

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

TARCÍSIO DIAS DA SILVA

Identificação e localização de danos estruturais mediante respostas dinâmicas

SÃO PAULO

2021

TARCÍSIO DIAS DA SILVA

Identificação e localização de danos estruturais mediante respostas dinâmicas

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Estruturas

Orientadores:

Prof. Dr. Valério da Silva Almeida

Prof. Dr. Túlio Nogueira Bittencourt

SÃO PAULO

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 09 de junho de 2021

Assinatura do autor: Tarcísio Dias da Silva

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Silva, Tarcísio
Identificação e localização de danos estruturais mediante respostas dinâmicas / T. Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2021.
117 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1. Análise de Ondaletas 2. Detecção de Danos 3. Vigas (Análise)
4. Análise modal I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II. t.

TARCÍSIO DIAS DA SILVA

Identificação e localização de danos estruturais mediante respostas dinâmicas

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Estruturas

SÃO PAULO

2021

Dedicatória.

*À minha mãe,
por todo apoio e amor incondicional*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por toda força, coragem e amparo concedido, que me permitiram seguir até a conquista e conclusão de mais esse passo na minha vida.

À minha mãe e pai, Iete Dias, pelo amor, incentivo e todo apoio em todas as horas, e a minha mãe paulista, Tia Nice (*in memoriam*), pelo apoio e amor de todos os dias.

A meus irmãos e a toda minha família por acreditar e incentivar mais um passo de meus estudos.

A meus orientadores Profs. Dr. Túlio Nogueira Bittencourt e Dr. Valério da Silva Almeida, pela disponibilidade, orientação, apoio e oportunidade do aprendizado ao longo dessa jornada.

À Fernanda, irmã que a vida me deu, por todo companheirismo e todo incentivo. À Natanna, por mesmo distante ser uma amiga mais que presente, e a Felipe, Nathanael e Gustavo por todas as horas de risadas e abstração.

Aos meus irmãos Adhara, Ráira, Thay, Carol, Anna, Camila e Guilherme, um verdadeiro ser integral, por todo amor a cada dia, pelo incentivo e por me ajudarem a segurar firme diante de todas as adversidades, em especial a Tia Jane, por ser essa mãezona amorosa em todos os momentos.

A todo GMEC, pelo apoio, incentivo e oportunidade da realização desse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

SILVA, Tarcísio. **Identificação e localização de danos estruturais mediante respostas dinâmicas**. 2020. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Técnicas não destrutivas, baseadas em respostas dinâmicas da estrutura, representam uma alternativa aos métodos tradicionais para obtenção de informações sobre o comportamento da estrutura. Com isso, as análises baseadas em vibrações têm evoluído, permitindo bons resultados na identificação de potenciais danos. Utilizando da premissa de que as características significantes de uma estrutura mudam a partir de qualquer modificação em suas propriedades mecânicas, o objetivo desse trabalho foi o estudo de métodos de identificação e localização de danos. Dois modelos numéricos de vigas foram utilizados: um em aço e outro em concreto simples. Diversos casos de danos foram simulados no *software* ABAQUS®, e as respostas dinâmicas obtidas foram processadas através do Matlab®, utilizando os métodos: (1) Transformadas de Wavelets, (2) Diferença da Curvatura Modal (MCD), (3) Indicador Baseado em Dados de Modos de Vibração (MSDBI) e (4) os métodos (2) e (3) modificados. Os resultados obtidos mostraram que as Transformadas de Wavelets foram capazes de detectar os danos e os métodos modificados apresentaram desempenho superior aos métodos originais. O uso de tais métodos se mostrou promissor para o processo de detecção e identificação de danos em estruturas.

Palavras-chave: Análise de Ondas. Detecção de Danos. Vigas (Análise). Análise modal.

ABSTRACT

SILVA, Tarcísio. **Structural damage location based on modal parameters**. 2020. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Non-destructive techniques based on modal parameters constitute an alternative to traditional methods on obtaining information about structures behaviour. As a result, vibration analysis has been evolving, allowing satisfactory results. Since dynamics properties change at significant modification on the mechanical properties of a structure, this research aimed to analyze damage detection methods based on those parameters. Two numerical beams were modeled on ABAQUS® in steel and concrete. Tests were performed and the modal parameters and displacements were processed by Matlab®, upon applying the methods studied on this research: Wavelet transforms, Modal Curvature Difference, Mode Shape Data Based Indicator, and a modified version of the last two. Results showed that wavelet transform detected the damage and the modified version of the other two methods had a better performance than the original ones. These methods showed to be effective on the process of damage detecting on structures.

Keywords: Wavelet transform. Damage detection. Beams. Modal analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Característica e origem das cargas dinâmicas típicas: (a) harmônica, (b) periódica, (c) impulsiva e (d) transiente.....	20
Figura 2 - Análise teórica das vibrações de um sistema	21
Figura 3 - Análise experimental das vibrações de um sistema.....	21
Figura 4 - Comparação de sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência	24
Figura 5 - A Transformada de <i>Wavelet</i>	32
Figura 6 - Comparação de sinais	33
Figura 7 - Processo da Transformada de Wavelet.....	34
Figura 8 - Funções cosseno para várias escalas	34
Figura 9 - Efeito do deslocamento da função	35
Figura 10 - Cálculo dos coeficientes de wavelet	35
Figura 11 - Escala de uma função wavelet.....	36
Figura 12 - Explicação do eixo dos gráficos	36
Figura 13 - Exemplos de gráficos para Transformada Contínua de Wavelet (CWT).	36
Figura 14 - Função Haar	40
Figura 15 - Funções Daubechies	40
Figura 16 - Funções Biortogonais	41
Figura 17 - Funções Symlet	42
Figura 18 - Função Coiflet.....	42
Figura 19 - Diferença da Curvatura Modal (MCD) em viga biapoiada.....	44
Figura 20 - Exemplo de deslocamento da deformada modal de uma estrutura íntegra	46
Figura 21 - Exemplo de deslocamento da deformada modal de uma estrutura danificada.....	46
Figura 22 - Ilustração do comprimento do entalhe na seção.....	50
Figura 23 - Modelo da viga de concreto discretizada	52
Figura 24 - Modelo da viga de aço discretizada	52
Figura 25 - Modelo da viga de concreto discretizada com o elemento 9 danificado .	53
Figura 26 – Dano simulado com dimensão 20x20mm	53
Figura 27 – Dano simulado com dimensão 5x25mm	53
Figura 28 - Seção transversal dos danos na viga de aço.....	54

Figura 29 - Modos de vibração para a viga VA_INT.....	56
Figura 30 - Modos de vibração para a viga VA_D1.....	56
Figura 31 - Modos de vibração para a viga VA_D2.....	56
Figura 32 - Modos de vibração para a viga VA_D3.....	57
Figura 33 - Modos de vibração para a viga VA_D3.....	57
Figura 34 – Interpolação e Regularização Modo 1 - VA_D1	58
Figura 35 - Interpolação e Regularização Modo 2 - VA_D1	58
Figura 36 - Interpolação e Regularização Modo 3 - VA_D3	58
Figura 37 - DWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando bior6.8	59
Figura 38 - DWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando coif3.....	59
Figura 39 - DWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando db5	59
Figura 40 - DWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando sym6.....	59
Figura 41 - DWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando bior6.8	60
Figura 42 - DWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando coif3.....	60
Figura 43 - DWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando db5	60
Figura 44 - DWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando sym6.....	60
Figura 45 - DWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando bior6.8	61
Figura 46 - DWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando coif3.....	61
Figura 47 - DWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando db5	61
Figura 48 - DWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando sym6.....	61
Figura 49 - DWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando bior6.8	61
Figura 50 - DWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando coif3.....	61
Figura 51 - DWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando db5	62
Figura 52 - DWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando sym6.....	62
Figura 53 - DWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando bior6.8	62
Figura 54 - DWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando coif3.....	62
Figura 55 - DWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando db5	63
Figura 56 - DWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando sym6.....	63
Figura 57 - DWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando bior6.8	63
Figura 58 - DWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando coif3.....	63
Figura 59 - DWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando db5	63
Figura 60 - DWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando sym6.....	63
Figura 61 - DWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando bior6.8	64
Figura 62 - DWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando coif3.....	64

Figura 63 - DWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando db5	64
Figura 64 - DWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando sym6.....	64
Figura 65 - DWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando bior6.8	65
Figura 66 - DWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando coif3.....	65
Figura 67 - DWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando db5	65
Figura 68 - DWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando sym6.....	65
Figura 69 - CWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando coif4.....	66
Figura 70 - CWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando db5	67
Figura 71 - CWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando gaus8.....	67
Figura 72 - CWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando sym8.....	67
Figura 73 - CWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando coif4.....	68
Figura 74 - CWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando db5	68
Figura 75 - CWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando gaus8.....	68
Figura 76 - CWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando sym8.....	69
Figura 77 - CWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando coif4.....	69
Figura 78 - CWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando db5	70
Figura 79 - CWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando gaus8.....	70
Figura 80 - CWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando sym8.....	70
Figura 81 - CWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando coif4.....	71
Figura 82 - CWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando db5	71
Figura 83 - CWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando gaus8.....	71
Figura 84 - CWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando sym8.....	72
Figura 85 - CWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando coif4.....	72
Figura 86 - CWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando db5	73
Figura 87 - CWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando gaus8.....	73
Figura 88 - CWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando sym8.....	73
Figura 89 - CWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando coif4.....	74
Figura 90 - CWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando db5	74
Figura 91 - CWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando gaus8.....	74
Figura 92 - CWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando sym8.....	75
Figura 93 - CWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando coif4.....	75
Figura 94 - CWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando db5	76
Figura 95 - CWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando gaus8.....	76
Figura 96 - CWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando sym8.....	76

Figura 97 - CWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando coif4.....	77
Figura 98 - CWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando db5	77
Figura 99 - CWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando gaus8.....	77
Figura 100 - CWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando sym8.....	78
Figura 101 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VA_D1	79
Figura 102 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VA_D2.....	80
Figura 103 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VA_D3.....	80
Figura 104 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VA_D4.....	81
Figura 105 - Modos de vibração para a viga VA_INT.....	81
Figura 106 - Modos de vibração para a viga VA_D1.....	82
Figura 107 - Modos de vibração para a viga VA_D2.....	82
Figura 108 - Modos de vibração para a viga VA_D3.....	82
Figura 109 - Modos de vibração para a viga VA_D4.....	83
Figura 110 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VA_D1.....	84
Figura 111 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VA_D2.....	84
Figura 112 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VA_D3.....	84
Figura 113 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VA_D4.....	85
Figura 114 - Modos de vibração para a viga VC_INT	86
Figura 115 - Modos de vibração para a viga VC_D1.....	86
Figura 116 - Modos de vibração para a viga VC_D2.....	86
Figura 117 - Modos de vibração para a viga VC_D3.....	87
Figura 118 – Interpolação e Regularização Modo 1 - VC_D1	87
Figura 119 - Interpolação e Regularização Modo 3 - VC_D1	88
Figura 120 - DWT Modo 1 para a viga VC_D1 usando bior5.5	88
Figura 121 - DWT Modo 1 para a viga VC_D1 usando db9	88
Figura 122 - DWT Modo 1 para a viga VC_D1 usando sym7	89
Figura 123 - DWT Modo 3 para a viga VC_D1 usando bior5.5	89
Figura 124 - DWT Modo 3 para a viga VC_D1 usando db9	89
Figura 125 - DWT Modo 3 para a viga VC_D1 usando sym7	89
Figura 126 - DWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando bior5.5	90

Figura 127 - DWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando db9	90
Figura 128 - DWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando sym7	90
Figura 129 - DWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando bior5.5	90
Figura 130 - DWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando db9	90
Figura 131 - DWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando sym7	91
Figura 132 - DWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando bior5.5	91
Figura 133 - DWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando db9	91
Figura 134 - DWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando sym7	91
Figura 135 - DWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando bior5.5	92
Figura 136 - DWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando db9	92
Figura 137 - DWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando sym7	92
Figura 138 - CWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando bior5.5	93
Figura 139 - CWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando gaus8	94
Figura 140 - CWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando sym8	94
Figura 141 - CWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando bior5.5	94
Figura 142 - CWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando gaus8	95
Figura 143 - CWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando sym8	95
Figura 144 - CWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando bior5.5	96
Figura 145 - CWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando gaus8	96
Figura 146 - CWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando sym8	96
Figura 147 - CWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando bior5.5	97
Figura 148 - CWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando gaus8	97
Figura 149 - CWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando sym8	97
Figura 150 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VC_D1	99
Figura 151 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VC_D2	99
Figura 152 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VC_D3	99
Figura 153 - Modos de vibração para a viga VC_INT	100
Figura 154 - Modos de vibração para a viga VC_D1	100
Figura 155 - Modos de vibração para a viga VC_D2	101
Figura 156 - Modos de vibração para a viga VC_D3	101
Figura 157 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VC_D1	102
Figura 158 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VC_D2	102

