitos casos, como na detecção de defeitos de solda, situações duvidosas podem surgir e testes de radiografia são, geralmente, necessários para confirmar o defeito suspeito. Somente as técnicas de raio-x (Figura 3.2) são efetivamente capazes de detectar o tamanho, forma e localização dos danos (Broek, 1986).

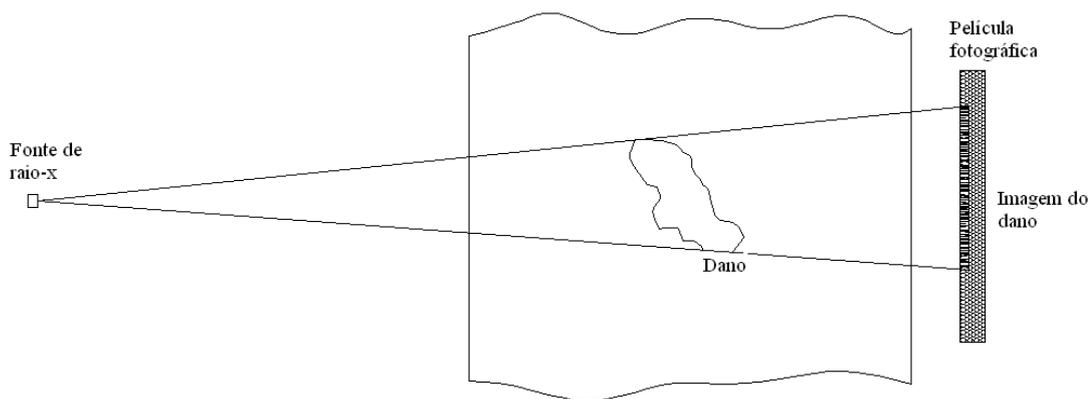


Figura 3.2 - Figura Detecção de danos usando a técnica de raio-x (modificado - Bezerra, 1993).

Técnicas radiográficas, entretanto, possuem diversos contratempos. Primeiro, elas tendem a ser mais caras quando comparadas com outras técnicas não destrutivas. Segundo, o custo dos equipamentos fixos de raio-x são muito altos e necessitam de um espaço razoável para um laboratório de radiografia, incluindo uma sala escura para processamento do filme. Para aparelhos de raio-x portátil, os custos são menores, mas o espaço para processamento e interpretação do filme também é necessário. Terceiro, a inspeção radiográfica de componentes ou estruturas, no local, pode ser um processo lento, porque o equipamento de raio-x portátil geralmente é limitado a uma emissão de radiação de baixa energia e, conseqüentemente, muitos disparos são necessários para inspecionar um objeto. Além disso, os custos com uso de técnicas que utilizam o raio-x podem ser aumentados devido à necessidade de proteção do pessoal contra os efeitos da radiação. Os aspectos de segurança devem ser aplicados não somente para as pessoas diretamente envolvidas no teste, mas também para todas as pessoas que trabalham nas proximidades do teste de radiografia. Finalmente, não é possível detectar todos os tipos de danos através de radiografia. Danos que se alinham com a direção do raio-x podem escapar da detecção. Ainda mais, a inacessibilidade de algumas regiões para serem investigadas podem também proibir o uso de tais métodos (Bezerra, 1993).

Nos últimos anos, tem tido um aumento na demanda para desenvolver procedimentos computacionais para a identificação do dano, baseado em observações discretas internas e externas (Tanaka et al., 1988).

A solução do problema inverso de detecção de danos através de métodos numéricos pode assim, fornecer uma ferramenta complementar para as técnicas não destrutivas de análise, monitoramento e diagnóstico de estruturas.

3.2 MÉTODOS NUMÉRICOS

Conforme visto anteriormente, existem várias técnicas não destrutivas de detecção de danos em estruturas. Porém, estas técnicas são caras e requerem uma análise precisa de grande extensão da estrutura.

Os métodos numéricos podem auxiliar nos exames não destrutivos de estruturas, pois mesmo que eles não detectem o dano, eles podem mostrar a possível localização do mesmo, fazendo com que a área de análise seja reduzida, tornando os exames não destrutivos menos onerosos (Silva, Bezerra e Brito, 2010).

Entre os métodos numéricos mais usados para detectar danos, destacam-se o método dos elementos finitos (MEF) e o método dos elementos de contorno (MEC).

Uma das áreas de métodos numéricos bastante desenvolvidas após a Segunda Guerra foi para a resolução de problemas diretos ou bem-postulados, mas a utilização de métodos numéricos para determinação de um dano é um tipo de problema inverso ou mal-postulado.

Na Figura 3.3, considere o domínio Ω como homogêneo, isotrópico, linear elástico e representando um sólido bidimensional com contorno Γ . Um problema direto em elastostática tem os seguintes itens bem definidos (Kubo, 1988)

- O domínio de interesse Ω , e contornos Γ ;
- As equações que governam o domínio Ω ;
- As condições de contorno apropriadas pra o contorno Γ inteiro;
- As propriedades dos materiais envolvidos nas equações que regem o problema;
- As forças que agem no sólido.

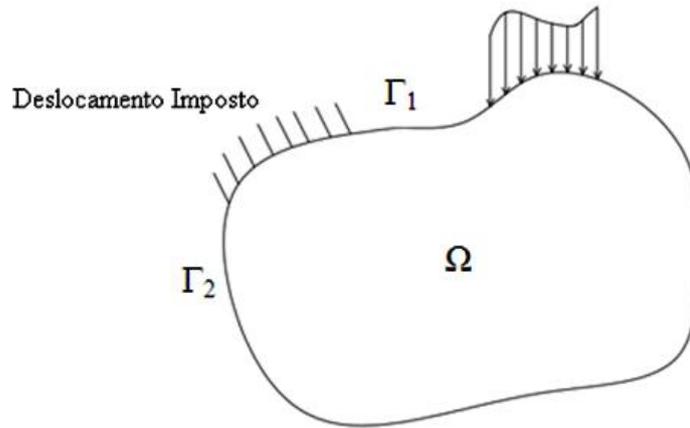


Figura 3.3 – Problema direto em elastostática (modificado - Bezerra, 1993).

Se em uma estrutura parte do domínio matemático Ω ou alguma propriedade que governa o problema fosse desconhecido, então este problema deixa de ser direto e passa a ser inverso ou mal-postulado.

Existem diversos métodos que auxiliam na resolução de problemas inversos, entre eles podemos citar: inversão direta, mínimos quadrados, regularização, algoritmos genéticos, redes neurais, entre outros. Neste trabalho, será dada ênfase ao método de regularização, pois o mesmo foi utilizado para auxiliar no processo de detecção do dano por diversos pesquisadores (Beck et al., 1985; Bezerra, 1993; Ferreira, 2007).

3.2.1 Método da mudança de flexibilidade

Este método foi proposto por Pandey e Biswas (1994) com o objetivo de desenvolver um método de identificação e localização de danos usando os parâmetros modais da estrutura. Considerando os modos de vibração normalizados $\Phi^T M \Phi = I$, as matrizes de rigidez e de flexibilidade sem o dano e com o dano ficam da seguinte forma:

$$K = M \Phi \Omega \Phi^T M = M \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \phi_i \phi_i^T M \quad (3.1)$$

$$F = \Phi \Omega^{-1} \Phi^T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^2} \phi_i \phi_i^T \quad (3.2)$$

$$F^* = \Phi^* \Omega^{*-1} \Phi^{*T} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^{*2}} \phi_i^* \phi_i^{*T} \quad (3.3)$$

Onde, K é a matriz de rigidez, M é a matriz de massa, $\Phi=[\phi_1, \phi_2, \dots \phi_n]$ é a matriz dos modos de vibração, Ω é a matriz diagonal com os quadrados das frequências naturais de vibração ω_i , n é o número de graus de liberdade do sistema, ω_i são as frequências naturais, F é a matriz de flexibilidade e o asterisco sobrescrito denota o parâmetro de dano. A mudança da matriz de flexibilidade ΔF é dada por:

$$\Delta F = F - F^* \quad (3.4)$$

Cada coluna da matriz de flexibilidade representa o deslocamento produzido por uma força unitária aplicada ao grau de liberdade associado.

Um índice mais apropriado pode ser determinado a partir dos valores absolutos máximos dos elementos da coluna de ΔF é dado por:

$$\delta F_j = \max \delta F_{ij} \quad (3.5)$$

Onde δF_{ij} são os elementos de ΔF e δF_j indica o grau de liberdade quando a máxima variação de flexibilidade ocorre e indica também a localização do dano.

O uso dos modos de vibração para detecção de danos tem alguns inconvenientes, pois a presença do dano pode não influenciar significativamente nos modos de vibração menores que são aqueles geralmente medidos. Além disso, o ruído de sinal e a escolha dos sensores utilizados podem afetar consideravelmente a precisão do procedimento de detecção de danos (Kim et al., 2003).

3.2.2 Método da curvatura

Este método, proposto por Pandey et al., (1991) , é baseado na evidência que a curvatura dos modos de vibração está relacionada com a rigidez a flexão da estrutura da seguinte forma:

$$v'' = \frac{M}{EI} \quad (3.6)$$

Onde v'' é a curvatura da seção, M é o momento fletor da seção, E é o módulo de elasticidade e I é o momento de inércia da seção.

A introdução de um dano ou uma fissura na estrutura provoca diminuição na rigidez (EI) na seção fissurada ou região danificada e conseqüentemente, a magnitude da curvatura na seção irá aumentar. Essas mudanças na curvatura são locais e podem ser usadas para detectar e localizar o dano.

Pandey et al., (1991) mostraram que a curvatura dos modos de vibração é mais sensível ao dano do que o próprio modo de vibração. A plotagem da diferença da curvatura modal de um estado intacto e um danificado é um pico no elemento danificado e indica a presença de um defeito. Porém, Farrar e Jauregui, (1997) descobriram que o método da curvatura detecta o dano em apenas dois ou três lugares e que o método era pouco provável que fosse tão bem sucedido em localizar maiores regiões de danos. Além disso, para calcular a curvatura com precisão, um grande número de pontos de medição foi necessário.

3.2.3 Assinaturas estruturais

As “Assinaturas Estruturais” são funções que comparam as respostas estáticas e/ou dinâmicas obtidas nas situações com e sem o dano. O uso destas comparações pode auxiliar no processo de localização do dano. A seguir são apresentadas algumas assinaturas utilizadas por diversos pesquisadores, entre eles, Bezerra e Saigal, (1993); Brito (2008); Caldeira, (2009).

A primeira assinatura $F_1(z)$ é um somatório de coeficientes entre variações de deslocamentos e as duas primeiras variações de frequências naturais para todos os n nós da estrutura, conforme descrito na Equação 3.7.

$$F_1(z) = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta u_x^j}{\Delta \omega_1^2} + \frac{\Delta u_x^j}{\Delta \omega_2^2} + \frac{\Delta u_y^j}{\Delta \omega_1^2} + \frac{\Delta u_y^j}{\Delta \omega_2^2} \quad (3.7)$$

Onde:

Δu : diferença entre os deslocamentos nodais da estrutura intacta (u^i) e da estrutura danificada (u^d) nas direções x e y para os n pontos da estrutura.

$\Delta\omega_1^2$ e $\Delta\omega_2^2$: quadrados das diferenças entre as frequências naturais obtidas com a estrutura intacta (ω^i) e com a estrutura danificada (ω^d), somente considerando a primeira e a segunda frequência natural de vibração da estrutura, respectivamente.

Podemos escrever os parâmetros Δu e $\Delta\omega$ matematicamente da seguinte forma:

$$\Delta u = u^i - u^d \quad (3.8)$$

$$\Delta\omega_1^2 = (\Delta\omega_1^i - \Delta\omega_1^d) \quad (3.9)$$

$$\Delta\omega_2^2 = (\Delta\omega_2^i - \Delta\omega_2^d) \quad (3.10)$$

A segunda assinatura $F_2(z)$, apresentada na Equação 3.11 utiliza diferenças de deslocamentos estáticos nas duas direções x e y e diferenças entre as frequências (ao quadrado) da estrutura intacta e da estrutura danificada. A assinatura é computada para todos os n graus de liberdade e para as k primeiras frequências naturais extraídas para a estrutura.

$$F_2 \ z = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta u_x^j + \Delta u_y^j}{\sum_{j=1}^k \Delta\omega_j^2} \quad (3.11)$$

A terceira assinatura $F_3(z)$, apresentada na Equação 3.12 calcula o somatório do produto dos quadrados das diferenças entre (estrutura intacta e danificada) dos n deslocamentos resultantes Δu_j^2 e das k primeiras frequências naturais $\Delta\omega_k^2$.

$$F_3 \ z = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^k \Delta u_j^2 \Delta\omega_k^2 \quad (3.12)$$

A quarta assinatura $F_4(z)$, denominada COMAC (*Coordinate Modal Assurance Criterion*), mede a correlação entre vários vetores. Se os deslocamentos modais no nó i de uma série de modos de vibração são iguais, o valor do COMAC é um para este nó. Caso contrário, a perturbação no local do modo de vibração danificado pode dar valores de COMAC menores que um (Ndambi et al., 2002). Este índice pode ser expresso por:

$$COMAC_J = \frac{\left[\sum_{i=1}^n |\phi_{ij} \phi_{ij}^*| \right]^2}{\sum_{i=1}^n \phi_{ij}^2 \sum_{i=1}^n \phi_{ij}^{*2}} \quad (3.13)$$

Onde ϕ_{ij} e ϕ_{ij}^* são os modos de vibração para o j-ésimo nó do i-ésimo modo para a estrutura intacta e para a estrutura danificada, respectivamente.

Dentro deste contexto das assinaturas, vale destacar os trabalhos do Brito (2008) e Caldeira (2009). Brito (2008) analisou onze assinaturas diferentes para localização de danos em treliças planas plotando os gráficos das funções objeto, e concluiu que a combinação de parâmetros estáticos, como os deslocamentos nodais, juntamente com os dinâmicos, como as frequências da estrutura, mostraram uma maior eficiência no equacionamento de funções objeto destinadas à identificação da localização do dano. Já Caldeira (2009), estudou seis assinaturas escritas em termos de características de rigidez, deslocamentos às cargas estáticas e modos de vibrar com o objetivo de localizar danos em vigas e pórticos. A autora concluiu que as assinaturas que utilizam o somatório das diferenças de frequência ao quadrado $\sum_{k=1}^6 \Delta\omega_k^2$ mostraram-se mais convenientes no processo de detecção do dano.

Existem ainda outros métodos tradicionais baseados nos parâmetros de vibração, mas que não fazem parte desta pesquisa.

3.2.4 MÉTODOS BASEADOS EM WAVELETS

Embora a literatura sobre detecção de dano tenha sido, até agora, dominada por estudos baseados em métodos que utilizaram a frequência ou informação da variação da rigidez, métodos baseados na transformada de *wavelet*, uma recente teoria matemática desenvolvida em análise de sinal (Mallat, 1989), está emergindo.

Estes métodos são baseados em medidas que são feitas de maneira discreta em alguns pontos da estrutura. Tais medidas podem estar submetidas a erros de equipamentos ou a erros humanos e geralmente seguem uma distribuição normal que será abordada no item 3.3 deste trabalho.

3.2.4.1 Wavelets e Transformada de Fourier

A representação de funções a partir da combinação de diferentes funções ortogonais existe desde o início do século XIX, quando Fourier descobriu que poderia representar sinais periódicos a partir da soma de senos e cossenos. (Barbosa, 2001). A série de Fourier é a expansão de um sinal em uma série de senos e cossenos, porém a análise de Fourier possui um grande inconveniente, pois na transformação para o domínio da frequência, a informação do tempo é perdida (Misiti et al., 2002).

Como forma de tentar corrigir esta deficiência pode-se calcular os coeficientes da série de Fourier em partes do sinal, selecionadas sistematicamente por uma sequência de janelamentos. Assim, a perda da variável original não é total, mesmo que ao sacrifício da informação em frequência. A esta técnica é dado o nome de transformada de Fourier em tempo restrito (*Short Time Fourier Transform*, ou STFT), (Loureiro, 2004).

A vantagem da análise de *wavelet* sobre a de Fourier, ou análise modal, é que a transformada de *wavelet* decompõe um sinal (por exemplo, um sinal temporal ou espacial) em uma série de funções locais de ondas (*wavelets*) com base no eixo do tempo (ou espacial) e, permite a identificação das características locais de um sinal a partir de parâmetros como a escala e a posição das *wavelets*.

Apesar da transformada de Fourier (TF) ser amplamente utilizada, ela possui grandes deficiências para a detecção de danos. Para os sinais não-estacionários, TF fornece componentes espectrais, mas não suas posições temporais, uma vez que a informação temporal é perdida após a aplicação TF. De forma semelhante, a TF pode detectar a presença de perturbações locais para sinais espaciais, mas não suas posições efetivas.

A Transformada de *wavelet* não apresenta estas deficiências, pois ela pode detectar a presença e a localização das perturbações, bem como o instante de sua ocorrência, simultaneamente (Huang, Meyer e Nasser, 2009).

A transformada de *wavelet* é a expansão de um sinal em uma série de pequenas ondas (*wavelets*). O termo *wavelet* é usado para descrever uma função localizada no espaço. Por “localizada” entende-se que a *wavelet* tem suporte compacto (ou quase compacto, o importante é que sua energia esteja concentrada em uma pequena região). Estas

características resumem a capacidade de tal expansão em representar aspectos oscilatórios de curta duração presentes em um sinal, ver Figura 3.4 (Loureiro, 2004).

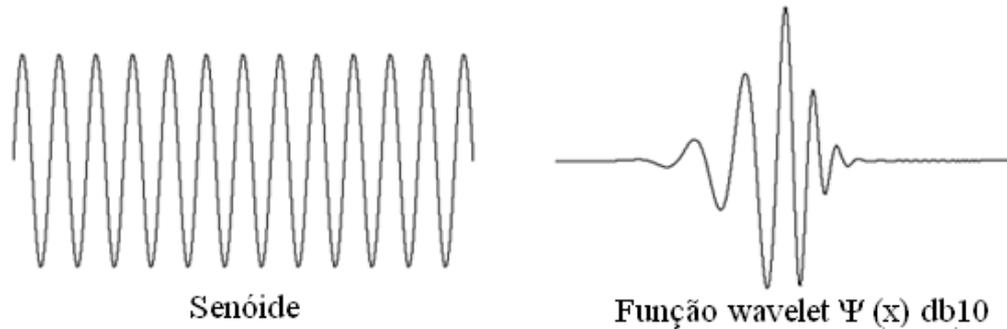


Figura 3.4 – Função periódica senoidal e função wavelet de Daubechies com 10 momentos nulos (Loureiro, 2004)

A expansão *wavelet* de um sinal é dada por:

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \langle f(x), \Psi_{j,k}(x) \rangle \Psi_{j,k}(x), j, k \in \mathbb{Z} \quad (3.14)$$

$$\langle f(x), \Psi_{j,k}(x) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \Psi_{j,k}(x) dx$$

A base é formada pela família de funções *wavelet* $\Psi_{j,k}$, responsável pelo particionamento do espaço de interesse $L^2(\mathbb{R})$ em subespaços W_j ortogonais entre si. Para representarmos uma função $f(x)$ contida em $L^2(\mathbb{R})$, é necessário uma sequência de subespaços que satisfaçam:

$$W_j \subset W_{j+1} \leftrightarrow \dots W_{-2} \subset W_{-1} \subset W_0 \subset W_1 \subset W_2 \subset \dots \quad (3.15)$$

Assim o espaço $L^2(\mathbb{R})$ pode ser visto como:

$$L^2 = \dots \oplus W_{-2} \oplus W_{-1} \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus W_2 \dots \quad (3.16)$$

Sendo $W_j \perp W_{j+1}$ e \oplus uma soma direta.

3.2.4.2 Propriedades das wavelets

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

- Ortogonalidade e biortogonalidade: estas propriedades garantem o cálculo rápido dos coeficientes de *wavelet*. Infelizmente, nem todas as funções de *wavelet* possuem estas duas propriedades;
- Suporte compacto: esta propriedade significa que a função *wavelet* não assume o valor zero para intervalos finitos. Esta propriedade permite representar de forma mais eficiente os sinais que têm características localizadas;
- Momentos nulos: esta propriedade determina o grau do polinômio que podem ser aproximados. Esta propriedade é usada para selecionar a *wavelet*-mãe mais adequada para a detecção de danos;
- Regularidade: é o número de vezes que uma função é diferenciável no ponto x_0 . Singularidades em uma função podem ser detectadas por essa regularidade.

De acordo com estas propriedades, as *wavelets*-mãe mais conhecidas são classificadas em (Ovanesova e Suarez, 2004) da seguinte forma:

- A Haar, Daubechies de ordem N (db N), Meyer, Symlets de ordem N (sym N) e a Coiflets de ordem N (coif N) são exemplos de *wavelets*-mãe ortogonais;
- A Haar, Daubechies de ordem N , Symlets de ordem N e a Coiflets de ordem N são *wavelets*-mãe que possuem suporte compacto;
- A Daubechies de ordem N , Symlets de ordem N e a Coiflets de ordem N são *wavelets*-mãe que possuem um número arbitrário de momentos nulos;
- A Morlet, Meyer e Gaussian são *wavelets*-mãe regulares. Por outro lado, a Daubechies de ordem N , a Symlets de ordem N e a Coiflets de ordem N são *wavelets*-mãe que possuem uma regularidade pobre.

3.2.4.3 Wavelets mãe

As *wavelets*-mãe são funções $\Psi(t)$ que são utilizadas para o cálculo dos coeficientes de *wavelet*. O processo de cálculo destes coeficientes bem como o uso da *wavelet*-mãe na obtenção dos mesmos será abordado no próximo item.

Neste trabalho, serão utilizadas duas *wavelets*-mãe diferentes a Daubechies(db2) e a Biorthogonal(bior6.8). Estas duas *wavelets*-mãe foram escolhidas pelo fato das mesmas já terem sido utilizadas por diversos pesquisadores (Ovanesova, 2000; Estrada, 2008; Grabowska, Palacz, Krawczuk, 2008, entre outros) e apresentarem bons resultados no processo de detecção de danos.

A *wavelet*-mãe mais simples foi descoberta por Haar (1910) ver Figura 3.5, ela representa a mesma wavelet db1 e é definida em termos da função de Heaviside $H(t)$ conforme a Equação 3.17:

$$\Psi(t) = H(t) - 2H(t-1/2) + H(t-1) \quad (3.17)$$

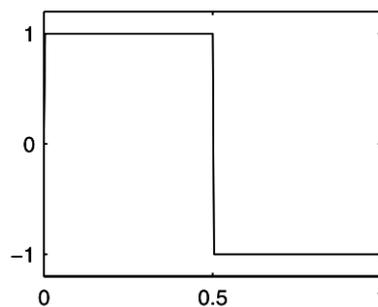


Figura 3.5 – Wavelet-mãe Haar (Misiti et al, 2002)

Ingrid Daubechies inventou as chamadas *wavelets* ortonormais com suporte compacto, tornando viável a análise discreta de *wavelets*. Os nomes da família de *wavelets* de Daubechies são escritos dbN, onde N é a ordem, e db é o “sobrenome” da *wavelet*. A *wavelet* db1, como mencionada acima, é a mesma wavelet Haar, a Figura 3.6 apresenta as funções *wavelet* psi dos próximos nove membros da família.

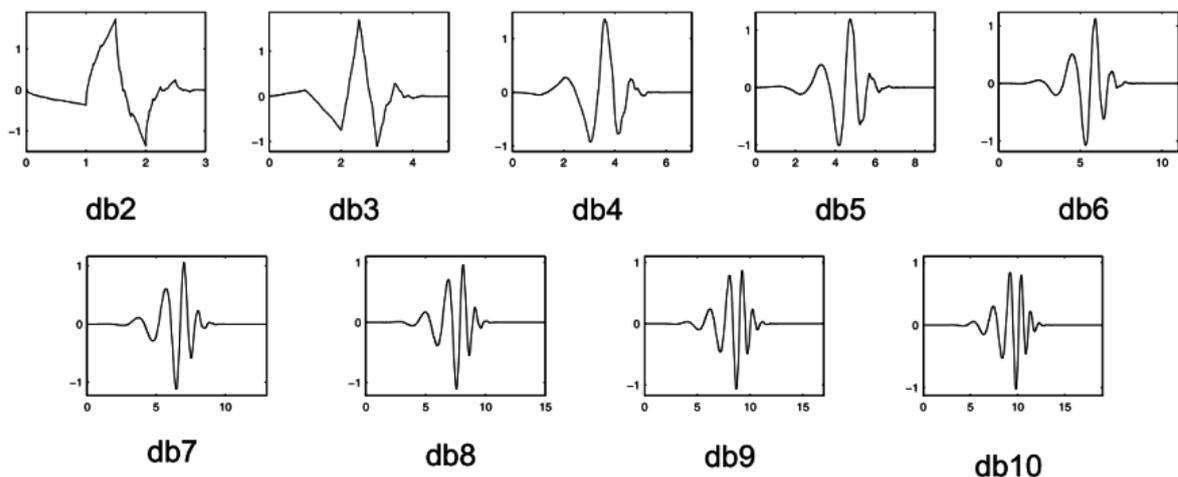


Figura 3.6 – Família de wavelets db1 a db9 (Misiti et al., 2002)

A família de *wavelets* Biorthogonal (Figura 3.7) exibe a propriedade de fase linear que é necessária para a reconstrução da imagem e do sinal. Os nomes da família de *wavelets* Biorthogonal são escritos biorNr.Nd, onde Nr é a ordem de reconstrução e Nd é a ordem de decomposição. Usando duas *wavelets*, uma para decomposição (lado esquerdo) e a outra para reconstrução (lado direito) em vez de apenas uma, propriedades interessantes podem ser derivadas dessas duas *wavelets*. (Misiti, et al., 2002).

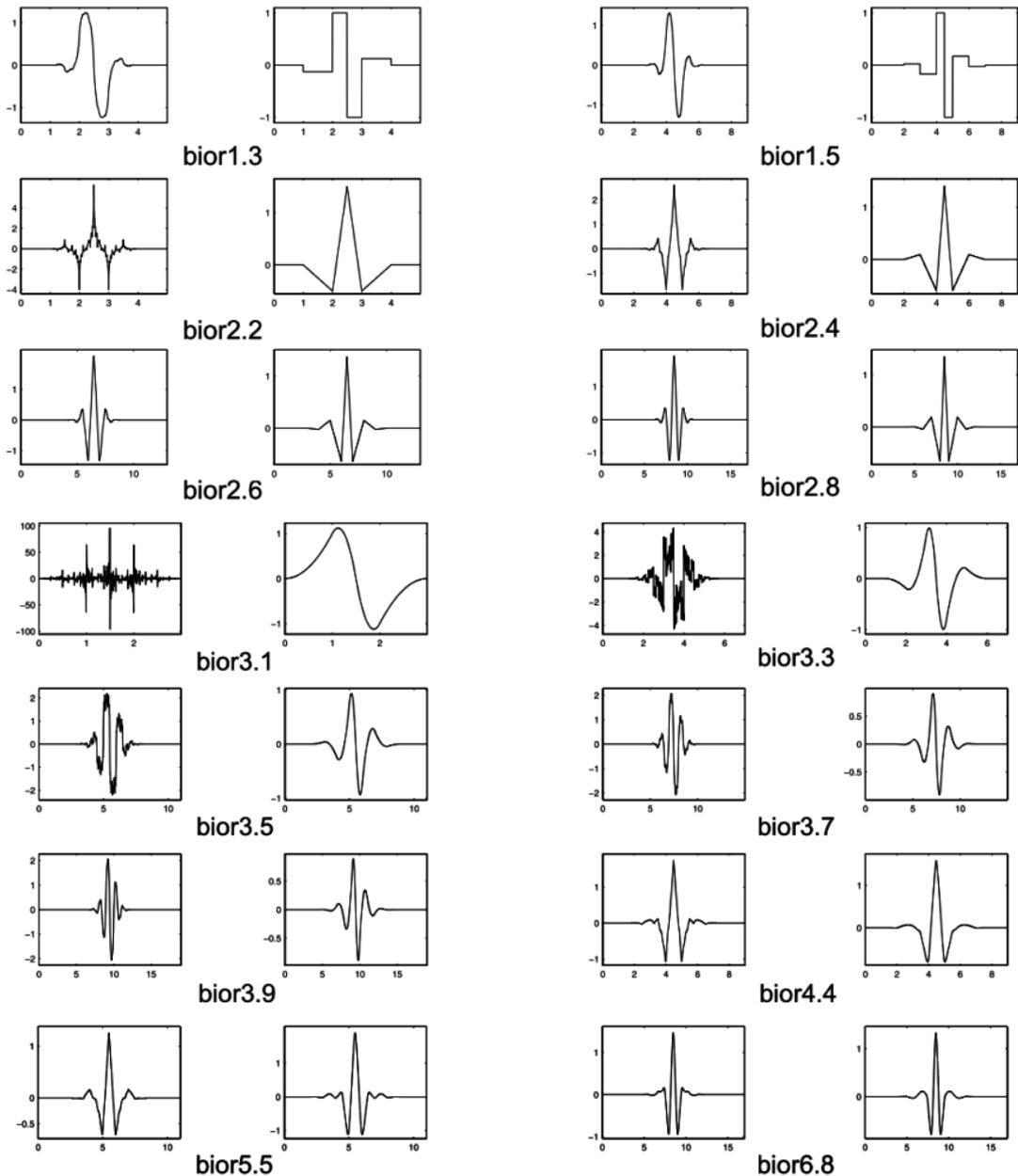


Figura 3.7 - Família de *wavelets* biorthogonais (Misiti et al., 2002).

Um resumo das famílias de *wavelets* e as propriedades associadas a cada uma delas estão apresentadas na Tabela 3.1

Tabela 3.1 – Resumo das propriedades das famílias de *wavelets*
(modificado - Misit et al., 2002)

Propriedade	morl	meyer	haar	dbN	symN	coifN	biorNr.Nd
Infinitamente regular	x	x					
Regularidade arbitrária				x	x	x	x
Suporte compacto ortogonal			x	x	x	x	
Suporte compacto biortogonal							x
Ortogonal			x	x	x	x	
Biortogonal							x
Número de momentos nulos arbitrários				x	x	x	x
Transformada contínua	x	x	x	x	x	x	x
Transformada discreta		x	x	x	x	x	x

Pela Tabela 3.1, percebe-se que as duas *wavelets*-mãe escolhidas para serem utilizadas, neste trabalho, apresentam de uma forma geral, as propriedades que uma wavelet necessita para ser empregada no processo de detecção de danos. Vale ressaltar que as *wavelets*-mãe de Coiflets e Symlets mesmo apresentando as mesmas propriedades da Daubechies e da Biorthogonal não apresentaram bons resultados nas análises de detecção de danos realizadas nesta pesquisa, portanto não foram aqui reportadas.

Existem dois tipos de transformadas de *wavelet*: a contínua e a discreta. Nos itens a seguir, serão apresentados os dois tipos de transformada.

3.2.4.4 Transformada Contínua de Wavelet (TCW)

Considerando um sinal (deslocamento, modo de vibração ou aceleração) de interesse no domínio do tempo e da frequência no intervalo $(-\infty; \infty)$ e $\psi(t)$, os valores da função de wavelet localizado no domínio do tempo e da frequência. Chamamos $\psi(t)$ de *wavelet* mãe. As *wavelets* são geradas a partir da *wavelet*-mãe por escala e translação, conforme abaixo:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.18)$$

A *wavelet* $\psi_{a,b}$ está associada ao parâmetro de escala a e ao parâmetro de translação b . Ela oscila na frequência a^{-1} e está posicionada no tempo (ou espaço) b . Como a escala é o inverso da frequência, para escalas altas temos frequências baixas e para escalas baixas temos frequências altas. Sendo assim, um pequeno pico no gráfico, corresponde a uma componente de alta frequência no sinal, e grandes picos correspondem a componentes de baixa frequência (Polikar, 2010).

A escala, como uma operação matemática, dilata ou comprime o sinal. Escalas maiores correspondem a sinais dilatados e pequenas escalas correspondem a sinais comprimidos.

Transladar uma *wavelet* significa simplesmente atrasar ou antecipar seu começo.

Matematicamente, atrasar uma função $f(t)$ de k é representado por $f(t-k)$.

Os processos de escala e translação de *wavelets* estão apresentados na Figura 3.8

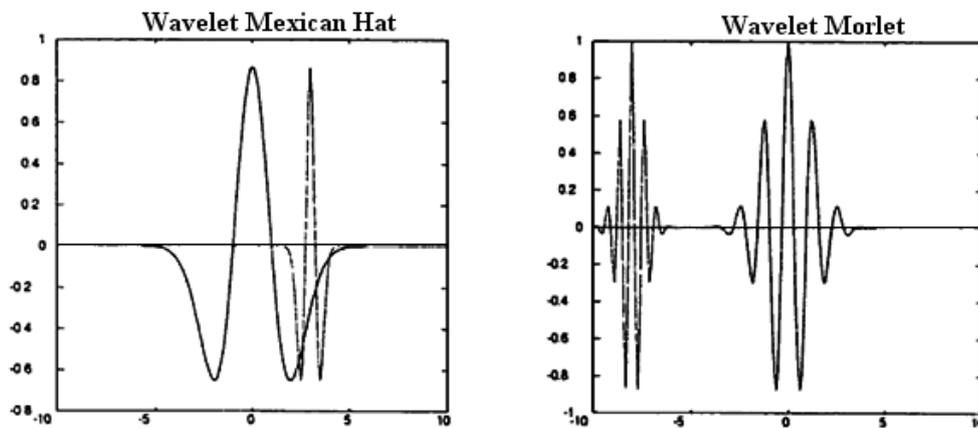


Figura 3.8- Dilação e translação de funções wavelet (Ovanesova, 2000).

A transformada contínua de *wavelet* (TCW) é definida como o somatório de todos os tempos ao longo do sinal multiplicado por uma *wavelet*-mãe transladada e escalonada, como mostra a Equação 3.19.

$$C_{a,b} = C_{a,b}(t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{a,b}(t_0) dt \quad (3.19)$$

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

Durante o cálculo dos coeficientes de *wavelet*, a *wavelet* analisada é transladada suavemente sobre todo o domínio da função analisada até que todo sinal seja coberto. Então a *wavelet* é esticada e o procedimento acima é repetido. Para todos os passos de translação e dilatação, o coeficiente $C_{a,b}$ é calculado continuamente. Os coeficientes constituem os resultados de uma regressão do sinal original realizada pela *wavelet* (Ovanesova, 2000).

As transformadas de *wavelet*, em geral, apresentam-se bastante eficientes na identificação temporal de frequências altas de curta duração e na identificação em frequência de sinais longos de baixas frequências. Sendo assim, a TCW consiste numa poderosa ferramenta que corta sinais em diferentes componentes em frequência e, então, estuda cada componente com a resolução ajustada para sua escala (Filho, Roitman e Magluta, 2008).

Um dos inconvenientes da TCW é que um número muito grande de coeficientes de *wavelet* $C_{a,b}$ são gerados durante a análise. Além disso, poucas *wavelets* têm uma expressão explícita e muitas são definidas com equações recursivas. A TCW é redundante neste sentido e é necessário o uso de todo o domínio de $C_{a,b}$ para reconstruir o sinal $f(t)$. Portanto, em vez de usar dilatações e translações contínuas, valores discretos destes parâmetros são usados para realizar a Transformada Discreta de Wavelet (TDW) Ovanesova e Suaréz (2004).

Em função dos motivos expostos acima, optou-se em utilizar apenas as transformadas discretas de *wavelet* na detecção de danos.

3.2.4.5 Transformada Discreta de Wavelet (TDW)

Wavelets (ψ) com parâmetros inteiros são, geralmente, usadas nas transformadas de *wavelet*, por exemplo, podem ser geradas de uma *wavelet*-mãe usando valores escalonados de a e transladados de b baseados na potência de 2. Este procedimento reduz o esforço computacional nos cálculos dos coeficientes de *wavelet*. A escala a é definida como $a = 2^j$ e a translação $b = k2^j$ com $(j,k) \in \mathbb{Z}$. Este processo é chamado de Transformada Discreta de Wavelet (TDW) e as *wavelets* Ψ são obtidas pela Equação 3.20.

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (3.20)$$

Onde j e k são os índices de escala e translação (posição) respectivamente. Os coeficientes discretos de *wavelet* são dados por:

$$C_{j,k} = \int_{t_0}^{\infty} f(t) \Psi_{j,k}(t) dt \quad (3.21)$$

De posse de um modelo numérico de uma estrutura e do conhecimento da teoria para o cálculo das transformadas de *wavelet*, os seguintes passos são necessários para realizar um procedimento de detecção de danos utilizando a TDW.

- Passo 1: discretizar a estrutura contínua (viga, pórtico, treliça, tubulação, passarela, ponte, entre outras) em n elementos com uma malha bem refinada e regular.
- Passo 2: obter um sinal associado a uma resposta estática ou dinâmica (deslocamentos, modos de vibração, deformações) nos pontos nodais através de um modelo em elementos finitos ou contorno em uma área de interesse.
- Passo 3: calcular os coeficientes de wavelet realizando a TDW para diferentes escalas a partir da Equação 3.21.
- Passo 4: plotar os valores dos coeficientes de wavelet para cada nível de decomposição em um gráfico, no qual o eixo x apresenta os nós da estrutura e no eixo y os coeficientes de *wavelet*.
- Passo 5: avaliar o gráfico plotado da seguinte forma: procurar pontos que apresentem uma mudança súbita (como um pico) na distribuição dos valores dos coeficientes de *wavelet*, caso estas perturbações não estejam associadas a uma descontinuidade de material ou geométrica (por exemplo, mudança de barra ou regiões de apoio), então, isto significa que o dano está localizado próximo a esta região.

Os passos 3 e 4 foram feitos utilizando o programa MATLAB e estão apresentados de forma detalhada no APÊNDICE C deste trabalho.

3.3 DISTRIBUIÇÃO DO ERRO

A precisão nos dados obtidos a partir de ensaios e de análises numéricas é muito importante para a obtenção de resultados confiáveis. A inserção de pequenos erros nos dados ψ_{ik} pode causar perturbações ao longo do sinal, dificultando assim, a detecção da posição do dano.

No processo de detecção de danos, um número de medidas experimentais existe além do ψ_{ik} , como a localização do sensor, dimensão dos modelos e propriedades dos materiais. Medidas experimentais são inerentemente acompanhadas por incertezas no vetor de dados ψ . Nesta pesquisa, assume-se que cada quantidade medida possui uma precisão conhecida, exceto nas medidas de deslocamentos e modos de vibração no vetor de dados ψ_{ik} . As medidas experimentais ψ_{ik} , a partir de sensores, são assumidas como sendo as maiores fontes de erros ou incertezas (Bezerra, 1993).

Os erros podem ser separados em componentes sistemáticos e aleatórios. Os erros sistemáticos são aqueles erros constantes causados por efeitos como: sensibilidade a mudança, calibração e não-linearidades conhecidas. Estes erros sistemáticos, geralmente, podem ser eliminados, repetindo as medidas sob diferentes condições ou com equipamentos diferentes.

Quaisquer efeitos conhecidos devido a equipamento, instalação, interferência e a erros de calibração sistemática são assumidos como podendo ser removidos, na medida em que os erros remanescentes em ψ podem ser considerados como aleatórios. Portanto, deslocamentos ou modos de vibração de dados ψ medidos são assumidos que, em primeiro lugar, contêm erros aleatórios. Além disso, assume-se também que estes erros aleatórios podem ser descritos estatisticamente. Nota-se que as quantidades ψ são medidas em posições discretas, desde que somente um número finito de sensores esteja disponível. Isto faz com que a distribuição espacial dos dados não seja completamente conhecida (Cerni e Foster, 1962).