Figura 159 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VC_D3.....	102
Figura 160 - Sintaxe da função <i>spline</i> no Matlab	112
Figura 161 - Exemplo de aplicação da função <i>spline</i> em código.....	113
Figura 162 - Exemplo de aplicação da função de Tikhonov em código	114
Figura 163 - Exemplo código MCD	116
Figura 164 - Exemplo código MSDBI	116
Figura 165 - Exemplo código CWT	117
Figura 166 - Exemplo código DWT	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades da viga em concreto simples.....	51
Tabela 2 - Propriedades da viga em aço.....	52
Tabela 3 - Cenário de dano único na viga de concreto	53
Tabela 4 - Cenários de dano na viga de aço.....	54
Tabela 5 - Frequências (Hz) obtidas no ABAQUS	55
Tabela 6 - Relação entre nós e distância dos danos.....	59
Tabela 7 - Resumo do uso da DWT	66
Tabela 8 - Resumo do uso da DWT (continuação)	66
Tabela 9 - Resumo do uso da CWT	78
Tabela 10 - Resumo do uso da CWT (continuação)	79
Tabela 11 - Frequências (Hz) obtidas no ABAQUS para viga em concreto	85
Tabela 12 - Resumo do uso da DWT para viga de concreto.....	93
Tabela 13 - Resumo do uso da CWT para viga de concreto.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP	Corpo de Prova
COMAC	<i>Coordinate Modal Assurance Criterion</i>
CWT	<i>Continuous Wavelet Transform</i> (Transformada Contínua de Wavelet)
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i> (Transformada Discreta de Wavelet)
FRF	<i>Frequency Response Function</i> (Função de Resposta de Frequência)
FRI	Função de Resposta ao Impulso
MAC	<i>Modal Assurance Criterion</i> (Critério de Confiança Modal)
MCD	<i>Modal Curvature Difference</i> (Diferença da Curvatura Modal)
MMCD	<i>Modified Modal Curvature Difference</i> (Diferença da Curvatura Modal Modificada)
MSDBI	<i>Mode Shape Data Based Indicator</i> (Indicador Baseado em Dados de Modos de Vibração)
MSDBIM	<i>Mode Shape Data Based Indicator Modified</i> (Indicador Baseado em Dados de Modos de Vibração Modificado)
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SHM	<i>Structure Health Monitoring</i> (Monitoramento da Integridade Estrutural)
WT	<i>Wavelet Transform</i> (Transformada de Wavelet)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos.....	17
1.3	Organização da Dissertação	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Dinâmica das Estruturas	19
2.2	Análise Modal	21
2.2.1	Análise Teórica.....	22
2.2.2	Análise Experimental	23
2.3	Processamento de Sinais.....	23
2.3.1	Análises no domínio da frequência.....	23
2.3.2	Análises no domínio tempo-frequência	25
2.4	Métodos de detecção de danos	25
3	MÉTODOS UTILIZADOS PARA ANÁLISE	31
3.1	Análise com as <i>Wavelets</i>	31
3.1.1	Introdução.....	32
3.1.2	Transformada Contínua de <i>Wavelet</i>	33
3.1.3	Transformada Discreta de <i>Wavelet</i>	37
3.1.4	Propriedades das <i>Wavelets</i>	38
3.1.5	Famílias.....	39
3.1.5.1	Família Haar	39
3.1.5.2	Família Daubechies.....	40
3.1.5.3	Família Biortogonal.....	40
3.1.5.4	Família Symlets	42
3.1.5.5	Família Coiflets.....	42

3.2	Diferença da Curvatura Modal	43
3.3	Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração	45
3.4	Métodos Modificados.....	46
3.4.1	MCD Modificado	46
3.4.2	MSDBI Modificado.....	47
4	METODOLOGIA.....	49
4.1	Trabalhos abordados.....	49
4.2	Propriedades Físicas, Geométricas e Discretização das vigas estudadas.....	51
4.3	Introdução dos danos.....	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1	Viga em Aço.....	55
5.1.1	Transformadas de <i>Wavelet</i> (WT).....	55
5.1.1.1	DWT	59
5.1.1.2	CWT	66
5.1.2	MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM	79
5.2	Viga em Concreto.....	85
5.2.1	Transformada de <i>Wavelet</i> (WT).....	85
5.2.1.1	DWT	88
5.2.1.2	CWT	93
5.2.2	MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM	98
6	CONCLUSOES E SUGESTÕES.....	103
	REFERÊNCIAS.....	107
	APÊNDICE A – Métodos de Interpolação e Regularização	111
	APÊNDICE B – Código fonte dos métodos analisados.....	115

1 INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas depende de diversos fatores, desde o uso adequado dos seus elementos, ao projeto bem executado, aos materiais empregados, a manutenção adequada, ao plano de inspeção, entre outros. Segundo Lima Junior (2020), o conceito de durabilidade começou a ser estudado na comunidade internacional na década de 80, porém só foi incorporado no Brasil em 2003 através da ABNT NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a) em sua primeira edição.

Segundo a ABNT NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a), durabilidade é a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas no projeto estrutural, ou seja, é quando a estrutura consegue manter um desempenho satisfatório, sua resistência e condições normais de serviço no período de vida útil. Em sua versão de 2014, a norma define a vida útil como sendo o período no qual a estrutura mantém suas características sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista.

No entanto, a degradação das estruturas e de seus componentes, em geral, é um processo inevitável. À efeito, esse fenômeno provoca o surgimento de danos nas estruturas. Danos podem ser entendidos como o conjunto de alterações, seja no material ou nas propriedades geométricas da seção, que afetam o desempenho atual ou futuro da estrutura (FIGUEIREDO, 2010).

Danos são frequentemente observados em sistemas estruturais, mesmo no período de sua vida útil. Podem ser causados por inúmeros fatores, tais como: impacto danoso de algum objeto, fissuras cumulativas, entre outros. Ocorrem mais comumente em locais específicos, sendo que em peças fletidas está associado à redução da rigidez à flexão. O efeito desses danos causa a deterioração das estruturas, levando-as ao colapso, além de influenciar as propriedades dinâmicas da estrutura (HOU; NOORI; AMAND, 2000).

Posto isto, verifica-se um potencial de exploração das técnicas de Monitoramento da Integridade Estrutural ou *Structural Health Monitoring* (SHM) em inglês. Monitoração define-se como a leitura, contínua e automática, do comportamento das estruturas. A monitoração tem como objetivo avaliar a integridade

estrutural quando a estrutura estiver submetida a um dado tipo de solicitação (DAS; SAHA; PATRO, 2016).

SHM possui algumas técnicas, mas a mais empregada é a inspeção visual. Entretanto, sua confiabilidade é baixa e falha quando aplicada a estruturas de difícil acesso ou isoladas. Para contornar esses problemas, técnicas não destrutivas são aplicadas em substituição a algumas técnicas tradicionais. Existem ainda os ensaios numéricos para determinação de danos, que utilizam, na sua maioria, o método dos elementos finitos para modelagem e posterior determinação dos parâmetros antes e após o surgimento do dano (PALECHOR, 2018; SILVA, 2015; ZONTA, 2000).

Além do benefício à segurança da estrutura em si e de seus usuários, a monitoração implica em considerável impacto econômico. Os resultados obtidos através da aquisição e da análise dos dados, contribuem, se tomadas as providências de manutenção, de forma positiva para uma maior vida útil da estrutura, uma vez que pontos fragilizados podem ser facilmente identificados e suas patologias sanadas. Além disso, a detecção e quantificação do dano na estrutura fornece importantes benefícios, como a identificação da necessidade de intervenções, bem como a realização da manutenção adequada, contribuindo para redução de custos.

1.1 Justificativa

A deterioração de estruturas e os problemas econômicos causados por estas, ao longo do tempo, são conhecidos. Entretanto, em países como o Brasil, esses problemas podem ser ainda mais delicados, pois ao mesmo tempo em que é necessário um investimento para expandir a infraestrutura existente, para não travar a economia local, é também essencial investimentos na manutenção da atual infraestrutura. Outro fator que agrava a situação é a cultura da falta de prevenção, que leva a uma manutenção muito cara e às vezes tardia (COLOMBO, 2016).

Os danos, sejam eles causados por ações estáticas (cargas de peso próprio, etc...) e/ou ações dinâmicas (vento, tráfego, explosões, impactos, etc.), associados ainda aos fenômenos naturais, podem não somente danificar a estrutura, como reduzir drasticamente sua vida útil, podendo levar a estrutura ao colapso. Para tentar contornar estes problemas, uma das soluções é o emprego da monitoração contínua ou periódica da estrutura através de sensores que reflitam o comportamento real da mesma juntamente com a análise efetiva dos dados coletados.

As técnicas não destrutivas, principalmente as baseadas em respostas dinâmicas da estrutura, representam um bom caminho para obter inúmeras informações sobre o comportamento mecânico da estrutura. Análises baseadas em vibrações têm evoluído com o passar dos anos, sendo uma técnica promissora para o SHM, permitindo bons resultados principalmente com o constante aperfeiçoamento da tecnologia de coleta de dados (acelerômetros, *hardwares* e *softwares* de aquisição de dados). Sua premissa é que as características dinâmicas de uma estrutura são função de suas propriedades mecânicas (massa, rigidez ou amortecimento), ou seja, qualquer mudança nestas últimas levará a uma mudança nas características dinâmicas da estrutura. Atualmente, a maioria dos sistemas de monitoramento utilizam as características dinâmicas da estrutura (TAHA et al., 2006).

A escolha do tema foi motivada porque a capacidade de identificar danos é de grande importância e quando feita ainda no seu início, contribui para uma extensão da vida útil da estrutura e uma redução dos custos com reparos e manutenção, além de mitigar os possíveis transtornos a usuários, como longos desvios e congestionamentos, e a economia do país, a exemplo de diminuição de arrecadação.

Com base nisso, neste trabalho, pretende-se contribuir no campo da identificação de danos através das propriedades dinâmicas das estruturas utilizando de quatro métodos disponíveis na literatura especializada: Transformada Contínua de Wavelet (CWT), Transformada Discreta de Wavelet (DWT), Diferença da Curvatura Modal (MCD) e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração (MSDBI), estes dois últimos, além de serem utilizados em suas versões originais, foram também aplicados com suas respectivas modificações.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo a detecção de danos em modelos numéricos de aço e concreto simples e a verificação da eficácia dos métodos apresentados na literatura específica.

Como objetivos específicos, temos:

- a) Comparar os métodos de obtenção de danos quando aplicados a um modelo de concreto simples e a um modelo de aço;
- b) Comparar a sensibilidade dos métodos para diferentes intensidades e quantidade de danos.

1.3 Organização da Dissertação

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O primeiro consiste na parte introdutória, contextualizando e justificando o tema, seguindo da exposição dos objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo discorre sobre a revisão bibliográfica, que abrange conceitos relativos à dinâmica das estruturas e a análise modal. Além disso é apresentado alguns trabalhos relacionados às técnicas de identificação e localização de danos disponíveis na literatura.

No capítulo três são descritos os métodos utilizados neste trabalho para a identificação e localização de danos. Primeiro, as Transformadas de *Wavelet* (WT) são apresentadas e em seguida, os métodos da Diferença da Curvatura Modal (MCD) e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração (MSDBI) e suas versões modificadas.

O quarto capítulo aborda a metodologia empregada para a elaboração dos modelos numéricos e a introdução dos danos nos casos em estudo, além da determinação dos modos de vibração e parâmetros modais nas condições intactas e danificadas.

No quinto capítulo é apresentado os resultados dos métodos analisados neste trabalho, aplicados para os casos das vigas de aço e de concreto simples, considerando diferentes cenários de danos.

No sexto capítulo é apresentada as principais conclusões do trabalho realizado, analisando o conjunto de resultados obtidos e as vantagens e desvantagens dos métodos estudados. Além disso, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos posteriores.

No Apêndice A são apresentados a teoria do método *Cubic Spline* para interpolação de dados e a Regularização de *Tikhonov*, com seus respectivos códigos de implantação no *software* Matlab©. Por fim, o Apêndice B traz alguns dos principais pontos dos códigos utilizados para os métodos analisados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dinâmica das Estruturas

Estruturas são solicitadas por diversos tipos de ações. Essas ações podem ser estáticas, que são aquelas em que a resposta estrutural não varia no tempo, como peso próprio e carregamentos quase-estáticos usuais. Podem ser ainda dinâmicas, que são as que as respostas variam no tempo. As dinâmicas ainda podem ser classificadas quanto a intensidade da duração no tempo: longa duração, como vento e tráfego, e curta duração, como impacto e explosões. Em um sentido amplo do conceito, todas as ações podem ser consideradas de caráter dinâmico, por variarem em direção, grandeza e sentido ao longo do tempo, embora, em muitos casos, o aspecto dinâmico da ação possa ser desconsiderado (SILVA, 2018).

Clough e Penzien (1995) define, então, a dinâmica das estruturas como sendo o estudo do deslocamento de um corpo em função do tempo, tendo por objetivo definir os deslocamentos, velocidades e acelerações de todos os elementos de uma estrutura sob ação de cargas dinâmicas. Em estruturas como pontes e passarelas, as ações dinâmicas podem causar vibrações consideráveis, danificando a estrutura e tornando-a inapta a funcionar adequadamente.

Clough e Penzien (1995) classificam em quatro, os tipos de força causados por ações dinâmicas: harmônicas, periódicas, impulsivas e transientes, tal qual mostra a Figura 1. A carga pode ser dita harmônica (a) quando funções senoidais conseguem representar sua variação no tempo, sendo um carregamento característico de máquinas rotativas desbalanceadas. O carregamento periódico (b) é aquele que possui um intervalo regular de tempo – chamado período – porém com cargas de intensidades diferentes, sendo os motores de combustão interna um exemplo, dentre outros. A carga é impulsiva ou aperiódica (c) impulsiva quando é de grande intensidade e curta duração, como uma explosão ou um impacto. A força é denominada de transiente ou aperiódica de longa duração (d) quando possui variação aleatória no tempo e não é de curta duração, como ventos, ondas do mar, tráfego de veículos sobre uma ponte, sismo, entre outros.

Figura 1 - Característica e origem das cargas dinâmicas típicas: (a) harmônica, (b) periódica, (c) impulsiva e (d) transiente



Fonte: Adaptado de Clough & Penzien, 1995

Três parâmetros são necessários para obtenção da resposta estrutural da estrutura às ações dinâmicas: massa, rigidez e amortecimento. A massa depende do material usado na própria estrutura mais uma parcela do carregamento estático. A rigidez depende das propriedades geométricas da seção e das propriedades mecânicas da estrutura. Já o amortecimento representa uma qualidade do material ou da estrutura capaz de dissipar energia durante as vibrações.

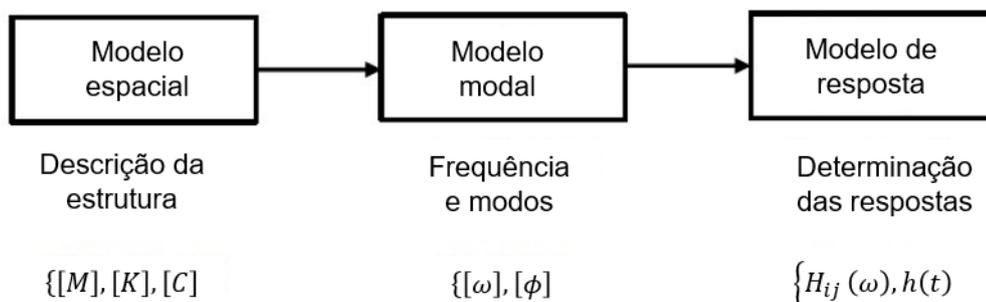
2.2 Análise Modal

A análise modal é uma parte importante do estudo das propriedades dinâmicas de uma estrutura. Baseadas em abordagens teóricas ou experimentais, essas abordagens permitem a construção de um modelo matemático capaz de determinar os parâmetros modais da estrutura, tais como frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento. Os referidos parâmetros podem ser determinados por métodos analíticos ou experimentais, sendo esse último mais usual para a verificação e validação de resultados do modelo analítico (SILVA, 2018; LIMA JUNIOR, 2020).

Silva (2015) afirma que, para todos os modos de vibração, os parâmetros modais compõem uma boa e completa descrição dinâmica da estrutura. Sendo assim, os modos de vibração representam as propriedades dinâmicas de uma estrutura livre, ou seja, onde não há forças em exercício.

Para cada uma das alternativas de aquisição dos parâmetros modais, são necessárias três fases de análise. A Figura 2 apresenta as fases para a análise modal teórica.

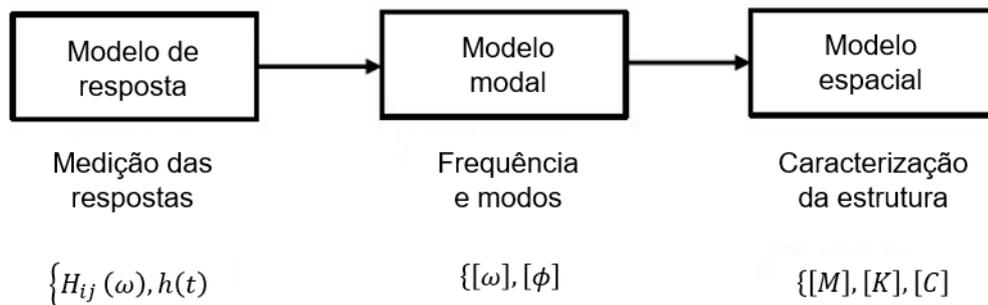
Figura 2 - Análise teórica das vibrações de um sistema



Fonte: Adaptado de Lima Junior, 2020.

Na Figura 3 é apresentado o esquema da análise modal experimental.

Figura 3 - Análise experimental das vibrações de um sistema



Fonte: Adaptado de Lima Junior, 2020.

Em que:

$[M]$ - matriz de massa;

$[C]$ - matriz de amortecimento;

$[K]$ - matriz de rigidez;

$[\omega]$ - matriz de frequências naturais;

$[\phi]$ - matriz modal;

$H_{ij}(\omega)$ e $h(t)$ – respostas da estrutura em FRF e amplitudes.

2.2.1 Análise Teórica

Também conhecida como problema direto, conforme Clough e Penzien (1995), o primeiro passo dessa análise é a caracterização das propriedades geométricas e físicas da estrutura, em relação às suas matrizes de massa $[M]$, rigidez $[K]$ e amortecimento $[C]$, sendo estas propriedades que definem o modelo espacial.

Em seguida, a análise modal do modelo é feita, determinando assim seus parâmetros modais: as frequências naturais (ω), seus correspondentes modos de vibração (ϕ) e fatores de amortecimento (ξ). A vantagem de trabalhar com modelo espacial é a oportunidade de transformar seu sistema de n equações em um conjunto desacoplado de vários modelos de um grau de liberdade, sendo um para cada modo de vibração do modelo original de múltiplos graus de liberdade.

Por fim, realiza-se a análise da resposta da estrutura sob determinadas condições de excitação. Conquanto seja claro que essa última fase dependa das propriedades estruturais e da natureza e intensidade da excitação, é adequado

apresentar a análise da resposta sob uma excitação normalizada pois que a partir da resposta normalizada pode ser constituída a solução de qualquer caso particular. Assim, o modelo de resposta consiste em um conjunto de funções de resposta em frequência (FRFs) ou de funções de resposta ao impulso (FRIs), além das respostas da estrutura ao longo do tempo ($h(t)$).

2.2.2 Análise Experimental

Lima Junior (2020) nos diz que a análise experimental percorre o caminho oposto à análise teórica. Começa com a medição da resposta da estrutura em formas de FRFs, FRIs ou variações $h(t)$. Em seguida, são utilizados métodos para deduzir os parâmetros modais (ω , ϕ e ξ). A partir desses dados e de técnicas especiais ou de através da comparação com um modelo numérico, é viável deduzir as propriedades espaciais.

Contudo, deve-se observar que nesse modelo geralmente ocorre um aumento significativo dos graus de liberdade do sistema, em razão das dificuldades experimentais e por uma limitação dos pontos medidos no experimento. Deve-se levar em conta, ainda, que o processo para determinação dos parâmetros modais nesse tipo de análise é feito em diversas fases e o seu sucesso depende da correta avaliação dos erros e das precisões de cada etapa (SILVA, 2018).

2.3 Processamento de Sinais

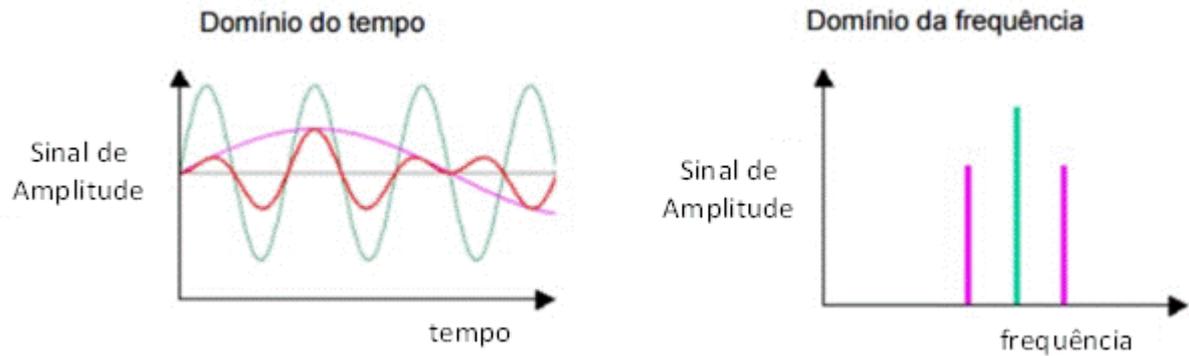
Existem três tipos de técnicas de processamento de sinais: análise no domínio do tempo, análise no domínio da frequência e análise no domínio tempo-frequência. Para a detecção de danos em estruturas, onde as modificações nas frequências, nos modos de vibração e as relações de amortecimento são utilizadas para identificar os mesmos, as análises no domínio da frequência e no tempo-frequência são mais adequadas (SILVA, 2015).

2.3.1 Análises no domínio da frequência

Segundo Silva (2015), a representação de um sinal no domínio da frequência permite que se separem conceitualmente todas as senóides que formam o sinal,

diferentemente de um sinal no domínio do tempo, em que a representação dá somente a amplitude do sinal em um dado instante de tempo. A Figura 4 mostra uma comparação de sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Figura 4 - Comparação de sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência



Fonte: Silva, 2015.

Uma boa ferramenta para determinar a contribuição de cada função senoidal, presente numa série temporal, é a Transformada de Fourier (TF). A TF pode ser definida como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i \omega x} dx \quad (2.1)$$

Onde $f(x)$ é o sinal analisado e ω é a frequência inerente de cada componente do sinal apresentado, ou seja, representa as diferentes frequências contidas nas séries e a exponencial transforma para o espaço das frequências.

A TF é comumente utilizada na engenharia para obtenção de informações adicionais de um sinal temporal, localizadas no espectro da frequência obtido após a transformação matemática. Porém, ela a TF possui uma deficiência para decompor as várias frequências de um sinal com relação a sua localização no tempo, principalmente para as séries estacionárias, que representam a maioria dos fenômenos encontrados na natureza.

2.3.2 Análises no domínio tempo-frequência

Devido a deficiência da TF, conforme exposto acima, foi proposta uma modificação da mesma visando melhorar a representação das séries temporais. Essa modificação é conhecida como Transformada Janelada de Fourier (TJF). A principal diferença entre a TF e a TJF é que, na última, o sinal é dividido em pequenos intervalos, onde cada intervalo desse sinal é assumido como sendo estacionário.

A TJF nada mais é do que o produto da TF por uma função janela W , em que a largura dessa janela deve ser a mesma do segmento de sinal:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} W(x - t) f(x) e^{-2\pi i \omega x} dx \quad (2.2)$$

A transformada contribuiu muito para o estudo e análise de séries temporais não-estacionárias. Entretanto, ela possui como ponto negativo o comprimento finito da janela, que abrange apenas a parte do sinal, fazendo a frequência se tornar mais pobre. Não se sabe as componentes exatas da frequência de um sinal, mas sim a banda de frequência. E se for utilizada uma janela de comprimento infinito será obtido a TF novamente, que possui excelente resolução de frequência, mas não concede informação sobre o tempo (SILVA, 2015).

2.4 Métodos de detecção de danos

Segundo Silva (2015), os métodos de detecção baseado nas propriedades dinâmicas da estrutura são importantes técnicas para avaliação de danos em estruturas. A premissa básica do dano é que ele irá alterar as propriedades físicas de uma estrutura, alterando assim a resposta dinâmica desta. O desafio encontra-se em detectar a influência do dano nas menores frequências da estrutura, já que os danos são tipicamente locais e essas frequências são as que predominam durante os testes.

Rytter (1993) define em seu trabalho quatro níveis de investigação do dano estrutural:

- 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.

No Nível I é considerado somente a presença de dano ou não. O nível II considera o dano e a localização. No nível III, a detecção e a localização devem ser quantificadas em extensão e severidade e o nível IV, a vida útil remanescente deve ser determinada considerando o dano.

A seguir serão apresentados alguns dos métodos disponíveis na literatura para detecção de danos baseado em seus parâmetros modais.

Vandiver, em 1975 e 1977, estudou, para uma torre marítima de estação luz, as mudanças nas frequências dos dois primeiros modos de flexão e o primeiro modo de torção. A partir das simulações numéricas realizadas, o autor indica que na massa efetiva da torre, ante a instalação de chapas para controlar a movimentação de líquidos nos tanques do convés, foi de apenas 1% nas frequências dos três modos analisados. Assim, num processo sistemático de remoção dos elementos do modelo numérico, o autor mostra que a falha na grande maioria dos elementos produz mudanças nas frequências superiores a 1%. Numa simulação de formação de ferrugem (através de uma redução da espessura das paredes dos tubos estruturais), foi constatado uma redução de 3,71% nas frequências dos modos de flexão.

Cawley e Adams, em 1979, apresentaram um método, aplicável a qualquer estrutura, baseado na mudança das frequências naturais para localização do dano, consistindo no cálculo, via elementos finitos, das variações das frequências naturais devido ao dano em alguns pontos selecionados da estrutura. Os resultados dos testes, feito em uma placa retangular de alumínio e em uma placa de plástico reforçado com fibra, mostraram uma boa acurácia do método para detectar, localizar e quantificar, aproximadamente, os danos na estrutura.

Três anos depois, Allemang e Brown, em 1982, propuseram um método que faz uso de um índice estatístico global chamado Critério de Confiança Modal ou *Modal Assurance Criterion* (MAC). No método MAC são comparados os vetores modais experimentais dos modelos com e sem danos. O coeficiente MAC é obtido através da seguinte equação:

$$MAC_{(i,j)} = \frac{|\{\Phi_i^a\}^T \{\Phi_i^e\}|^2}{(\{\Phi_i^a\}^T \{\Phi_i^a\}) (\{\Phi_j^e\}^T \{\Phi_j^e\})} \quad (2.3)$$

Onde:

$\{\Phi_i^a\}$ – vetor modal do modelo sem danos do i-ésimo modo.

$\{\Phi_j^e\}$ – vetor modal do modelo com danos do j-ésimo modo.