A distribuição de erros nos dados pode ter uma influência significativa na detecção de danos. Uma série de hipóteses em relação a erros nos dados experimentais do vetor ψ_{ik} é feita. Estas hipóteses incluem (Beck et al. 1985):

- Erros são aditivos, portanto, uma quantidade de erro aleatório (vetor ψ_{ik}) pode ser adicionada aos valores “verdadeiros” dos elementos de ψ_{ik}

$$\psi_{ik} = \psi_{ik} + \psi_{ik} \quad (3.22)$$

Onde ψ_{ik} são as medidas de deslocamento e modos de vibrações obtidas nas análises estáticas e modais respectivamente.

- A média dos valores de erros aleatórios é zero. Dado uma série de medidas de erros aleatórios da quantidade ψ_{ik} na direção i .

$$E(\psi_{ik}) = \mu_i = 0 \quad (3.23)$$

Onde $E(\cdot)$ é o operador de valor médio. Isto significa que não existe tendência nos dados, e que os erros em ψ_{ik} são tanto positivos como negativos, e que o valor médio dos erros aleatórios passa a ser zero.

- Uma variância constante é assumida. Portanto, para cada direção i de dados medidos, nós temos:

$$V(\psi_{ik}) = E[(\psi_{ik} - E \psi_{ik})^2] = \sigma_i^2 \quad (3.24)$$

Onde $V(\cdot)$ é o operador de variância e σ_i é o desvio padrão. Isto implica que a variância do erro aleatório nos elementos de ψ_{ik} é independente da posição onde as medidas são tomadas.

- Assume-se que não existe correlação entre os erros

$$E[(\psi_{ik} - E \psi_{ik}) E[(\psi_{ij} - E \psi_{ij})]] = 0, \text{ para } k \neq j \quad (3.25)$$

Portanto, medidas de erro em pontos diferentes não possuem correlação entre si. O erro em um sensor não afeta os dados de outro sensor.

Erros possuem uma distribuição normal ou Gaussiana. Se as hipóteses acima são válidas, então a densidade de probabilidade dos erros ψ_{ik} , na direção i , $P_i(\psi_{ik})$, é dada por:

$$P_i(\psi_{ik}) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\psi_{ik}^2}{2\sigma_i^2} \right\} \quad (3.26)$$

A Figura 3.9 mostra uma curva de distribuição Gaussiana para números aleatórios, cuja média dos números aleatórios é zero e o desvio padrão é 1,0.

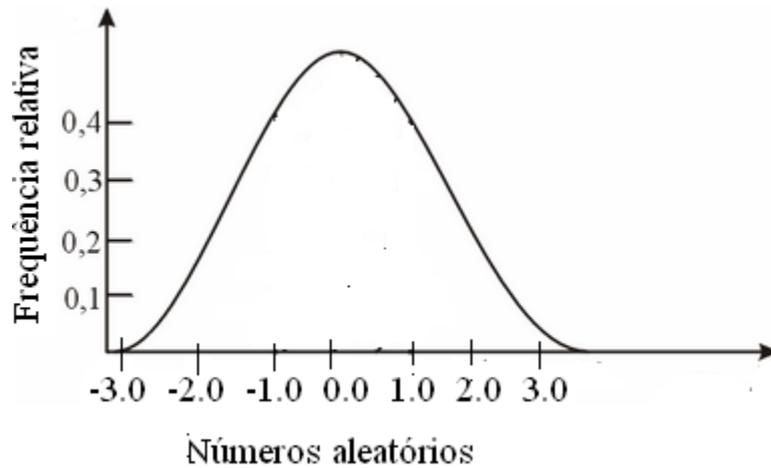


Figura 3.9 - Números aleatórios gerados com distribuição Gaussiana.

Os erros aleatórios ψ_{ik} são gerados em uma série W da seguinte forma:

$$W = \{\psi_{ik} : \psi_{ik} \in [-\eta E \psi_{ik} ; +\eta E \psi_{ik}]\} \quad (3.27)$$

Onde η_i ($\eta_i = 1\%, 2\%, 3\% \dots$) é a porcentagem de erro admitida nos sensores e $E \psi_{ik}$ é a média dos k valores não contaminados de ψ_{ik} na direção i .

Os problemas inversos aplicados em problemas de detecção de danos são susceptíveis às medidas de erros e, para reduzir tais erros, tem-se utilizado métodos de regularização.

3.3.1 Métodos de regularização

Existem vários procedimentos usados para a solução de problemas mal-colocados ou inversos em geral. Um destes foi desenvolvido por (Tikhonov e Arsenin, 1963). Tikhonov

introduziu o que ele chamou de método de regularização para reduzir a sensibilidade dos problemas mal-colocados à medidas de erro.

Métodos de regularização (Tikhonov e Arsenin 1977, Schnur e Zabarás 1990) visam reduzir as flutuações numéricas na solução por modificação da função desconhecida. Os termos de regularização mais utilizados são os de ordem zero, primeira ordem e segunda ordem, respectivamente (Beck et al., 1985). Os termos de ordem zero controlam as mudanças na magnitude do vetor u , os de primeira ordem controlam as mudanças na magnitude da taxa de variação de u e assim sucessivamente. Os termos aumentados da regularização, até os termos de segunda ordem, podem ser expressos na forma integral (Schnur e Zabarás, 1990) como:

$$\rho = \beta_0 \int u^2 ds + \beta_1 \int \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 ds + \beta_2 \int \left(\frac{\partial^2 u}{\partial s^2}\right)^2 ds \quad (3.28)$$

Uma equação de regularização análoga escrita em diferenças finitas é dada por:

$$\rho = \beta_0 \sum_{i=1}^p u_i^{(n)2} + \beta_1 \sum_{i=1}^p (u_i^{(n)} - u_i^{(n-1)})^2 + \beta_2 \sum_{i=1}^p (u_i^{(n)} - 2u_i^{(n-1)} + u_i^{(n-2)})^2 \quad (3.29)$$

Onde β_j são parâmetros de regularização, s é um parâmetro espacial, n é o número de iteração, u_i são os componentes de u . Segundo Beck et al., 1985, a Equação 3.29 é análoga à Equação 3.28. A expressão de regularização em diferenças finitas (3.29) será utilizada neste trabalho.

4 SIMULAÇÕES DE DANOS E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentadas as simulações de danos feitas em vigas, treliça e em uma ponte. Estas simulações estão acompanhadas dos seus respectivos resultados da aplicação das transformadas de *wavelet* na detecção de danos a partir da resposta dos sinais estáticos e modais obtidos no modelo numérico em elementos finitos.

Vale ressaltar que o método baseado em *wavelets* utilizado nesta pesquisa enquadra-se no método de detecção de danos de nível II, segundo a classificação proposta por Rytter (2003) a qual considera se a estrutura está danificada e a localização do dano.

As simulações de danos foram feitas utilizando os programas ANSYS 11.0 e SAP2000, utilizando elementos disponíveis em suas bibliotecas. Os resultados obtidos no pós-processamento foram, em seguida, analisados na Wavelet Toolbox do MATLAB para a aplicação da transformada discreta de *wavelet* com duas *wavelets*-mãe diferentes: a Daubechies 2 (db2) e a Biorthogonal 6.8 (bior6.8).

4.1 DETECÇÃO DE DANOS EM VIGAS

Para as diversas situações de danos foram realizadas análises estáticas e modais, variando a posição e a extensão do dano, as condições de apoio e a introdução do ruído de sinal na resposta com o objetivo de verificar a eficiência das transformadas de *wavelet* para situações distintas.

Duas condições de apoio diferentes foram utilizadas nas análises: engaste-livre e engaste-engaste. Na análise estática, uma carga concentrada $F = 500\text{kN}$ foi aplicada no meio do vão das vigas biengastadas e na extremidade direita nas vigas em balanço.

Para a análise modal, os três primeiros modos de vibração e as frequências naturais foram determinados. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam um modelo esquemático das vigas estudadas.

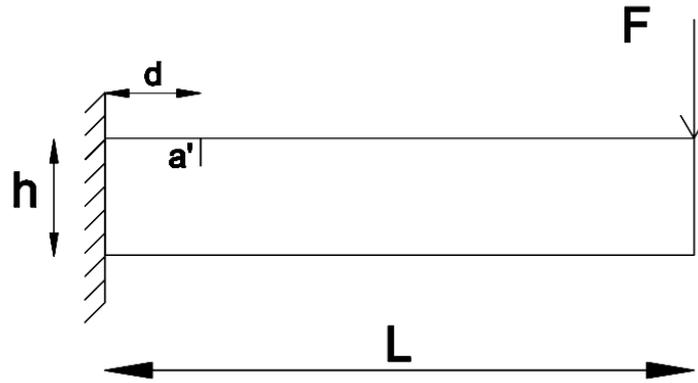


Figura 4.1 - Modelo da viga em balanço.

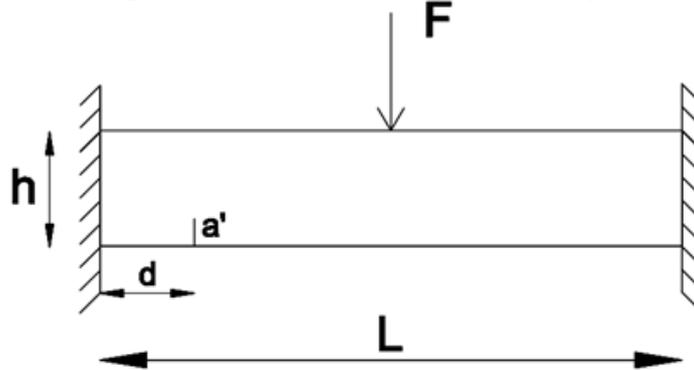


Figura 4.2 – Modelo viga biengastada.

As propriedades geométricas das vigas e as propriedades do material utilizado nas análises numéricas estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Propriedades das vigas

Propriedades	Símbolo	Valor	Unidade
Base da viga	B	0,10	m
Altura da viga	H	0,10	m
Área	S	0,01	m ²
Momento de Inércia	I	8,333x10 ⁻⁶	m ⁴
Comprimento da viga	L	0,50	m
Módulo de elasticidade	E	200,00	GPa
Massa específica	ρ	7850,00	Kg/m ³
Coefficiente de poisson	ν	0,30	-

As vigas foram simuladas utilizando o elemento PLANE42 da biblioteca do programa ANSYS 11.0. O elemento PLANE42 ilustrado na Figura 4.3 é utilizado para modelar estruturas sólidas 2-D. Este elemento é definido por quatro nós e dois graus de liberdade por nó: translação nas direções x e y.

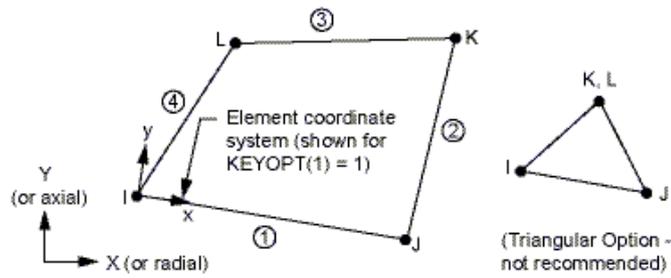


Figura 4.3-Elemento finito PLANE42(Biblioteca do ANSYS).

A posição e o tamanho da fissura foram analisados para quatro situações diferentes como mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Situações de dano

Situação	Tamanho da fissura em metros (a')	Localização da fissura a partir do engaste esquerdo (d)
1	0,025	0,125m = (L/4)
2	0,025	0,25m = (L/2)
3	0,0375	0,125m = (L/4)
4	0,0375	0,25m = (L/2)

O modelo em elementos finitos das vigas em balanço e biengastada foi discretizado em 4509 nós e 4000 elementos. As fissuras foram simuladas, eliminando os elementos do modelo nas dimensões apresentadas na Tabela 4.2 e as condições de contorno foram aplicadas em todos os nós da extremidade das vigas, restringindo os graus de liberdade em x , y e z , ver Figuras 4.4 e 4.5.

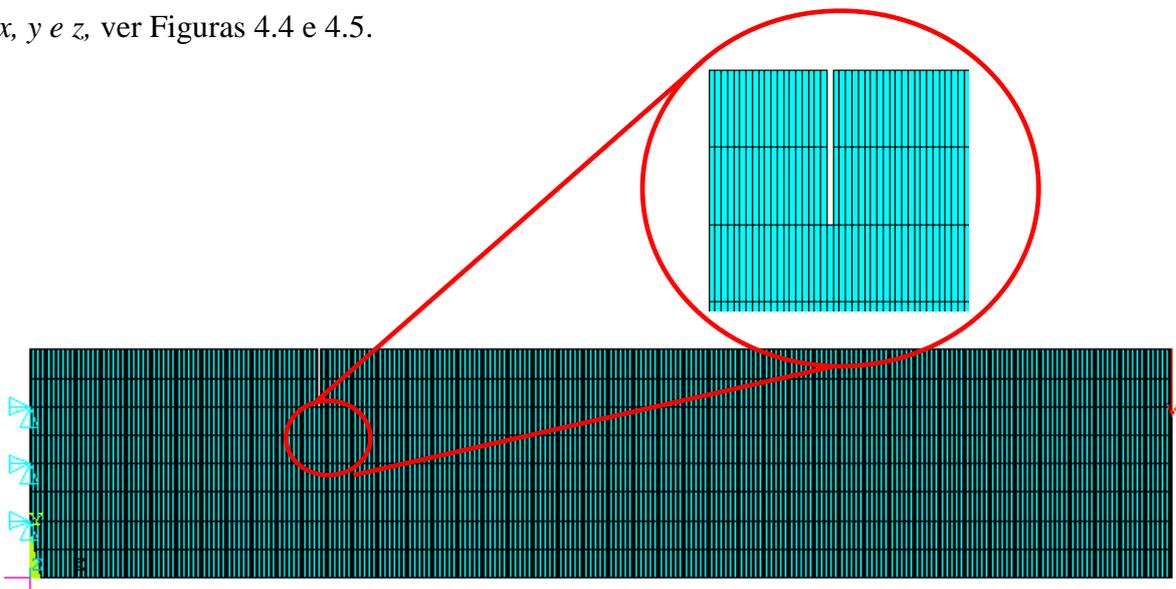


Figura 4.4 – Discretização do modelo em elementos finitos da viga em balanço

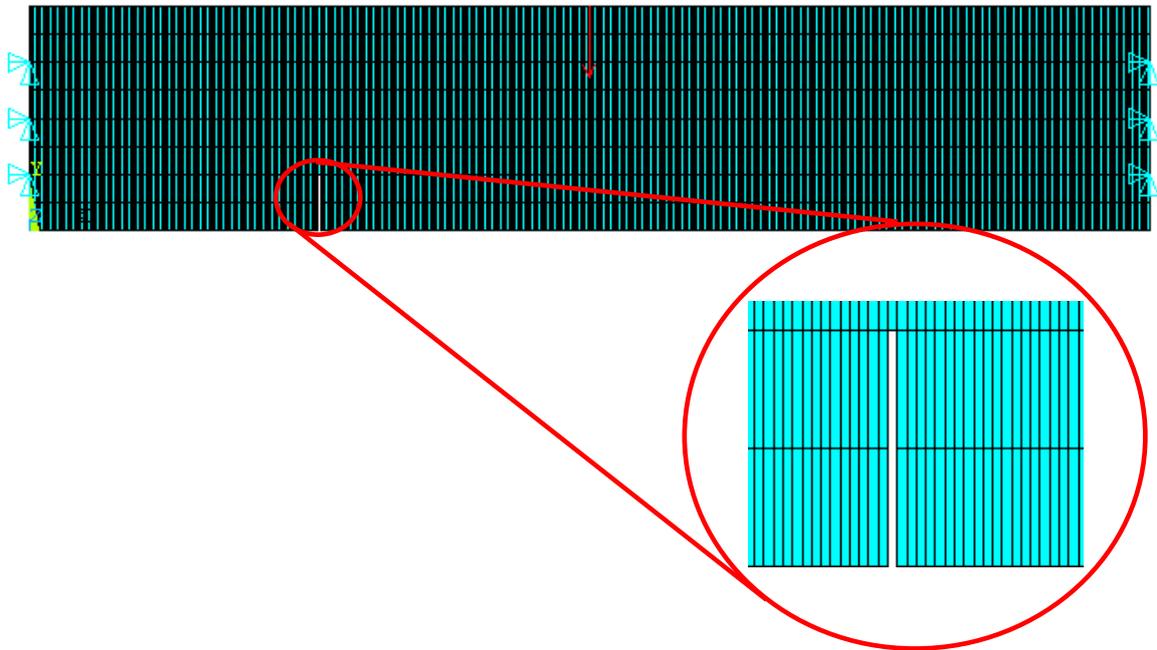


Figura 4.5 - Discretização do modelo em elementos finitos da viga biengastada.

4.1.1 Viga em Balanço

4.1.1.1 Análise estática

A viga em balanço apresentada na Figura 4.4 foi submetida à uma carga concentrada no valor de 500kN na extremidade livre. A deformada da viga, sem o dano, está apresentada na Figura 4.6 e a resposta estática dos deslocamentos nodais na linha inferior da viga, sem fissura e com fissura para a situação 1, está apresentada na Figura 4.7.

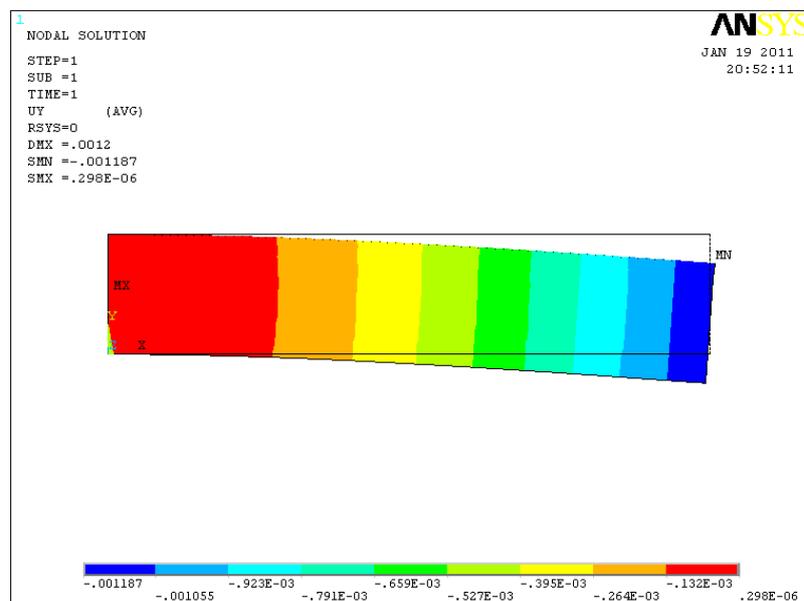


Figura 4.6 - Deformada da viga em balanço obtida no ANSYS.

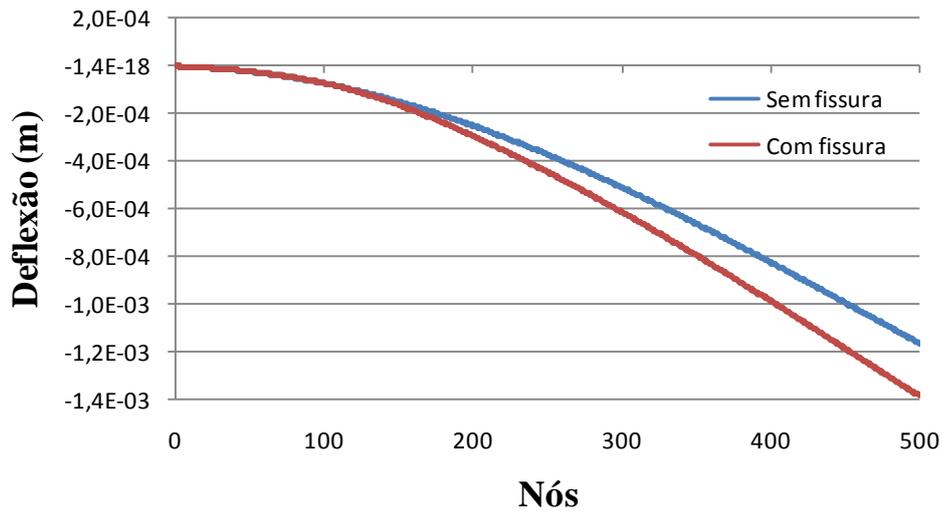


Figura 4.7 - Deflexão da viga em balanço submetida à carga estática.

Os deslocamentos nodais obtidos nas quatro situações de dano da Tabela 4.2 foram exportados para o MATLAB e, em seguida, a transformada discreta de *wavelet* foi aplicada para a obtenção dos coeficientes de *wavelet*, utilizando as *wavelets*-mãe db2 e bior6.8. Os resultados da aplicação das transformadas discretas de *wavelet* nos deslocamentos nodais estão apresentados abaixo.

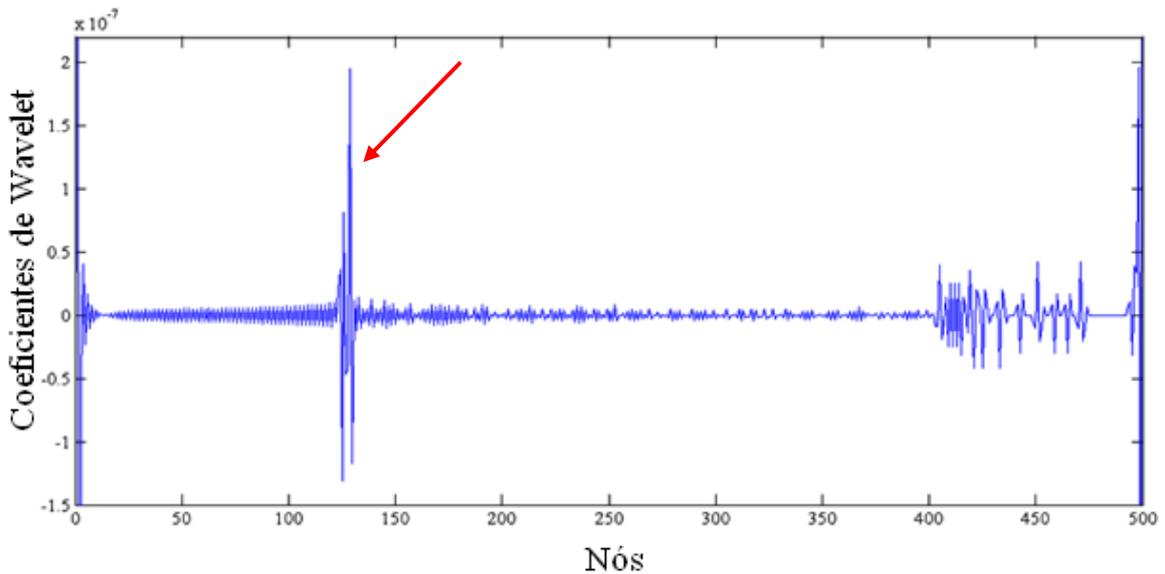


Figura 4.8- Coeficientes de wavelet da situação 1 usando db2 (L/4).

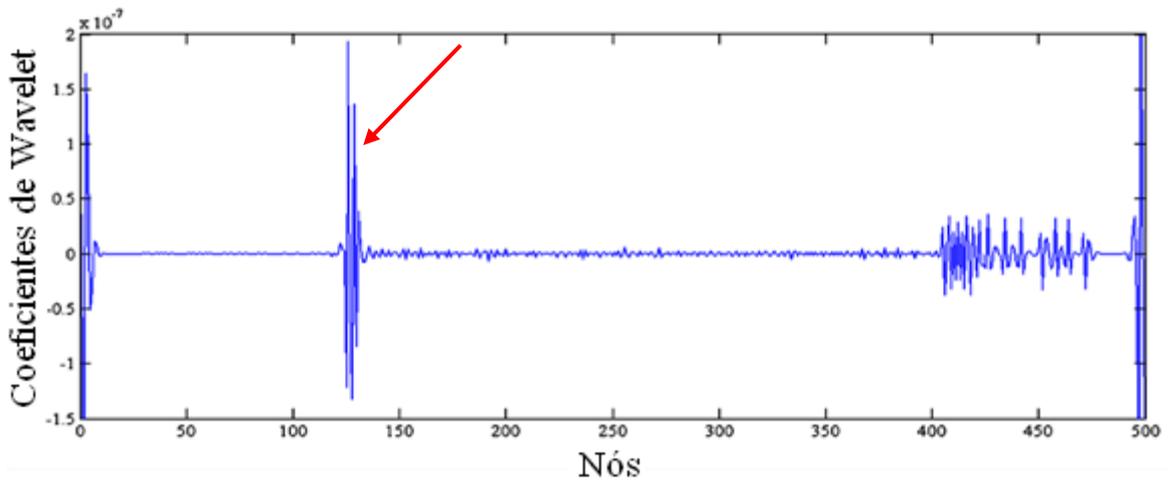


Figura 4.9- Coeficientes de wavelet da situação 1 usando bior6.8 (L/4).

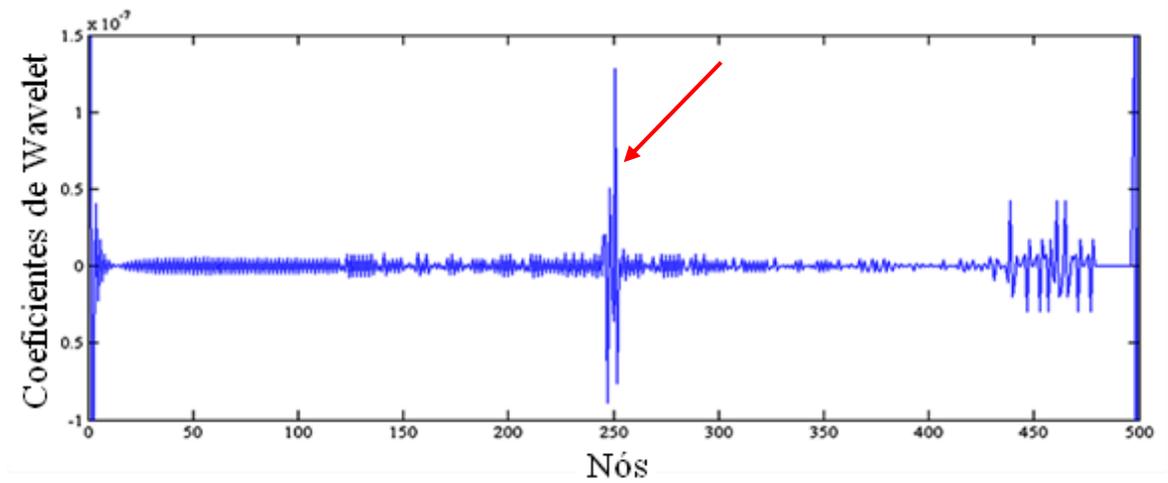


Figura 4.10 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando db2 (L/2).

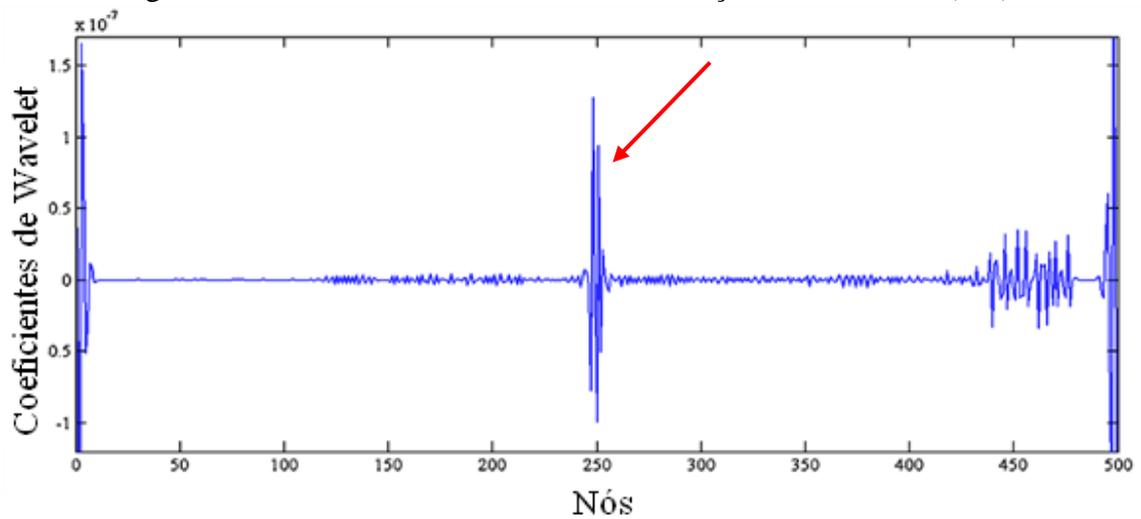


Figura 4.11 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando bior6.8 (L/2).

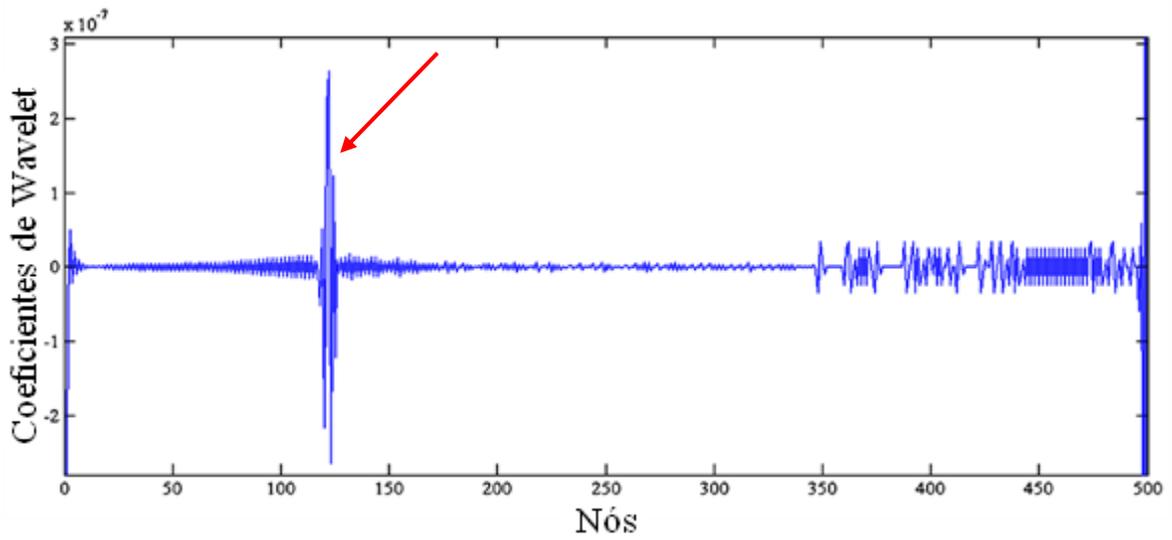


Figura 4.12 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando db2 (L/4).

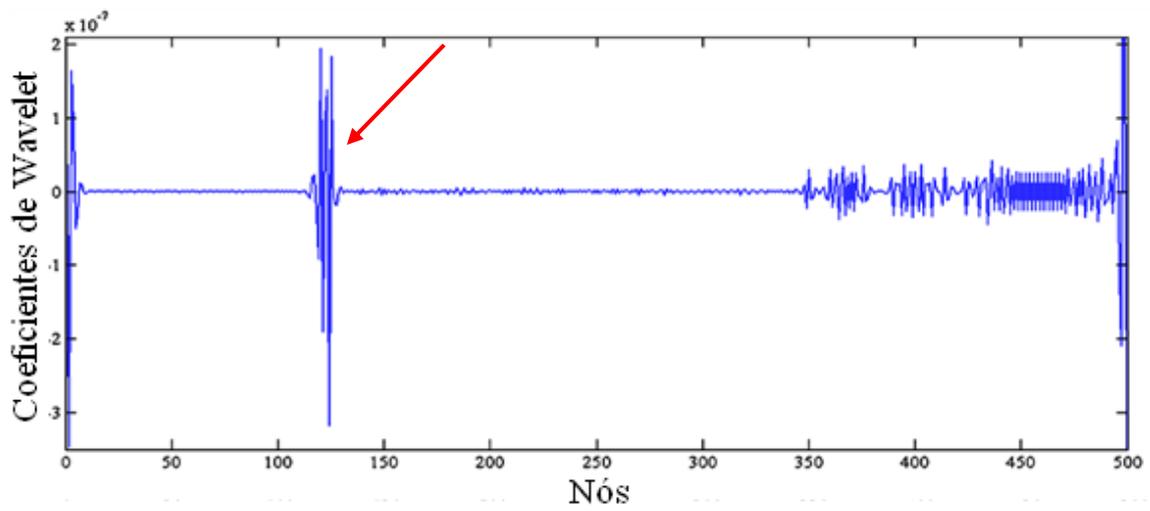


Figura 4.13 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando bior6.8 (L/4).

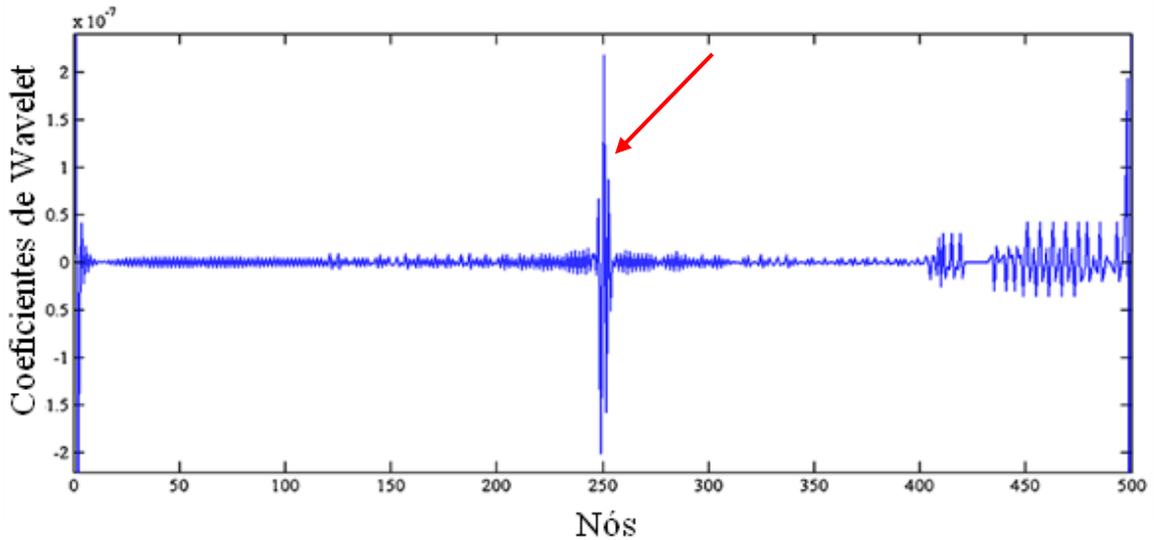


Figura 4.14 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando db2 (L/2).

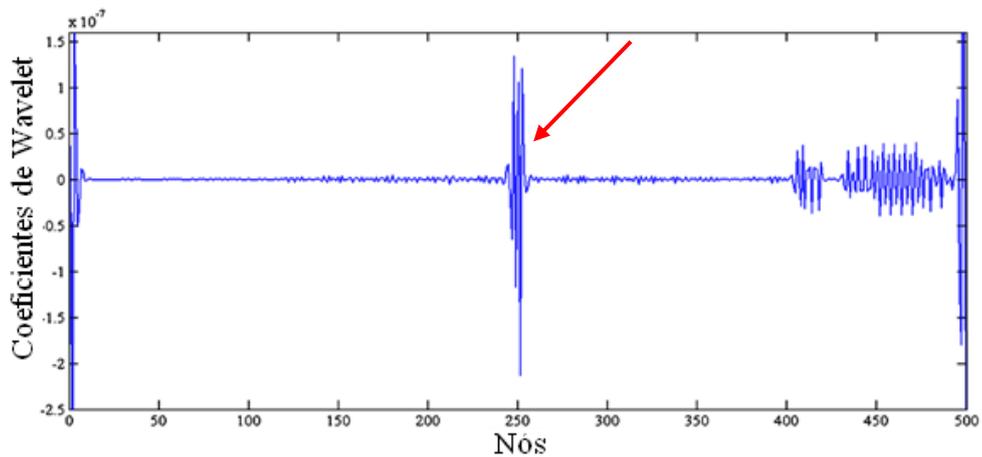


Figura 4.15 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando bior6.8 (L/2).

Nas quatro situações de danos, as duas *wavelets*-mãe foram capazes de detectar a localização exata do dano através de elevados picos na região danificada. Os gráficos apresentaram pequenas perturbações nas extremidades, devido às descontinuidades geométricas no engaste e na extremidade livre.

A situação 1 da análise estática foi submetida a uma contaminação nos sinais que foi feita distribuindo gaussianamente uma incerteza de 1% e 2% ao longo de todo o sinal, conforme explicado no item 3.3, com o objetivo de avaliar o efeito do ruído no processo de detecção de danos.

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam os resultados da aplicação das transformadas de *wavelet* para o primeiro caso com 1%.

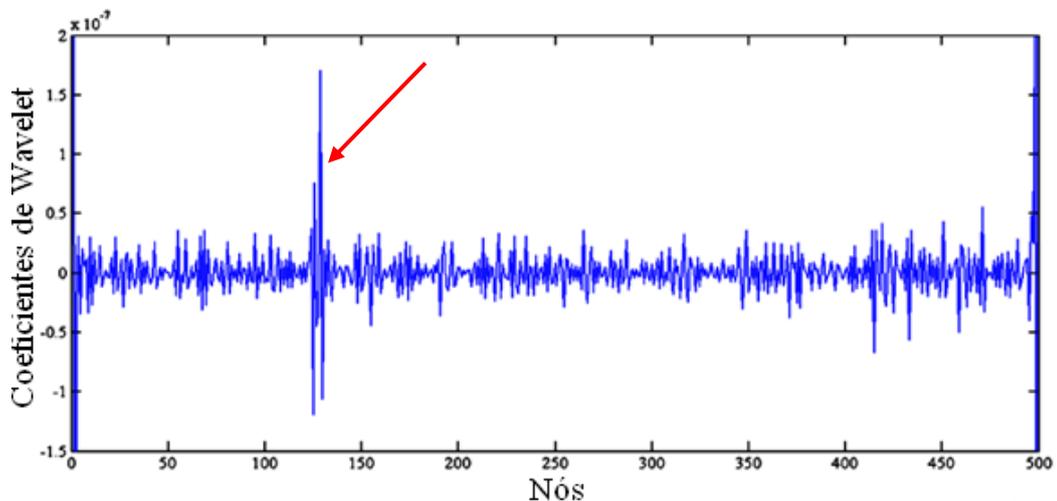


Figura 4.16 – Coeficientes de wavelet da situação 1 caso 1 usando db2 (L/4).