Este índice é uma correlação entre os pares de vetores modais, que testa a ortogonalidade entre dois vetores modais de vibração, um com dano e outro sem, e tem seu valor entre “0” e “1”, em que “0” é quando os vetores não são consistentes - ou seja, sem correlação entre os modos - e “1” é quando os vetores são idênticos e tem boa correlação.

Seguindo esse índice, em 1984, West apresentou uma utilização sistemática das informações da deformada modal para localizar o dano na estrutura, sem utilizar de elementos finitos. O autor utiliza o método MAC para determinar o grau de correlação entre os modos de vibração no teste de um flap de um ônibus espacial sem danos e depois de ser exposto a uma carga acústica.

Uma nova técnica baseada no método MAC é apresentada em 1988 por Lieven e Ewins. Chamada de *Coordinate Modal Assurance Criterion* ou COMAC. O coeficiente COMAC é uma extensão do método MAC, onde é possível identificar quais graus de liberdade estão colaborando negativamente para um baixo MAC. Este método possui caráter local e correlaciona dois vetores modais para cada grau de liberdade, onde um deles é a condição de referência, medindo, assim, a concordância pontual entre os vários modos de vibração. O coeficiente COMAC pode ser obtido através da seguinte equação:

$$COMAC_{(j)} = \frac{(\sum_{i=1}^n \{\Phi_i^a\}_j \{\Phi_i^e\}_j)^2}{(\sum_{i=1}^n \{\Phi_i^a\}_j \{\Phi_i^a\}_j)(\sum_{i=1}^n \{\Phi_i^e\}_j \{\Phi_i^e\}_j)} \quad (2.4)$$

Onde:

$\{\Phi_i^a\}$ – vetor modal do modelo sem danos do i-ésimo modo.

$\{\Phi_j^e\}$ – vetor modal do modelo com danos do j-ésimo modo.

Os valores do índice COMAC também variam entre “0” e “1”, tal qual o MAC, onde “0” significa completa ortogonalidade e “1” indica completa concordância. A

localização do dano por esse método é feita observando em qual nó ocorre a maior discordância entre os modos de vibração, com e sem danos. Caso os nós apresentem índice COMAC igual a unidade, este valor sugere que possivelmente a estrutura está intacta. Em relação ao método MAC, o que difere um do outro é que o MAC permite uma comparação global entre os valores da estrutura, com e sem danos, enquanto o COMAC permite a comparação em valores modais em cada nós da estrutura.

Os dois métodos, MAC e COMAC, e outras derivações, são utilizados por muitos autores de maneira conjunta para identificação e localização dos danos. Em 1992, Kim et al. investigou o MAC e suas variações na localização de danos. Eles usam o PMAC – *Partial MAC* para comparar os valores de MAC dos subconjuntos dos vetores modais. Ao associar o COMAC e o PMAC, os autores foram capazes de isolar a área danificada da estrutura. Já em 1994, Ko et al. combinou o MAC e o COMAC para detectar danos em estruturas de aço. Eles buscaram determinar quais os graus de liberdade mais relevantes a partir da sensibilidade das derivadas dos modos de vibração. Posteriormente, foi utilizado o COMAC como indicador de dano. Os resultados mostraram que algumas combinações de modos podem indicar os danos, mas que quando todos são analisados em conjunto, a indicação clara do dano pode ser mascarada pelos modos não sensíveis ao dano.

Novas contribuições sobre o uso dos índices MAC e COMAC para localização de danos nas estruturas, foi feita em 1997 por D'Ambra, Iturrioz e Doz. Neste trabalho, eles simularam diferentes níveis de danos em diferentes locais, considerando uma redução de até 25% na rigidez do elemento. Os resultados apontaram que, para estruturas mais simples, tal qual a viga testada, o dano é localizado com boa precisão. Entretanto, para estruturas mais complexas, o índice COMAC parece necessitar de mais que três modos de vibração para detectar os danos inferiores a redução de 10% da rigidez. Os autores também apontaram uma limitação na aplicação do método COMAC, em que erros foram encontrados nas indicações do índice quando o dano é localizado em correspondência com os nós de inflexão.

Pandey, Biswas e Samman, em 1991, propuseram um método de alteração na curvatura, onde, via elementos finitos, mostraram que a diferença absoluta entre as curvaturas dos modos de vibração, com e sem danos, estão localizadas na região do dano, sendo, portanto, adequada para a identificação e localização dos danos estruturais.

Penny, Wilson e Friswell (1993), apresentaram um método estatístico alternativo para identificação de danos, que compara as frequências naturais a partir dos dados medidos e dos simulados. Através dos mínimos quadrados, a localização e intensidade do dano são indicados através do menor erro encontrado na comparação. Eles, então, demonstram o método, utilizando dados simulados e experimentais, com variação da intensidade e localização dos danos, obtendo resultados promissores.

Em 1997, Ratcliffe empregou um método chamado Operador Laplaciano Modificado para identificar e localizar danos em vigas, porém utilizando apenas os modos de vibração da estrutura danificada. Os deslocamentos obtidos através dos modos de vibração foram aplicados na fórmula da função Laplaciana de diferenças finitas, em que esta representa a curvatura do nó em relação a determinado modo. Sendo que elementos danificados apresentam menor rigidez a flexão, logo, estes apresentaram maior curvatura que os elementos adjacentes, possibilitando assim a identificação dos danos. Este método difere do trabalho de Pandey, Biswas e Samman (1991) por não considerar a diferença das curvaturas entre as vigas integras e danificadas. Os resultados mostraram que para danos superiores a 10%, o método identifica com sucesso o dano, entretanto, para danos entre 0 e 5%, é necessário um processo adicional ao método.

Em 2000, o trabalho do Ovanesova apresentou o desenvolvimento analítico de um método não destrutivo tendo por base as wavelets. O estudo baseia-se na análise de um sinal de resposta da estrutura, sob diversas condições de carregamento. Os resultados foram ótimos e validados por meio das simulações numéricas.

Rucka e Wilde, em 2006, propuseram um método para estimar e localizar danos em vigas e placas. Os modos de vibração, de uma viga e uma placa sob diferentes condições de apoio, foram analisados com a Transformada Contínua e Discreta de Wavelet.

Estrada (2008) mostra uma análise comparativa da eficácia de vários métodos de detecção de danos, em especial para aqueles baseados na resposta dinâmica das estruturas com dano. Para essa particularidade são escolhidos os métodos baseados em wavelets, na curvatura das formas modais e na modificação da matriz de flexibilidade.

Wu e Wang, em 2011, estudaram, numérica e experimentalmente, a identificação de danos em uma viga usando a Transformada de Wavelet. Para o estudo, foi testado uma viga engastada submetida a um carregamento estático.

Também em 2011, Silva conduziu um estudo de detecção de danos utilizando modelagem numérica e Transformada de Wavelet. No estudo, diversas situações de danos foram simuladas em vigas, treliças e pontes e os sinais de deslocamento e os modos de vibrações foram utilizados para avaliar a eficácia e eficiência das transformadas na detecção de danos de estruturas sob diferentes condições de contorno e carregamento.

O método da Diferença da Curvatura Modal (MCD) foi usado em 2013, por Dawari e Vesmawala, para identificar e localizar danos em modelos numéricos de vigas biapoiadas com seção transversal I. Os resultados apontaram a eficácia do método na localização dos danos, seja em cenário de dano único ou de danos múltiplos. Os pesquisadores atestaram que as alterações nas curvaturas dos modos de vibrações encontram-se na região do dano, de forma que a diferença absoluta entre as curvaturas, com e sem danos, aumenta com a severidade do dano. Observou-se, também, que os modos de vibração superiores fornecem os melhores resultados em relação a localização dos danos.

Em 2015, Yazddanpanah, Seyedpoor e Bengar, propuseram um novo indicador para identificação de danos em vigas, baseado nos dados de inclinação e curvatura dos modos de vibração. Os autores testaram o método proposto através de exemplos numéricos de vigas com cenários de dano único e danos múltiplos. Os resultados mostraram grande eficácia para a maior parte dos casos estudados.

3 MÉTODOS UTILIZADOS PARA ANÁLISE

Neste capítulo será apresentado e descrito os métodos estudados nesse trabalho: (1) Transformada de *Wavelet* Discreta ou *Discrete Wavelet Transform* (DWT), (2) Transformada de *Wavelet* Contínua ou *Continuous Wavelet Transform* (CWT), (3) Diferença da Curvatura Modal ou *Modal Curvature Difference* (MCD) e (3) Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração ou *Mode Shape Data Based Indicator* (MSDBI).

Todos foram escolhidos por utilizarem as mesmas propriedades modais: os modos de vibração verticais, sendo que para o primeiro e segundo usamos os valores de deslocamentos reais da estrutura enquanto para os dois últimos utilizamos valores de deslocamentos normalizados. Além disso, para os dois últimos métodos também serão apresentadas as suas versões modificadas proposta por Lima Junior (2020).

3.1 Análise com as *Wavelets*

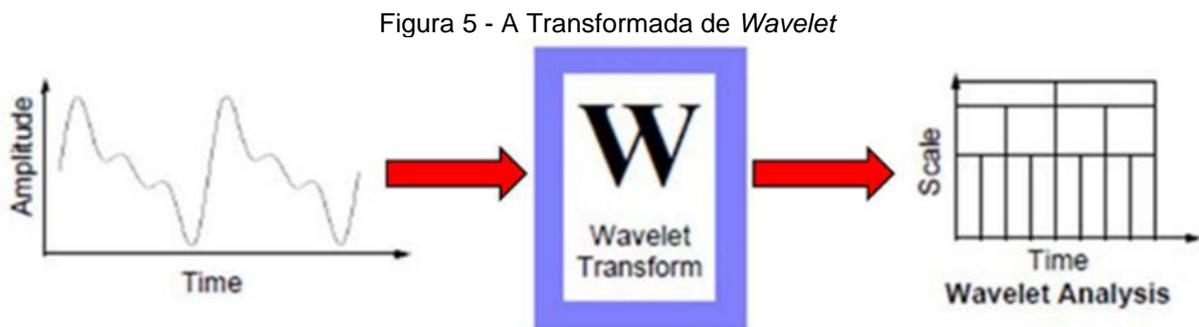
A palavra *wavelet* tem origem na palavra francesa “Ondalette”, que significa pequena onda. As primeiras *wavelets* surgiram em 1910, através do trabalho de Haar. Depois, em 1930, a base de Haar foi estudada por vários pesquisadores. Nessa ocasião, o pesquisador Paul Levy mostrou que as funções da base Haar são melhores que as funções da base Fourier para detalhar o movimento Browniano. Em 1985, Mallat utilizou as *wavelets* para estudar o processamento digital de imagens. Em 1989, Meyer construiu a primeira *wavelet* não trivial (suave), continuamente diferenciáveis e sem suporte compacto. E em 1990, Daubechies usou o trabalho de Mallat para contruir uma base de *wavelets* suaves com suportes compactos. A teoria de *wavelet* vem sendo muito utilizada para resolução de problemas estáticos e dinâmicos, lineares e não lineares, nas mais diversas áreas da engenharia (PALECHOR, 2013).

A maioria das abordagens baseadas em vibrações para detecção de danos demandam as propriedades modais com a ajuda da Transformada de Fourier, sendo que algumas características inerentes dela podem afetar a precisão da identificação dos danos. Primeiro, ela é um processo de redução de dados e, portanto, algumas informações e dados sobre as condições da estrutura podem ser perdidas. Segundo, é uma técnica de análise global, ou seja, ela não apresenta dependência do tempo dos sinais e não pode capturar características evolutivas. Terceiro, danos tendem a

ser capturados em modos de alta frequência, e estas geralmente são normalmente espaçadas e pouco excitadas. Todos esses fatores contribuem para dificultar técnicas baseadas em Transformada de Fourier (SILVA, 2015). Para mais detalhes sobre as análises de Fourier, consultar o trabalho realizado por Palechor em 2013.

3.1.1 Introdução

A análise de *Wavelet* se apoia na ideia de que um sinal qualquer pode ser decomposto em uma série de “ondas”. Permite a utilização de janelas com tamanhos variáveis e a utilização de intervalos de tempo e espaço variáveis para captar a informação necessária (Figura 5). Sua principal vantagem é a capacidade de realizar análise local de um sinal, podendo revelar aspectos nos dados que outras técnicas não detectam (PALECHOR, 2018; SILVA, 2015; MEHRA, 2018).



Fonte: Silva, 2015.

Wavelet é uma forma de onda com duração limitada, possuindo média de valor igual a zero. São funções usadas para (re)escrever um dado sinal, em posição e escala ao mesmo tempo.

A transformada de *Wavelet* unidimensional projeta um sinal em um espaço bidimensional, semelhante à transformada de Fourier por janelas. A transformada de *Wavelet* do sinal $f(x)$ é definida como:

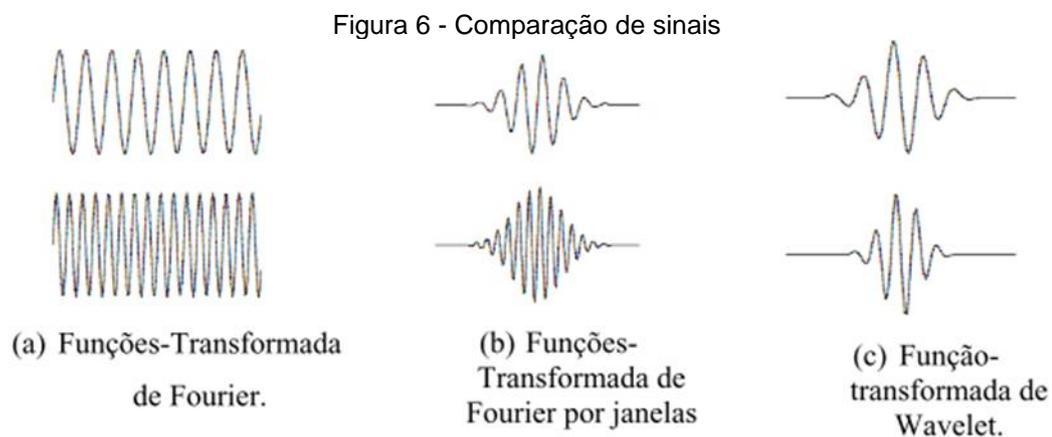
$$W_{\psi}^f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi^* \left(x - \frac{b}{a} \right) dx \quad (3.1)$$

Onde ψ^* é o conjugado complexo de $\psi(\cdot)$ e é assumido que o valor médio da equação desaparece.

O sinal de $f(x)$ é multiplicado por uma função de duas variáveis, tanto na transformada de Fourier janelada quanto na transformada de *Wavelet*. A função para a transformada de wavelet é dada por:

$$\psi^{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \psi^*\left(x - \frac{b}{a}\right) \quad (3.2)$$

As funções $\psi^{a,b}$ são as chamadas *wavelets*-mãe. Nas transformadas de Fourier por janelas, as funções geralmente oscilam e decaem rapidamente. O tamanho das janelas permanece constante, enquanto o número de oscilações muda. Nas *wavelets*-mãe, em contraste com as de Fourier, as oscilações permanecem constantes com a mudança de janela. Isso significa que a *wavelet* é alongada ou expandida ao longo do eixo do tempo (ou espaço) (PALECHOR, 2018; SILVA, 2015). A Figura 6 ilustra este princípio:



Fonte: Palechor, 2018.

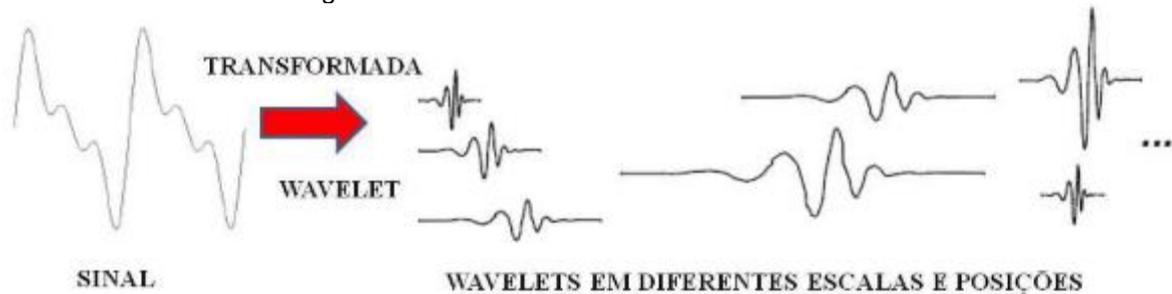
3.1.2 Transformada Contínua de *Wavelet*

A Transformada Contínua de *Wavelet* ou *Continuous Wavelet Transform* (CWT) é a soma sobre o tempo ou espaço do sinal multiplicado por uma escala e deslocado por uma função wavelet-mãe. (NICKOLAS, 2017)

$$C(\text{escala}, \text{posição}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\psi(\text{escala}, \text{posição}) dx \quad (3.3)$$

O resultado da CWT são os coeficientes C , que estão em função da escala e da posição. Os *wavelets* constitutivos do sinal original são adquiridos através do produto de cada coeficiente pela *wavelet* dimensionada (PALECHOR, 2018).

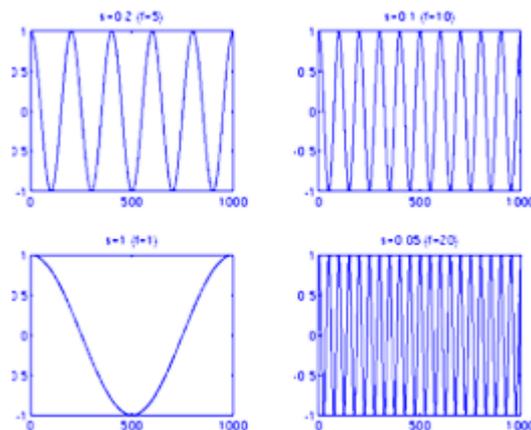
Figura 7 - Processo da Transformada de Wavelet.



Fonte: Palechor, 2018.

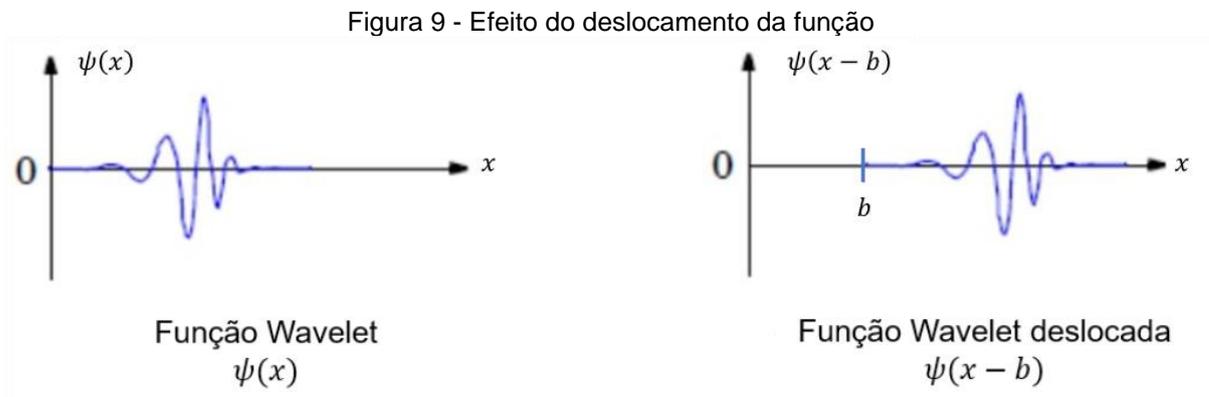
Na análise de *wavelet*, a escala a significa que a *wavelet* será alongada ou comprimida e, portanto, está relacionada à frequência do sinal. Altas escalas significam *wavelets* mais alongadas. Quanto mais esticada, maior a porção do sinal com a qual está sendo comparada, e assim as características medidas serão mais grosseiras. A Figura 8 ilustra sinais cosseno para várias escalas.

Figura 8 - Funções cosseno para várias escalas



Fonte: Silva, 2015.

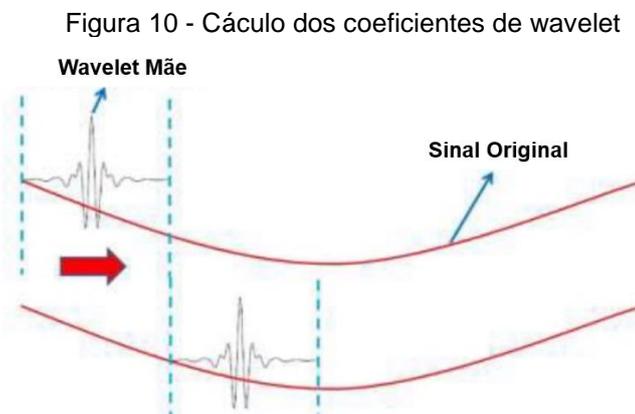
A translação de uma função é a aceleração ou o atraso do seu aparecimento. Atrasar uma função $f(x)$, b vezes, matematicamente, significa representá-la na forma $f(x - b)$. A Figura 9 mostra o exemplo de uma função deslocada:



Fonte: Palechor, 2013.

A CWT de um sinal é a soma ao longo do sinal multiplicado por escala a e com deslocamento b . Este processo produz coeficientes *wavelet*, que são uma função da dimensão (a) e posição (b). Aqui estão os cinco passos para a criação de um CWT:

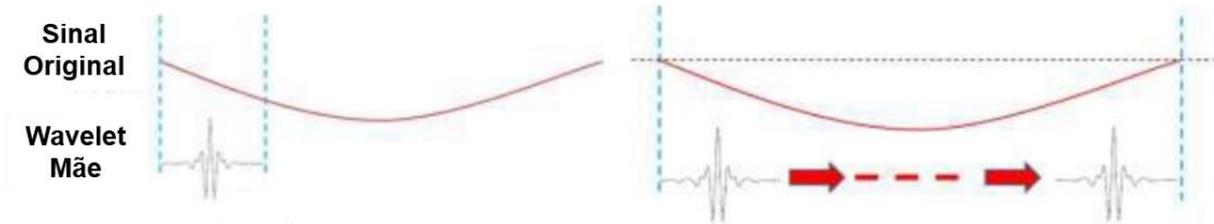
- escolha de uma *wavelet*-mãe e comparação com uma seção no início do sinal;
- cálculo do coeficiente C , que representa a semelhança entre o sinal e a função *wavelet* escolhida. Observar que os resultados dependem da forma da função *wavelet* escolhida, como mostra a Figura 10;
- em seguida, deslocar a *wavelet* para a direita e repetir os passos anteriores, até a cobertura integral do sinal seja atingido (Figura 10);



Fonte: Palechor, 2013.

- d) escalar a *wavelet* no tramo analisado, como mostra a Figura 11, e repetir os passos anteriores;

Figura 11 - Escala de uma função wavelet



Fonte: Palechor, 2013.

- e) Por fim, repetir todos os passos anteriores para todas as escalas.

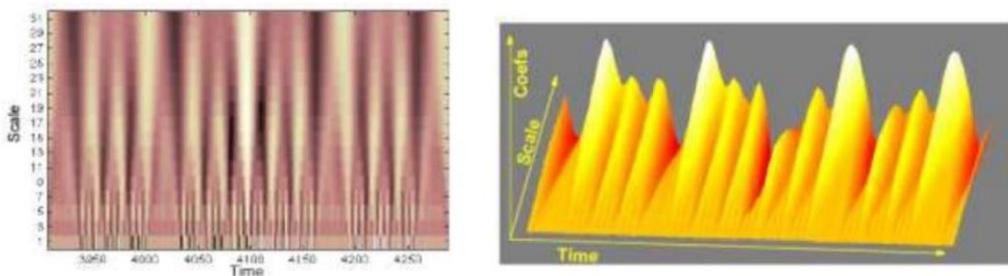
O resultado será a produção de diferentes coeficientes para diferentes escalas. Graficamente, o eixo x representa a posição ao longo do sinal, seja no tempo ou no espaço, o eixo y representa a escala a , e a cor de cada ponto xy representa a magnitude do coeficiente C . A Figura 12 explica os eixos dos gráficos da CWT e a Figura 13 mostra exemplos de gráficos da CWT.

Figura 12 - Explicação do eixo dos gráficos



Fonte: Palechor (modificado), 2013.

Figura 13 - Exemplos de gráficos para Transformada Contínua de Wavelet (CWT)



(a) Gráfico 2D CWT

(b) Gráfico 3D CWT

Fonte: Palechor, 2013.

Para a CWT, a *wavelet* $\psi^{a,b}$ pode ser descrita como uma função analítica, que depende do parâmetro escala (a), e do parâmetro translação (b) que muda continuamente sobre todo \mathbb{R} , exceto para $a \neq 0$. Ela oscila na frequência a^{-1} e está posicionada no tempo b . Logo, a CWT pode ser definida por:

$$W_{\psi}^f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(x - b/a\right) dx \quad (3.4)$$

3.1.3 Transformada Discreta de *Wavelet*

Calcular todos os coeficientes *wavelet* C possíveis para cada escala, gera uma grande quantidade de dados e pode se tornar um inconveniente no uso da CWT. Buscando minimizar essa tarefa, somente um subconjunto de escalas e posições é usado, sendo que as posições e escalas selecionadas são baseadas em potências diádicas, levando a uma grande redução dos esforços computacionais no cálculo dos coeficientes C e uma melhor eficiência na análise. Assim é o processo que chamamos de Transformada Discreta de *Wavelet* ou *Discrete Wavelet Transform* (DWT) (MEHRA, 2018).

Wavelets com parâmetros inteiros são geralmente usadas nas transformadas. *Wavelets*-mãe podem, por exemplo, serem geradas utilizando valores escalados de a e transladados de b . A escala é definida como $a = 2^j$ e a translação $b = k2^j$ com $(j, k) \in \mathbb{Z}$. Assim, a DWT é obtida através de:

$$DWT_{j,k} = 2^{-j/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi(2^{-j}x - k) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{j,k}(x) dx \quad (3.5)$$

Onde, j e k são os índices de escala e posição (translação), respectivamente.

A detecção de danos usando a DWT pode ser efetuada conforme a seguir:

- a) obter um sinal associado à resposta da estrutura completa ou examinar apenas uma parte da mesma;
- b) calcular os coeficientes de *wavelet* C , executando a DWT em diferentes níveis ou escalas. Os coeficientes $C_{j,k}$ são obtidos por:

$$C_{j,k} = \int_Z f(x)\psi_{j,k}(x) dx \quad (3.6)$$

Sendo $f(x)$ o sinal analisado; $(j, k) \in N$ a escala e a posição, respectivamente, e N todos os inteiros positivos; Z todos os inteiros e $\psi_{j,k}(x)$ é a wavelet expressa por:

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2}\psi_{j,k}(2^j x - k) \quad (3.7)$$

- c) por fim, plotar o gráfico dos coeficientes de wavelet para cada nível de decomposição estudado. Um pico na distribuição dos coeficientes significa uma perturbação local no sinal. Caso essa perturbação não seja de fonte conhecida, tal qual descontinuidade geométrica ou de material, existe um dano próximo desse local.