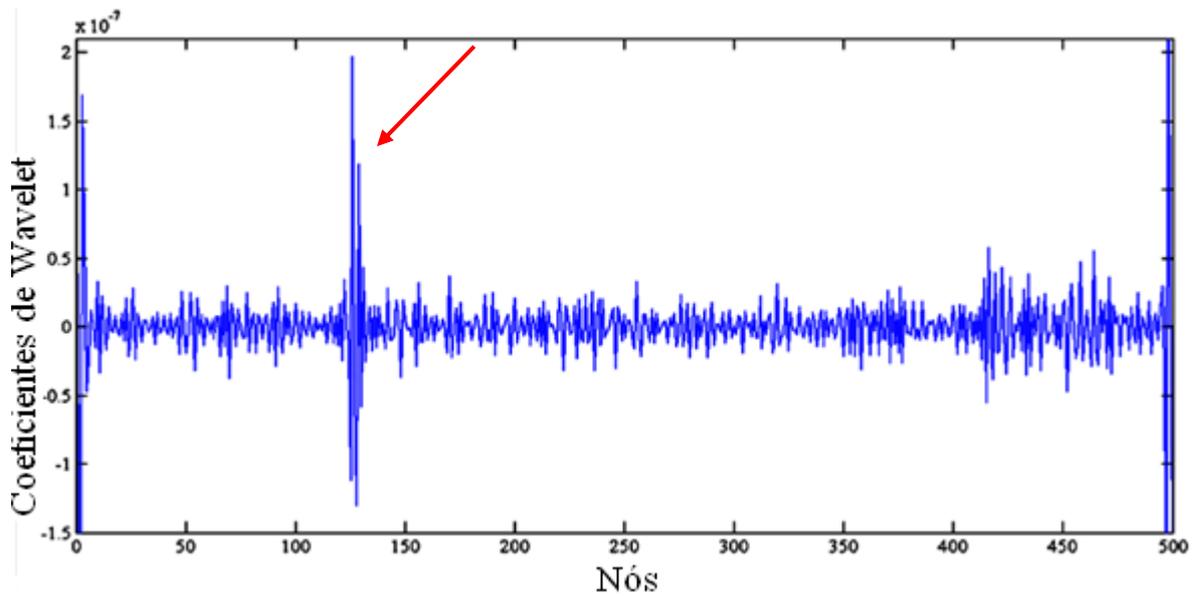


Figura 4.17 – Coeficientes de wavelet da situação 1 caso 1 usando bior6.8 (L/4).

Comparando os gráficos das Figuras 4.8 e 4.9 do sinal, sem o erro, com os gráficos das Figuras 4.16 e 4.17, observa-se que a introdução do erro provocou um aumento nas perturbações ao longo do sinal, mas, mesmo assim, a fissura foi detectada com precisão.

A mesma resposta estática do caso 1 foi usada para o caso 2, com a diferença que no caso 2 a resposta foi contaminada com um erro de 2% e, em seguida, calculou-se a transformada discreta de *wavelet* para localizar a posição da fissura. As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os resultados desta transformada para as wavelets-mãe de db2 e bior6.8.

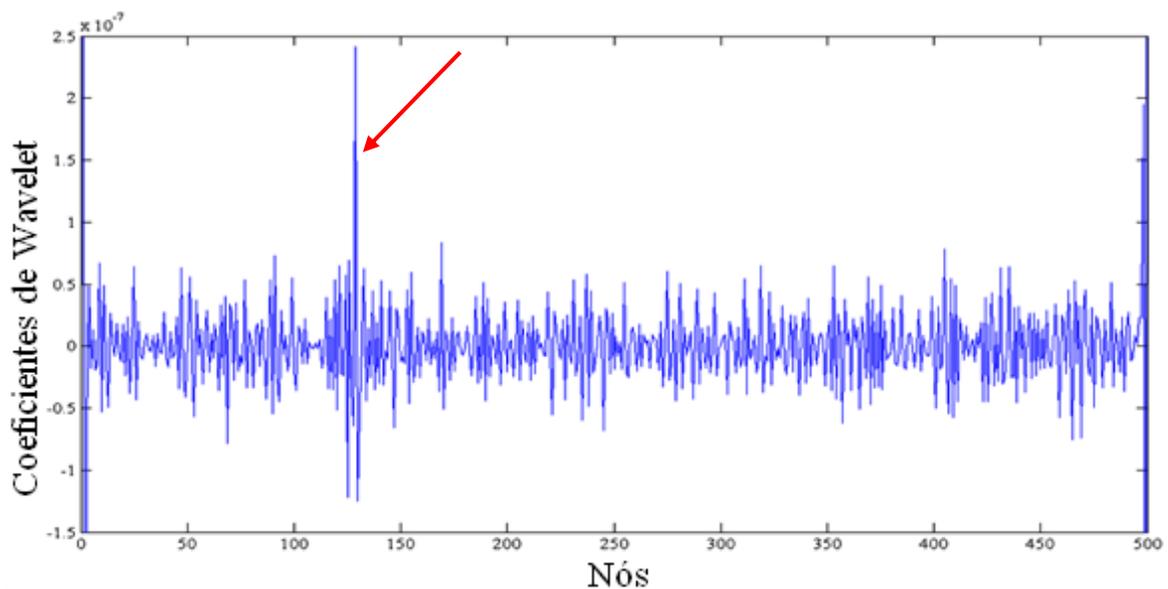


Figura 4.18- Coeficientes de wavelet da situação 1 caso 2 usando db2 (L/4).

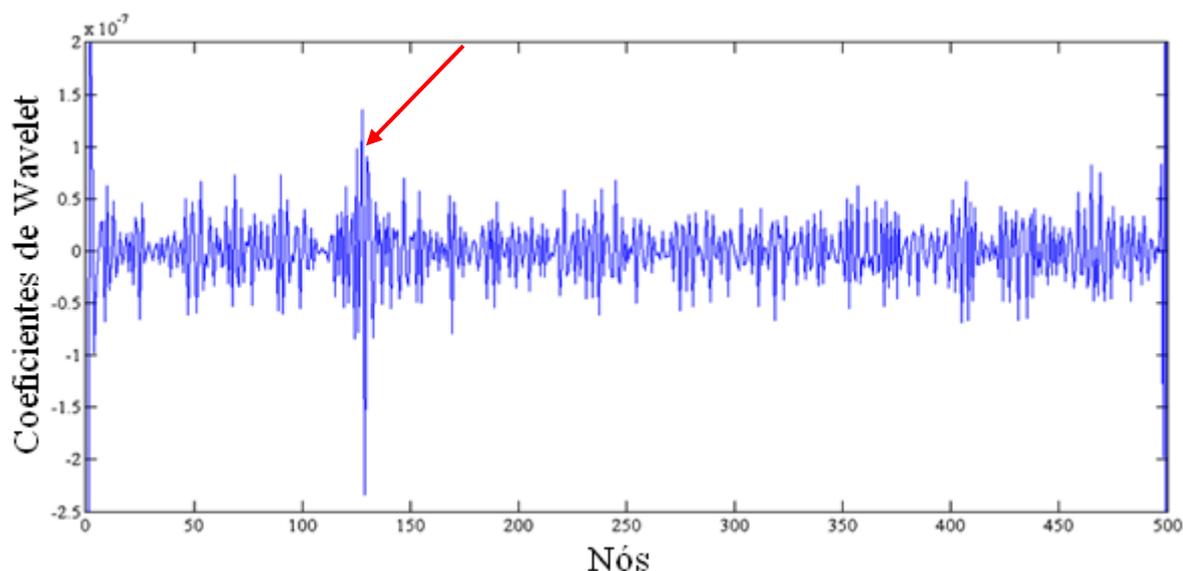


Figura 4.19 – Coeficientes de wavelet da situação 1 caso 2 usando bior6.8 (L/4).

Comparando os gráficos das Figuras 4.8 e 4.9 do sinal, sem o erro com os gráficos das Figuras 4.18 e 4.19, observa-se que, mesmo introduzindo um erro de 2% no sinal, a fissura pode ser detectada com precisão.

A Tabela 4.3 abaixo apresenta os valores máximos dos coeficientes discretos de wavelet localizados na posição do dano obtidos na análise da resposta estática da situação 1, sem o erro, com 1% de erro e 2% de erro para as duas wavelets-mãe db2 e bior6.8 .

Tabela 4.3 - Coeficientes discretos de Wavelet para os casos com erro, $\times 10^{-7}$

% Erro	Situação 1 (Resposta Estática)	
	Db2	Bior6.8
Sem erro	1,98	1,97
1%	1,73	1,99
2%	2,48	2,47

Pela tabela acima, podemos observar que, para todos os casos analisados, a introdução do erro aumentou a amplitude máxima do valor do coeficiente de *wavelet* na posição do dano, com exceção do caso com 1% do dano utilizando a db2 que teve o valor do coeficiente reduzido.

4.1.1.2 Análise modal

Inicialmente foi feita uma análise da influência da fissura nas frequências naturais da viga para, em seguida, aplicar as transformadas de *wavelet* com o objetivo de detectar o dano.

As frequências naturais e os modos de vibração da viga em balanço, com e sem fissura, foram obtidas pela análise modal realizada no ANSYS e a primeira frequência natural para as quatro situações de dano estão apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Frequência fundamental (Hz) da viga em balanço

Tamanho da fissura(m)	Localização da fissura a partir do engaste	
	d=L/4	d=L/2
Sem fissura	332,49	332,49
0,025	304,56	324,30
0,0375	272,38	312,43

Pela Tabela 4.4, observa-se que o tamanho e a posição da fissura influenciaram no valor da frequência natural da viga, pois o aumento no tamanho da fissura provoca diminuição nos valores das frequências. Além disso, à medida que a fissura se afasta do engaste, a frequência aumenta, pois nesta situação a viga é mais rígida do que na situação em que a fissura está mais próxima ao engaste.

Para efeito de verificação do resultado obtido pelo ANSYS da viga sem a fissura, a primeira frequência natural foi comparada com o valor obtido através da teoria da mecânica do contínuo, onde as frequências naturais em Hz, segundo Blevins (1979), são expressas por:

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (4.1)$$

Sendo λ o parâmetro adimensional que depende do modo que deseja ser calculado, E o módulo de elasticidade, I o momento de inércia, L o comprimento da viga e m a massa por unidade de comprimento. O valor de λ para o primeiro modo de vibração de uma viga engaste-livre vale 1,8751. O resultado desta verificação é apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.5 – Frequência natural (Hz) da viga sem fissura

Modo	Mecânica do Contínuo	ANSYS
1º	326,144	332,49

O valor do primeiro modo de vibração obtido no ANSYS foi próximo do valor calculado pela formulação da mecânica do contínuo.

Os três primeiros modos de vibração da viga em balanço obtidos no ANSYS são apresentados nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22.

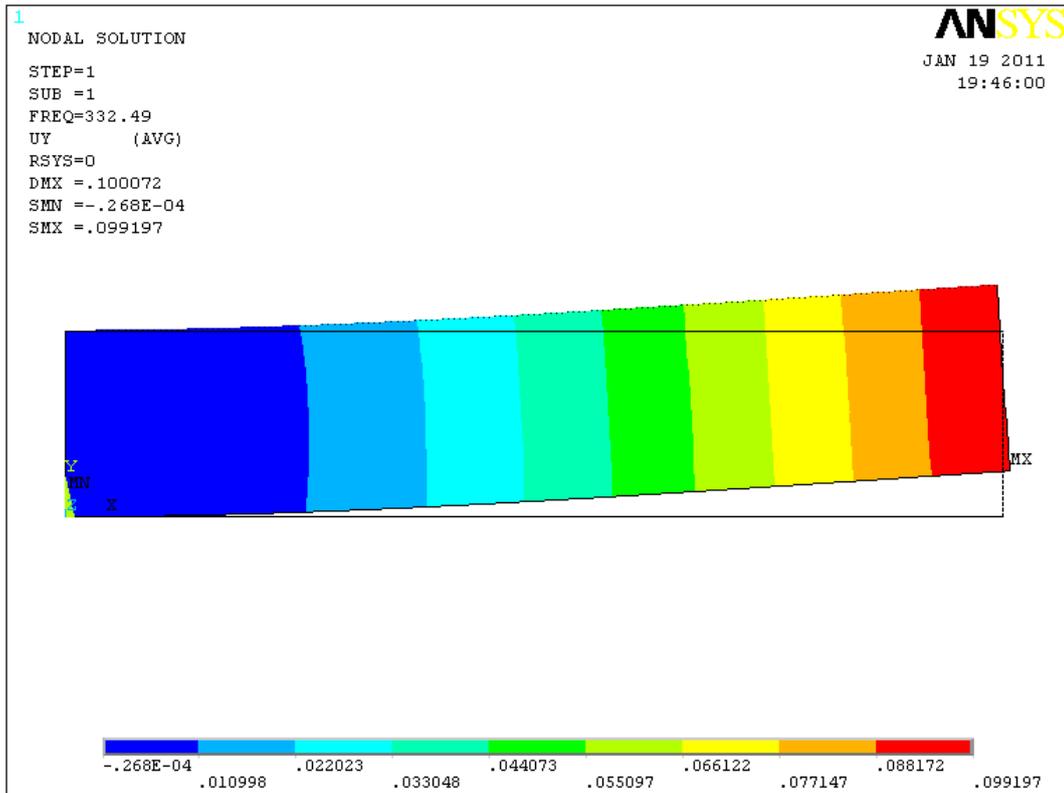


Figura 4.20 - Primeiro modo de vibração da viga em balanço obtido no ANSYS.

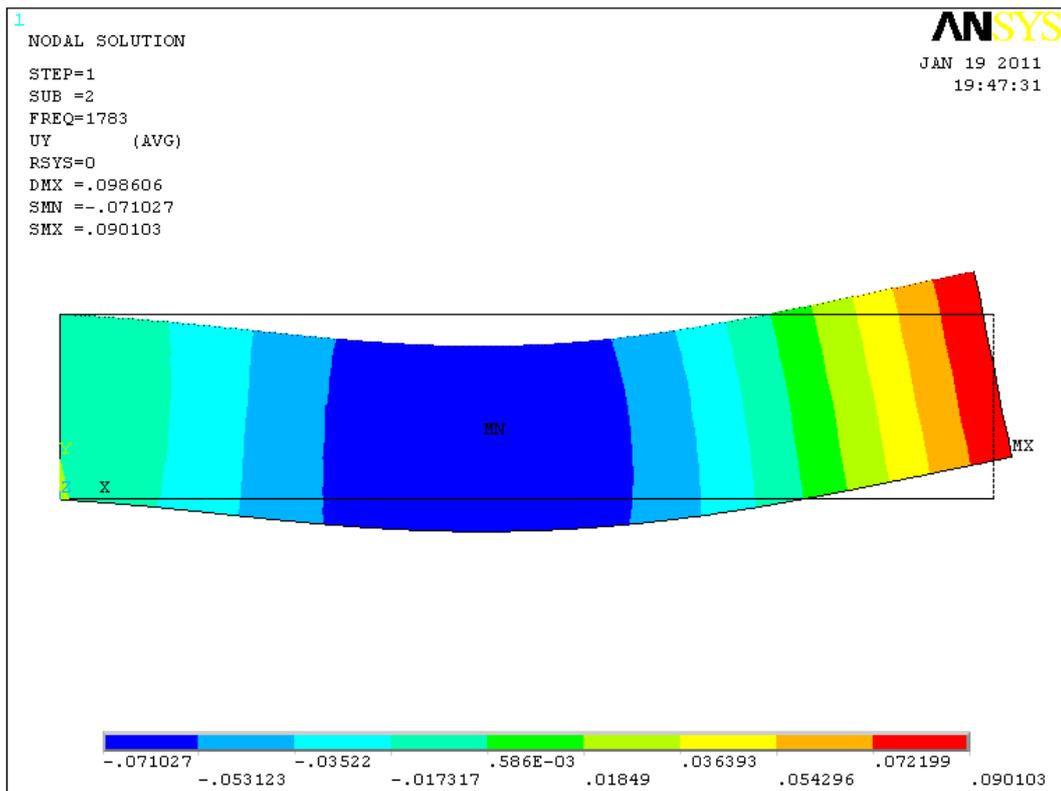


Figura 4.21 – Segundo modo de vibração da viga em balanço obtido no ANSYS.

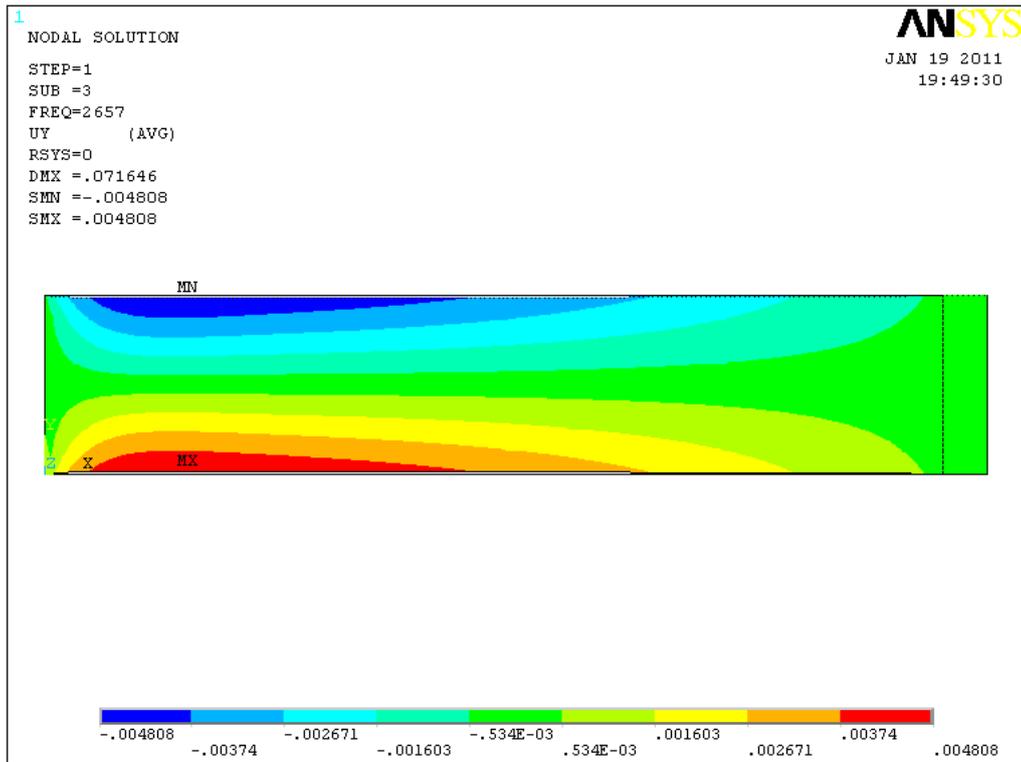


Figura 4.22 - Terceiro modo de vibração da viga em balanço obtido no ANSYS.

Os dois primeiros modos de vibração dos 500 nós da linha inferior da viga sem a fissura e com a fissura para a situação 1 são apresentados nas Figuras 4.23 e 4.24.

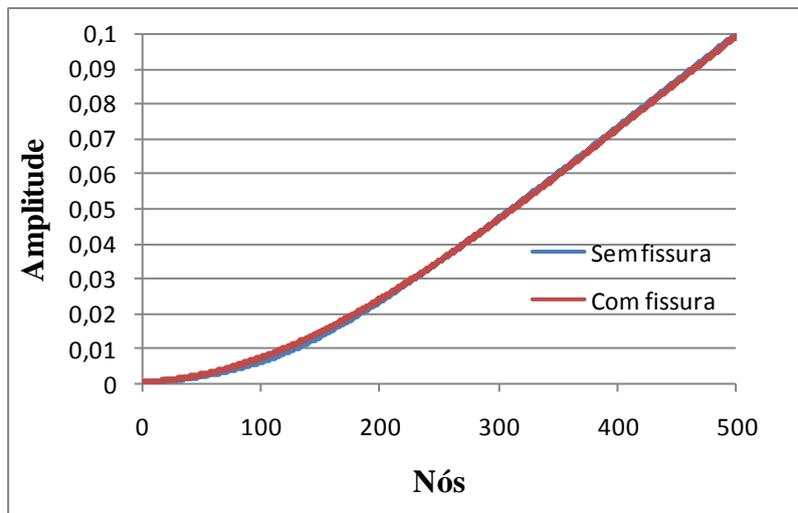


Figura 4.23 - Primeiro modo de vibração da viga em balanço

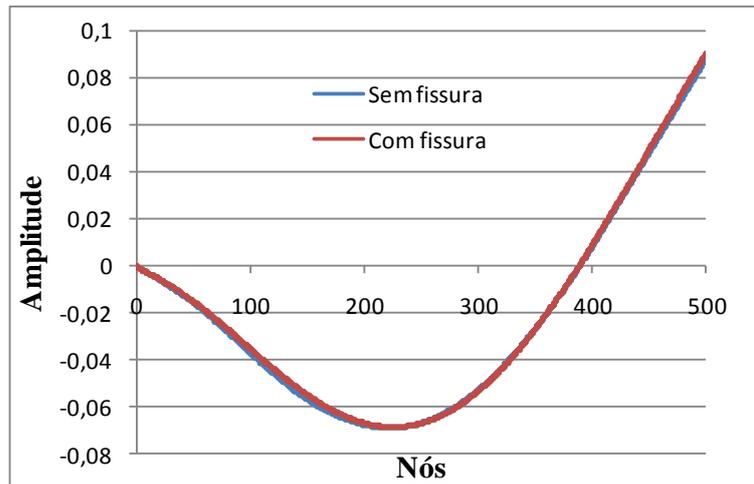


Figura 4.24- Segundo modo de vibração da viga em balanço.

As variações nos modos de vibração da viga em balanço, com e sem a fissura, não foram distintas o suficiente para identificar a presença da fissura, isso ocorre devido ao fato do tamanho da fissura ser pequeno.

Os modos de vibração obtidos na análise modal foram exportados para o MATLAB e, em seguida, a transformada discreta de wavelet foi aplicada para a obtenção dos coeficientes de wavelet, utilizando as *wavelets*-mãe db2 e bior6.8.

Os resultados da aplicação das transformadas discreta de wavelet para as quatro situações de dano da Tabela 4.2 estão apresentados abaixo.

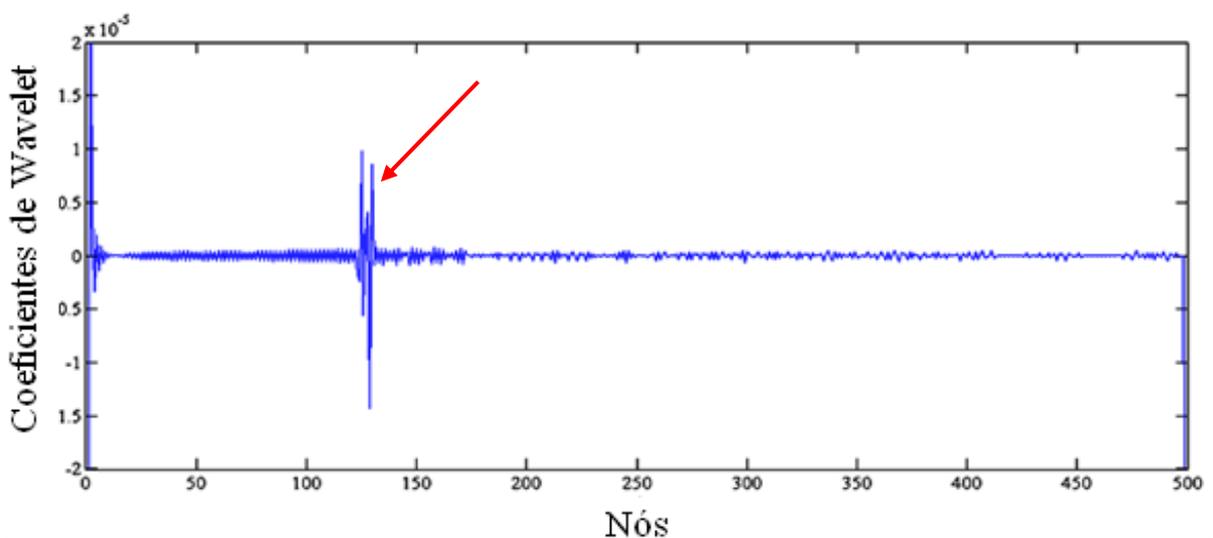


Figura 4.25 - Coeficientes de wavelet da situação 1 usando db2 (L/4).

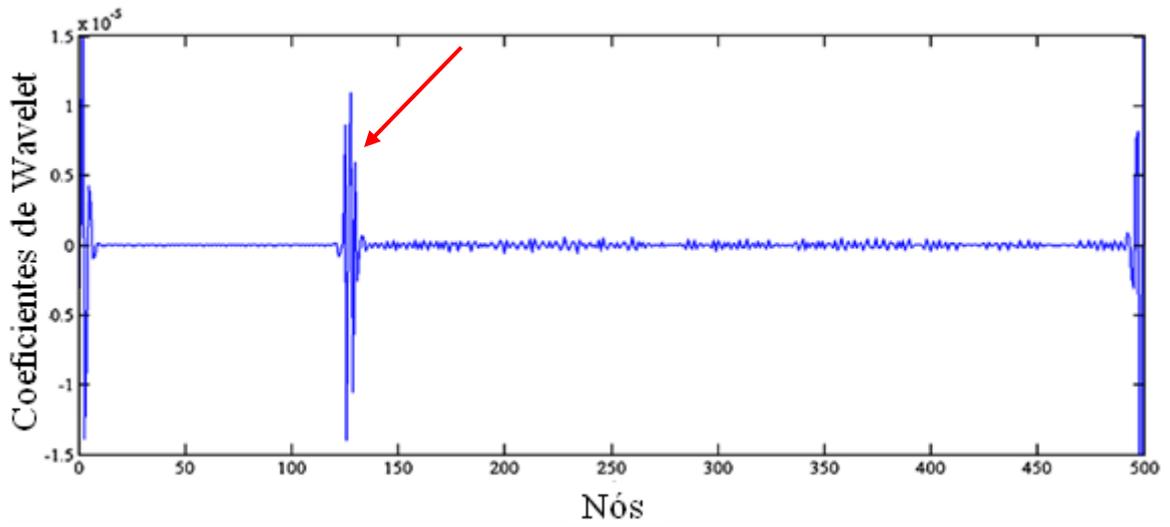


Figura 4.26 – Coeficientes de wavelet da situação 1 usando bior6.8 (L/4).

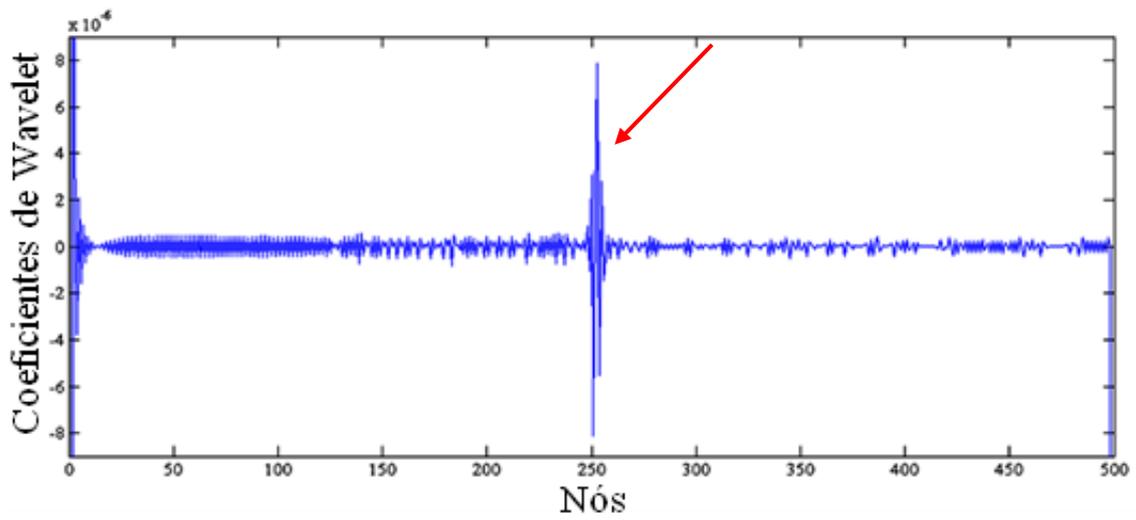


Figura 4.27 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando db2 (L/2).

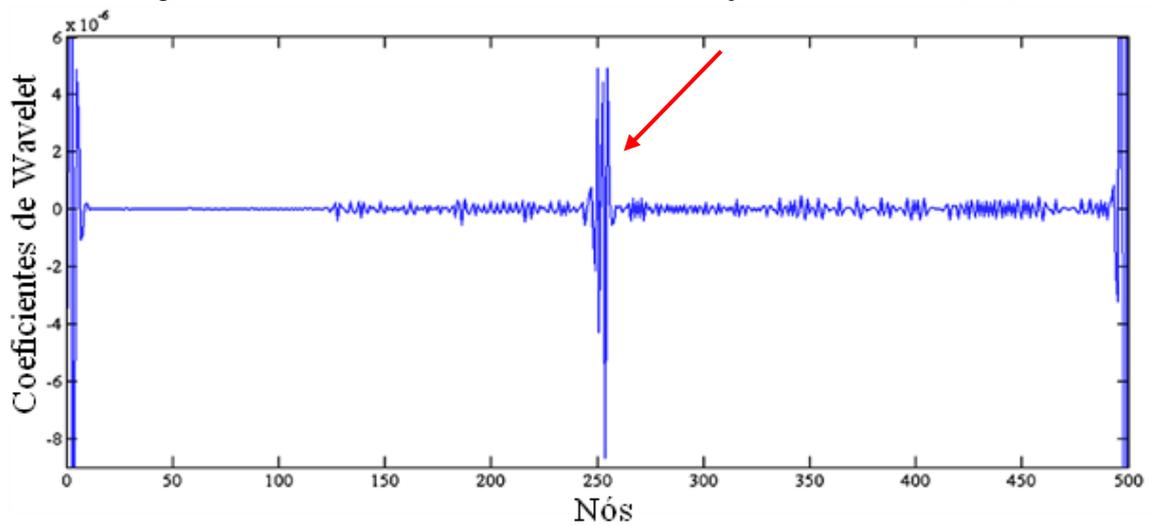


Figura 4.28 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando bior6.8 (L/2).

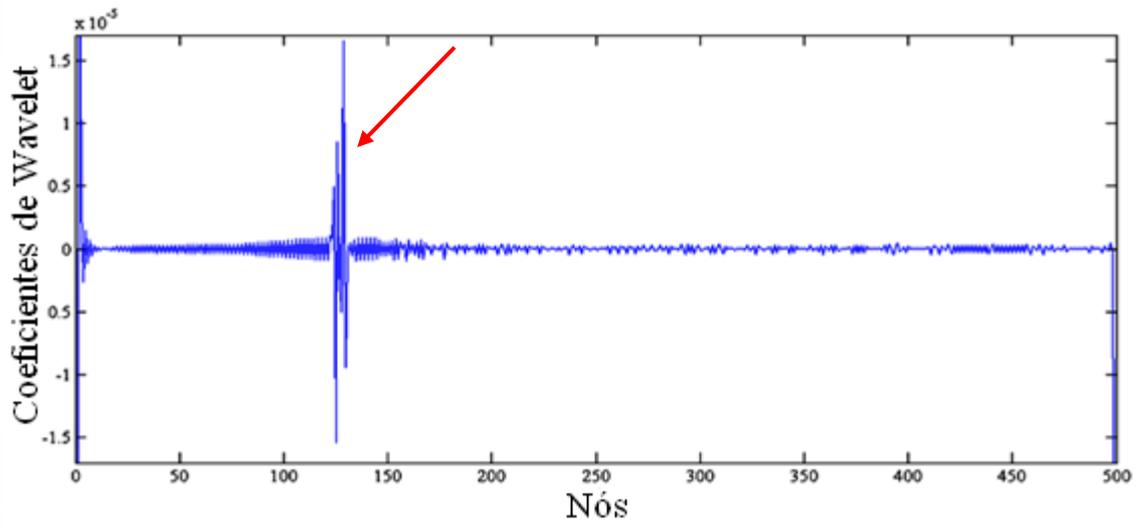


Figura 4.29 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando db2 (L/4).

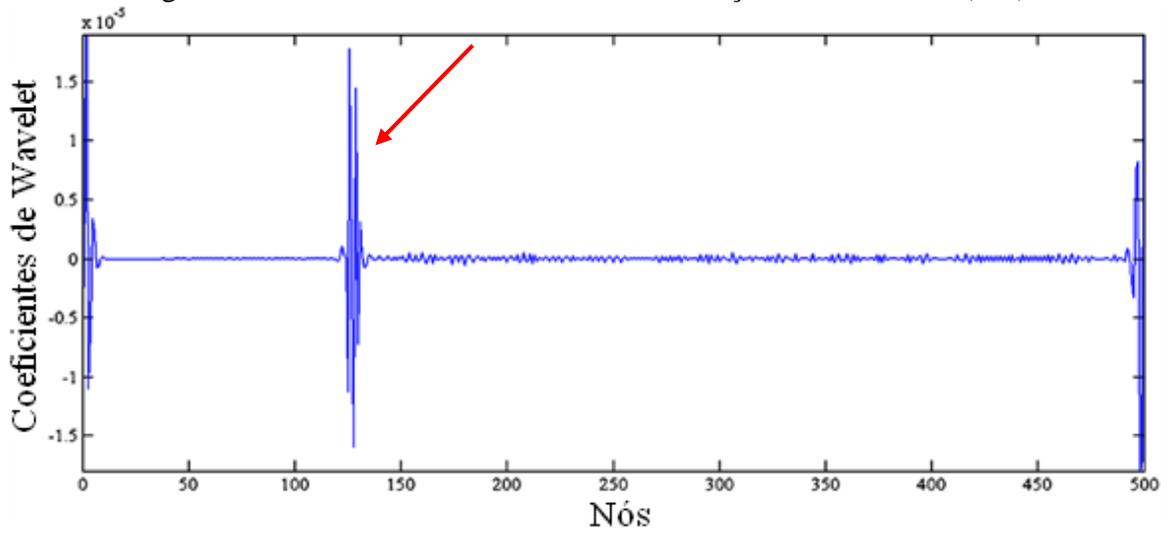


Figura 4.30 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando bior6.8 (L/4).

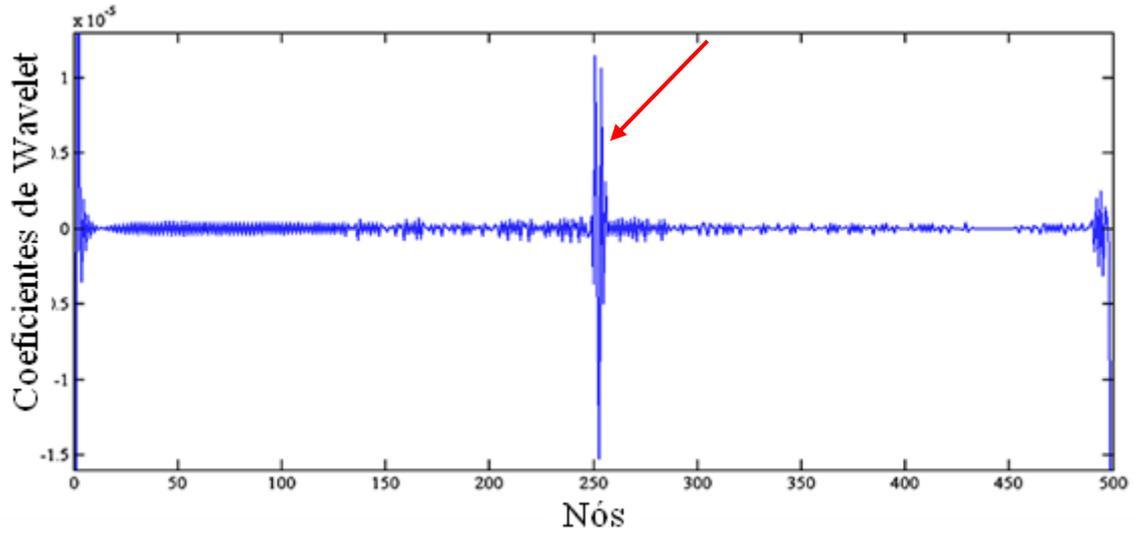


Figura 4.31 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando db2 (L/2).

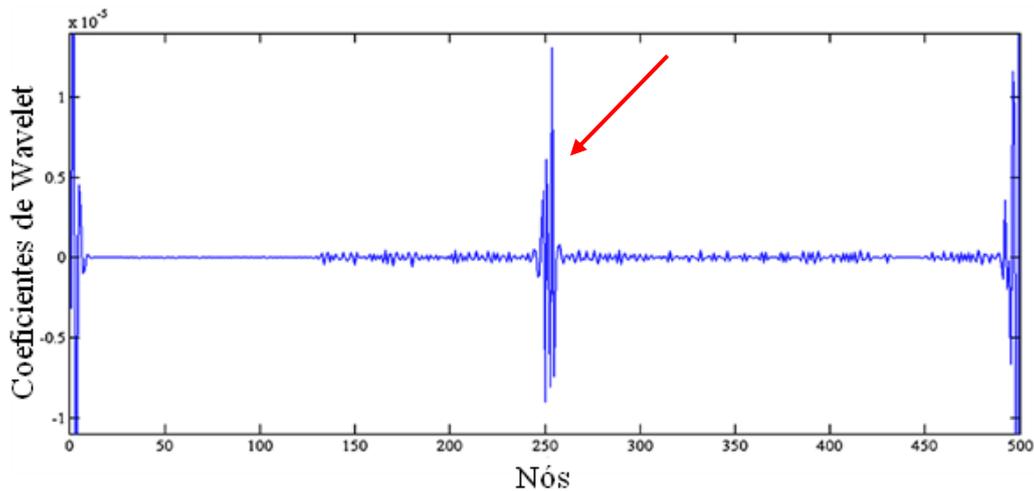


Figura 4.32 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando bior6.8 (L/2).

Nas quatro situações de danos, as duas *wavelets*-mãe foram capazes de detectar a localização exata do dano através de elevados picos na região danificada. Os gráficos da análise modal apresentaram perturbações mais suaves ao longo de todo o sinal em relação aos gráficos obtidos na análise estática.

4.1.2 Viga Biengastada

4.1.2.1 Análise estática

A viga biengastada apresentada na Figura 4.5 foi submetida à uma carga concentrada no meio do vão de 500kN. A deformada da viga biengastada, sem o dano, obtida no ANSYS é apresentada na Figura 4.33 e a resposta estática dos deslocamentos nodais da viga, sem fissura e com fissura da situação 1, é apresentada na Figura 4.34.

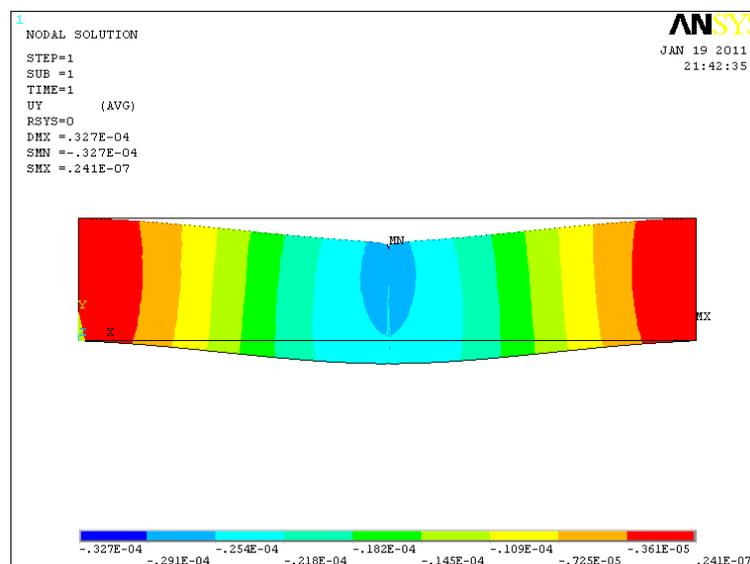


Figura 4.33 - Deformada da viga biengastada obtida no ANSYS.