3.1.4 Propriedades das *Wavelets*

No processo de transformação, as funções com regiões diferentes de suporte utilizadas são derivadas de uma função principal ou uma função-mãe. Assim, a *wavelet*-mãe é o modelo para geração de outras janelas de funções (PALECHOR, 2018).

Segundo Silva (2015), as funções *wavelets* possuem diferentes propriedades que lhe permitem ser mais apropriadas para determinados fins. As propriedades mais relevantes de uma função *wavelet* e as *wavelets*-mãe o processo de detecção de danos são:

- a) **Ortogonalidade e biortogonalidade:** Nem todas as funções de *wavelet* possuem essas propriedades. Elas permitem um cálculo rápido dos coeficientes da *wavelet*. Duas funções $f(x)$ e $g(x)$ são ortogonais se seu produto interno é igual a zero. O termo bi-ortogonal se refere às bases diferente que são ortogonais entre si, mas que não formam um conjunto ortogonal. As *wavelets*-mãe mais conhecidas, com essa propriedade, são: Haar, Daubechies de ordem n , Meyer, Symlets de ordem n e a Coiflets de ordem n ;

- b) **Suporte compacto:** Representa de forma mais eficiente os sinais com características localizadas. Suporte de uma função é o conjunto de pontos onde a mesma não é zero. Uma função possui suporte compacto, se a aderência do conjunto, onde não é zero, conforma um conjunto delimitado, ou seja, significa que a função *wavelet* não assume valor zero para intervalos finitos, o que permite uma representação mais eficaz dos sinais com características locais. A Haar, Daubechies de ordem n , Symlets de ordem n e a Coiflets de ordem n são as *wavelets*-mãe que possuem essa propriedade;
- c) **Momento de decaimento:** Determina o grau do polinômio que pode ser aproximado. Se o valor médio de $x^k \psi(x)$ é igual a zero, para $k = 0, 1, \dots, n$, então a *wavelet* tem $n + 1$ momentos de fuga e polinômios de grau n são suprimidos por esta função. Esta é a propriedade usada para escolha da *wavelet*-mãe mais adequada para a detecção de danos. *Wavelets*-mãe que possuem um número arbitrário de momentos de decaimento são a Daubechies de ordem n , a Symlets de ordem n e a Coiflets de ordem n ;
- d) **Regularidade:** É a quantidade de vezes que uma função é diferenciável em x_0 . Seja s a regularidade de uma função f ; se a derivada de f de ordem m se aproximar de $|x - x_0|^r$ localmente ao redor de x_0 , logo $s = m + r$, com $0 < r < 1$. As singularidades de uma função e outras propriedades, como a suavidade dos sinais, podem ser obtidas por essa regularidade. A Morlet, Meyer e Gaussian são *wavelets*-mãe regulares. Já a Daubechies de ordem n , a Symlets de ordem n e a Coiflets de ordem n são *wavelets*-mãe de regularidade fraca.

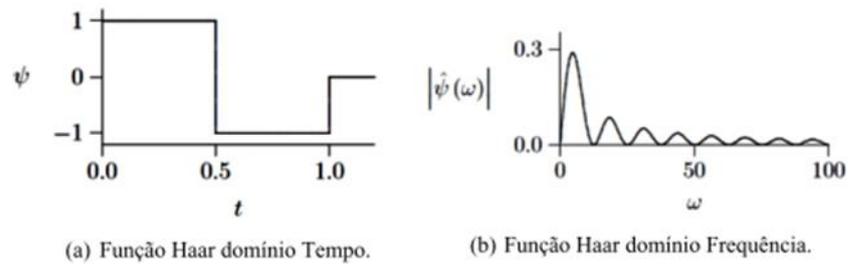
3.1.5 Famílias

Para uma função $\psi(x)$ ser considerada uma *wavelet*-mãe, ela deve pertencer ao espaço e satisfazer a condição de admissibilidade. Uma *wavelet*-mãe é uma função que oscila, possui energia finita e tem valor médio nulo (PALECHOR, 2018; SILVA, 2015). A seguir uma breve explanação sobre algumas famílias de *wavelets*.

3.1.5.1 Família Haar

É a mais simples das *wavelets*. A *wavelet* Haar se assemelha a uma função degrau. Representa também a *wavelet* Daubechies db1.

Figura 14 - Função Haar

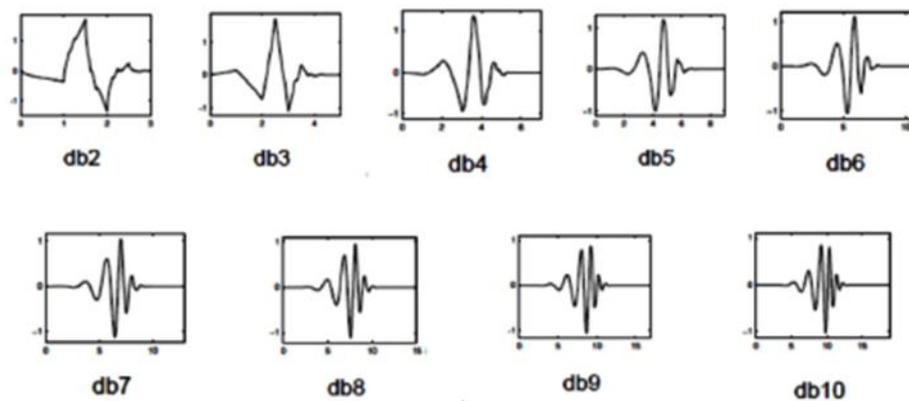


Fonte: Palechor, 2018.

3.1.5.2 Família Daubechies

As chamadas *wavelets* ortonormais foram criadas em 1992 por Ingrid Daubechies. Seus nomes são escritos com “dbN”, onde N é a ordem, e db o “sobrenome” da *wavelet*. A *wavelet* db1, conforme acima, é a mesma *wavelet* Haar. Essas *wavelets* são perfeitamente compactas no tempo, porém possuem um elevado grau de superposição espectral entre as escalas. Sua principal vantagem é ser ortogonal, o que significa que um erro no sinal de entrada não crescerá com a transformação, além de assegurada estabilidade computacional (PALECHOR, 2018; SILVA, 2015). Na Figura 15 estão as funções dos próximos nove membros da família.

Figura 15 - Funções Daubechies

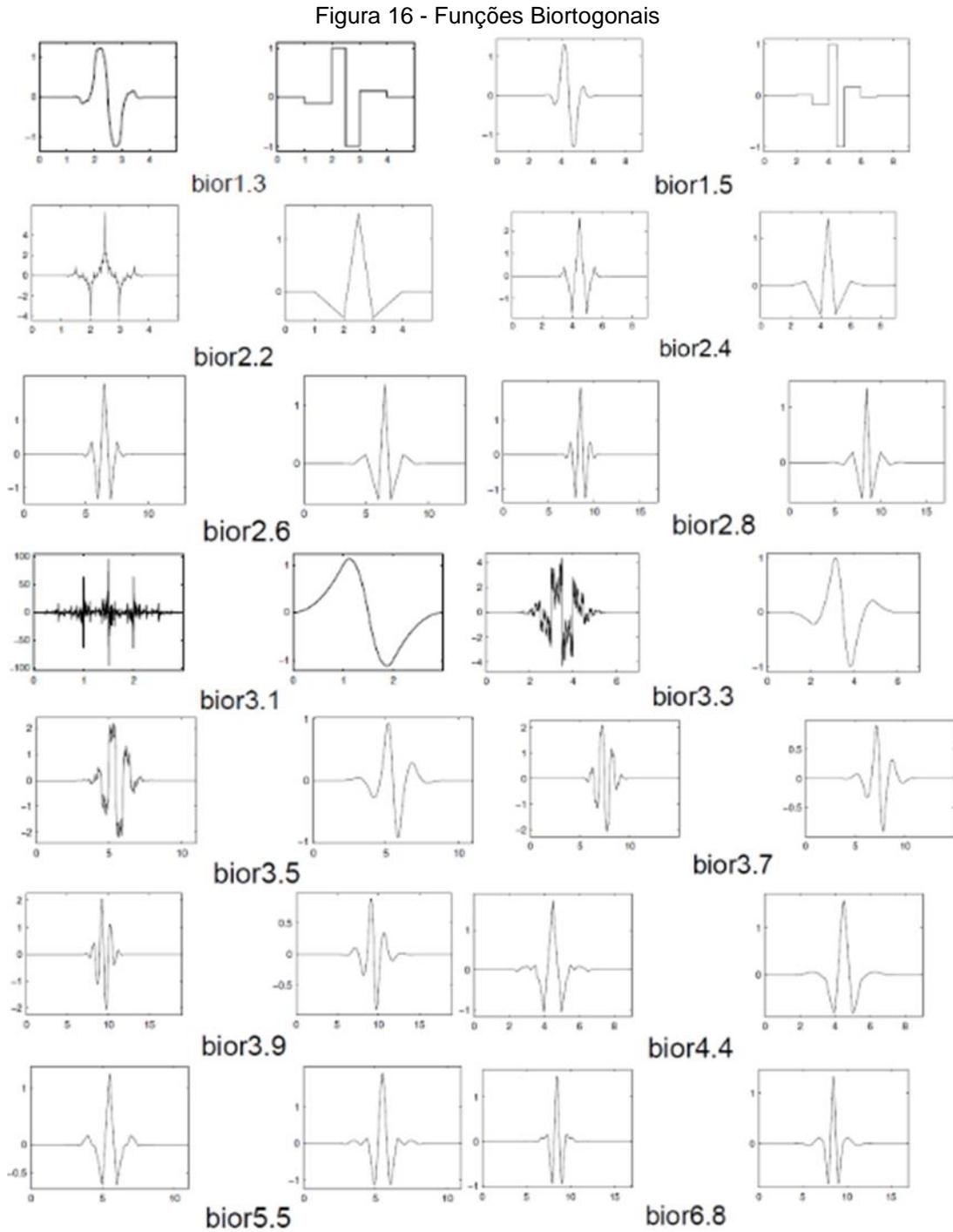


Fonte: Palechor, 2018.

3.1.5.3 Família Biortogonal

Daubechies (1992) introduziu uma base de *wavelets* biortogonais com o objetivo de obter *wavelets* que fossem simétricas e de suporte compacto

(PALECHOR, 2018; SILVA, 2015). A Figura 16 mostra alguns exemplos de *wavelets* biortogonais.

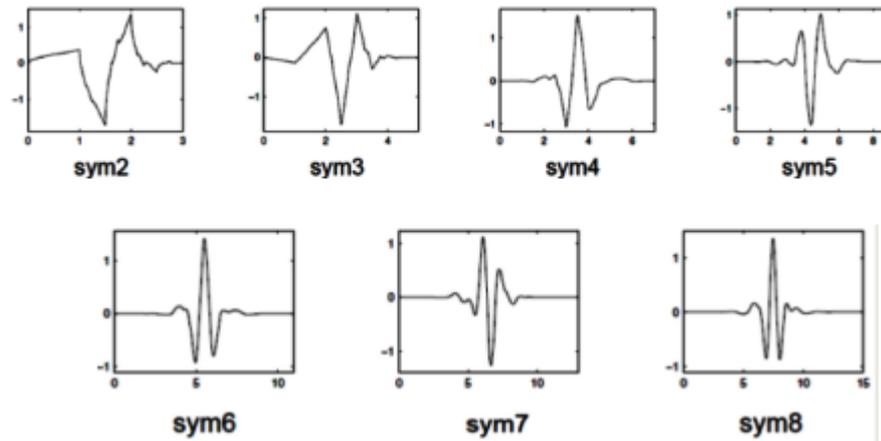


Fonte: Palechor, 2018.

3.1.5.4 Família Symlets

Foram propostas por Daubechies como modificações da família db. Estas são quase simétricas e suas propriedades semelhantes à da família original.

Figura 17 - Funções Symlet

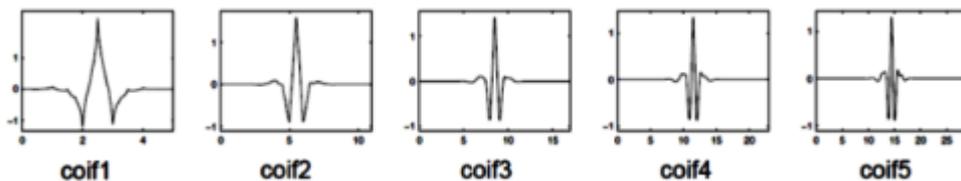


Fonte: Palechor, 2018.

3.1.5.5 Família Coiflets

A função onda tem $2N$ momentos iguais a zero e função de escala tem $2N-1$ momentos iguais a zero. As duas funções têm comprimento de apoio de $6N-1$.

Figura 18 - Função Coiflet



Fonte: Palechor, 2018.

3.2 Diferença da Curvatura Modal

Deformadas modais são mais sensíveis a presença de danos locais quando comparadas às mudanças nas frequências naturais. Entretanto, o uso das deformadas possui algumas desvantagens, como o fato de o dano local não influenciar significativamente nas formas dos primeiros modos de vibração e o fato das deformadas serem mais afetadas por ruídos e cargas ambientais (PANDEY, BISWAS, SAMMAN, 1991).

Em contrapartida, Pandey, Biswas e Samman (1991) mostraram que as derivadas das deformadas modais, como a curvatura modal, são mais sensíveis a pequenas perturbações. Em um elemento estrutural, o dano altera o momento de inércia, reduzindo a rigidez à flexão da seção e, portanto, modificando sua curvatura, provando, assim, ser um método adequado para o uso na detecção de danos.

Assim, nesse trabalho, Pandey, Biswas e Samman (1991) mostraram que as mudanças absolutas nas curvaturas de um elemento estrutural intacto e com dano seriam bons indicadores para localização e identificação dos danos. Assim, o método da Diferença da Curvatura Modal ou o *Modal Curvature Difference* (MCD) pode ser definido como:

$$MCD_{(i,j)} = |\Phi''_{d(i,j)} - \Phi''_{(i,j)}| \quad (3.8)$$

Onde:

MCD – diferença absoluta da curvatura modal o i -ésimo nó no j -ésimo modo de vibração;

$\Phi''_{d(i,j)}$ - curvatura modal do i -ésimo nó da estrutura danificada no j -ésimo modo de vibração;

$\Phi''_{(i,j)}$ - curvatura modal do i -ésimo nó da estrutura intacta no j -ésimo modo de vibração;

Os valores de curvatura são calculados usando a aproximação de um operador de Diferença Finitas Central (DFC), para o deslocamento do nó i na deformada do modo de vibração j . Este operador é definido pela seguinte equação:

$$\Phi''_{(i,j)} = \frac{\phi_{(i+1,j)} - \phi_{(i,j)} + \phi_{(i-1,j)}}{l^2} \quad (3.9)$$

$$\Phi''_{d(i,j)} = \frac{\phi_{d(i+1,j)} - \phi_{d(i,j)} + \phi_{d(i-1,j)}}{l^2} \quad (3.10)$$

Em que:

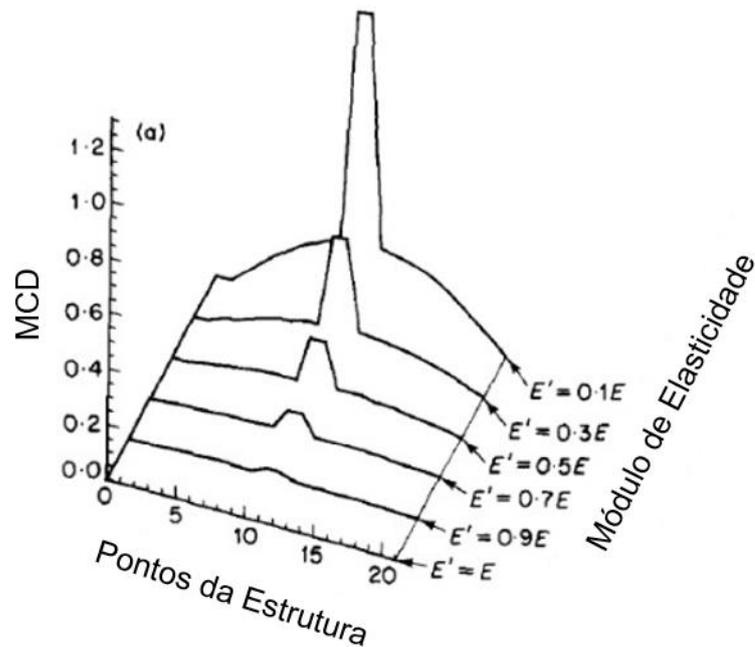
$\phi_{(i,j)}$ – deslocamento da deformada modal do i -ésimo nó da estrutura intacta no j -ésimo modo de vibração;

$\phi_{d(i,j)}$ – deslocamento da deformada modal do i -ésimo nó da estrutura danificada no j -ésimo modo de vibração;

l – comprimento do elemento de viga

Em um local com dano, o valor da curvatura modal é significativamente maior que em outros locais, o que leva o MCD a identificar os danos. No trabalho de Pandey, Biswas e Samman (1991), uma viga biapoada foi testada, onde uma variação do módulo de elasticidade da seção foi usado para representar o dano. A Figura 19 mostra os resultados encontrados.

Figura 19 - Diferença da Curvatura Modal (MCD) em viga biapoada



Fonte: Pandey, Biswas e Samman (modificado), 1991.

3.3 Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração

O Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração ou *Mode Shape Data Based Indicator* (MSDBI) foi originalmente proposto em 2015 por Yazdanpanah, Seyedpoor e Bengar. Esse método usa uma combinação das respostas dinâmicas, como deslocamentos, inclinações e curvatura dos modos de vibração e é definido pela seguinte equação:

$$MSDBI_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left| \left[|\Phi''_{d(i,j)} - \Phi''_{(i,j)}| (\phi_{d(i,j)})^2 \right] - \left[(|\Phi'_{d(i,j)}| - |\Phi'_{(i,j)}|)^2 (\phi_{d(i,j)}) \right] \right| \quad (3.11)$$

Onde:

$MSDBI_j$ – indicador baseado nos dados dos modos de vibração i -ésimo nó;

$\Phi'_{(i,j)}$ - inclinação modal do i -ésimo nó da estrutura intacta no j -ésimo modo de vibração;

$\Phi'_{d(i,j)}$ - inclinação modal do i -ésimo nó da estrutura danificada no j -ésimo modo de vibração;

m – número de modos de vibração.

As inclinações, tal qual as curvaturas no método anterior, podem ser calculadas através de um operador DFC, para o deslocamento i na deformada modal do modo j , definido pela seguinte equação:

$$\Phi'_{(i,j)} = \frac{\phi_{(i+1,j)} - \phi_{(i-1,j)}}{2l} \quad (3.12)$$

$$\Phi'_{d(i,j)} = \frac{\phi_{d(i+1,j)} - \phi_{d(i-1,j)}}{2l} \quad (3.13)$$

Em seus estudos, os autores assumiram que o conjunto do MSDBI de todos os nós representava uma população aleatória normalmente distribuída, podendo assim normalizar o MSDBI da seguinte forma:

$$nMSDBI_j = \max \left[0, \left(\frac{MSDBI_j - \text{mean}(MSDBI)}{\text{std}(MSDBI)} \right) \right] \quad (3.14)$$

No qual:

$\text{mean}(MSDBI)$ – média do MSDBI em todos os nós;

$\text{std}(MSDBI)$ – desvio padrão do MSDBI em todos os nós.

3.4 Métodos Modificados

Lima Junior (2020), propôs em seu trabalho a modificação dos métodos MCD e do MSDBI para que o dano fosse localizado com maior precisão pelos métodos. A seguir essas modificações serão descritas.

3.4.1 MCD Modificado

O dano pode ser representado por uma pequena irregularidade no sistema original. Algumas situações provocam o espelhamento do deslocamento da deformada modal do j -ésimo modo, quando comparada as estruturas íntegras e danificadas, tal qual Figura 20 e a Figura 21 mostra:

Figura 20 - Exemplo de deslocamento da deformada modal de uma estrutura íntegra

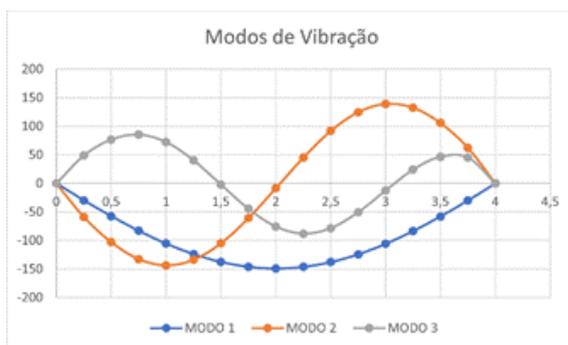
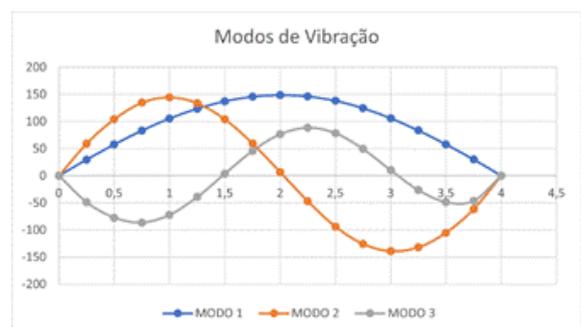


Figura 21 - Exemplo de deslocamento da deformada modal de uma estrutura danificada



Para esse tipo de ocorrência, o uso da equação (3.8) não resultara num bom indicador MCD para a detecção da diferença das curvaturas. Nos exemplos acima, no ponto 2m, para a estrutura íntegra ele é negativo e para a danificada é positivo, não sendo possível, assim, realizar o cálculo do MCD para o dado nó.

Logo, a proposta do método da Diferença da Curvatura Modal Modificada (MMCD) é baseado nas mudanças absolutas das curvaturas modais absolutas, da estrutura intacta e danificada, tal a definição da equação abaixo:

$$MMCD_{(i,j)} = \left| |\Phi''_{d(i,j)}| - |\Phi''_{(i,j)}| \right| \quad (3.15)$$

Para este método modificado, é sugerido o uso de m modos de vibração, evidenciando de forma mais exata e com boa segurança o local do dano. Assim, o $MMCD_i$ no i -ésimo nó é definido como a média da soma do $MMCD_i^j$ para todos os modos normalizados em relação ao maior valor $MMCD_{max}^j$ de cada modo, ou seja:

$$MMCD_j = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{MMCD_i^j}{MMCD_{max}^j} \quad (3.16)$$

Os resultados do índice proposto na equação (3.16) serão comparados com o proposto pela equação (3.8). Logo, se faz necessário o índice MCD seja normalizado de forma análoga ao $MMCD_j$:

$$MCD_j = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{MCD_i^j}{MCD_{max}^j} \quad (3.17)$$

3.4.2 MSDBI Modificado

Com base no MMCD, Lima Junior (2020) também propôs uma alteração no método MSDBI, passando a considerar as curvaturas modais em valor absoluto. Logo, o MSDBI modificado (MSDBIM) do i -ésimo nó no j -ésimo modo é:

$$MSDBIM_{(i,j)} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[\left| |\Phi''_{d(i,j)}| - |\Phi''_{(i,j)}| \right| (\phi_{d(i,j)})^2 \right] - \left[(|\Phi'_{d(i,j)}| - |\Phi'_{(i,j)}|)^2 (\phi_{d(i,j)}) \right] \quad (3.18)$$

Normalizando de maneira semelhante ao $MCDM_j$ (Equação 3.16) para m modos de vibração, tem-se:

$$MSDBIM_j = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{MSDBIM_i^j}{MSDBIM_{max}^j} \quad (3.19)$$

Os resultados dos índices $MCDM_j$ (Equação 3.16), $MSDBIM_j$ (Equação 3.19) e MCD_j (Equação 3.17), uma vez que serão comparados com o indicador $nMSDBI_j$, são normalizados analogamente. Desse modo:

$$nMSDBIM_j = \max \left[0, \left(\frac{MSDBIM_j - \text{mean}(MSDBIM)}{\text{std}(MSDBIM)} \right) \right] \quad (3.20)$$

No qual:

$\text{mean}(MSDBIM)$ – média do MSDBIM em todos os nós;

$\text{std}(MSDBIM)$ – desvio padrão do MSDBIM em todos os nós.

$$nMMCD_j = \max \left[0, \left(\frac{MCDM_j - \text{mean}(MCDM)}{\text{std}(MCDM)} \right) \right] \quad (3.21)$$

No qual:

$\text{mean}(MMCD)$ – média do MMCD em todos os nós;

$\text{std}(MMCD)$ – desvio padrão do MMCD em todos os nós.

$$nMCD_j = \max \left[0, \left(\frac{MCD_j - \text{mean}(MCD)}{\text{std}(MCD)} \right) \right] \quad (3.22)$$

No qual:

$\text{mean}(MCD)$ – média do MCD em todos os nós;

$\text{std}(MCD)$ – desvio padrão do MCD em todos os nós.

4 METODOLOGIA

O desenvolvimento desta pesquisa começou com a revisão bibliográfica sobre o tema, buscando apreender as informações e elaborar conhecimento a respeito dos métodos de identificação e localização de danos. Assim, três métodos foram estudados de forma mais profunda e implementados computacionalmente, sendo que dois desses métodos possui versões modificadas. Os códigos computacionais foram implementados com o auxílio do *software* Matlab®, em sua versão R2015a. As investigações do dano foram feitas com modelos computacionais de vigas de concreto simples e aço, elaborados por meio do *software* comercial para análise por elementos finitos Abaqus®, utilizando dados disponíveis na literatura para as vigas. Assim, nesse cenário, os trabalhos realizados por Carvalho (2015) e por Silva (2015) e Palechor (2013) deram grandes subsídios para a realização do trabalho. Deste modo, neste capítulo será apresentado alguns pontos importantes destes trabalhos que estão supracitados ao longo deste texto. Neste capítulo também será discutida a discretização e a introdução dos danos nos modelos computacionais construídos.

O trabalho de Carvalho (2015) foi escolhido devido ao interesse nos dados experimentais das vigas ensaiadas e a possibilidade de avaliar a detecção de danos por outros métodos. Já os trabalhos de Silva (2015) e Palechor (2013) deram subsídios valiosos sobre a detecção de danos através das análises de *wavelets*, além do interesse na modelagem e resultados numéricos e experimentais, possibilitando uma validação do método usado na pesquisa e a avaliação para diferentes casos de danos múltiplos.