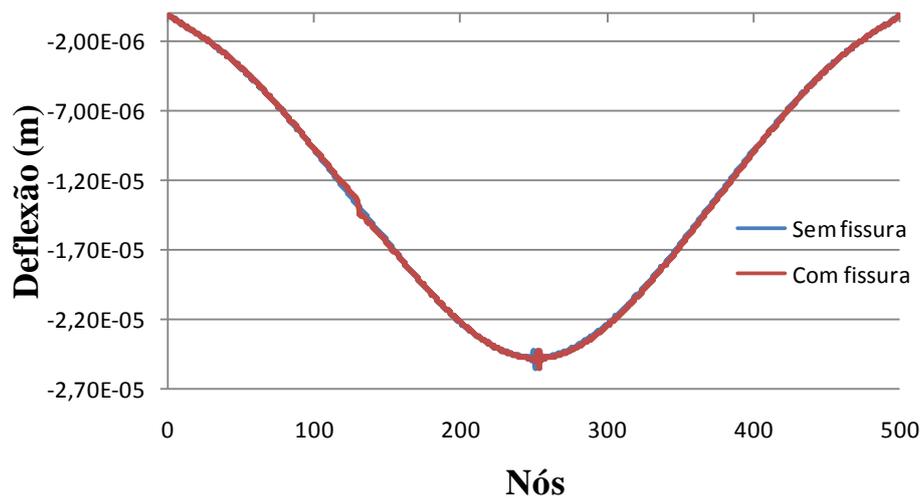


Figura 4.34 – Deslocamento da viga biengastada submetida à carga estática.

Os deslocamentos nodais obtidos nas quatro situações de dano da Tabela 4.2 foram exportados para o MATLAB e, em seguida, a transformada discreta de *wavelet* foi aplicada para a obtenção dos coeficientes de wavelet utilizando as *wavelets*-mãe db2 e bior6.8. Os resultados da aplicação das transformadas discretas de wavelet nos deslocamentos nodais estão apresentados abaixo.

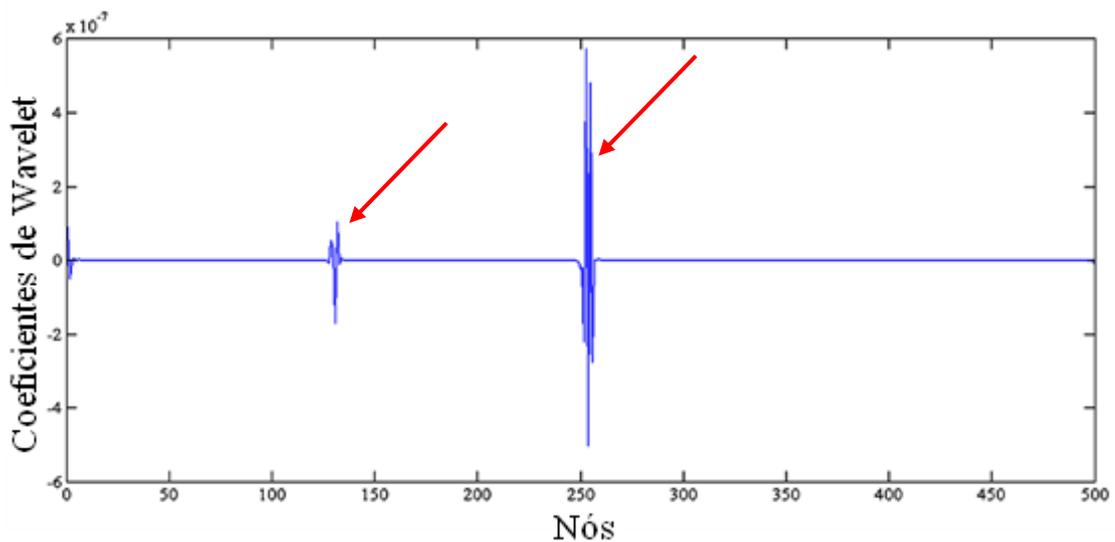


Figura 4.35 – Coeficientes de wavelet da situação 1 usando db2 (L/4).

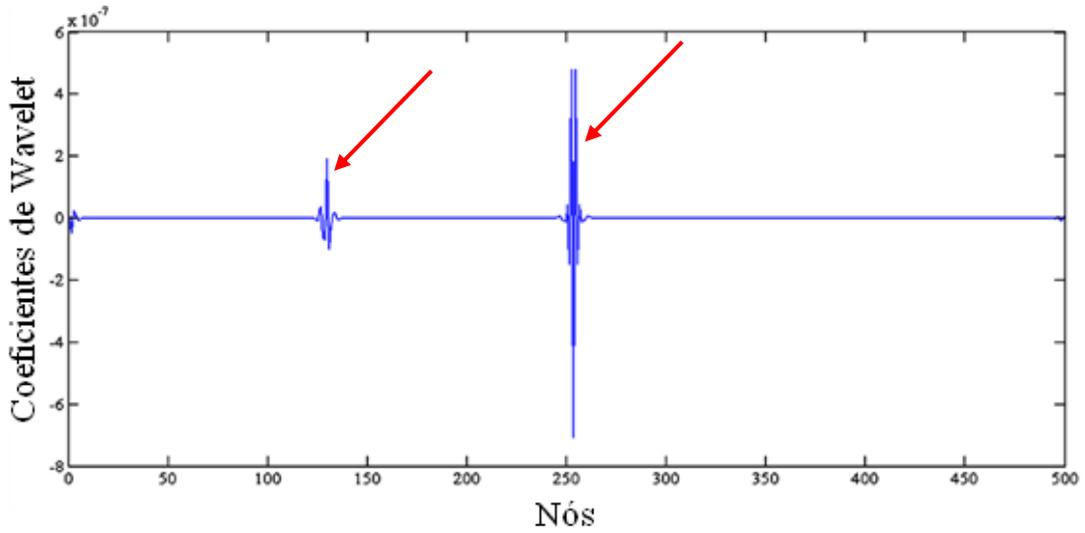


Figura 4.36 – Coeficientes de wavelet da situação 1 usando bior6.8 (L/4).

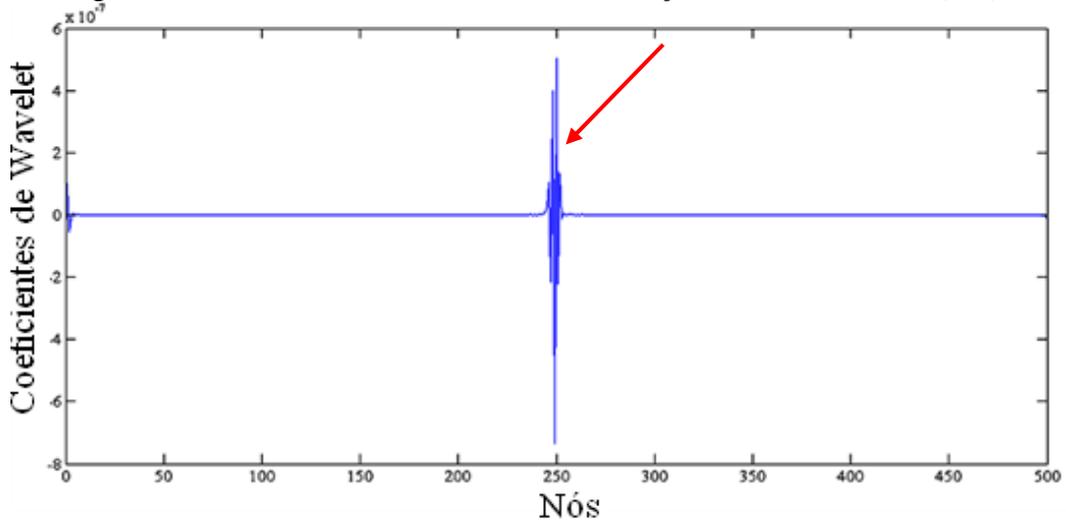


Figura 4.37 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando db2 (L/2).

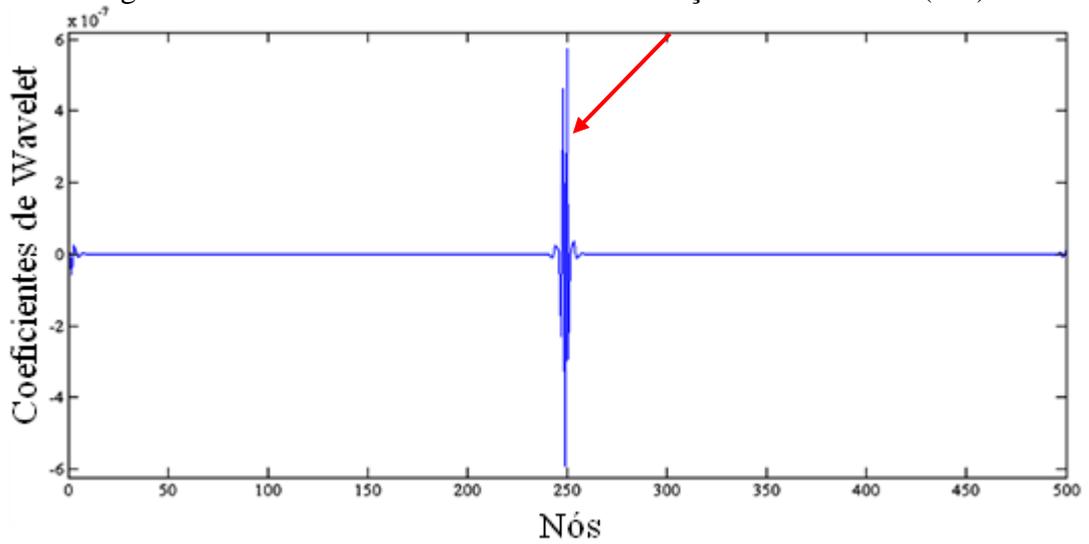


Figura 4.38 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando bior6.8 (L/2).

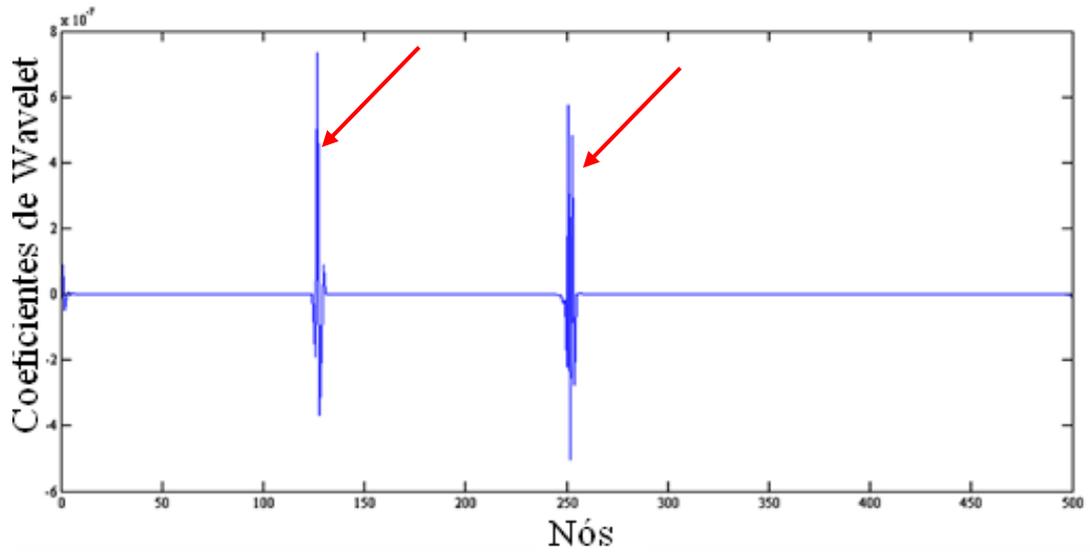


Figura 4.39 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando db2 (L/4).

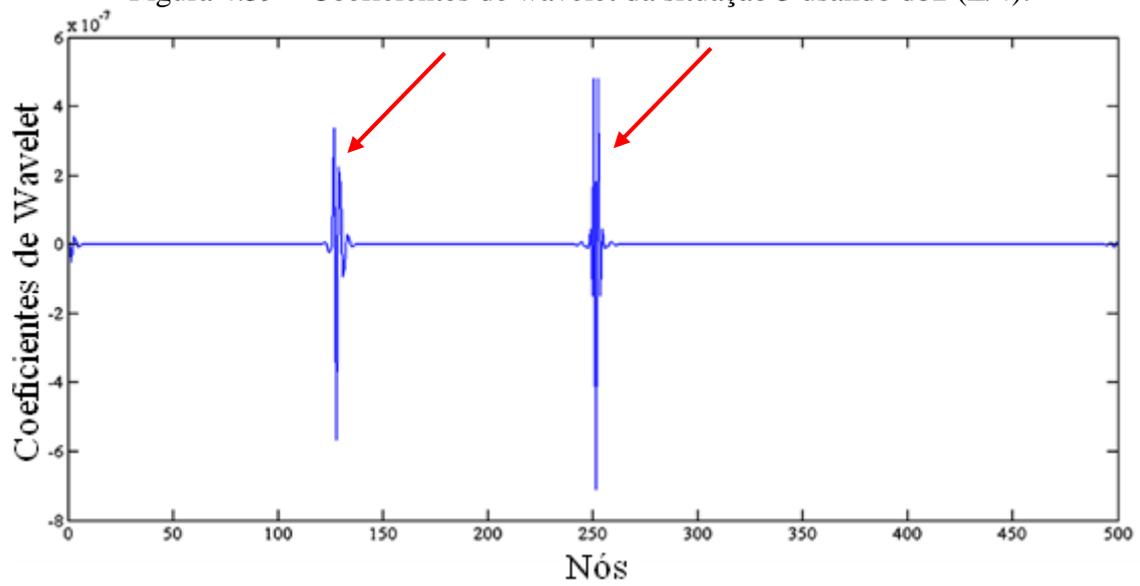


Figura 4.40 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando bior6.8 (L/4).

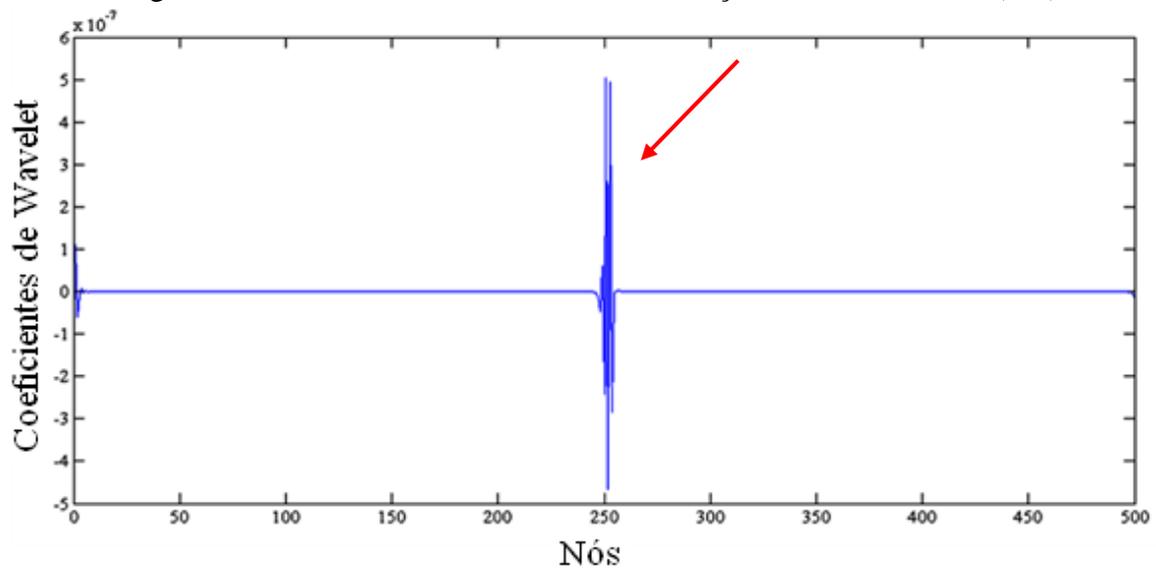


Figura 4.41 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando db2 (L/2).

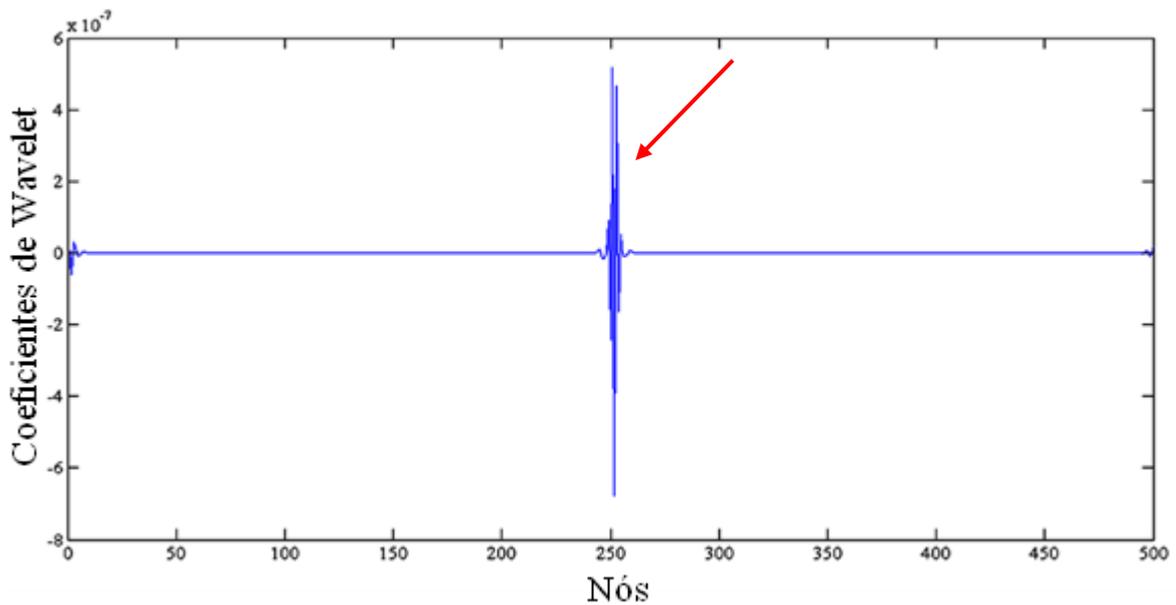


Figura 4.42 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando bior6.8 (L/2).

Para as situações 1 e 3, as transformadas de wavelet foram capazes de detectar a posição da fissura e da aplicação da carga concentrada. Além disso, para todas as demais situações a posição da fissura foi detectada e as perturbações nos engastes praticamente desapareceram.

4.1.2.2 Análise modal

A mesma análise feita para a viga em balanço para analisar o efeito da fissura nas frequências naturais foi feita para a viga biengastada com e sem fissura

A primeira frequência natural para as quatro situações de dano estão apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Frequência fundamental (Hz) da viga biengastada

Tamanho da fissura(m)	Localização da fissura a partir do engaste	
	d=L/4	d=L/2
Sem fissura	1747,5	1747,5
0,025	1742,9	1667,80
0,0375	1736,2	1597,5

A presença da fissura na viga biengastada teve uma influência semelhante à viga em balanço, pois o aumento do tamanho da fissura provocou diminuição nos valores das frequências naturais.

O resultado obtido pelo ANSYS da primeira frequência natural da viga biengastada, sem a fissura, também foi comparado com o valor obtido através da teoria da mecânica do contínuo. O resultado desta verificação está apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Frequência natural da viga biengastada sem fissura (Hz)

Modo	Mecânica do Contínuo	ANSYS
1º	2075,31	1747,50

Na Tabela 4.7, observa-se uma diferença de 18% entre os valores das frequências naturais, esta diferença poderia ser diminuída utilizando-se uma malha mais grosseira. Tal verificação foi feita, mas os resultados não foram aqui apresentados.

Os três primeiros modos de vibração da viga biengastada obtidos no ANSYS são apresentados nas Figuras 4.43, 4.44 e 4.45.

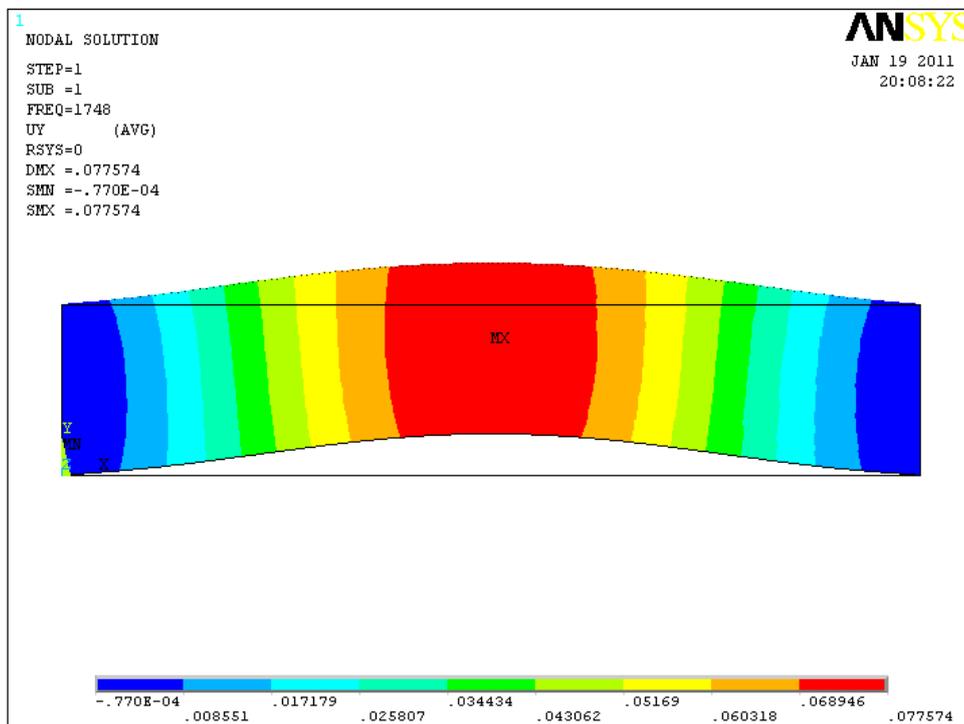


Figura 4.43 - Primeiro modo de vibração da viga biengastada obtido no ANSYS.

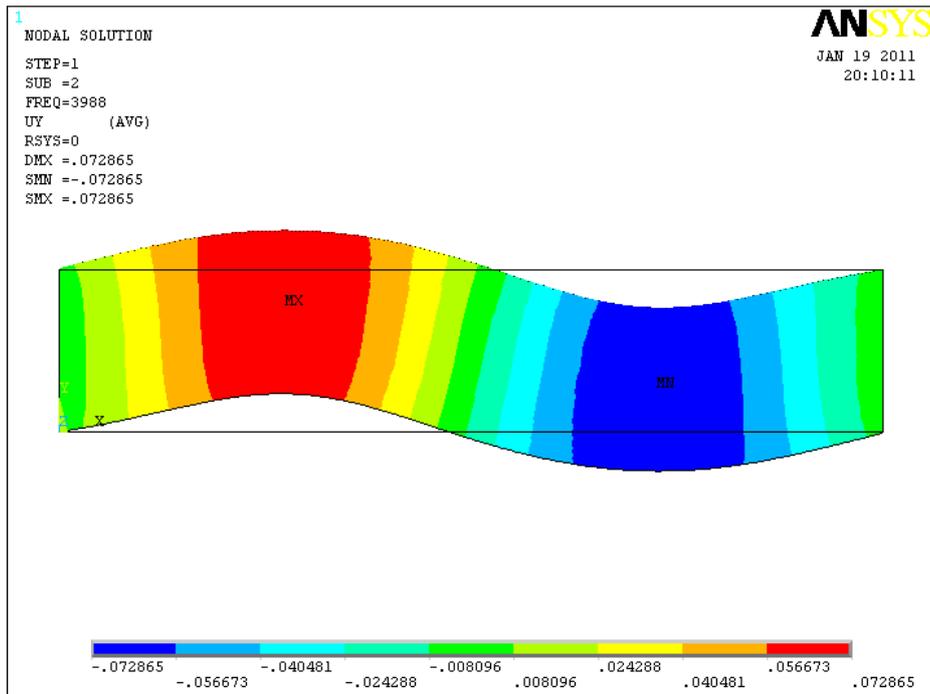


Figura 4.44 - Segundo modo de vibração da viga biengastada obtido no ANSYS.

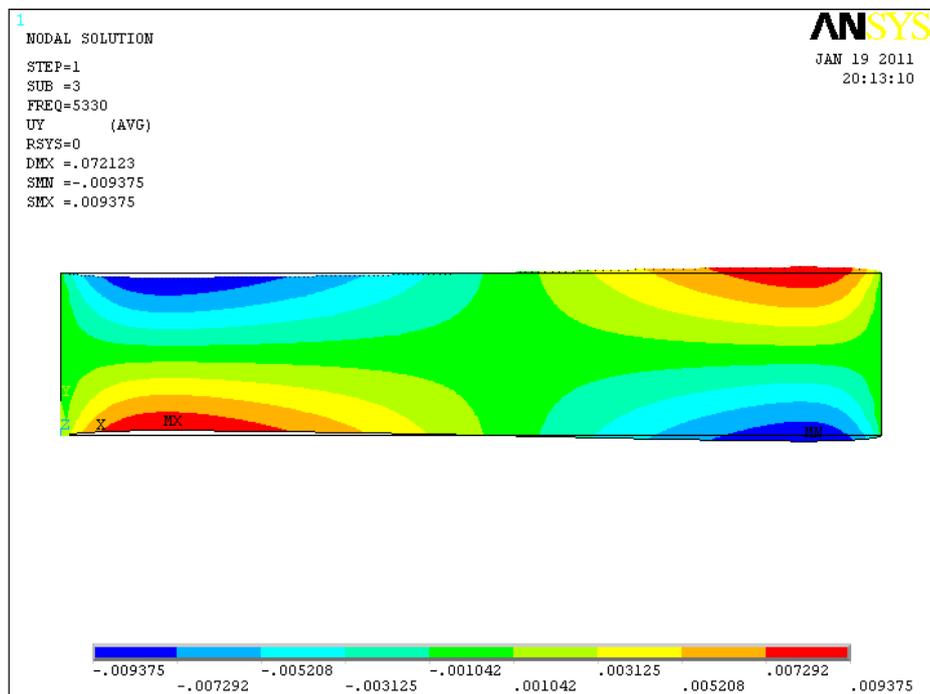


Figura 4.45 -Terceiro modo de vibração da viga biengastada obtido no ANSYS.

Os dois primeiros modos de vibração da viga biengastada, sem a fissura e com a fissura para a situação 1, são apresentados nas Figuras 4.46 e 4.47.

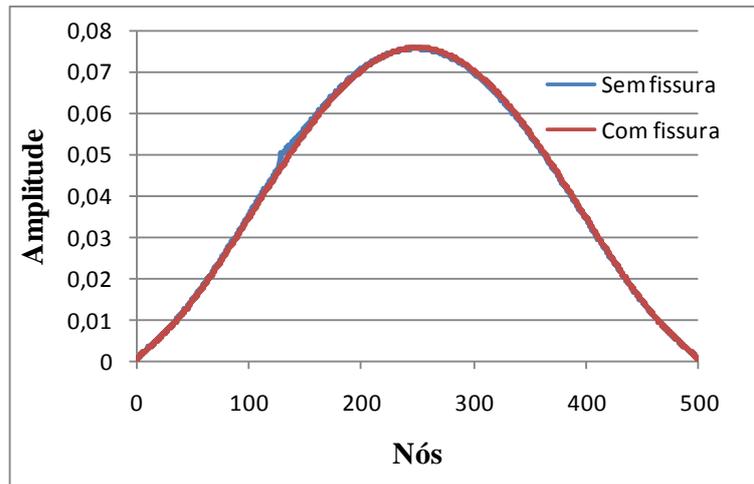


Figura 4.46- Primeiro modo de vibração da viga biengastada.

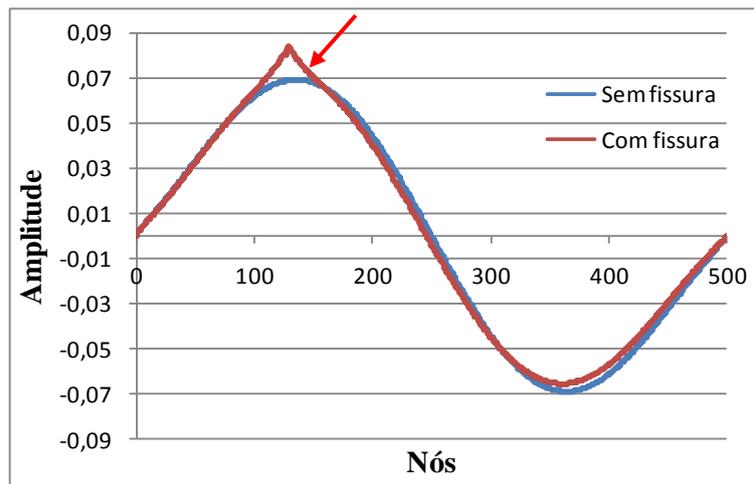


Figura 4.47- Segundo modo de vibração da viga biengastada.

Conforme esperado, a presença da fissura para na viga biengastada elevou os valores das frequências naturais em relação à viga anterior. Além disso, o segundo modo de vibração apresentou uma certa sensibilidade à presença da fissura (nó 125).

Os modos de vibração obtidos na análise modal foram exportados para o MATLAB e, em seguida, a transformada discreta de *wavelet* foi aplicada para a obtenção dos coeficientes de wavelet utilizando as *wavelets*-mãe db2 e bior6.8.

Os resultados da aplicação das transformadas discreta de *wavelet* para as quatro situações de dano da Tabela 4.2 são apresentados a seguir.

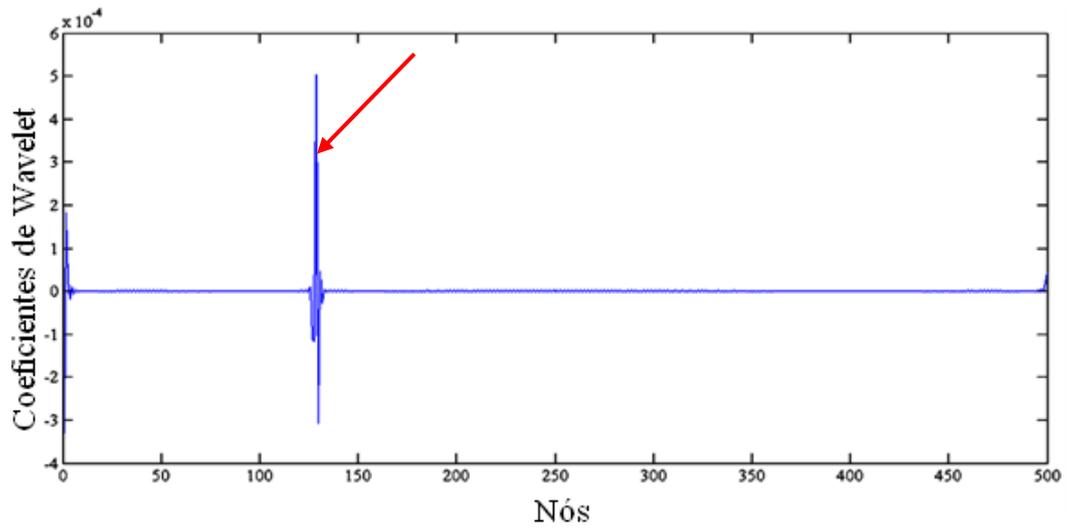


Figura 4.48 - Coeficientes de wavelet da situação 1 usando db2 (L/4).

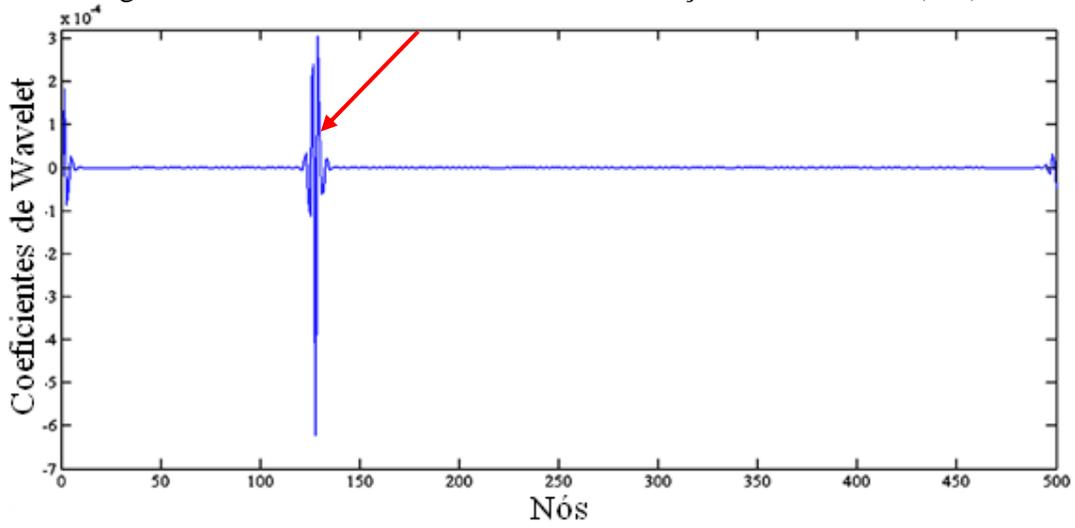


Figura 4.49 – Coeficientes de wavelet da situação 1 usando bior6.8 (L/4).

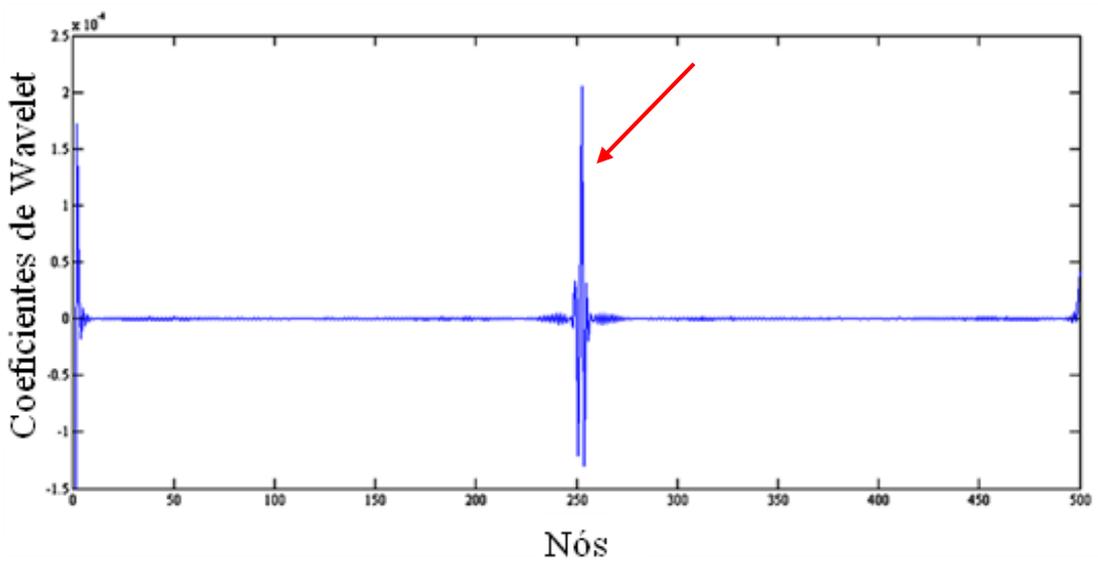


Figura 4.50 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando db2 (L/2).

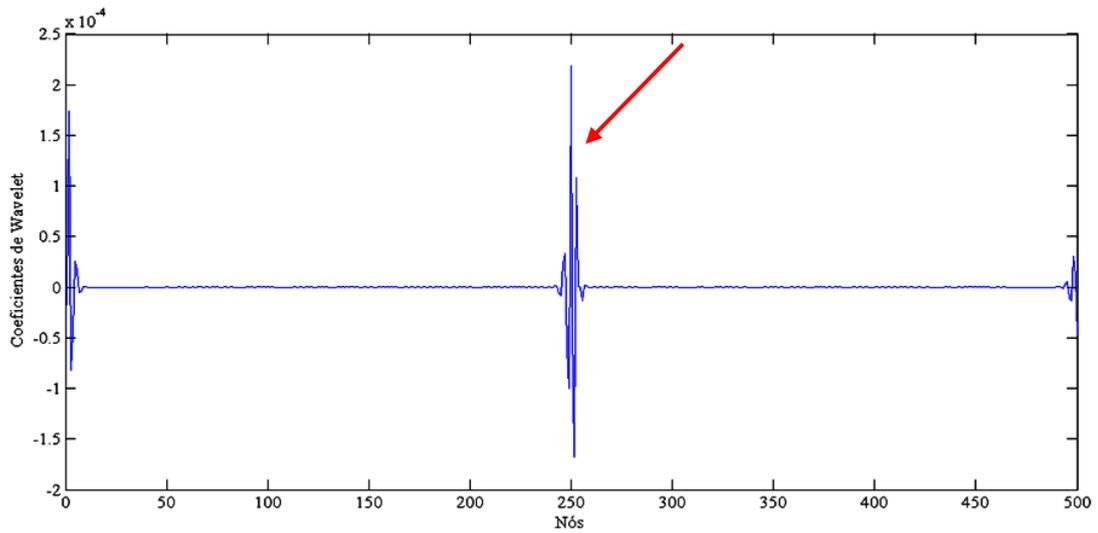


Figura 4.51 – Coeficientes de wavelet da situação 2 usando bior6.8 (L/2).

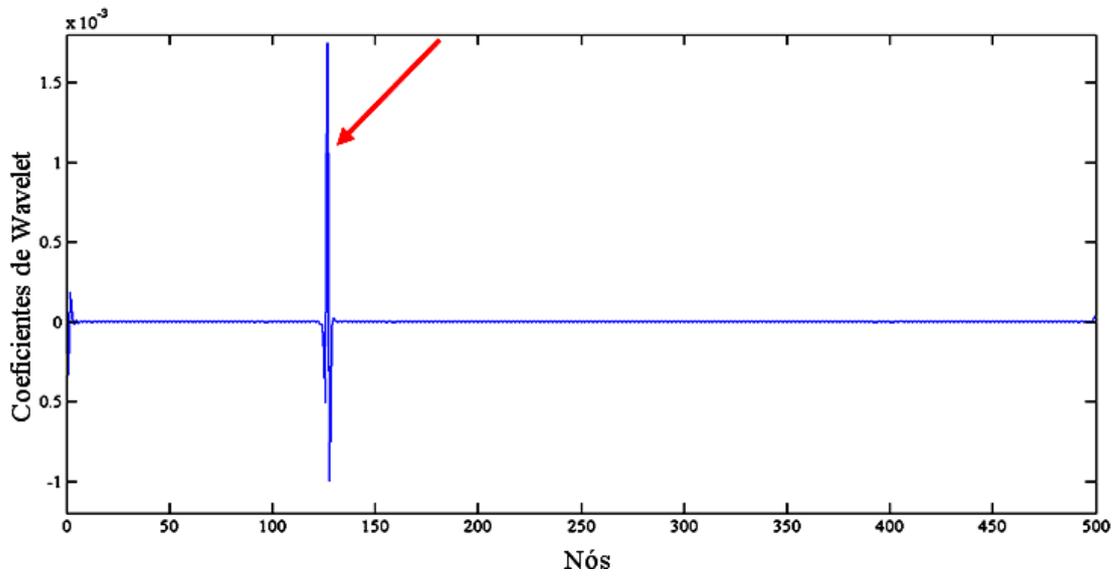


Figura 4.52 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando db2 (L/4).

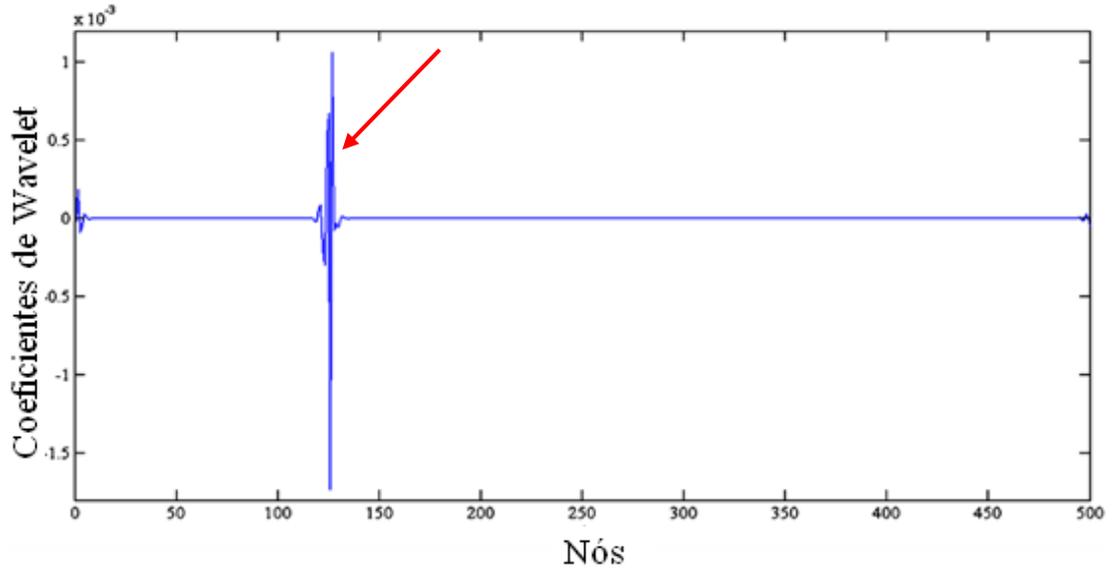


Figura 4.53 – Coeficientes de wavelet da situação 3 usando bior6.8 (L/4).

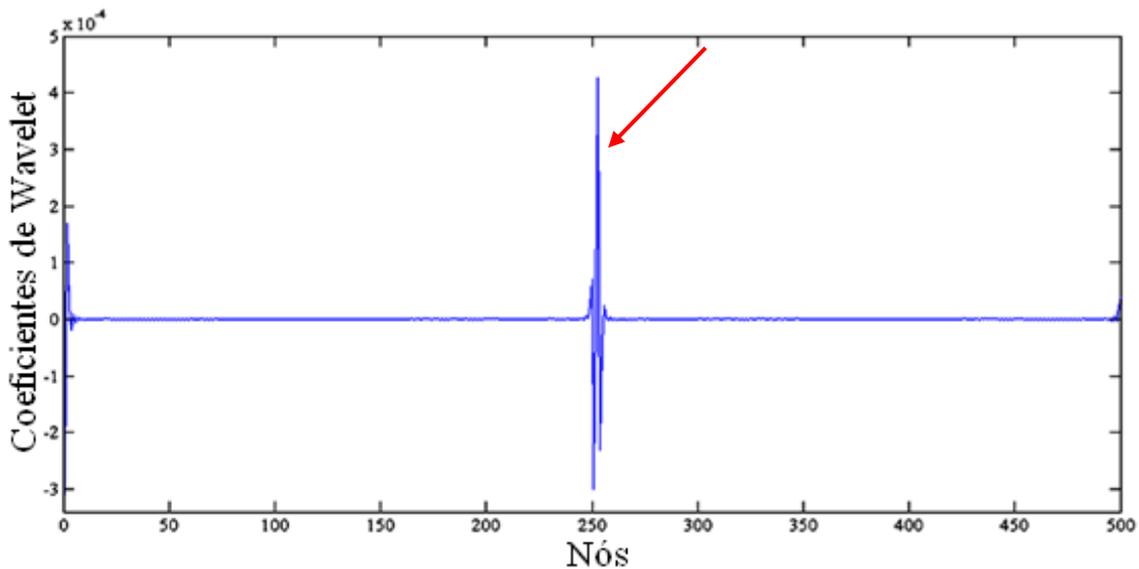


Figura 4.54 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando db2 (L/2).

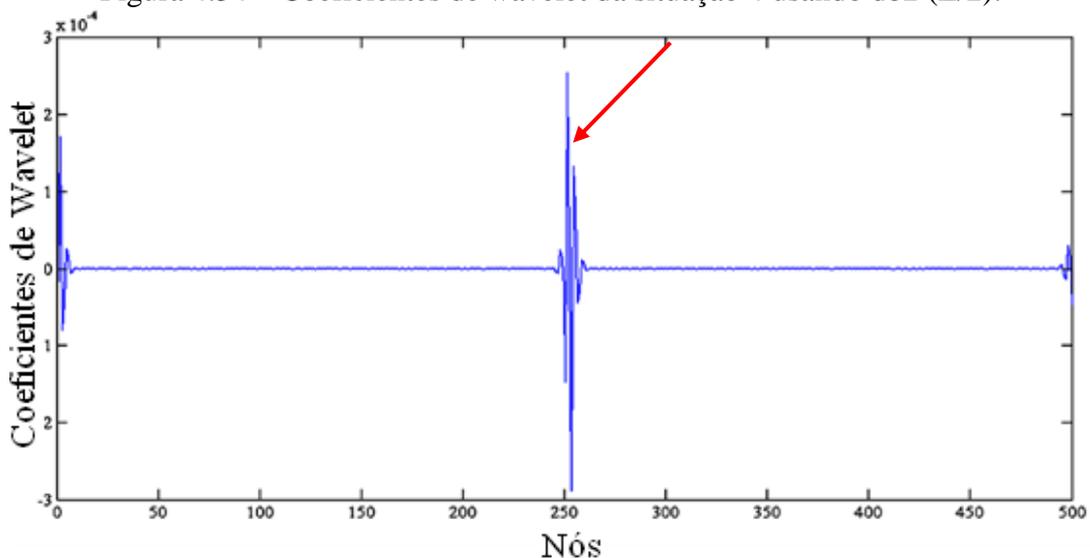


Figura 4.55 – Coeficientes de wavelet da situação 4 usando bior6.8 (L/2).

Para as quatro situações analisadas, a posição da fissura foi detectada e o comportamento dos coeficientes de wavelet nos engastes foi semelhante com o da análise estática, já que as perturbações nos engastes praticamente desapareceram.

4.2 DETECÇÃO DO DANO EM UMA TRELIÇA

No estudo de detecção do dano na treliça foi utilizado o elemento FRAME do SAP2000. Este elemento é definido com dois nós, tendo seis graus de liberdade por nó (deslocamentos: U_X , U_Y e U_Z e rotações: Rot_X , Rot_Y e Rot_Z) no modelo 3D ou quatro graus de liberdade por nó (deslocamentos: U_X e U_Y e rotações: Rot_X e Rot_Y) no modelo 2D. A geometria e o sistema de coordenadas podem ser vistas na Figura 4.56.

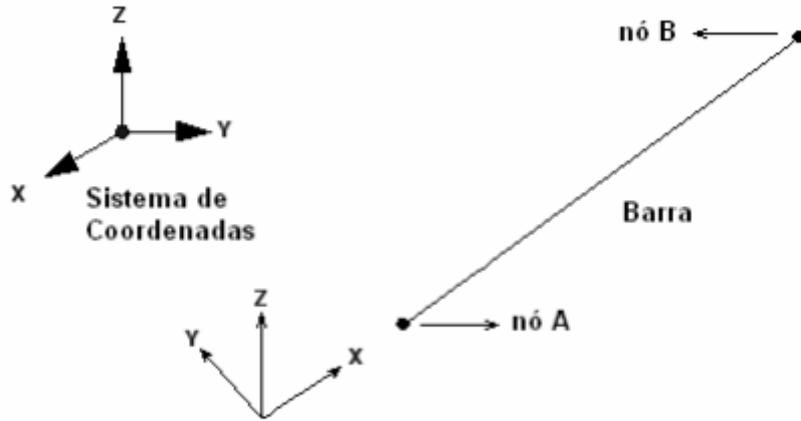


Figura 4.56 – Elemento de barra (FRAME).

As propriedades geométricas da treliça e as propriedades do material utilizado nas análises são apresentadas na Tabela 4.8

Tabela 4.8 – Propriedades da treliça

Propriedades	Símbolo	Valor	Unidade
Comprimento total	L	9,00	m
Altura da treliça	h	1,00	m
Área das barras	A	0.0048	m ²
Módulo de elasticidade	E	200,00	GPa
Massa específica	ρ	7850,00	Kg/m ³
Coefficiente de poisson	ν	0,30	-

Cada barra da treliça foi dividida em dez elementos e o dano na treliça foi simulado através da redução de 50% no valor do módulo de elasticidade de um elemento no banzo superior (22), conforme ilustrado na Figura 4.57

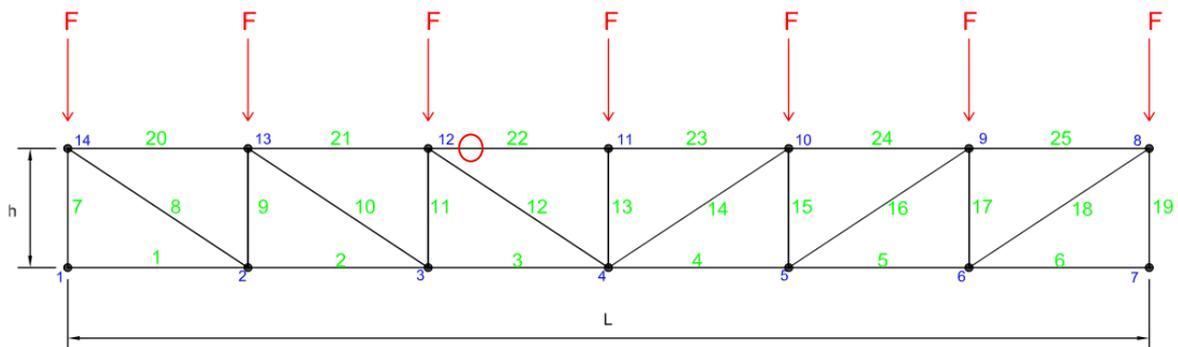


Figura 4.57 – Treliça analisada.

4.2.1 Análise estática

A treliça apresentada na Figura 4.57 foi submetida a um carregamento estático de 5kN nos nós do banzo superior e para a análise dos deslocamentos nodais U_x da treliça, a mesma foi

linearizada, dispondo os deslocamentos nodais das barras em sequência. Após a linearização, o dano ficou localizado entre os nós 237 e 238.

Os deslocamentos nodais U_x obtidos no SAP2000 foram analisados no Wavelet Toolbox do MATLAB para a aplicação da transformada discreta de wavelet usando a *wavelet*-mãe db2. A Figura 4.58 apresenta os deslocamentos nodais U_x encontrados nas barras da treliça linearizada.

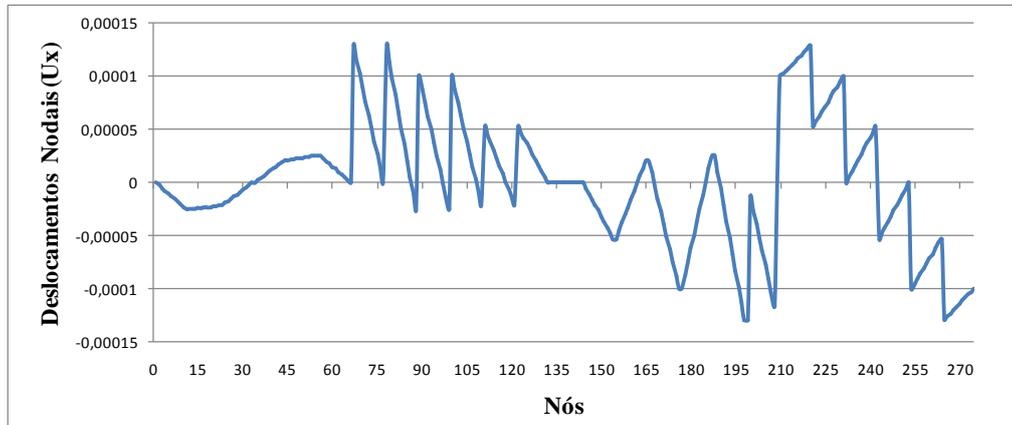


Figura 4.58 - Deslocamentos nodais para a treliça linearizada.

As descontinuidades apresentadas no gráfico acima são evidentes nos nós em que ocorre a mudança de uma barra para outra. Estas descontinuidades dificultaram o processo de detecção de danos, conforme será mostrado adiante.

Os resultados da aplicação da transformada discreta de *wavelet* nos deslocamentos nodais U_x , sem o dano e com o dano, são apresentados respectivamente nas Figuras 4.59 e 4.60.

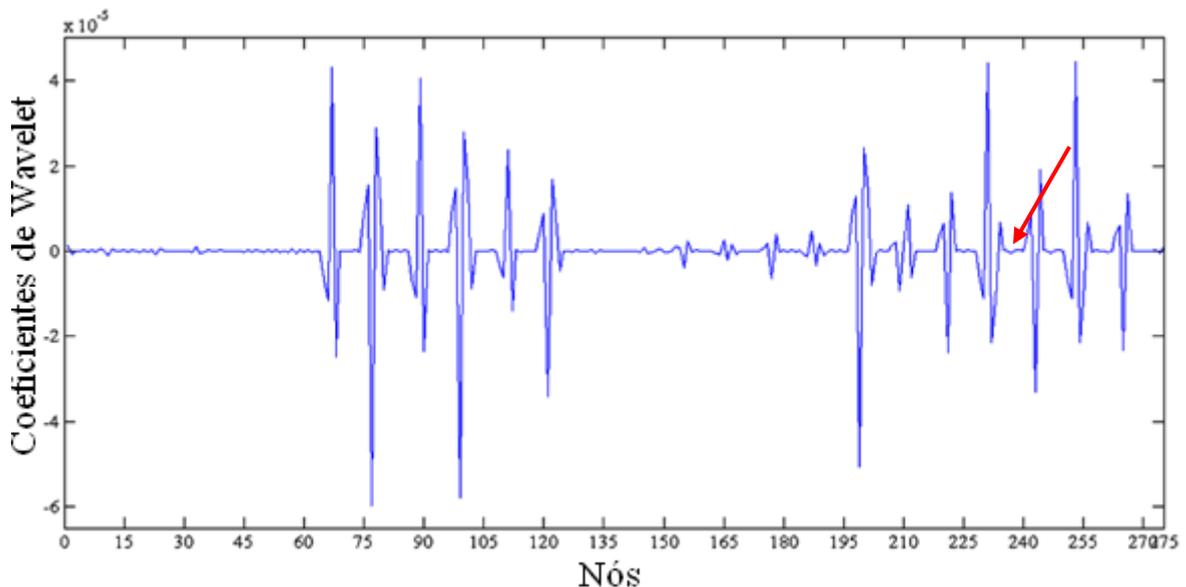


Figura 4.59 – Coeficientes de wavelet para a treliça sem o dano usando db2.

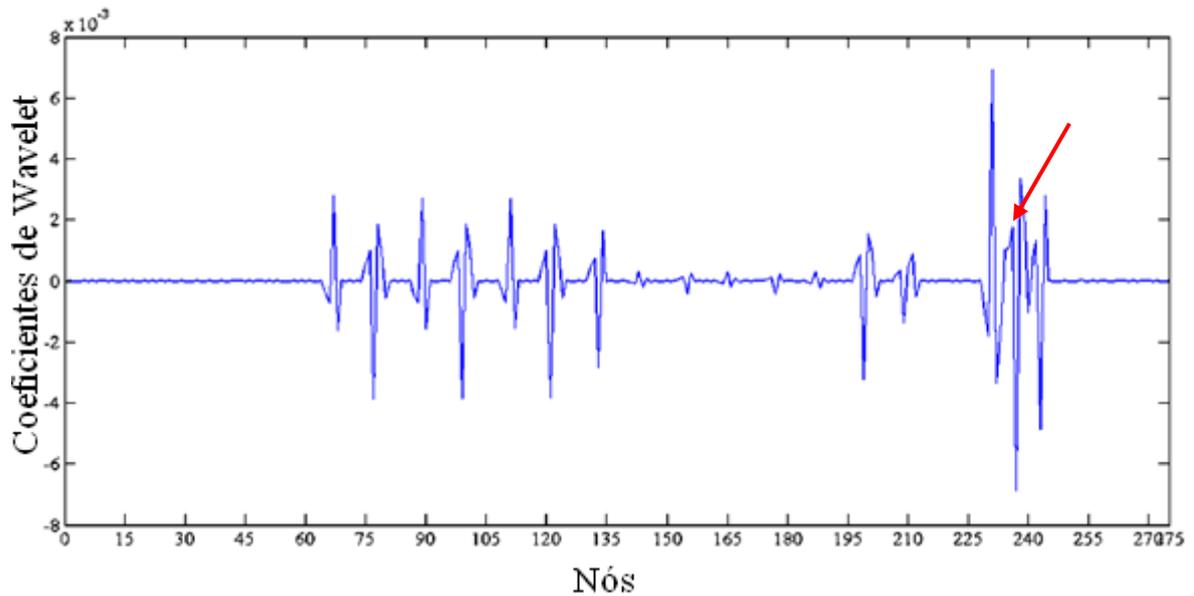


Figura 4.60 - Coeficientes de wavelet para a treliça com o dano usando db2.

Os gráficos apresentados nas Figuras 4.59 e 4.60 apresentaram perturbações em vários pontos devido à mudança de uma barra para outra, porém no nó 238, que pertence à barra 22, apresentou uma descontinuidade na Figura 4.60 (com o dano), descontinuidade esta que não está presente na Figura 4.59 (sem o dano), mostrando assim, a posição do dano.

Outra análise realizada na treliça foi feita utilizando a diferença entre os deslocamentos nodais obtidos com o dano e sem o dano. Os resultados desta análise são apresentados nas Figuras 4.61 e 4.62.

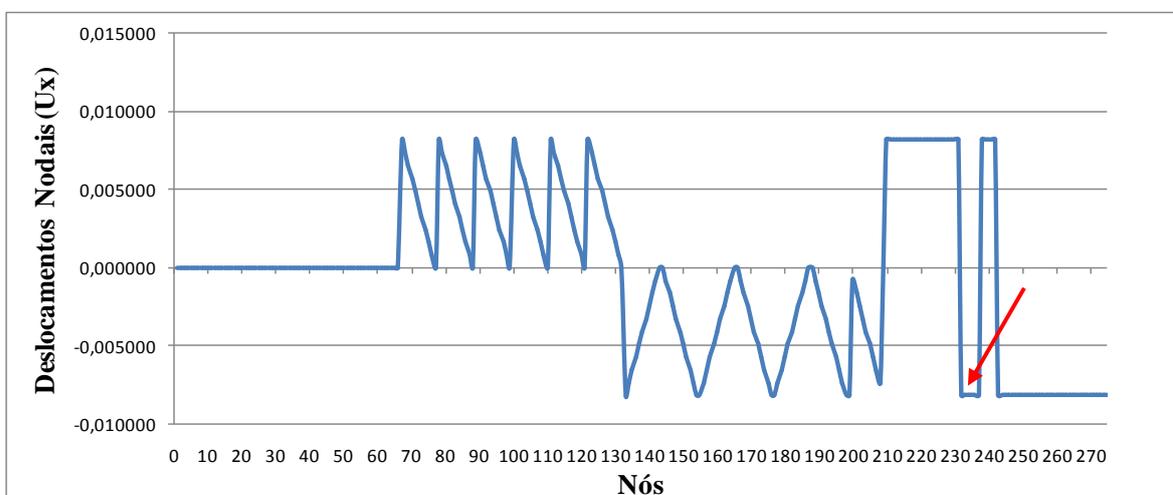


Figura 4.61 – Diferença dos deslocamentos nodais com o dano e sem o dano.

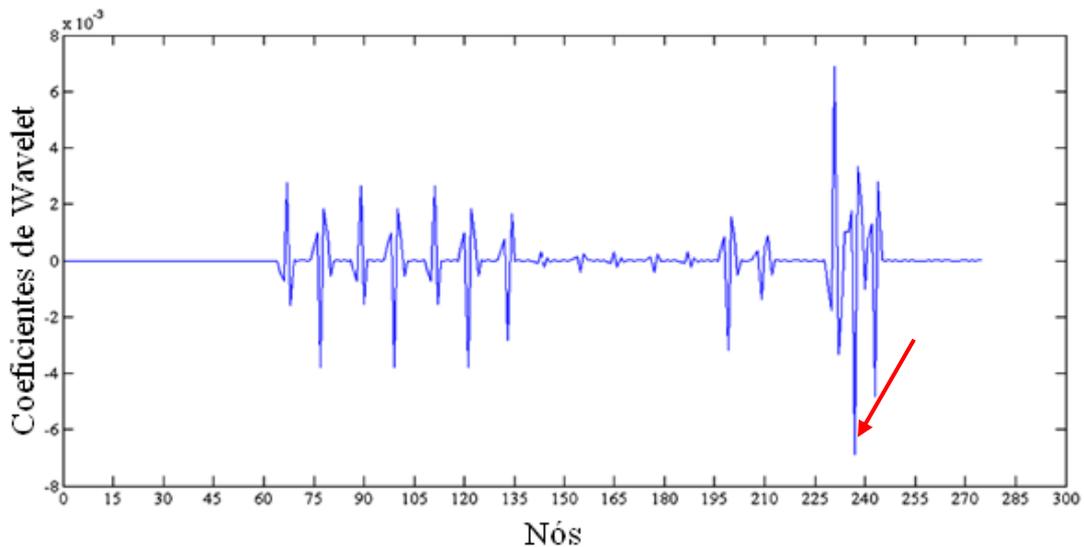


Figura 4.62 – Coeficientes de wavelet aplicado no sinal da diferença dos deslocamentos com o dano e sem o dano usando Db2.

Pode-se observar na Figura 4.61 que, na região do dano nas proximidades do nó 237, o gráfico mantém-se linear. A Figura 4.62 apresentou descontinuidades devido à mudança das barras e nas proximidades do nó 237, ele apresentou uma descontinuidade devido ao dano.

Com o objetivo de suavizar o sinal obtido pelos deslocamentos nodais, utilizou-se um método de regularização Schnur e Zabarás (1990).

4.2.2 Detecção de dano com sinal regularizado

O método de regularização utilizado neste trabalho foi o de Schnur e Zabarás (1990) apresentado item 3.3.1. As Figuras 4.63, 4.64 e 4.65 apresentam os deslocamentos regularizados e a aplicação das transformadas de wavelet, sem o dano e com o dano, usando db2.

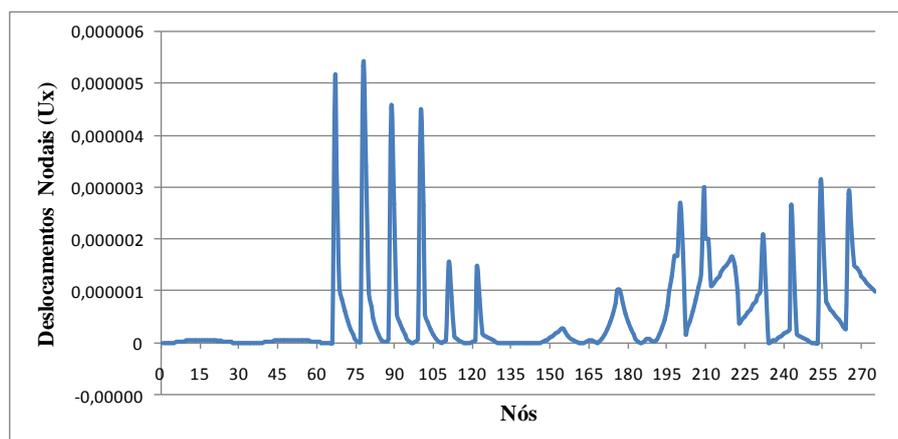


Figura 4.63 - Deslocamentos nodais regularizados para $\beta=100$.

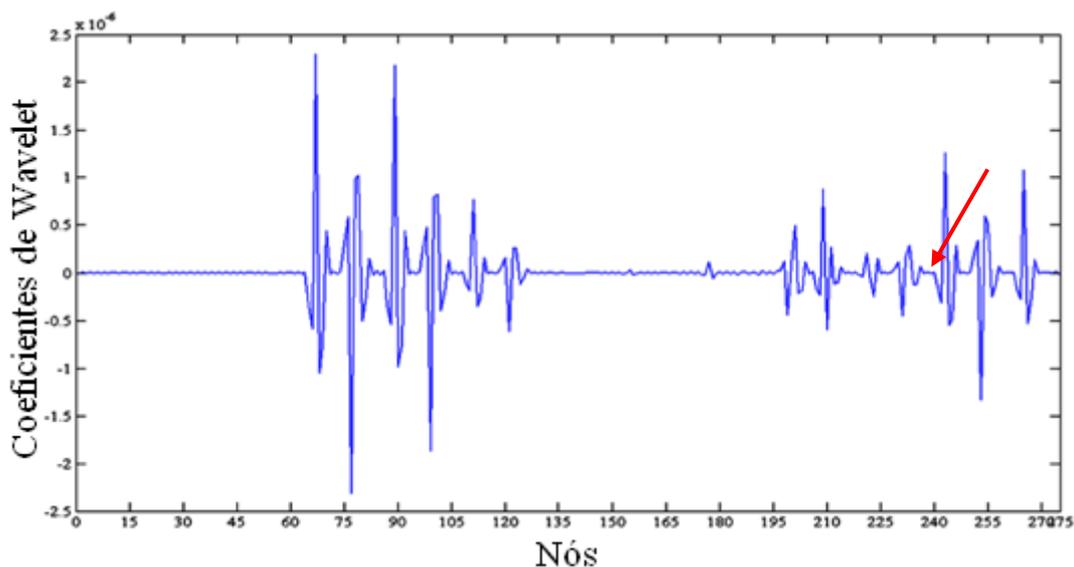


Figura 4.64 – Coeficientes de wavelet aplicado nos deslocamentos regularizados sem o dano usando db2.

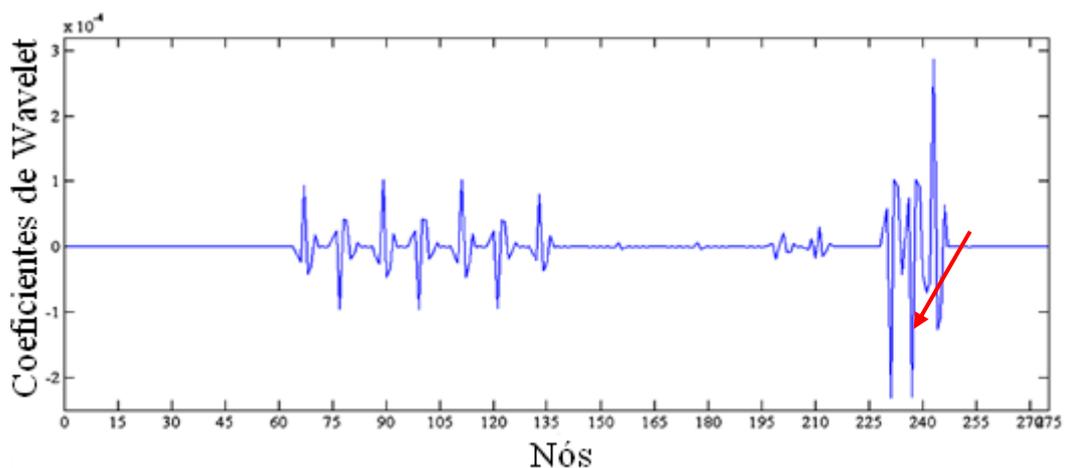


Figura 4.65 - Coeficientes de wavelet aplicado nos deslocamentos regularizados com o dano usando Db2.

Nas Figuras 4.64 e 4.65, pode-se observar que a regularização de Schunur e Zabarás(1990) reduziu a amplitude dos coeficientes de wavelet, auxiliando no processo de detecção do dano.

4.3 DETECÇÃO DO DANO EM UMA PONTE

A ponte sobre o Córrego Padeiro foi utilizada como exemplo de aplicação da detecção de danos em pontes, utilizando as transformadas de wavelet. Esta ponte está localizada na Rodovia: BR-163/364MT, no Km 489,2. Sua estrutura é toda em concreto armado com duas longarinas apoiadas em muros de encontro em concreto ciclópico com alas nas extremidades e um vão livre de 7,50m.

A pista de rolamento possui duas faixas de tráfego com largura total de 7,20 m com faixas de segurança, dispositivos de drenagem superficial e barreiras New Jersey para proteção lateral.

A planta baixa e os cortes estão apresentados nas Figuras 4.66, 4.67 e 4.68. O relatório fotográfico da ponte e a ficha de inspeção estão nos ANEXOS A e B respectivamente.

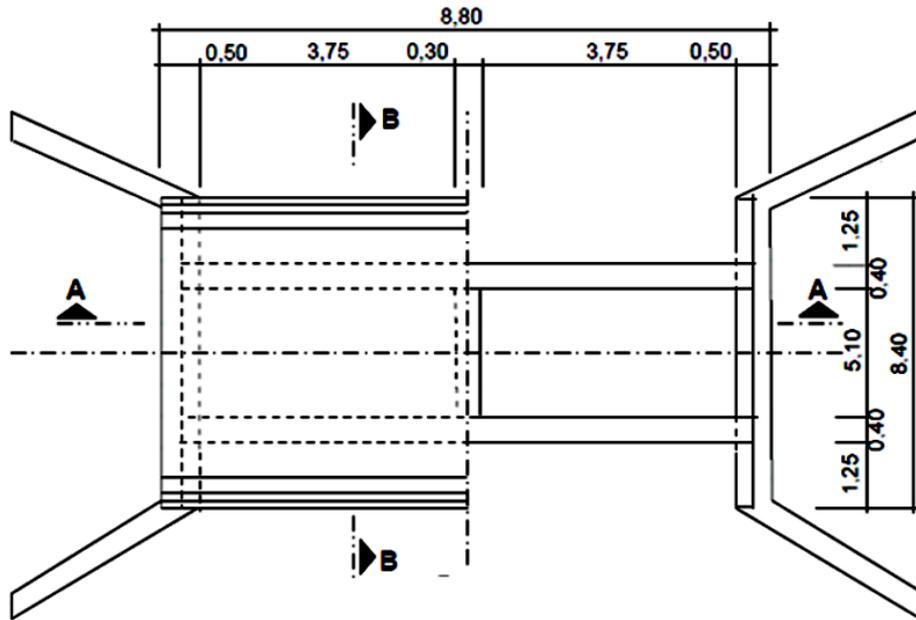


Figura 4.66 – Planta baixa da ponte sobre o córrego padeiro.

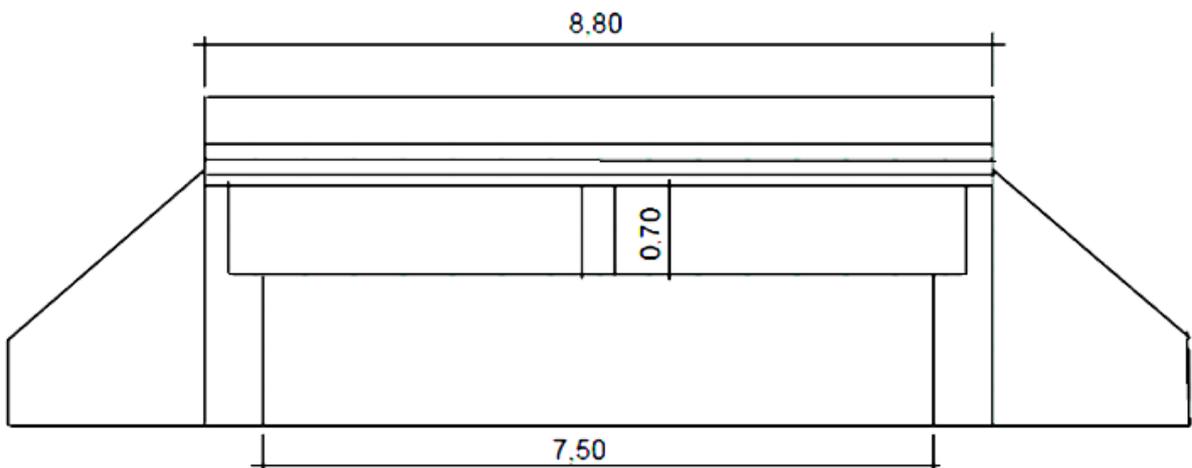


Figura 4.67 – Corte A-A da ponte sobre o córrego padeiro.

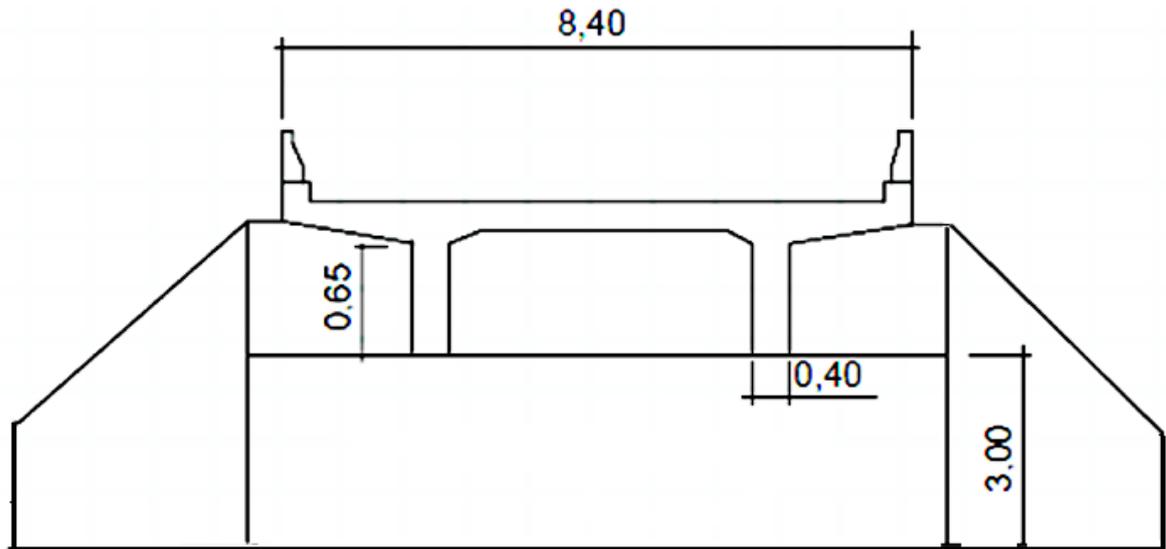


Figura 4.68 – Corte B-B da ponte sobre o córrego padeiro.

O presente trabalho limitou-se a analisar apenas a superestrutura da ponte e para a modelagem da superestrutura, utilizou-se o elemento SOLID65 (3-D Reinforced Concrete Solid) que está ilustrado na Figura 4.69 e é usado para modelagem 3-D de estruturas de concreto, com ou sem barras de reforço. É um elemento que possui oito nós e três graus de liberdade por nó: translação nas direções x, y, z .

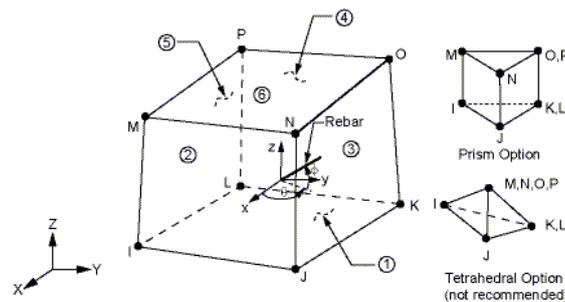


Figura 4.69 – Elemento sólido SOLID65 (Biblioteca do ANSYS).

As propriedades dos materiais utilizadas no modelo em elementos finitos estão na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Propriedades dos materiais utilizados na ponte

Propriedades	Símbolo	Valor	Unidade
Resistência à compressão	f_{ck}	20,00	MPa
Módulo de elasticidade	E	21287,00	MPa
Massa específica	ρ	2500,00	Kg/m^3
Coefficiente de poisson	ν	0,20	-

A geometria do modelo sólido em elementos finitos da ponte sobre o Córrego Padeiro é representada pelas vistas e pelas perspectivas nas Figuras 4.70 e 4.71 respectivamente.

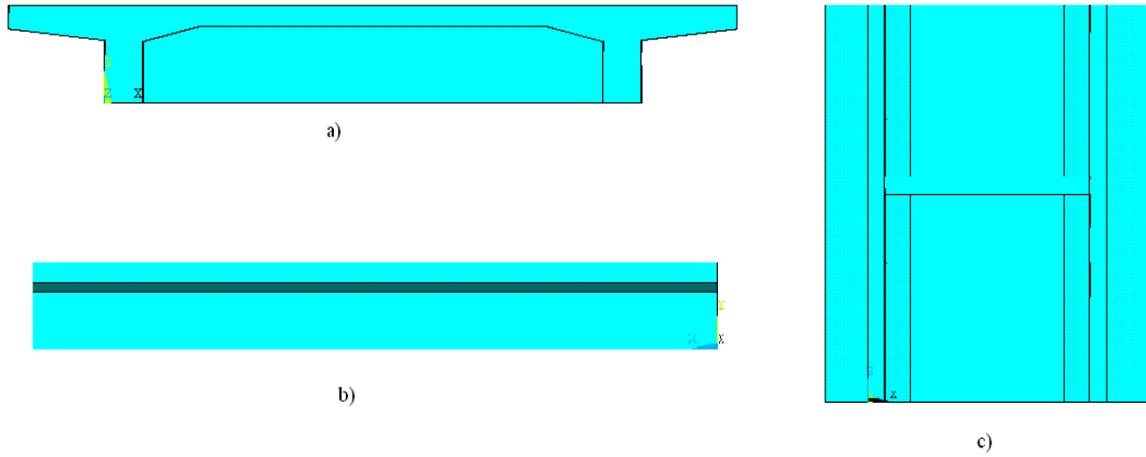


Figura 4.70 – Ponte sobre o Córrego Padeiro: (a) vista frontal, (b) lateral, (c) inferior.

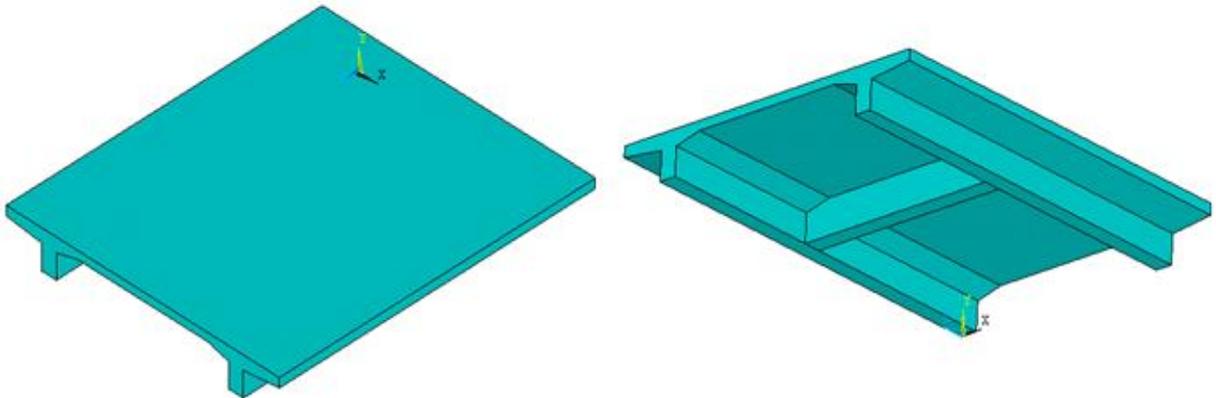


Figura 4.71 – Perspectivas da ponte sobre o Córrego Padeiro.

A discretização do modelo em elementos finitos foi feita com 231097 nós e 196224 elementos. As condições de contorno foram aplicadas nas extremidades das vigas restringindo as translações em x , y e z , ver Figura 4.72.

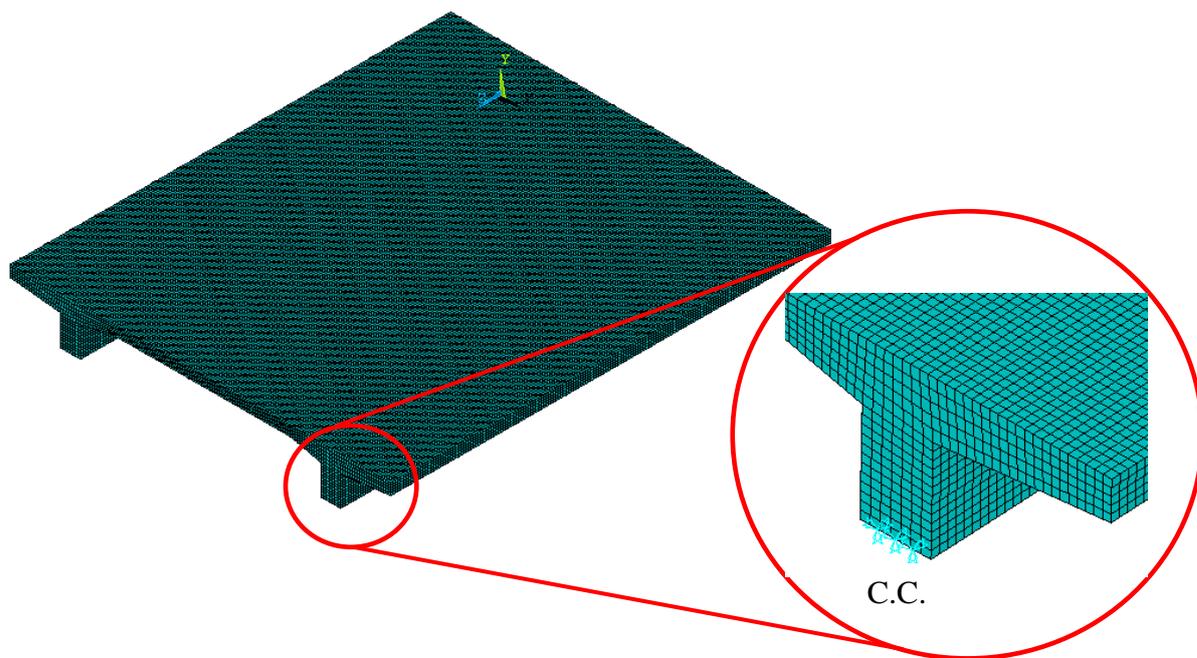


Figura 4.72 – Discretização do modelo em elementos finitos da ponte sobre o Córrego Padeiro.

A escolha dos danos a serem simulados na ponte foi baseada em um estudo recente feito por Vitório (2008) que apresenta a avaliação do risco estrutural de 40 pontes de concreto armado localizadas em rodovias federais no Brasil. A Tabela 4.10 apresenta o levantamento das patologias encontradas na superestrutura das pontes.

Tabela 4.10 – Ocorrência de Patologias em superestrutura (Vitório, 2008)

Tipo de Dano	Quantidade de Obras	%
Deslocamento do concreto das vigas principais	31	77,50
Deslocamento do concreto das lajes do tabuleiro	35	87,50
Deslocamento do concreto das transversinas	25	62,50
Fissuras nas vigas principais	21	52,50
Fissuras nas lajes do tabuleiro	15	37,50
Fissuras nas transversinas	10	25,00
Oxidação de armaduras das vigas principais	31	77,50
Oxidação de armaduras das lajes do tabuleiro	25	62,50
Oxidação de armaduras das transversinas	7	17,50
Deformações nas vigas principais	5	12,50
Deformações nas lajes	8	20,00
Fissuras e/ou esmagamento de dente Gerber	1	2,50
Carbonatação	25	62,50
Eflorescências	15	37,50

Nos dados apresentados na tabela acima, pode-se destacar o deslocamento do concreto das lajes do tabuleiro, com ocorrência de 87,5% e nas vigas principais de 77,5%. Em função disto, estas duas situações serão simuladas neste trabalho.

Os casos de dano utilizados neste trabalho estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Casos de dano utilizados na ponte

Caso	Tamanho do deslocamento (cm²)	Localização do deslocamento a partir do apoio direito (m)
1- Deslocamento VP	25	0,60
2- Deslocamento no tabuleiro	125	3,48

Para o deslocamento na VP, o dano está localizado entre os nós 163 e 164 e para o deslocamento no tabuleiro está entre os nós 87 e 88.

Os dois casos de dano foram simulados deletando elementos do modelo em elementos finitos nas dimensões apresentadas na Tabela 4.11, ver Figuras 4.73 e 4.74.

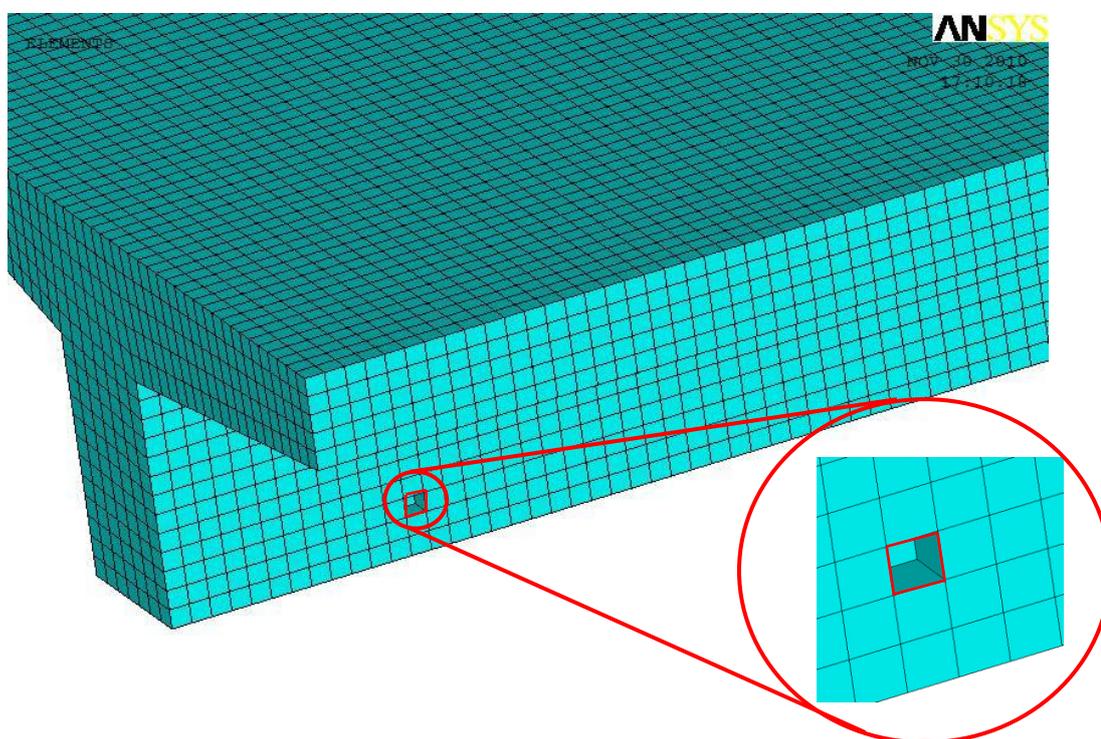


Figura 4.73 – Caso 1: Deslocamento na viga principal.

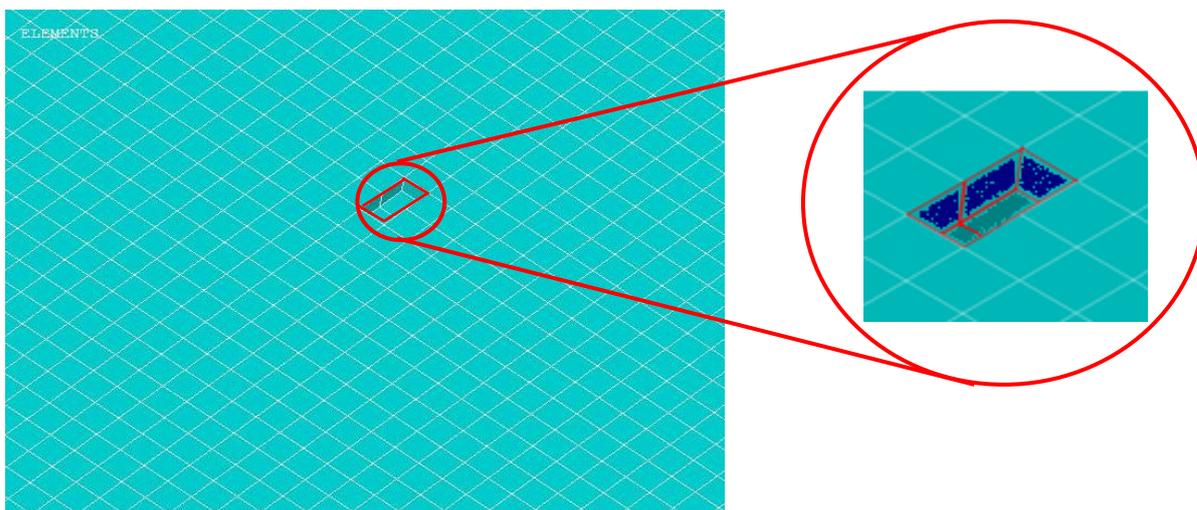


Figura 4.74 – Caso 2: Deslocamento no tabuleiro.

Após a definição dos modelos de danos, a ponte foi submetida à uma análise estática e modal, sem o dano e com o dano.

Na análise estática, foram consideradas as ações permanentes e variáveis previstas na NBR 7187:2003 e NBR 7188:1984. Estas ações estão nas Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14. Para efeito de escolha das cargas móveis, adotou-se para a ponte em análise como sendo Classe 45, na qual o veículo tipo tem 450kN de peso total e está ilustrado nas Figuras 4.75 e 4.76.

O script desenvolvido e utilizado para a análise estática está no Apêndice A.

Tabela 4.12 – Ações permanentes

Peso Próprio	γ (kN/m³)
Concreto Armado	25
Pavimentação	24
Recapeamento	2

Tabela 4.13 – Pesos dos veículos e valores das cargas distribuídas

Classe da Ponte	Veículo	Carga uniformemente distribuída	
	Peso total	q(em toda a pista)	q'(nos passeios)
	kN	kN/m²	kN/m²
45	450	5	3
30	300	5	3
12	120	4	3

Tabela 4.14 – Características dos veículos-tipo

Item	Unidades	Tipo 45	Tipo 30	Tipo 12
Quantidade de eixos	Eixo	3	3	2
Peso total do veículo	kN	450	300	120
Peso total de cada roda dianteira	kN	75	50	20
Peso de cada roda intermediária	kN	75	50	-
Peso de cada roda traseira	kN	75	50	40
Largura de contato b 1 - roda dianteira	m	0,5	0,4	0,2
Largura de contato b 2 - roda intermediária	m	0,5	0,4	-
Largura de contato b 3 - roda traseira	m	0,5	0,4	0,3
Comprimento de contato da roda	m	0,2	0,2	0,2

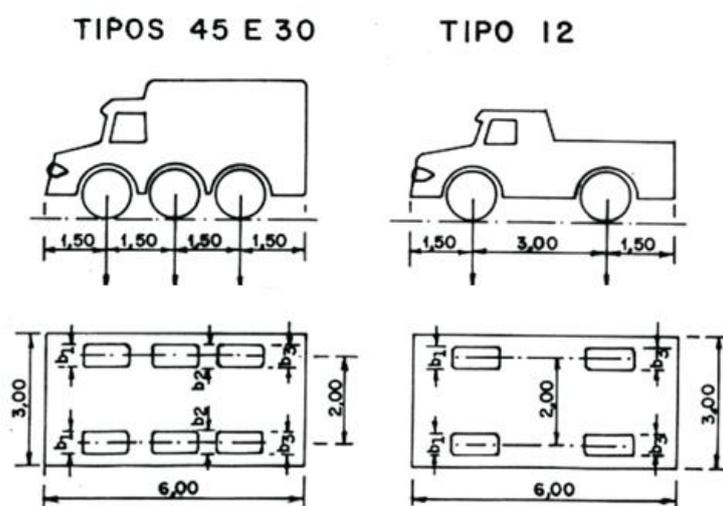


Figura 4.75 – Características dos veículos-tipo (FONTE: NBR:7188;1984).

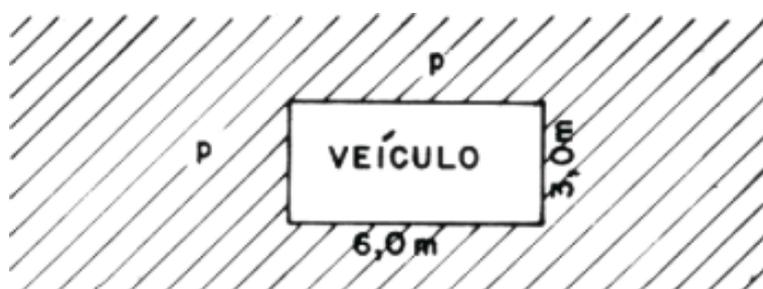


Figura 4.76 – Trem tipo da NBR:7188(1984).

Segundo a NBR7188:1984, o trem-tipo da ponte deve ser colocado no sentido longitudinal devendo encostar a roda do veículo no guarda-rodas com o objetivo de obter os efeitos mais desfavoráveis nas lajes, longarinas e etc.

O modelo em elementos finitos submetido às ações permanentes e variáveis está apresentado na Figura 4.77.

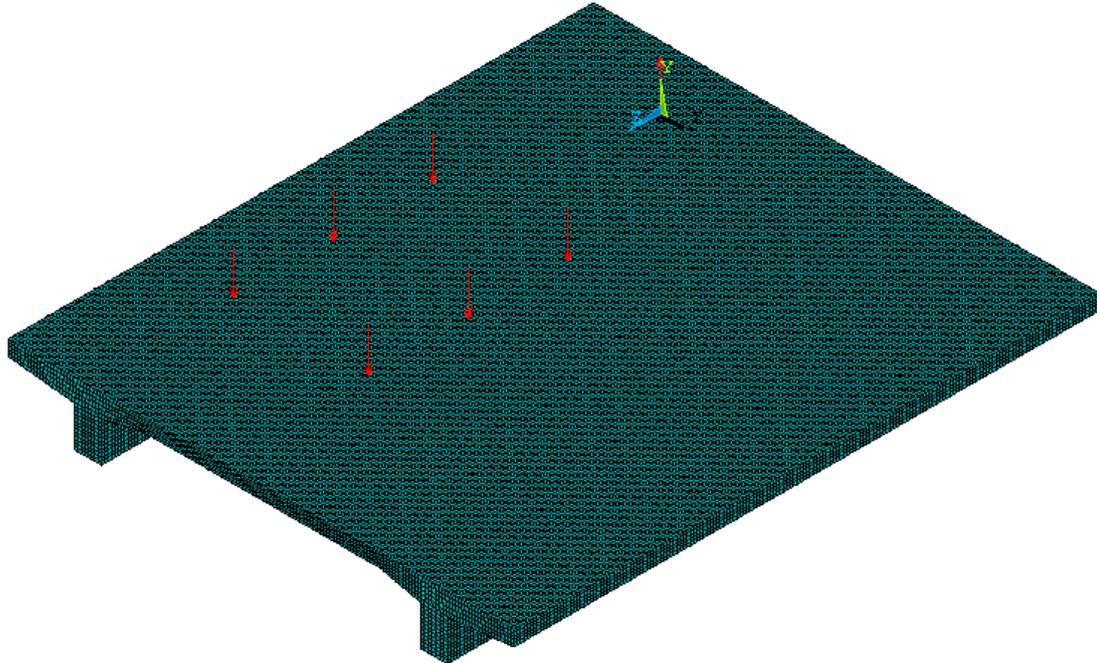


Figura 4.77 – Modelo em elementos finitos da ponte sob carregamento estático.

4.3.1 Análise estática

Na análise estática, foram considerados todos os carregamentos apresentados no item 4.3. A deformada da ponte, as tensões na direção x e os deslocamentos nodais na direção y para o modelo sem o dano estão apresentados nas Figuras 4.78, 4.79 e 4.80 respectivamente.

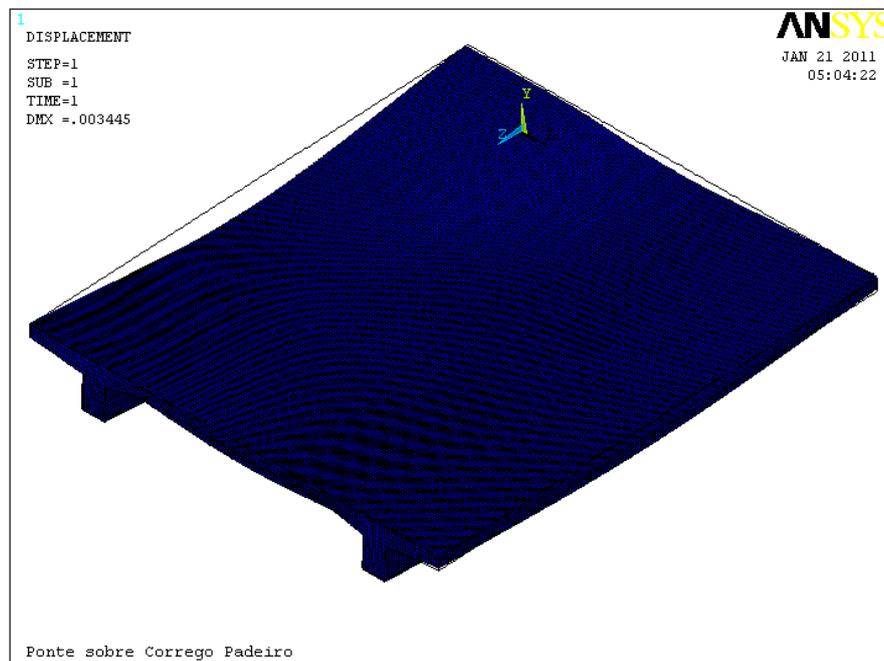


Figura 4.78 - Deformada da ponte.

Observa-se na Figura 4.78 que o deslocamento máximo da estrutura foi de 3,44mm.

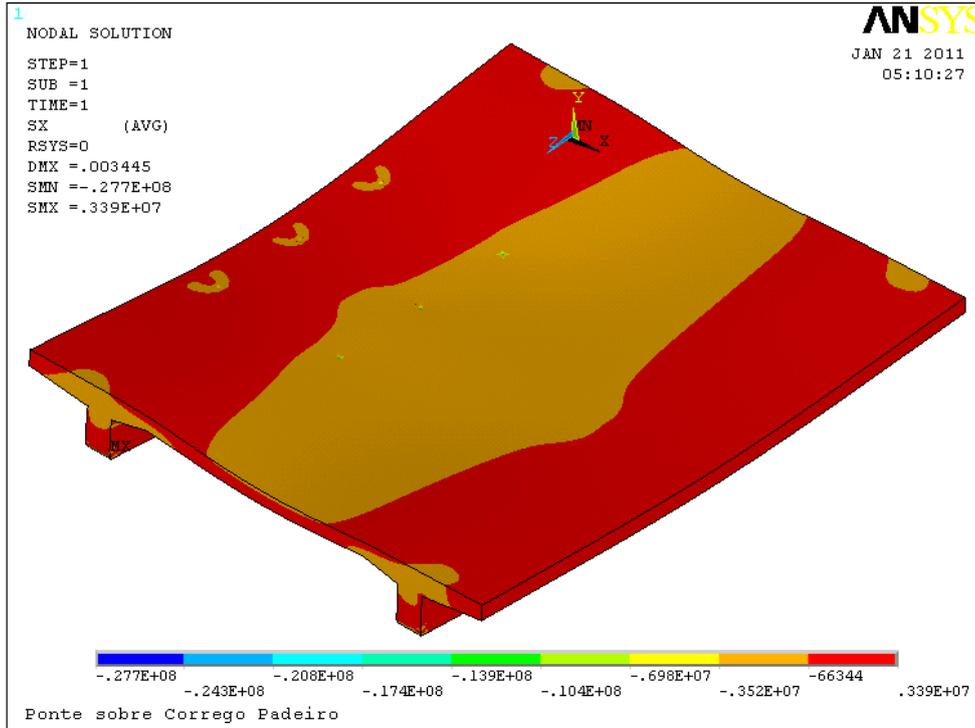


Figura 4.79 – Tensões normais na direção x (σ_x).

Observa-se na Figura 4.79 que o valor máximo de tensão de compressão na direção x foi de 27,70MPa (na região do apoio) e a máxima de tração com valor 3,39MPa. Observa-se também uma concentração de tensão nos pontos de aplicação das cargas concentradas.

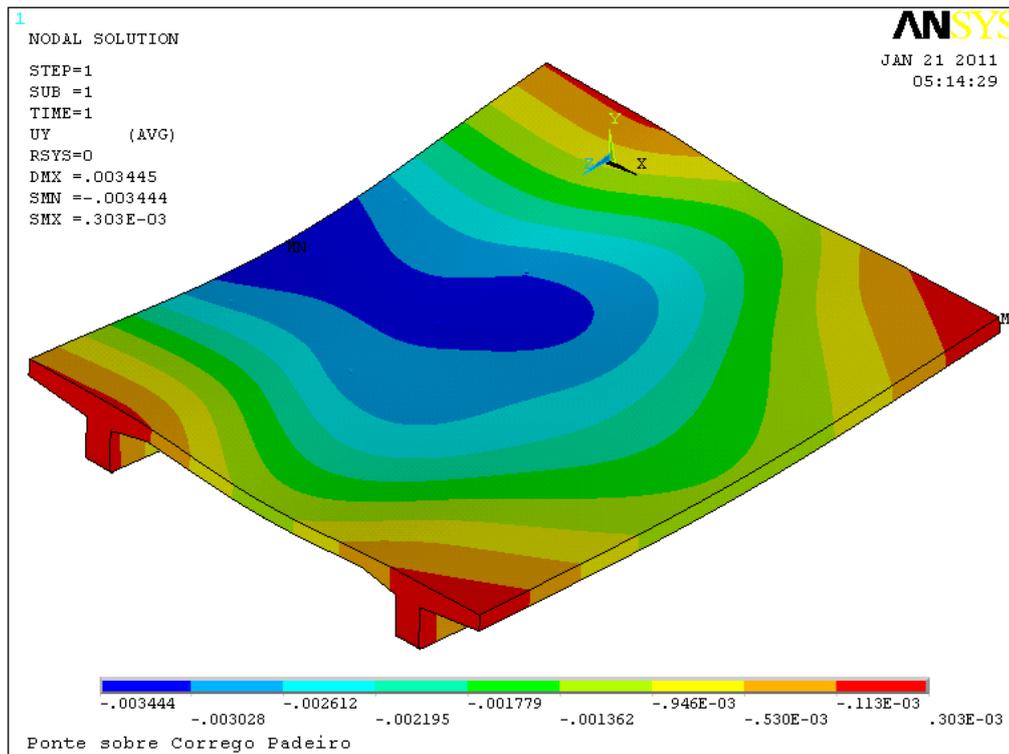


Figura 4.80 – Deslocamentos verticais na direção y (U_y).

Os deslocamentos nodais (U_y) obtidos na linha inferior da viga principal, sem o dano e com o dano, são apresentados na Figura 4.81.

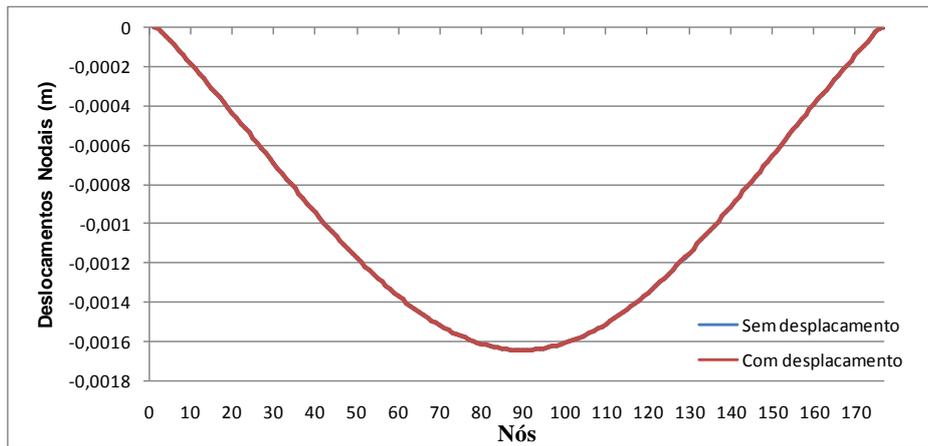


Figura 4.81 – Deslocamentos nodais da viga principal com e sem deslocamento.

Na Figura 4.81 observa-se que a presença do dano não alterou muito os valores dos deslocamentos nodais.

4.3.1.1 Deslocamento na viga principal

Os deslocamentos nodais obtidos no caso 1 do deslocamento na VP foram exportados para o MATLAB e, em seguida, a transformada discreta de *wavelet* foi aplicada para a obtenção dos coeficientes de wavelet utilizando a *wavelet*-mãe Db2.

O resultado da aplicação da transformada discreta de *wavelet* nos deslocamentos nodais é apresentado abaixo.

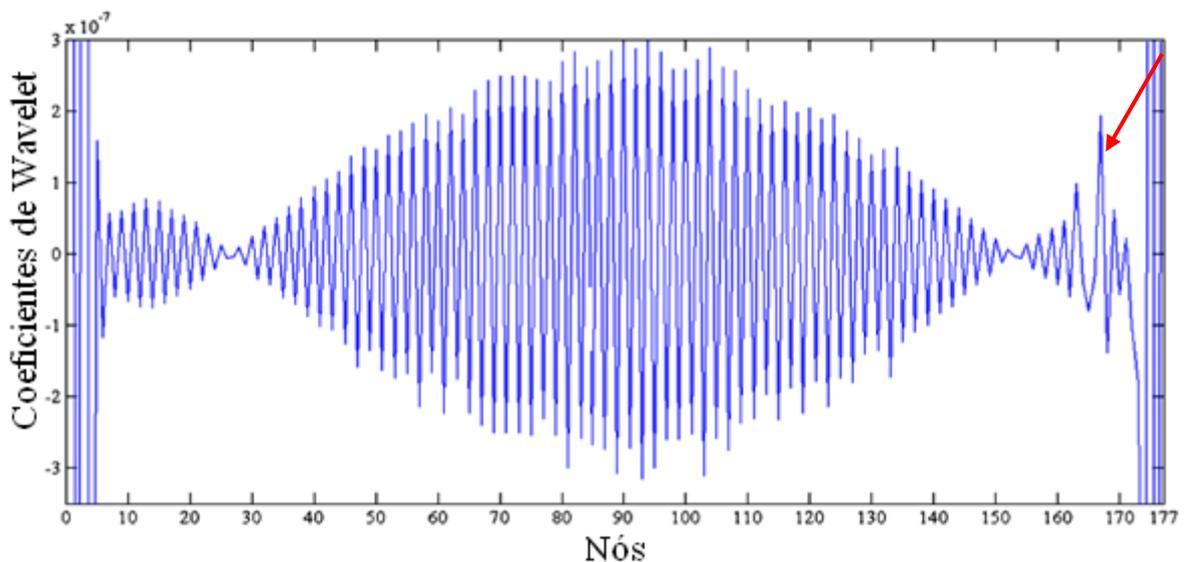


Figura 4.82 – Coeficientes de wavelet para deslocamento na viga principal usando Db2.

As transformadas de *wavelet* não foram capazes de localizar com precisão a posição do deslocamento (nó 163), motivo este que, possivelmente, pode ser atribuído ao carregamento concentrado do trem tipo aplicado no meio da ponte ter gerado essas perturbações ao longo do sinal.

Com o objetivo de tentar reduzir estas perturbações ao longo do sinal, foi aplicado ao método de regularização de Schnur e Zabarás (1990). O resultado desta aplicação é apresentado na Figura 4.83.

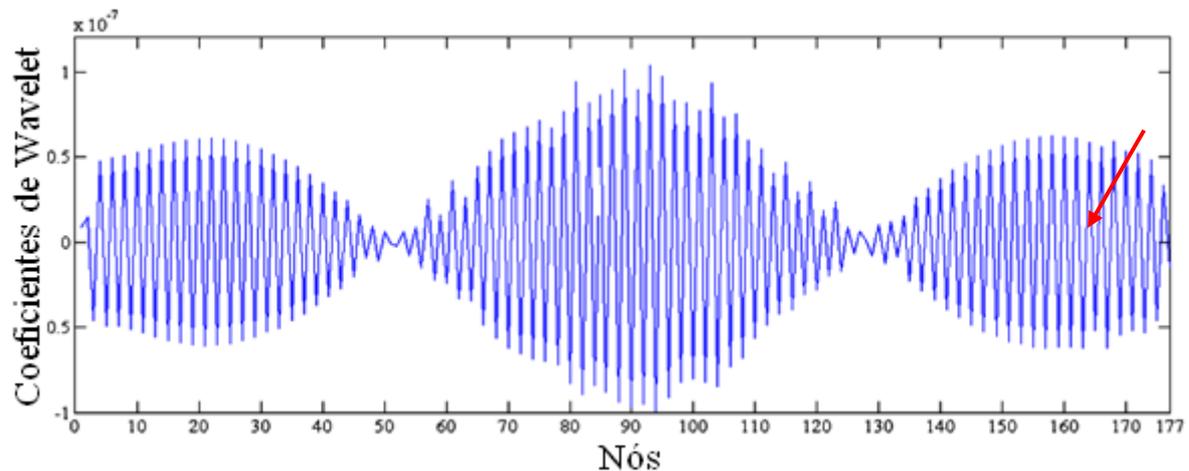


Figura 4.83 - Coeficientes de wavelet para deslocamento na viga principal com regularização usando db2.

A Figura 4.83 mostra que regularização não auxiliou muito no processo de detecção do dano, já que não se pôde detectar a sua posição apenas analisando o sinal transformado.

Uma última tentativa de detectar a posição do dano foi feita, desta vez utilizando o sinal da diferença entre os deslocamentos com o dano e sem o dano. O resultado desta análise é apresentado na Figura 4.84.

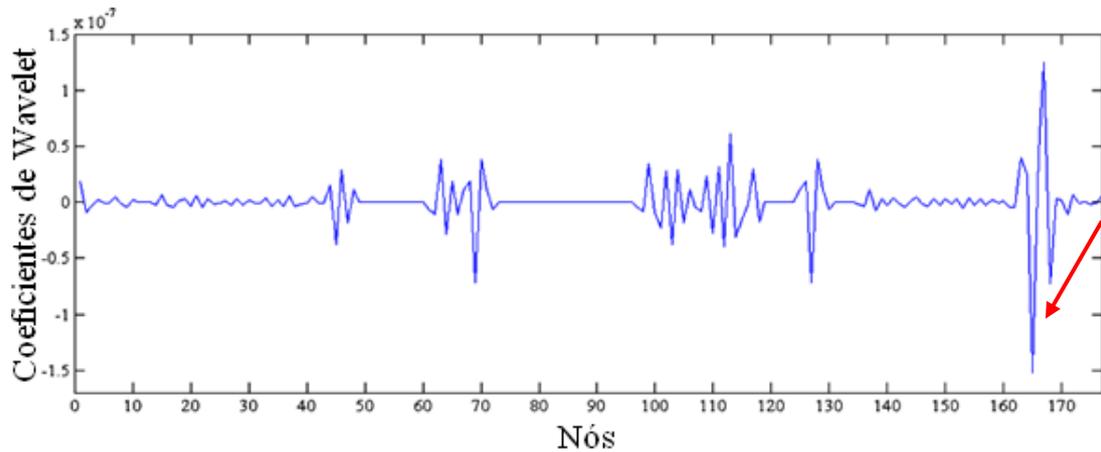


Figura 4.84 - Coeficientes de wavelet para deslocamento na viga principal com sinal da diferença com o dano e sem dano usando db2.

Na Figura 4.84, pode-se perceber que utilizando o sinal da diferença com o dano e sem o dano, foi possível identificar a posição do mesmo (próximo ao nó 163), que foi onde os coeficientes alcançaram maior amplitude.

4.3.1.2 Deslocamento no tabuleiro

O segundo caso de dano analisado foi o deslocamento no tabuleiro da ponte. A deformada da ponte, as tensões na direção x e os deslocamentos nodais na direção y para o modelo com deslocamento no tabuleiro são apresentados nas Figuras 4.85, 4.86 e 4.87, respectivamente.

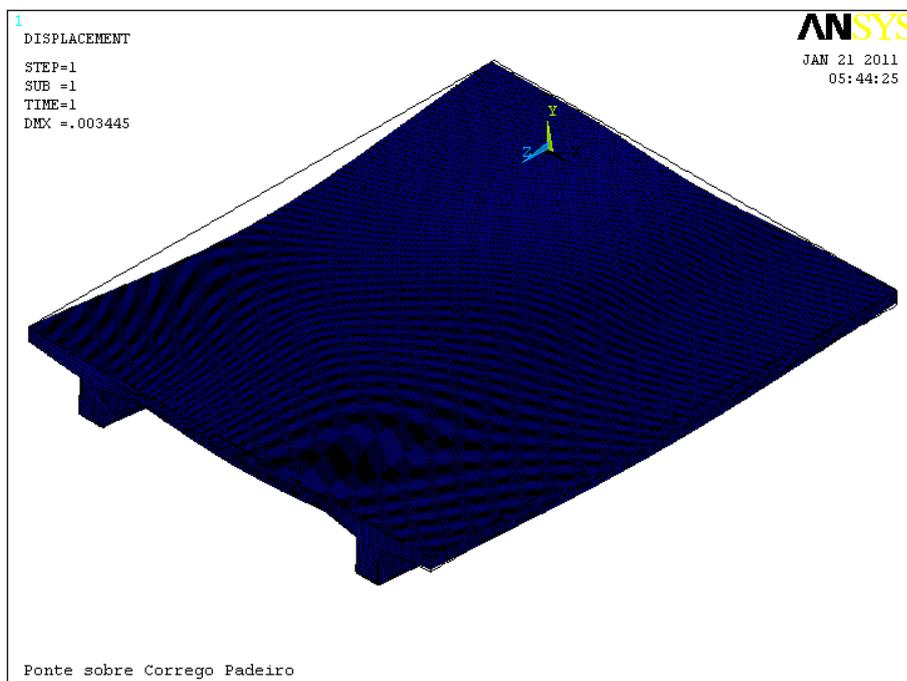


Figura 4.85 – Deformada da ponte com deslocamento no tabuleiro.

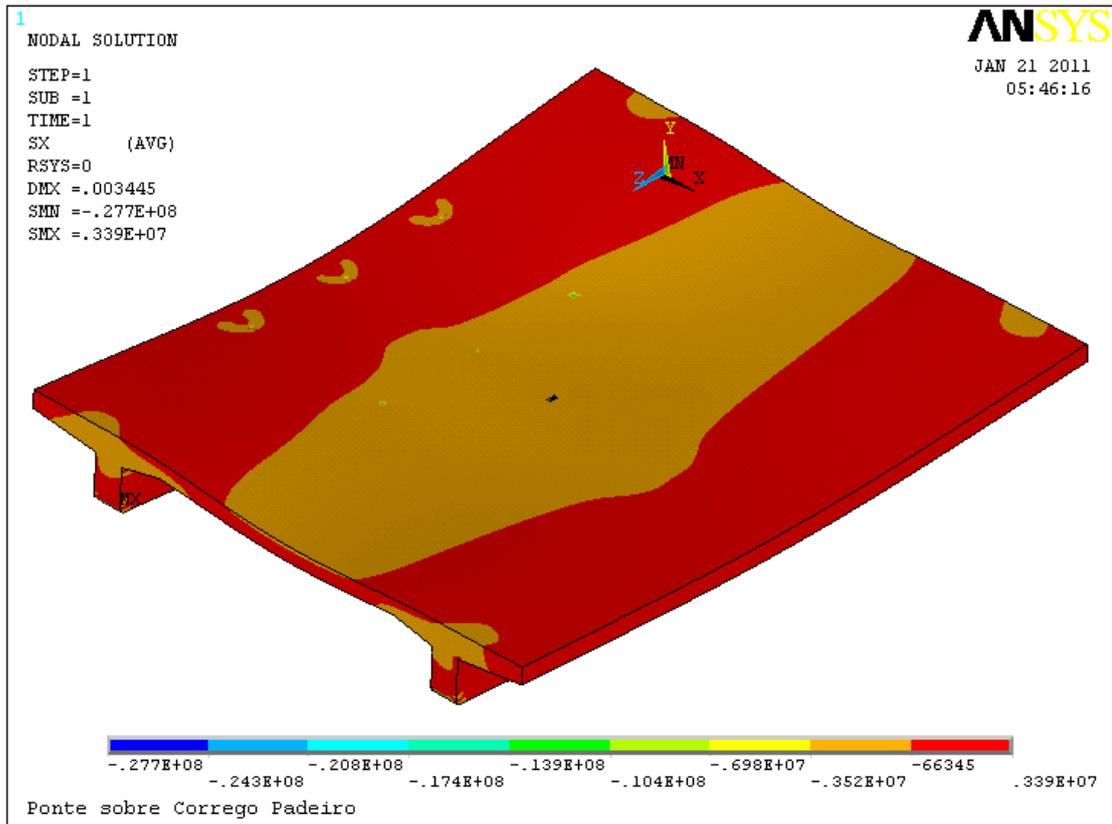


Figura 4.86 – Tensões normais na direção x com deslocamento no tabuleiro.

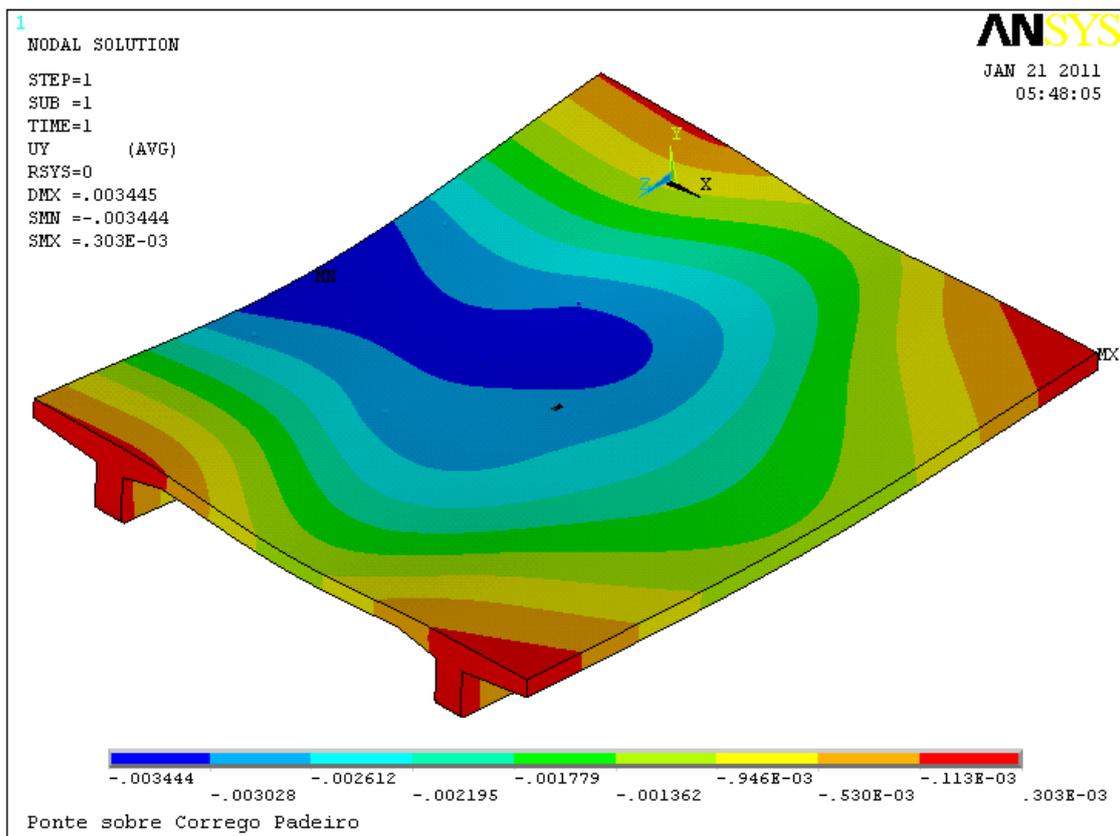


Figura 4.87 – Deslocamentos verticais na direção y com deslocamento no tabuleiro.

O deslocamento no tabuleiro não alterou a configuração geral do campo de tensões e de deslocamentos na ponte, fato este que pode ser observado comparando as Figuras 4.85, 4.86 e 4.87 com as Figuras 4.78, 4.79 e 4.80 sem o dano na ponte.

Os deslocamentos nodais (U_y) obtidos na parte de cima do tabuleiro sem o dano e com o dano estão apresentados na Figura 4.88.

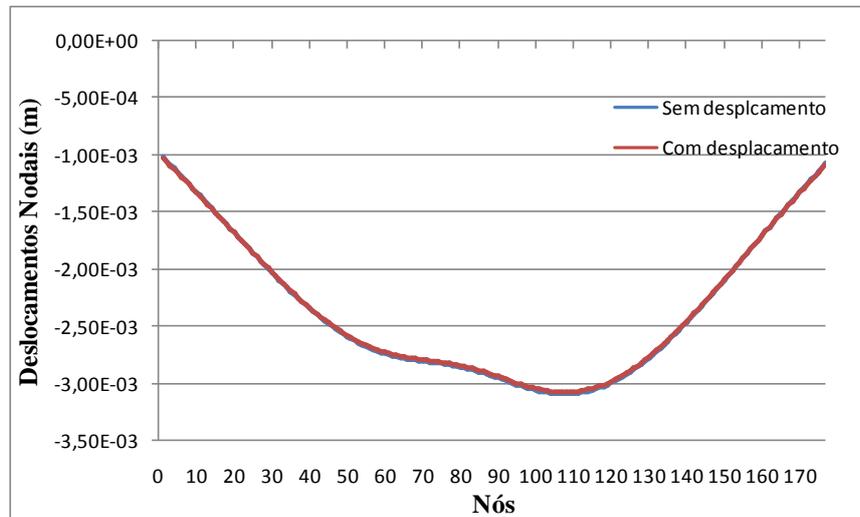


Figura 4.88 - Deslocamentos nodais no tabuleiro com e sem deslocamento.

Os deslocamentos nodais com o dano no tabuleiro foram analisados sem ruído e com ruído de 1% e 2%, utilizando a transformada discreta de *wavelet* com a *wavelet*-mãe bior6.8. Os resultados destas análises são apresentados nas figuras abaixo.

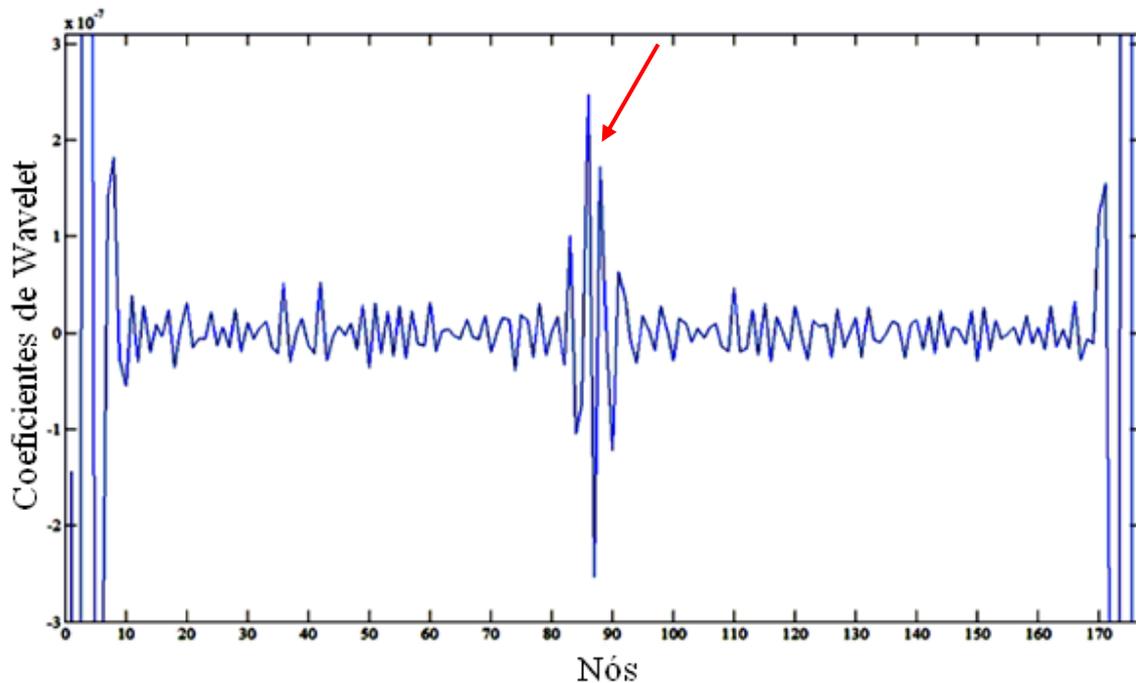


Figura 4.89 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro usando bior6.8.

A Figura 4.89 apresenta perturbações ao longo de todo sinal e nas extremidades, porém foi possível localizar a posição do dano com precisão (nó 83).

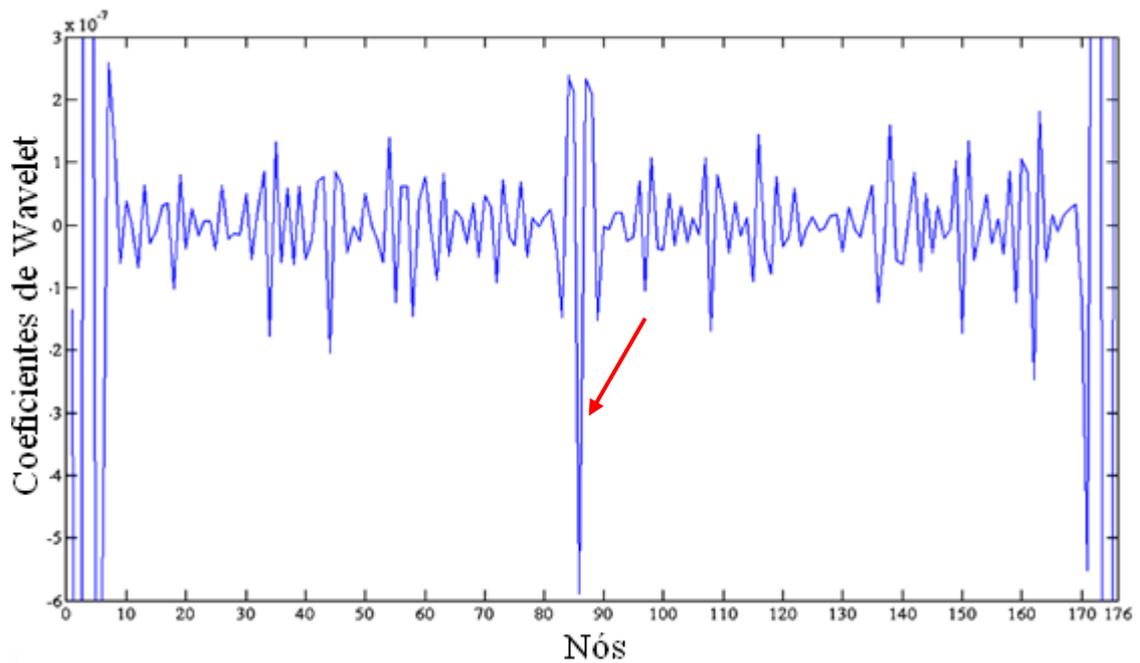


Figura 4.90 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro com 1% de erro no sinal estático e usando bior6.8.

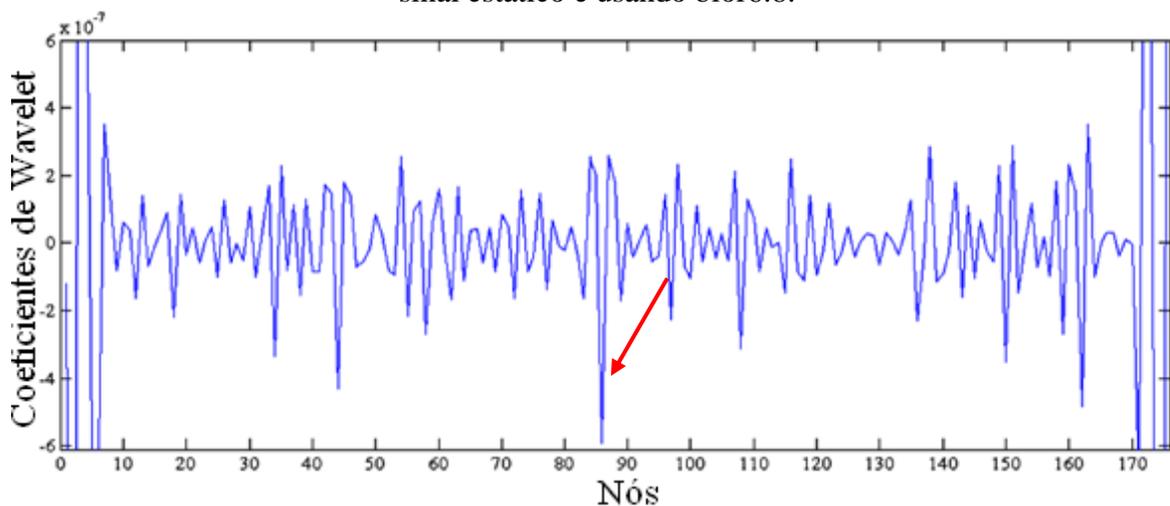


Figura 4.91 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro com 2% de erro no sinal estático e usando bior6.8.

A introdução do ruído de 1% provocou um aumento nas perturbações ao longo do sinal, mas, mesmo assim, foi possível localizar a posição do dano. Já a introdução do ruído de 2% comprometeu a detecção da localização do dano.

4.3.2 Análise modal

Na análise modal, os três primeiros modos de vibração foram obtidos, sendo que no processo de detecção do dano, apenas os resultados relativos ao primeiro modo de vibração foi utilizado. O script desenvolvido e utilizado na análise modal está no Apêndice B. Os três primeiros modos de vibração da ponte, sem o dano e com o dano, na VP, são apresentados nas Figuras 4.92 a 4.97.

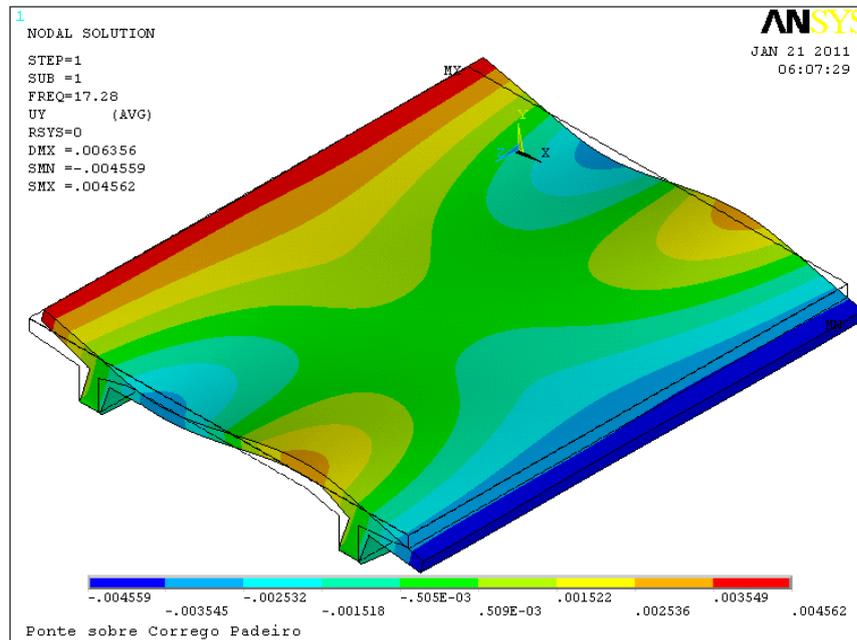


Figura 4.92 – Primeiro modo de vibração sem o dano.

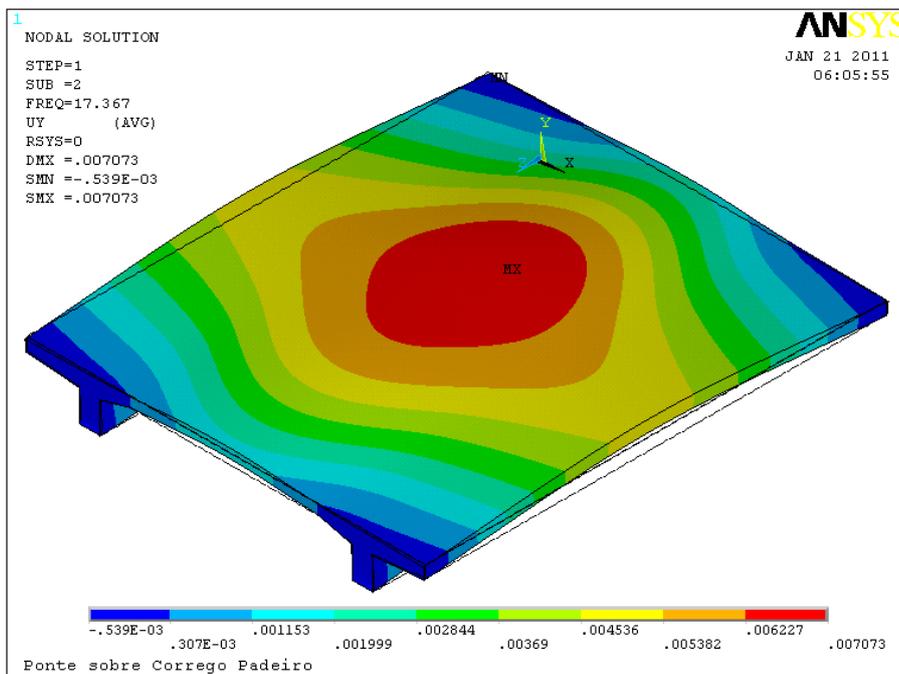


Figura 4.93 – Segundo modo de vibração sem o dano.

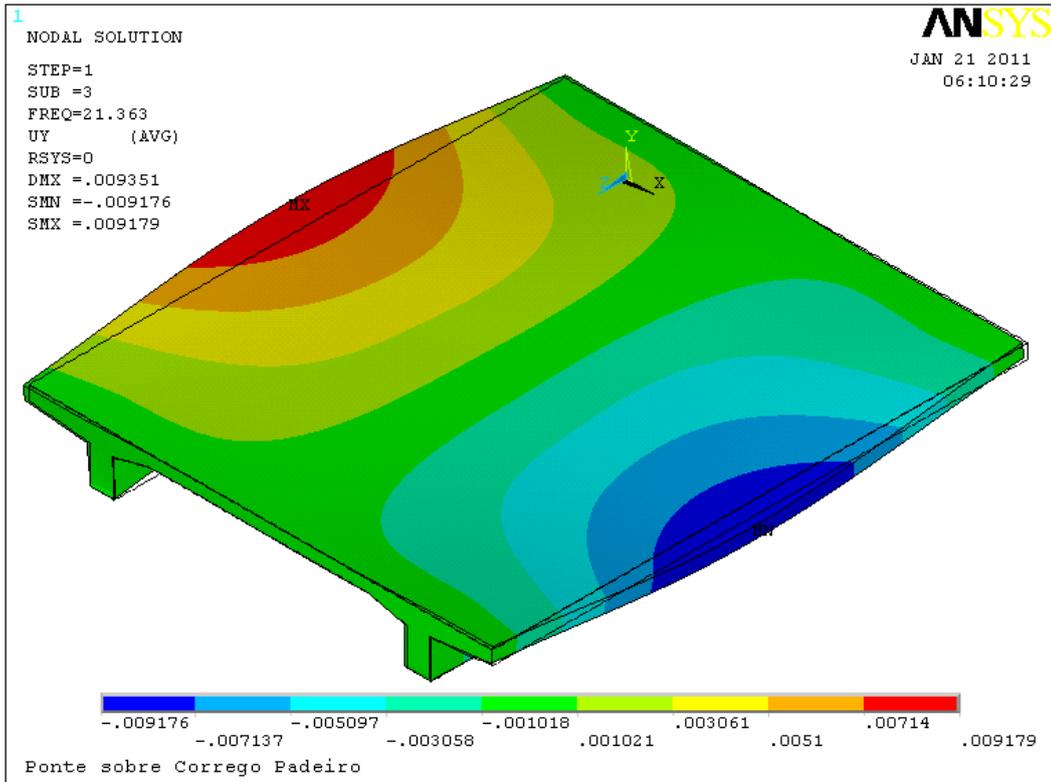


Figura 4.94 – Terceiro modo de vibração sem o dano.

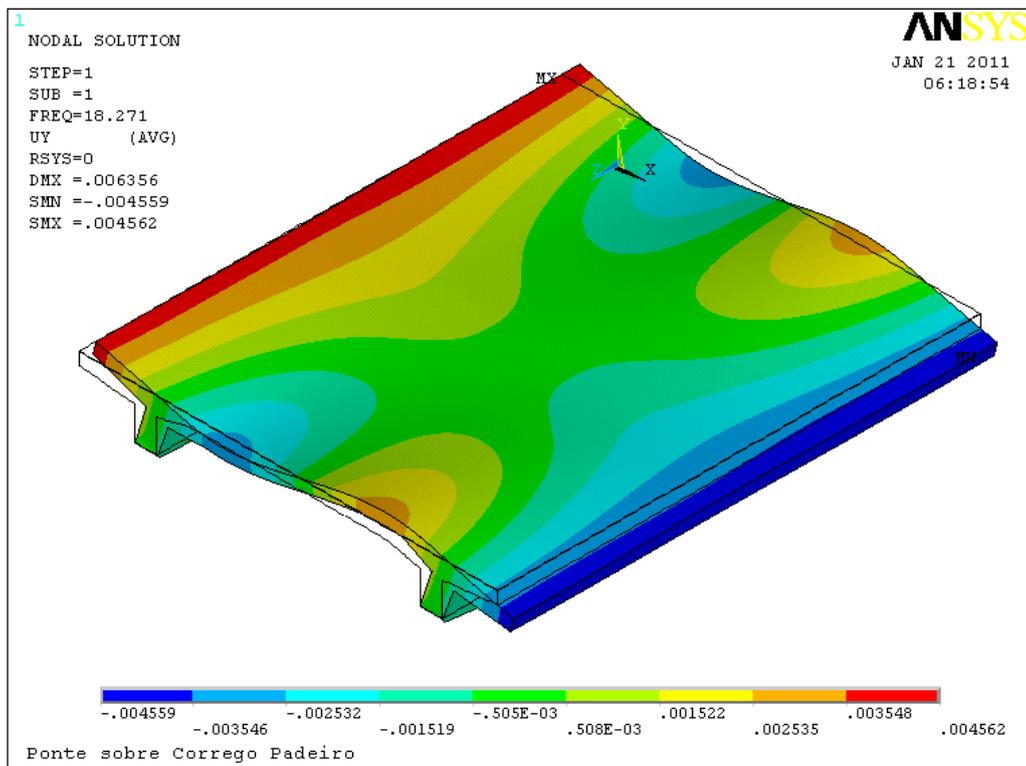


Figura 4.95 - Primeiro modo de vibração com deslocamento na VP.

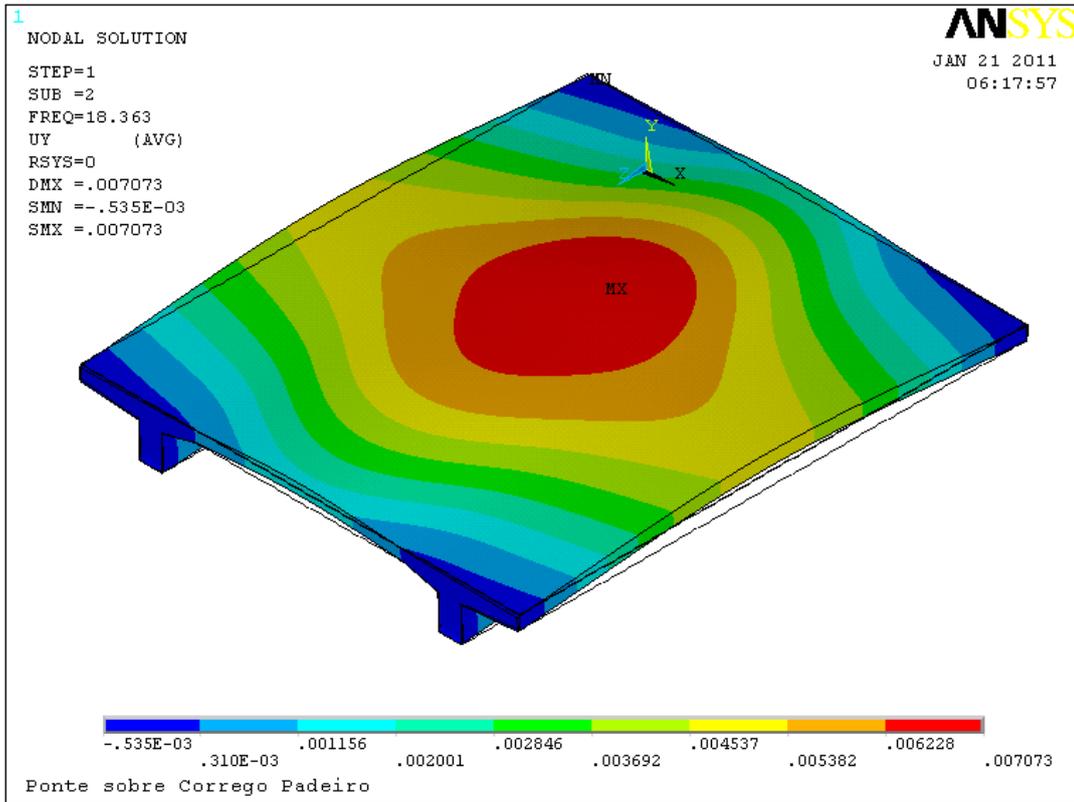


Figura 4.96 - Segundo modo de vibração com deslocamento na VP.

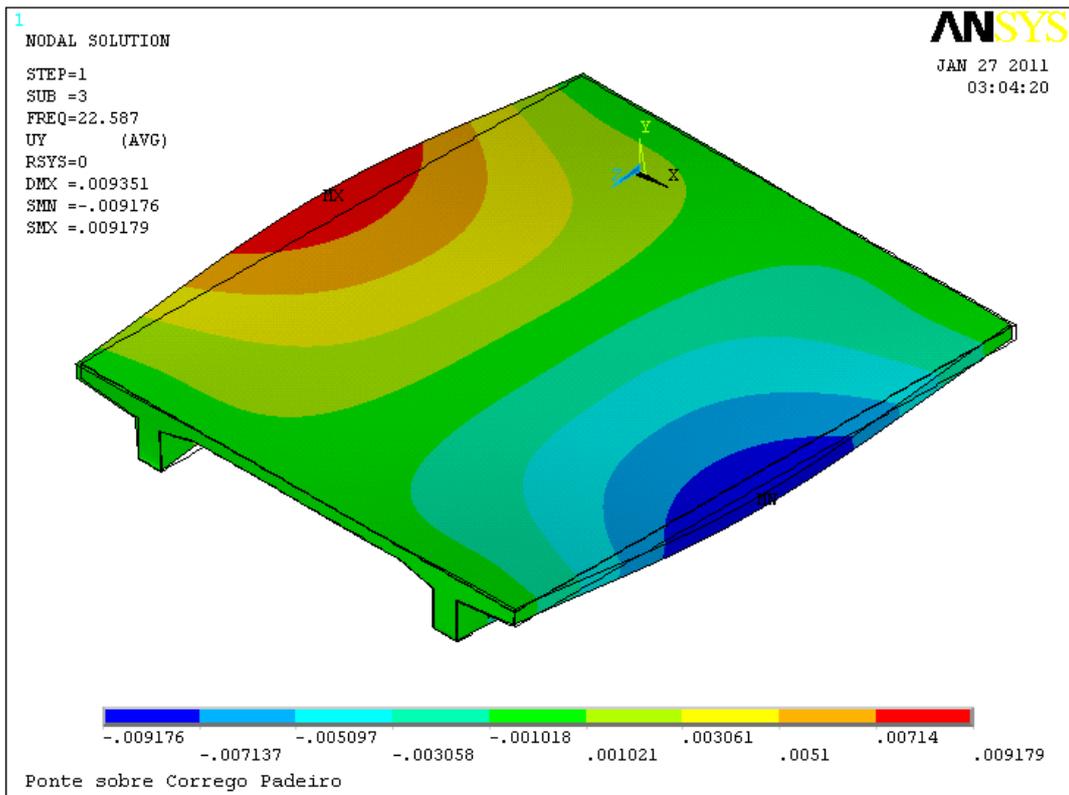


Figura 4.97 - Terceiro modo de vibração com deslocamento na VP.

A inserção do deslocamento na VP não foi suficiente para alterar a configuração dos modos de vibrar da ponte, porém este dano foi capaz de alterar os valores das frequências naturais da ponte, conforme podemos constatar na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Comparação entre as frequências naturais (Hz)

Frequências Naturais	f₁	f₂	f₃
Sem deslocamento	18,271	18,363	22,587
Com deslocamento	17,28	17,367	21,363

O gráfico com os valores do primeiro modo de vibração obtidos na linha inferior da viga principal, sem o dano e com o dano, é apresentado na Figura 4.98.

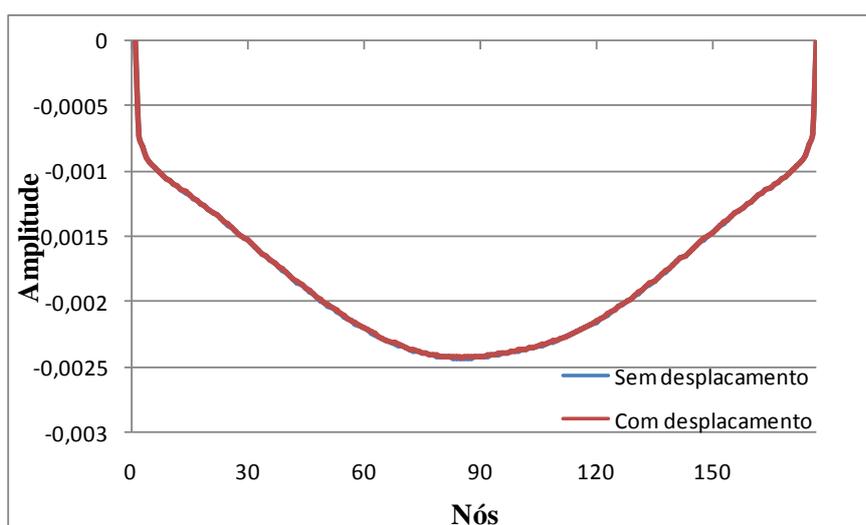


Figura 4.98 – Primeiro modo de vibração sem o dano e com o dano na VP.

Pela Figura 4.98 observa-se que a presença do deslocamento não provocou alterações significativas nos valores dos modos de vibração nodais.

4.3.2.1 Deslocamento na viga principal

Os sinais de modos de vibração da VP, referentes ao primeiro caso de dano, foram analisados utilizando a wavelet-mãe de db2. Os resultados desta análise são apresentados nas Figuras 4.99 a 4.101.

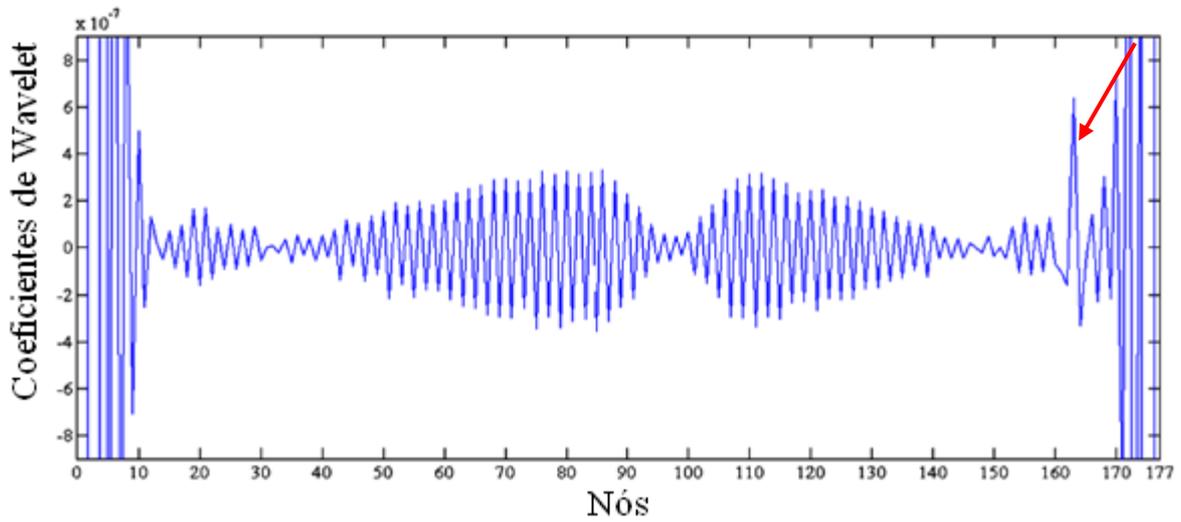


Figura 4.99 - Coeficientes de wavelet para deslocamento na VP usando db2.

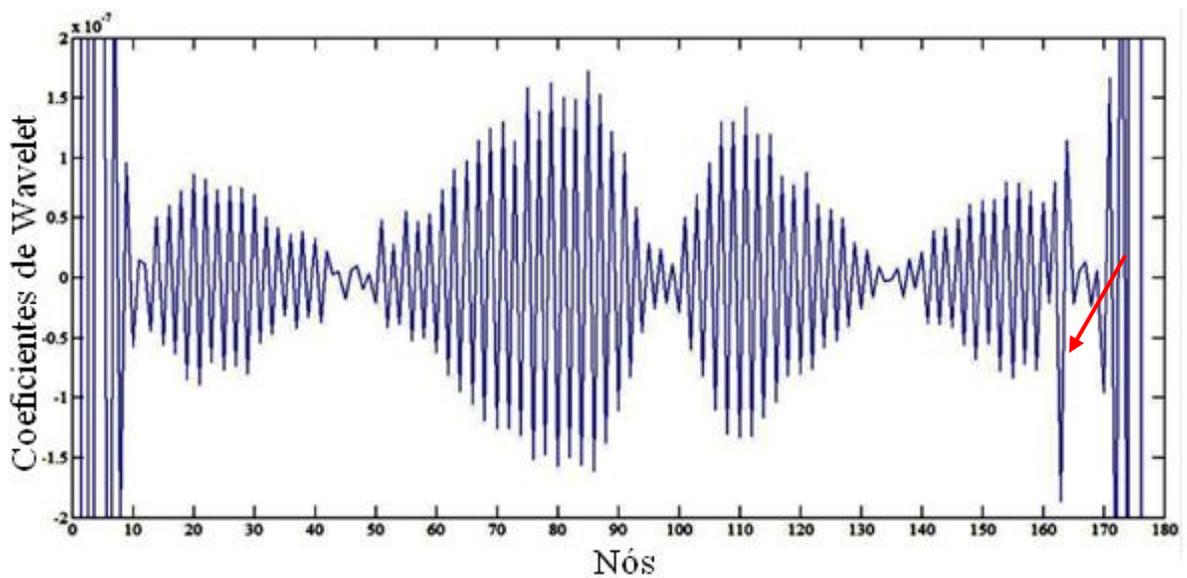


Figura 4.100 - Coeficientes de wavelet para deslocamento na VP com regularização usando db2.

Nas Figuras 4.99 e 4.100 os coeficientes de wavelet foram capazes de detectar a posição do dano, apesar do sinal transformado ter apresentado perturbações ao longo do sinal e nas extremidades da viga.

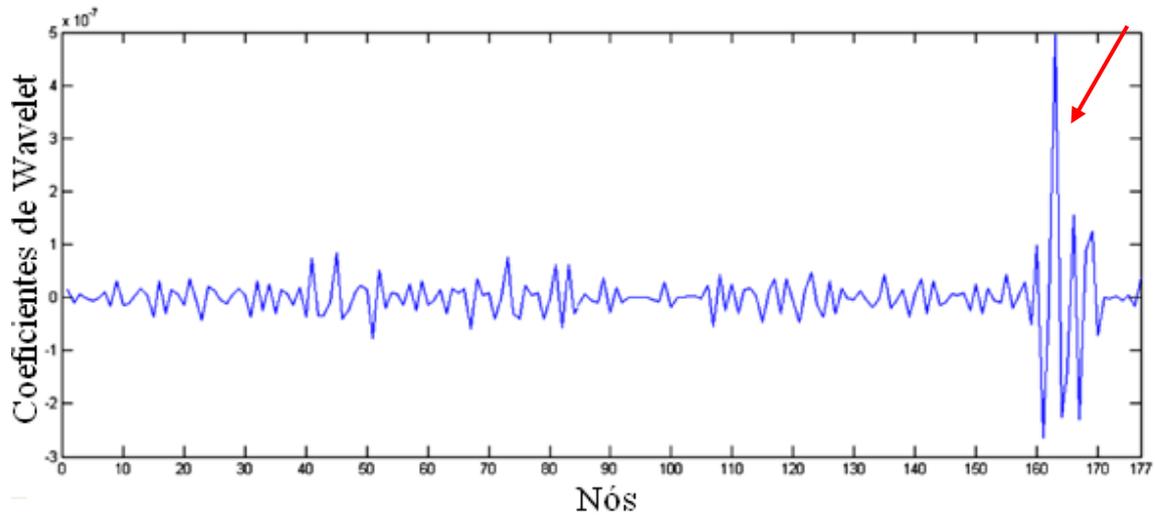


Figura 4.101 - Coeficientes de wavelet para deslocamento na viga principal com sinal da diferença entre dano e sem dano usando db2.

Na Figura 4.101, cujo sinal utilizado foi o da diferença entre os modos de vibração, com o dano e sem o dano, a posição do mesmo foi identificada com precisão.

4.3.2.2 Deslocamento no tabuleiro

O segundo caso de dano analisado foi o deslocamento no tabuleiro da ponte e os três primeiros modos de vibração da ponte com o dano são apresentados nas Figuras 4.102, 4.103 e 4.104.

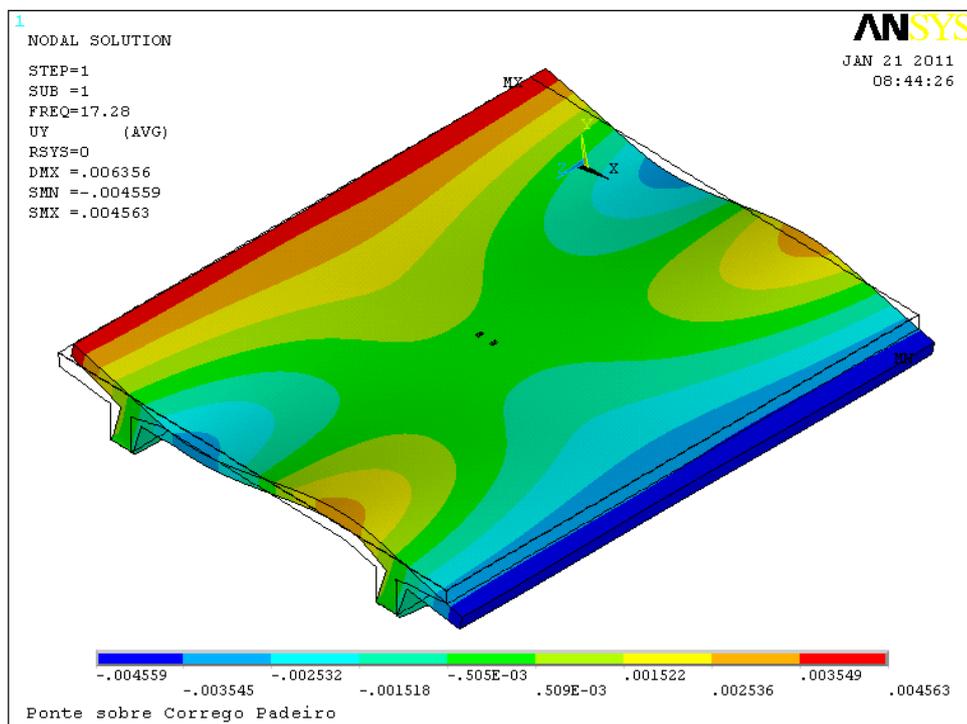


Figura 4.102 – Primeiro modo de vibração com deslocamento no tabuleiro da ponte.

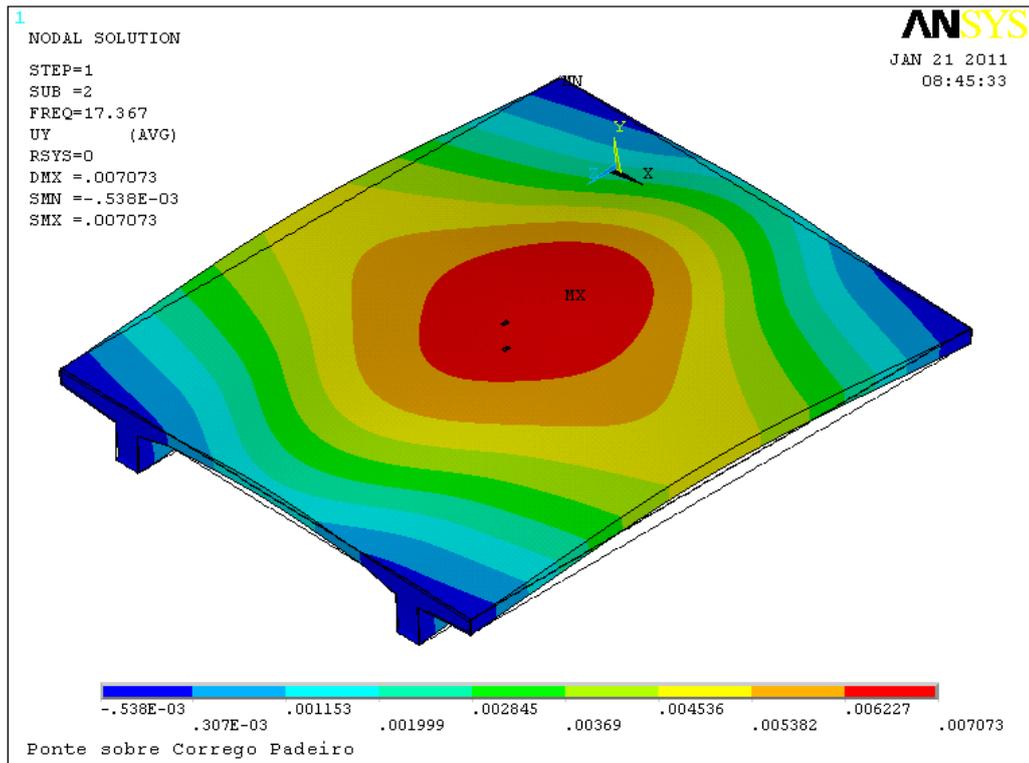


Figura 4.103 - Segundo modo de vibração com deslocamento no tabuleiro da ponte.

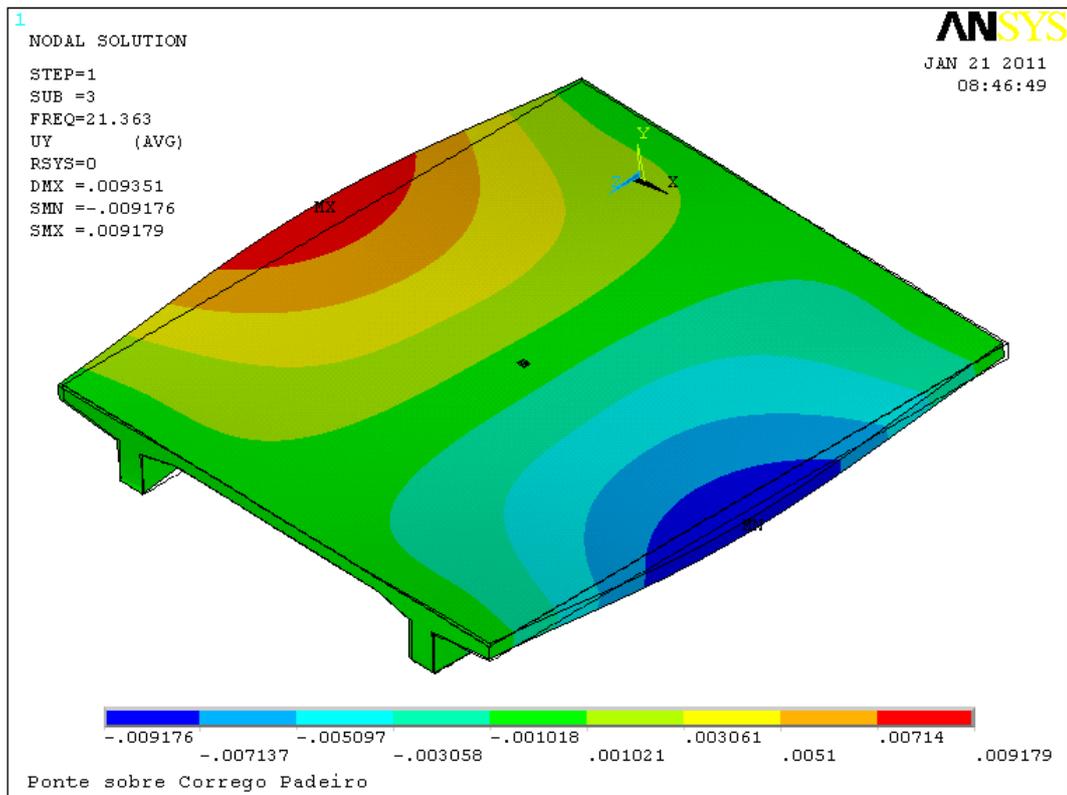


Figura 4.104 - Terceiro modo de vibração com deslocamento no tabuleiro da ponte.

Da mesma forma que no primeiro caso de deslocamento na viga, o deslocamento no tabuleiro não foi suficiente para alterar a configuração e os valores nodais dos modos de vibração na ponte, conforme pode ser observado nas Figuras 4.102, 4.103, 4.104 e 4.105.

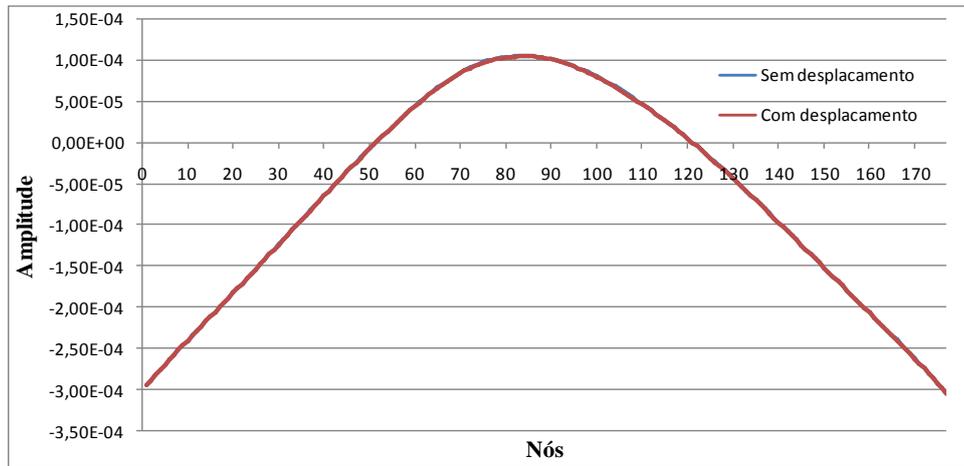


Figura 4.105 – Primeiro modo de vibração sem o dano e com o dano no tabuleiro.

Os valores nodais dos modos de vibração foram analisados sem ruído e com ruído de 1% e 2% utilizando a transformada discreta de *wavelet* com a *wavelet*-mãe bior6.8. Os resultados destas análises são apresentados a seguir.

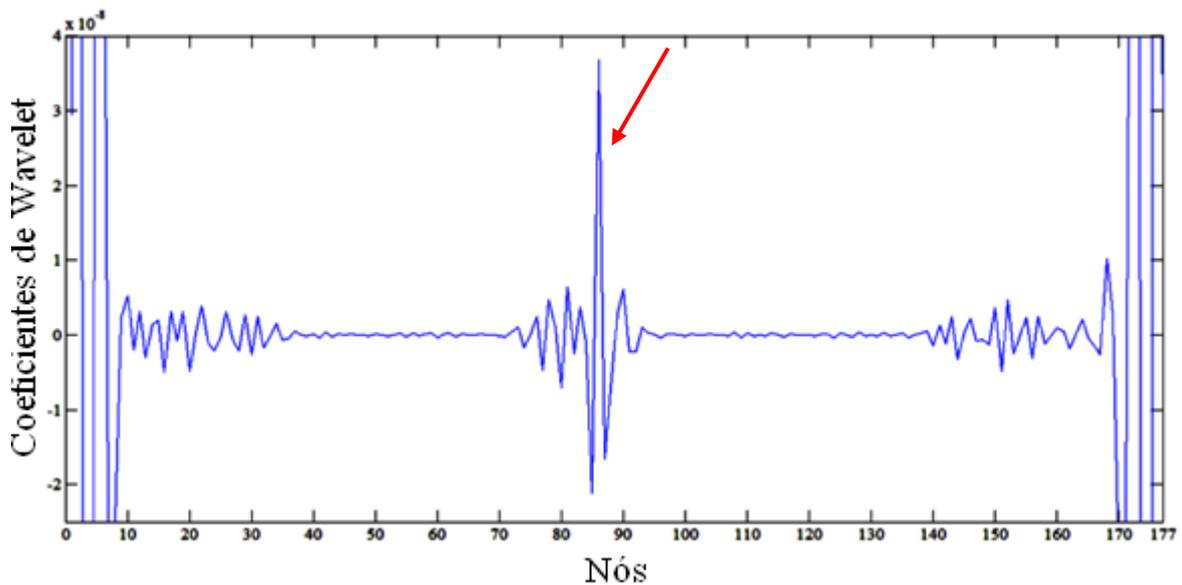


Figura 4.106 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro usando bior6.8.

Na Figura 4.106 pode-se observar com facilidade a localização do dano (nó 83), já que nas proximidades da região com o dano, os coeficientes de wavelet apresentaram uma grande amplitude em relação aos demais pontos

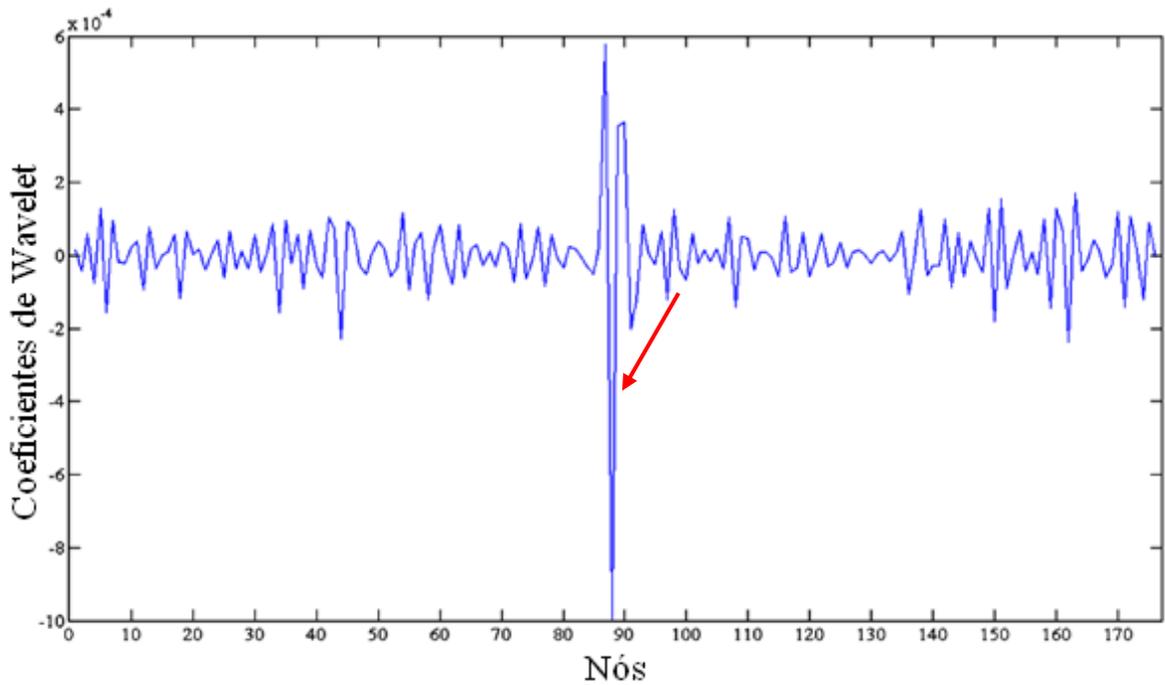


Figura 4.107 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro com 1% de erro no sinal modal e usando bior6.8.

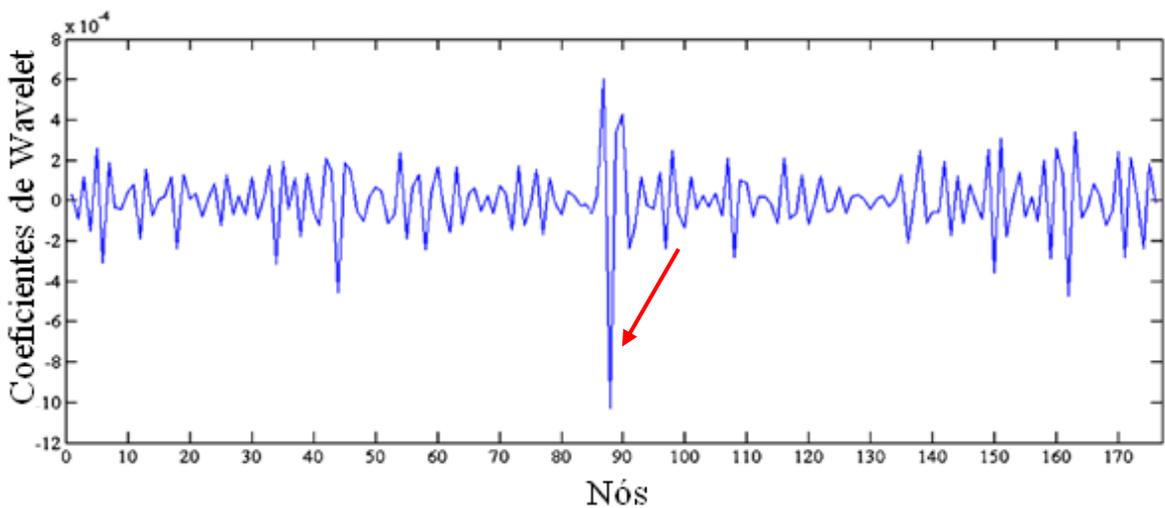


Figura 4.108 - Coeficientes de wavelet para deslocamento no tabuleiro com 2% de erro no sinal modal e usando bior6.8.

Nas Figuras 4.107 e 4.108 observa-se que os coeficientes de wavelet tiveram sua amplitude aumentada, consideravelmente, em relação ao sinal sem ruído, mas, mesmo assim, foi possível localizar o dano nas duas situações com o ruído

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

São apresentadas aqui as conclusões obtidas em cada uma das análises numéricas realizadas e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Neste trabalho, foram feitas diversas aplicações das transformadas de *wavelet* com o objetivo de detectar a posição do dano em diferentes tipos de estruturas, com diferentes condições de contorno e submetidas a carregamentos estáticos, modais e à ruídos de sinal

As transformadas discretas de *wavelet*, utilizando as *wavelets*-mãe de db2 e bior6.8 foram muito eficientes no processo de detecção do dano nas vigas, já que em todos casos tanto estáticos quanto modais, elas foram capazes de localizar a posição exata do dano. Além disso, os coeficientes de *wavelet* mostraram-se sensíveis às descontinuidades geométricas nas extremidades das vigas e às descontinuidades provocadas pelas cargas concentradas, visto que nestes pontos, os coeficientes de *wavelet* alcançaram grandes amplitudes.

Vale destacar também, a eficiência apresentada pelos coeficientes de *wavelet* na localização do dano, mesmo com a introdução de valores de 1% e 2% de ruído no sinal original.

As descontinuidades no sinal provocadas pelas mudanças de barra na treliça dificultaram a detecção do dano, porém foi possível localizar a posição do dano utilizando o sinal com o dano, e utilizando o sinal da diferença entre dano e sem dano. O uso da regularização no sinal obtido na treliça ajudou no processo de detecção de dano, pois o mesmo suavizou o sinal original.

A detecção do dano na ponte a partir de sinais estáticos não foi bem sucedida, pois não foi possível localizar com precisão a posição do dano na VP a partir do sinal original e nem a partir do sinal original regularizado. A detecção só foi possível utilizando o sinal da diferença entre dano e sem dano. Um dos possíveis motivos para a dificuldade da detecção do dano a partir de sinais estáticos, talvez, tenha sido devido ao carregamento concentrado do trem tipo ter induzido perturbações ao longo do sinal, já que foi comprovado na análise da detecção de danos em vigas que os coeficientes de *wavelet* são sensíveis à cargas concentradas. O mesmo não ocorreu para o segundo caso estático de deslocamento no

tabuleiro, no qual foi possível detectar a posição do dano a partir do sinal sem ruído e com adição de ruído no valor de 1% e 2%.

Na análise modal da ponte em todos os casos analisados do deslocamento na VP e deslocamento no tabuleiro, sem e com o ruído, os coeficientes de *wavelet* foram capazes de detectar a localização do dano

O processo de detecção de dano ficou mais evidente para os casos com deslocamento no tabuleiro do que para o deslocamento nas vigas principais, isso pode ser explicado pelo fato da extensão do dano no tabuleiro ter sido duas vezes maior do que nas vigas principais.

Nas situações analisadas com ruído adicionado nos sinais estáticos e modais da ponte, percebeu-se que o sinal modal foi mais sensível à adição do ruído, pois a adição do mesmo alterou um pouco a configuração original do sinal, além de alterar a amplitude dos coeficientes de *wavelet*.

De uma forma geral, assume-se que as transformadas de *wavelet* podem ser utilizadas como uma alternativa aos métodos tradicionais de detecção de danos, visto que as mesmas foram capazes de localizar a posição do dano para diversos casos, porém uma das desvantagens do uso das transformadas de *wavelet* é que a malha em elementos finitos deve ser bem refinada e regular, pois as transformadas de *wavelet* apresentam certa sensibilidade com relação a uma malha desordenada, gerando picos ao longo do sinal, dificultando, assim, a localização da posição do dano.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A busca incessante por critérios de determinação de danos e por respostas para os frequentes questionamentos que surgem ao longo do desenvolvimento de uma pesquisa, deve ser motivada por aqueles que querem dar uma contribuição nas diversas áreas do conhecimento. Com vistas a contribuir para busca de tais critérios e respostas, foram listadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Fazer análises experimentais com modelos de vigas e treliças em escala reduzida para testar a eficiência do método, usando as respostas estáticas e modais.

- Simular, numericamente, a corrosão das armaduras de peças de concreto armado através da redução de taxa de armadura no elemento finito SOLID65 e aplicar a transformada de *wavelet* para tentar localizar o dano provocado pela corrosão.
- Fazer estudo numérico visando avaliar um nível de refinamento ideal da malha em elementos finitos para alcançar bons resultados na detecção de danos.
- Fazer análises numéricas com número reduzido de pontos de aquisição de sinais e traçar uma curva de interpolação com o objetivo de gerar mais pontos a partir da curva interpolada, reduzindo assim o grau de refinamento da malha em elementos finitos.
- Ao se fazer um modelo simplificado da ponte utilizada neste estudo com elementos SHELL63 e BEAM4, comparar com os resultados obtidos com o modelo sólido.
- Testar a eficiência do método, utilizando respostas obtidas em ensaios de campo.
- Utilizar o método dos elementos de contorno como forma de obtenção dos sinais estáticos e modais para, em seguida, tentar aplicar as transformadas de *wavelet* com o objetivo de localizar o dano.
- Fazer um estudo paramétrico aumentando progressivamente o dano, verificando quando passa a ser sensível.
- Testar outras wavelets-mãe.
- Verificar a influência dos parâmetros de massa na wavelet.
- Testar a eficiência do método para utilização em outros tipos de estruturas como tubulações, barragens, plataformas offshore, torres de transmissão, passarela, pontes ferroviárias, entre outras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- _____.NBR7187: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- _____.NBR7188: Carga móvel em ponte de rodoviária e passarela de pedestre . Rio de Janeiro, 1984.
- Barbosa, A. R. (2001). Wavelets no intervalo em elementos finitos. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Beck J. V., Blackwell B., Clair Jr. C. R. ST. (1985). Inverse heat conduction – Ill-Posed Problems New York:Wiley-Interscience Publication.
- Bezerra, L. M.(1993). Inverse elastostatics solutions with boundary elements, PhD. Dissertation, Department of Civil Engineering of Carnegie Melon University, Pittsburgh.
- Brasiliano, A. (2001). Caracterização de dano em estruturas aporticadas. 2001. 109p. , Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.
- Blevins, R. D. (1979). Formulas for natural frequency and mode shape. United States of America, 492p.
- Brito, M. A. N. B. (2008). Análise de assinaturas elastostáticas e elastodinâmicas na solução do problema inverso de identificação de danos em treliças via método dos elementos finitos, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.
- Broek, D. (1986). Elementary engineering fracture mechanics. 4th ed. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.
- Caldeira, M. M. C. (2009). Procedimentos numéricos para a solução do problema inverso de localização de danos em estruturas aporticadas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.
- CEB (1990), CEB - FIP Model Code 90 (MC - 90).Design Code. Lausanne, May 1993. 437p. (Bulletin D'Information, 213-214).
- Cerni R. H., Foster, L. E. (1962). Instrumentation for engineering measurement. New York:John Wiley.

- Conhecasaopaulo, (2010). 360° da Ponte Octávio Frias de Oliveira. Disponível em: <http://conhecasaopaulo.zip.net/>. Acesso em: 02jun. 2010.
- Cunha, A. J. P., Lima, N. A. e Souza, V. C. M., (1998). Acidentes estruturais na construção civil, Vol. 2. Editora Pini, São Paulo.
- Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., Shevitz, D.W.(1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review, Los Alamos National Laboratory report no. LA-13070-MS.
- Douka, E., Loutridis, S., Trochidis, A., (2003). Crack identification in beams using wavelet analysis. *International Journal of Solids and Structures* 40, 3557–3569.
- DNIT, (2010). Relatório de diagnóstico das obras-de-arte especiais existentes.
- Estrada, E. S., (2008). Damage detection methods in bridges trough vibration monitoring:evaluation and application. Doctoral Thesis, University of Minho.
- Farrar, C.R., Jauregui, D.A. (1997). Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge; 2, numerical study. *Smart Materials and Structures*, nº. 7, 720-731
- Ferreira, M. D. C.(2007). Análise inversa em sólidos bidimensionais utilizando o método dos elementos de contorno. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, SP, 162p.
- Filho, L. A. C. M. A., Roitman, N., Magluta, C., (2008). Identificação de Carregamentos e Estruturas em Operação Através de Transformadas Wavelet. In: *Xxix Cilamce - Iberian Latin American Congress On Computational Methods In Engineering*, Alagoas.
- Folhaonline, (2005). Congestionamento em ponte que desabou atinge 15 km de extensão Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u104729.shtml>. Acesso em: 11jun. 2010.
- Flickr, (2010). Ponte JK. Disponível em: <http://www.flickr.com/photos/velhojr/91353643/>. Acesso em: 02 Jun. 2010.
- Grabowska, J., Palacz, M., Krawczuk, M. (2008). Damage identification by wavelet analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 22, 1623-1635
- Haar. A., (1910). Zur Theorie der Orthogonolem Funktionensysteme. *Math. Ann.* 69,331-371.
- Halmshaw, R. (1987). *Non-destructive testing*. Vitoria, Australia: Edward Arnold

- Helene, P. R. L. ; Pereira, F.(2007). Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto. São Paulo: Cargraphics, 598p.
- Honório, M. C. F.(1997). Problemas inversos em campo potencial com o método dos elementos de contorno, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 236p.
- Huang Yi., Meyer D., Nemat N. S. (2009). Damage detection with spatially distributed 2D continuous wavelet transform. *Mechanics of Materials*, 41,1096-1107.
- Hull, J. B., John V. B. (1988). *Non-destructive testing*. New York: Springer-Verlag.
- Husni, R. et al.(2005). Ações sobre as estruturas de concreto. *Manual de Reabilitação de Estruturas de Concreto. Reparo, Reforço e Proteção*.Sao Paulo: Red Habilitar, editores, p. 37-104.
- Kim, T.J., Ryu, Y.S., Cho, H.M., Stubbs, N.(2003). Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs modeshape- based method. *Engineering Structures* 25, 57–67.
- Kubo, S. (1988). Inverse problems related to the mechanics and fracture of solids and structures. *International Journal of Solid Mechanics* 31:157-166
- Leme, S. P. L., Aliabadi, M. H., Bezerra, L M, Partridge, P. W.(2007). An investigation into active strain transfer analysis in a piezoceramic sensor system for structural health monitoring using the dual boundary element method. *Structural durability and health monitoring*, Vol. 3, p. 121-132.
- Loureiro, P. L. M. (2004). Modelagem acústica no domínio da transformada wavelet. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro PUC-Rio. Rio de Janeiro, RJ, 74p.
- Mallat, S. (1989). A Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Trans. Pattern Anal and Machine Intell.* 11, 674-693.
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J. M. (2002). *Wavelet toolbox*. Math Works. Inc., Natick, Massachusetts
- Ndambi, J.-M., Vantomme, J., Harri, K.(2002). Damage assessment in reinforced concrete beams using eigenfrequencies and mode shape derivatives, *Engineering Structures*, 24, 501–515.
- Nepomuceno, A. A., Teatini, J. C.(2009). *Notas de aula da disciplina de Patologia, Recuperação e Manutenção de Estruturas da Universidade de Brasília*.
- Neville, A., (1997). *Propriedades do concreto*, 2º Ed. São Paulo: PINI, 826p.

- Okafor A. C., Dutta, A. (2000). Structural damage detection in beams by wavelet transforms. *Smart Materials and Structures* 9, 906-917.
- Ovanesova, A. V., (2000). Applications of wavelets to crack detection in frame structures. Tese de Doutorado da Universidade do Porto Rico, 235p.
- Ovanesova, A. V., Suárez L. E.(2004). Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures. *Journal Engineering Structures* 26, 39-49
- Pandey, A.K., Biswas, M., Samman, M.M., (1991). Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration* 145 (2), 321–332.
- Pandey, A.K., Biswas, M.(1994). Damage detection in structures using changes in flexibility, *Journal of Sound and Vibration*, 169(1), 3-17.
- Presezniak, F. A. (2007). Identificação de danos e determinação da vida útil em estruturas usando transformada wavelet e conceitos de mecânica da fratura. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 149p.
- Polikar (2010). The wavelet tutorial parte III. Multiresolution analysis and the cwt. Disponível em: <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTpart3.html> Acesso em: 05 maio. 2010
- Quek, S. T., Wang, Q., Zhang L., Ang, K. K. (2001). Sensitivity analysis of crack detection in beams by wavelet technique. *International Journal of Mechanical Sciences* 43,2899-2910.
- Ramos, L.F.(2007). Damage identification on masonry structures based on vibration signatures, PhD dissertation, University of Minho, Guimarães, Portugal.
- Rytter, A.(1993). Vibration based inspection of civil engineering structures, Ph.D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.
- Silva, R. S. Y. C., Bezerra, L. M., Brito, M. A. N. (2010). Determinação de danos em vigas usando transformada de wavelet. In: 31º Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia, CILAMCE, 2010.Buenos Aires.Argentina.
- Surace,C., Ruotolo, R. (1994). Crack detection of a beam using the wavelet transform. In: Proceedings of the 01th International Modal Analysis Conference, Honolulu, 1141-1147.
- Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemat, D.W., Nadler, B.R.(2003). A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS.

- Tanaka M., Nakamura M., Nakano T.(1988). Defect shape identification by means of elastodynamics boundary element analysis and optimization technique. *Advances in Boundary Elements*. Ed. C. A. Brebbia. Berlin: Springer Verlag. Vol. 3. 183-194.
- Vitório, J. A. P.(2008). Avaliação do grau de risco estrutural de pontes rodoviárias de concreto.In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON.
- Zhu, X. Q., Law, S. S. (2006). Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history. *International Journal of Solids and Structures* 43, 2299-2317.
- Wang, Q., Deng, X.M.(1999). Damage detection with spatial wavelets. *International Journal of Solids and Structures* 36, 3443–3468.
- Wang, Q, Dajun, W., Xianyue, Su. (1999). Crack detection of structure for plane problem with spatial wavelets. *Chinese Journal of Mechanics Press*, Vol. 15.

APÊNDICES

APÊNDICE A – SCRIPT UTILIZADO PARA GERAÇÃO DA ANÁLISE ESTÁTICA DA PONTE SOBRE RIO PADEIRO

FINISH

/CLEAR

/PREP7

/TITLE, Ponte sobre Corrego Padeiro

!Propriedades do Concreto

Ec = 21287.06e6 !Módulo de elasticidade do concreto para um fck de 20 Mpa (N/m²)

vc = 0.2 !Coeficiente de Poisson concreto

dc = 2500 !Peso específico do concreto armado (Kg/m³)

!Definição da geometria

!Definição dos keypoints

K,1,0,0,0

K,2,0,0.611,0

K,3,-1,0.722,0

K,4,-1,0.95,0

K,5,6.6,0.95,0

K,6,6.6,0.722,0

K,7,5.6,0.611,0

K,8,5.6,0,0

K,9,5.2,0,0

K,10,5.2,0.6,0

K,11,4.6,0.75,0

K,12,1,0.75,0

K,13,0.4,0.6,0

K,14,0.4,0,0

K,15,0.4,0,4.6

K,16,5.2,0,4.6

K,17,5.2,0.6,4.6

K,18,4.6,0.75,4.6

K,19,1,0.75,4.6

K,20,0.4,0.6,4.6

!Definição das areas do tabuleiro, transversina e longarinas

```

A,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14 !Cria área da seção transversal
A,15,16,17,18,19,20
!Definição do tipo de elemento
ET,1,SOLID65
MP,EX,1,Ec !Definição do modulo de elasticidade do concreto
MP,NUXY,1,vc !Definição do Coeficiente de poisson do concreto
MP,dens,1,dc !Definição do peso específico do concreto
!Criação dos volumes!
FLST,2,1,5,ORDE,1 !Extruda área 1 ao longo do eixo z
FITEM,2,1
VEXT,P51X,,,0,0,8.8,,,,
FLST,2,1,5,ORDE,1 !Extruda área 2 ao longo do eixo z
FITEM,2,2
VEXT,P51X,,,0,0,0.4,,,,
type,1
mat,1
real,1
esize,20
FLST,2,2,6,ORDE,2 !Cola volumes
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
VGLUE,P51X

!Geração da malha tipo Sweep
ESIZE,0.05,0,
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,-3
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*

```

```
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
```

!Geração das condições de contono nas extremidades das vigas

```
FLST,2,4,4,ORDE,4
FITEM,2,8
FITEM,2,14
FITEM,2,28
FITEM,2,34
!*
/GO
DL,P51X, ,ALL,
```

!Geração do carregamento de multidão na ponte mais carregamento devido ao pavimento

```
ASEL,S, , , 7
APLOT
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,7
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,6300
```

!Geração do carregamento devido o trem tipo de 45t

```
FLST,2,6,1,ORDE,6
FITEM,2,53986
FITEM,2,54016
FITEM,2,54046
FITEM,2,61161
FITEM,2,61191
FITEM,2,61221
!*
```

/GO

F,P51X,FY,-56100

!Consideração da aceleração da gravidade para cálculo do peso próprio da estruturas

acel,0,9.81,0

APÊNDICE B – SCRIPT UTILIZADO PARA GERAÇÃO DA ANÁLISE MODAL DA PONTE SOBRE RIO PADEIRO

FINISH
/CLEAR
/PREP7
/TITLE, Ponte sobre Corrego Padeiro

!Propriedades do concreto

Ec = 21287.06e6 !Módulo de elasticidade do concreto para um fck de 25 Mpa (N/m²)
vc = 0.2 !Coeficiente de Poisson do concreto
dc = 2500 !Peso específico do concreto armado (Kg/m³)

!Definição da geometria!

!Definição dos keypoints

K,1,0,0,0
K,2,0,0.611,0
K,3,-1,0.722,0
K,4,-1,0.95,0
K,5,6.6,0.95,0
K,6,6.6,0.722,0
K,7,5.6,0.611,0
K,8,5.6,0,0
K,9,5.2,0,0
K,10,5.2,0.6,0
K,11,4.6,0.75,0
K,12,1,0.75,0
K,13,0.4,0.6,0
K,14,0.4,0,0
K,15,0.4,0,4.6
K,16,5.2,0,4.6
K,17,5.2,0.6,4.6
K,18,4.6,0.75,4.6
K,19,1,0.75,4.6
K,20,0.4,0.6,4.6

!Definição das areas do tabuleiro, transversina e longarinas

A,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14 !Cria área da seção transversal
A,15,16,17,18,19,20

!Definição do tipo de elemento

ET,1,SOLID65

MP,EX,1,Ec !Definição do módulo de elasticidade do concreto
MP,NUXY,1,vc !Definição do coeficiente de poisson do concreto
MP,dens,1,dc !Definição do peso específico do concreto
!Criação dos volumes!

```
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
VEXT,P51X,,0,0,8.8,,,
```

!Extruda área 1 ao longo do eixo z

```
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,2
VEXT,P51X,,0,0,0.4,,
type,1
mat,1
real,1
esize,20
```

!Extruda área 2 ao longo do eixo z

```
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
VGLUE,P51X
```

!Cola volumes

!Geração da malha tipo Sweep

```
ESIZE,0.05,0,
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,-3
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
```

!Geração das condições de contorno nas extremidades das vigas

```
FLST,2,4,4,ORDE,4
FITEM,2,8
FITEM,2,14
FITEM,2,28
FITEM,2,34
!*
/GO
DL,P51X, ,ALL,
```

!Escolha do tipo de análise(odal) e determinação da quantidade de modos de vibração(3)

```
/SOL
!*
ANTYPE,2
!*
!*
MODOPT,LANB,3
EQLV,SPAR
MXPAND,0, , 0
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
MODOPT,LANB,3,0,0, ,OFF
```

APÊNDICE C – ROTEIRO EM MATLAB PARA CALCULAR AS TDW

PASSO 1: criação do arquivo contendo as informações do sinal a ser analisado

Criar um vetor linha no MATLAB referente ao sinal estático ou dinâmico com o número de colunas igual ao número de nós da estrutura e em seguida salvar o sinal criado no “workspace”

PASSO 2: carregamento do sinal no MATLAB

No command window do MATLAB digitar:

Load sinal (sinal = nome do vetor sinal salvo no PASSO 2).

$s = \text{sinal}(1:n)$, onde n é o número de colunas do sinal a ser analisado.

$l_s = \text{length}(s)$.

PASSO 3: decomposição do sinal

$[cA1, cD1] = \text{dwt}(s, \text{'nome da wavelet-mãe e ordem desejada'})$, por exemplo ‘db2’.

PASSO 4: cálculo dos coeficientes de wavelet

$D1 = \text{upcoef}(\text{'d'}, cD1, \text{'db2'}, 1, l_s)$;

PASSO 5: plotagem do gráfico (Nós x Coeficientes de Wavelet)

$\text{plot}(D1)$.

ANEXOS

ANEXO A - RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DA PONTE SOBRE O CÓRREGO PADEIRO



Figura A.1 – Vista frontal – estaca inicial (DNIT, 2010)



Figura A.2 – Vista lateral a montante (DNIT, 2010)



Figura A.3 – Vista inferior da ponte (DNIT, 2010)



Figura A.4 – Leito do rio (DNIT, 2010)



Figura A.5 – Vista do encontro E1 (DNIT, 2010)



Figura A.6 – Vista do encontro E2 (DNIT, 2010)



Figura A.7 – Ferragem exposta na parte inferior do tabuleiro (DNIT, 2010)



Figura A.8 – Tabuleiro com proteção lateral danificada(DNIT, 2010)



Figura A.9 – Vista lateral a jusante (DNIT, 2010)



Figura A.10 – Vista frontal – estaca final (DNIT, 2010)

ANEXO B – FICHA DE INSPEÇÃO

Consol Engenharia Consultoria		VISTORIA DE OBRAS - DE - ARTE ESPECIAIS					DNIT	
FICHA DE INSPEÇÃO ROTINEIRA EXPEDITA								
OAE (Codigo):	7	Nome :	Ponte Sobre o Corrego Padeiro		Rodovia:	BR-163/364/MT	km :	409,8
Coordenação:	Roberto Alvim	Inspeção :	<input type="checkbox"/> DNIT / Residência :	<input checked="" type="checkbox"/> Outra Entidade	CONSOL	Data :	3/3/2010	
Comentários								
a) Condições de Estabilidade : <input checked="" type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Sofrível <input type="checkbox"/> Precária Condições de Conservação: <input checked="" type="checkbox"/> Baixa <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Sofrível								NOTA TÉCNICA
b) Nível de Vibração do Tabuleiro : <input checked="" type="checkbox"/> Normal <input type="checkbox"/> Intenso <input type="checkbox"/> Exagerado								4
c) Inspeção Especializada (Realizada por Engenheiro de Estruturas). Necessária ? <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não Urgente ? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não								
Já houve alguma anteriormente <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não								
Observações Adicionais : Barreira New Jersey danificadas e com fixação insuficiente, proteção lateral antiga (guarda corpo) não removida totalmente da estrutura, falta delineadores para sinalização e defensas metálicas								
Página 1								
1 - LAJE								
					NOTA TÉCNICA:	4	Local	Quantidade (Opcional)
Buraco (abertura)	<input type="checkbox"/>	Existe	<input type="checkbox"/>	É Iminente				
Armadura Exposta	<input checked="" type="checkbox"/>	Muito Oxidada	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência		Parte inferior do tabuleiro		
Concreto Desagregado	<input type="checkbox"/>	Muita Intensidade	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Fissuras	<input type="checkbox"/>	Forte Infiltração	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Marcas de Infiltração	<input type="checkbox"/>	Forte	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Aspecto de Concreto	<input type="checkbox"/>	Má Qualidade						
Cobrimento	<input checked="" type="checkbox"/>	Ausente / Pouco				Parte inferior do tabuleiro		
2 - VIGAMENTO PRINCIPAL								
					NOTA TÉCNICA:	5	Local	Quantidade (Opcional)
Fissuras Finas	<input type="checkbox"/>	Algumas	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Trincas (fissuras w > 0,3 mm)	<input type="checkbox"/>	Algumas	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Armadura Principal	<input type="checkbox"/>	Exposta	<input type="checkbox"/>	Muito Oxidada				
Desagregamento de Concreto	<input type="checkbox"/>	Muito Intenso	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Dente Gerber	<input type="checkbox"/>	Quebrado / Desplacado	<input type="checkbox"/>	Trincado				
Deformação (Flecha)	<input type="checkbox"/>	Exagerada						
Aspectos do Concreto	<input type="checkbox"/>	Má Qualidade						
Cobrimento	<input type="checkbox"/>	Ausente / Pouco						
3 - MESOESTRUTURA								
					NOTA TÉCNICA:	5	Local	Quantidade (Opcional)
Armadura Exposta	<input type="checkbox"/>	Muito Oxidada	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Concreto Desagregado	<input type="checkbox"/>	Muita Intensidade	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Fissuras	<input type="checkbox"/>	Forte Infiltração	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Aparelho de Apoio	<input type="checkbox"/>	Danificado	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Aspectos do Concreto	<input type="checkbox"/>	Má Qualidade						
Cobrimento	<input type="checkbox"/>	Ausente / Pouco						
Desaprumo	<input type="checkbox"/>	Há						
Deslocabilidade dos Pilares	<input type="checkbox"/>	Forte						
4 - INFRAESTRUTURA								
					NOTA TÉCNICA:	5	Local	Quantidade (Opcional)
Recalque de Fundação	<input type="checkbox"/>	Muita Oxidada	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Deslocamento de Fundação	<input type="checkbox"/>	Muita Intensidade	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Erosão Terreno de Fundação	<input type="checkbox"/>	Forte Infiltração	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
Estacas Desenterradas	<input type="checkbox"/>	Danificado	<input type="checkbox"/>	Grande Incidência				
5 - PISTA / ACESSO								
					NOTA TÉCNICA:	5	Local	Quantidade (Opcional)
Irregularidades no Pavimento	<input type="checkbox"/>	Muita Intensidade	<input type="checkbox"/>	Grande Extensão				
Junta de Dilatação	<input type="checkbox"/>	Faltando / Inoperante	<input type="checkbox"/>	Muito Problemática				
Acessos x Ponte	<input type="checkbox"/>	Degrau Acentuado	<input type="checkbox"/>	Concordância Problem.				
Acidentes com Veículos	<input type="checkbox"/>	Frequente	<input type="checkbox"/>	Eventual				