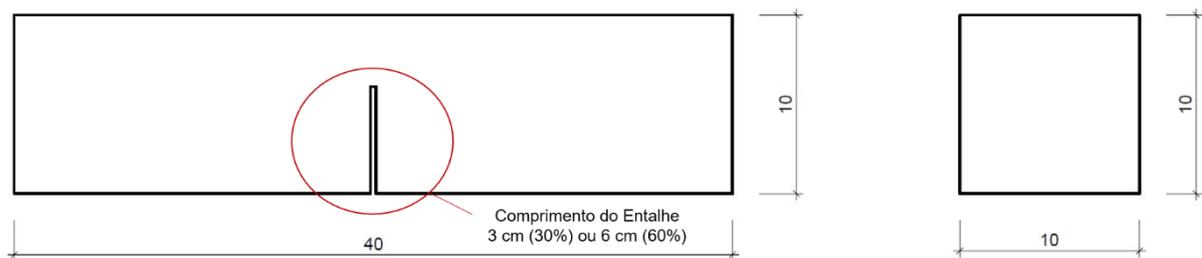
4.1 Trabalhos abordados

Carvalho (2015) conduziu um estudo, tendo o objetivo de verificar o índice da existência de danos em corpos de provas (CP) de vigas em concreto simples e de concreto reforçado com fibras. A rigidez a flexão (EI) foi o parâmetro escolhido, sendo feita a comparação dos valores de rigidez dos CP nos estados intacto e danificado. Uma análise estatística foi conduzida e comprovou que para as vigas estudadas, a rigidez foi um parâmetro eficiente na avaliação da presença de danos.

O autor estudou três lotes de vigas, e, para este trabalho, somente o segundo e o terceiro lotes são de interesse por serem os lotes de concreto simples. Para cada

lote foram moldados 10 CP, com dimensões 40x10x10 cm e o dano foi representado por um entalhe com 5mm de espessura perpendicular ao eixo da viga. Cada lote apresentava três condições distintas: 4 CP íntegros, 3 CP com dano representando uma penetração de 30%, ou uma profundidade de 3 cm, do disco da retífica, e outros 3 CP com dano de 60% ou uma profundidade de 6 cm.

Figura 22 - Ilustração do comprimento do entalhe na seção



Fonte: Carvalho (Adaptado), 2015.

Os dois lotes foram então submetidos aos ensaios propostos pela NBR 8522 (2008), que determina o módulo estático de elasticidade à compressão, e pela NBR 5739 (2007), que determina a resistência à compressão axial. O lote II da pesquisa apresentou resistência à compressão axial de 23,36 MPa e módulo de elasticidade (E) de 23,09 GPa. O lote III apresentou valores de 19,06 MPa e 19,19 GPa, respectivamente.

Palechor (2013) realizou um estudo com o objetivo de desenvolver uma técnica de diagnóstico de danos em estruturas baseada no uso de *wavelets*. Para tal, o autor utilizou vigas de aço e estudou, numérica e experimentalmente, situações de danos baseados nas respostas estáticas e dinâmicas das estruturas. As vigas foram discretizada em 17 pontos (ou 16 elementos) e, para incremento dos valores, esses dados foram interpolados e regularizados. Para as condições estáticas, foram conduzidos alguns casos de estudo modificando a posição e intensidade da carga aplicada na estrutura, o que gerava deslocamentos nos nós de estudo. Para respostas dinâmicas, diversos casos de dano foram simulados inserindo um entalhe na aba da viga, modificando o tamanho e localização ao longo da estrutura. Depois, cada modo de vibração fornece um deslocamento modal sendo de interesse somente o vertical. Com esses dados de respostas, foi aplicada a DWT e a CWT para identificação dos danos.

A tese de Silva (2015) abordou o uso das *wavelets* na identificação de danos tal qual Palechor (2013), propondo ainda um novo método de índice de dano baseado na energia da *wavelet* pacote. O autor estudou tanto vigas em aço como estruturas em concreto, para situações estáticas e dinâmicas. A metodologia é semelhante a feita por Palechor (2013), sendo de interesse aqui pelos ensaios experimentais da viga de aço para determinar o módulo de elasticidade, propriedade que usaremos nesse trabalho. Silva (2015) utilizou três métodos diferente para medir o módulo de elasticidade e assim garantir uma maior precisão nos resultados dinâmicos: formulação de Blevins, método da FRF e método da propagação das ondas. Para esse trabalho utilizaremos o módulo com valor de 208 GPa obtido através do método da FRF.

4.2 Propriedades Físicas, Geométricas e Discretização das vigas estudadas

Para a viga de concreto, foi escolhido as mesmas propriedades do material e dos dados geométricos do trabalho do Carvalho (2015), de acordo com a Tabela 1.

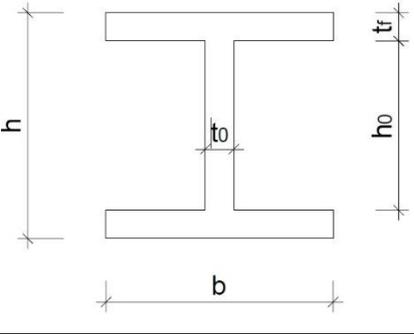
Tabela 1 - Propriedades da viga em concreto simples

A (m ²)	0,01
I (m ⁴)	833,33 10 ⁻⁸
E (N/m ²)	19,19 10 ⁹
ρ (kg/m ³)	2400
L (m)	0,4

Para a viga de aço, foram utilizadas as mesmas propriedades que o trabalho de Silva (2015), porém utilizando o módulo de elasticidade experimental escolhido, módulo esse escolhido por possuir um valor mais próximo do teórico para o material aço (Tabela 2).

Tabela 2 - Propriedades da viga em aço

h (cm)	10,16
h_0 (cm)	8,68
t_f (cm)	0,74
t_o (cm)	0,483
b (cm)	6,76
E (N/m ²)	$208 \cdot 10^9$
ρ (kg/m ³)	7800
L (m)	6



Os modelos das vigas de concreto e de aço foram elaborados em 2D e 3D respectivamente por meio do *software* Abaqus®. A malha de elementos finitos do modelo em concreto possui formulação B21, que se refere a elementos de viga linear de 2 nós no plano, onde cada nó apresenta três graus de liberdade. Já a malha de elementos finitos do modelo em aço possui formulação C3D8R, que representa um elemento cúbico com oito nós e integração reduzida, com somente um ponto de integração no elemento. Ambas foram discretizadas em 16 elementos e 17 nós, com a viga de aço tendo 0,375m de comprimento para cada elemento (Figura 24) e a viga de concreto com 0,025m de comprimento para cada elemento (Figura 23). Para melhor comparar os resultados experimentais estudados nos trabalhos supracitados com os resultados numéricos aqui estudados, a modelagem seguiu à risca a forma utilizada em laboratório, inclusive as condições de contorno e a posição dos apoios.

Figura 23 - Modelo da viga de concreto discretizada

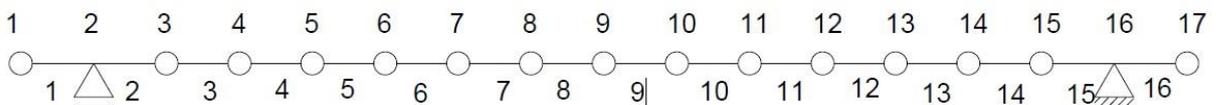
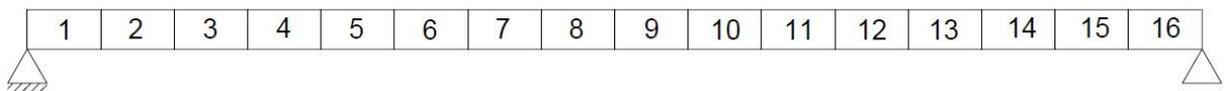


Figura 24 - Modelo da viga de aço discretizada



4.3 Introdução dos danos

Nos modelos da viga em concreto, um único dano foi inserido, tal qual Carvalho (2015). Buscou-se colocar o dano o mais próximo possível da região ensaiada (Figura 25). Três cenários de danos foram definidos para auxiliar na avaliação da sensibilidade dos métodos (Tabela 3).

Figura 25 - Modelo da viga de concreto discretizada com o elemento 9 danificado

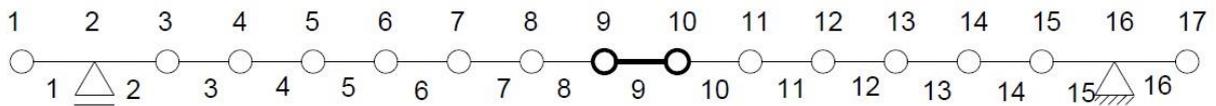


Tabela 3 - Cenário de dano único na viga de concreto

CENÁRIO	ELEMENTO	REDUÇÃO DA ELASTI.
VC_D1	9	10%
VC_D2	9	20%
VC_D3	9	30%

Para a viga em aço, foram testadas quatro situações de danos (Tabela 4), com dano único e danos múltiplos. Os danos foram inseridos o mais próximo do nó em que ele está indicado. Nesse caso, foi inserido um entalhe removendo elementos da malha em elementos finitos (Figura 26 e Figura 27). O dano, representando fissuras verticais abertas causadas por fadiga, foi escolhido pelo fato de o mesmo ser bastante encontrado em pontes.

Figura 26 – Dano simulado com dimensão 20x20mm

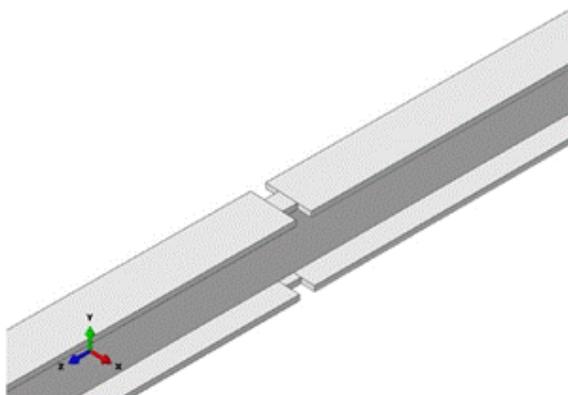


Figura 27 – Dano simulado com dimensão 5x25mm

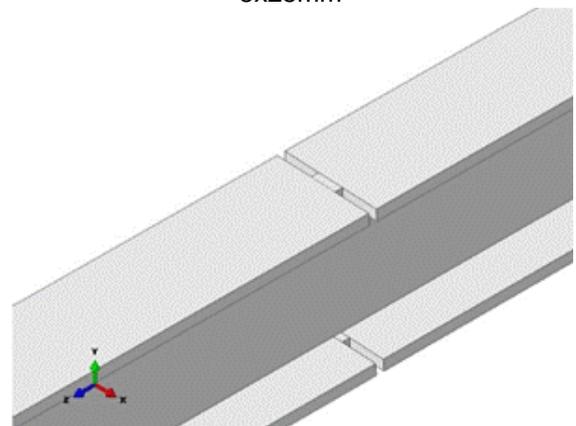


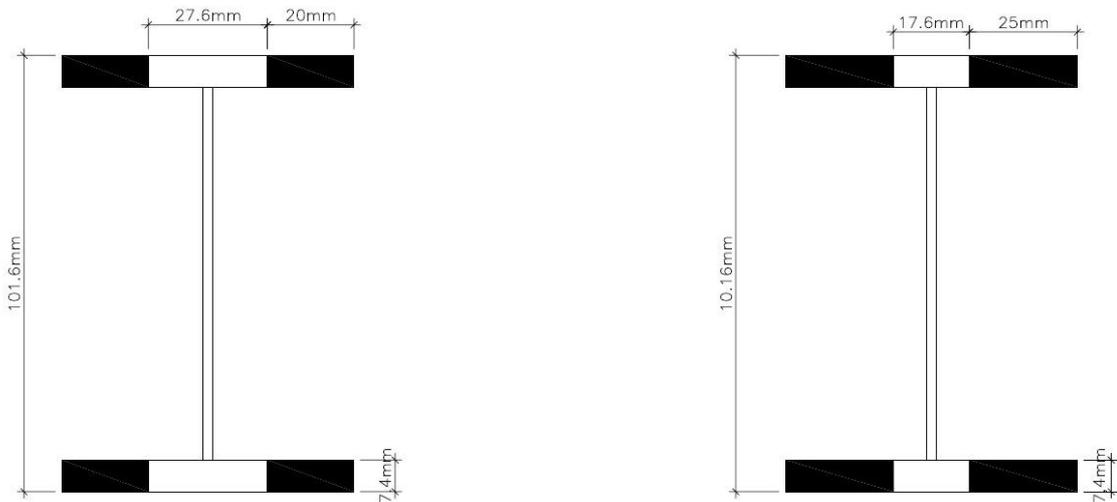
Tabela 4 - Cenários de dano na viga de aço

CENÁRIO	NÓS	DIST.	DIMENSÃO
VA_D1	13	4,5m	20x20mm
VA_D2	5 e 13	1,5m e 4,5m	20x20mm
VA_D3	5, 9 e 13	1,5m; 3,0m e 4,5m	20x20mm
VA_D4	5, 8, 11 e 14	1,5m; 2,625m; 3,75m e 4,875m	5x25mm

Na Tabela 4, a distância é em relação ao apoio fixo da viga. O uso de simetria nos três primeiros casos foi uma coincidência da modelagem. Embora em uma situação de campo nós não saberíamos a localização dos danos, nesse trabalho, para avaliar os métodos, o conhecimento prévio dos locais não é prejudicial. Considerando ainda os tamanhos de área dos danos, a diminuição do tamanho, mesmo que com o acréscimo de danos no modelo, fez com que o modelo D4 apresentasse um sinal mais livre de influência causa pelos danos próximos.

A seção transversal dos danos é apresentada na figura abaixo:

Figura 28 - Seção transversal dos danos na viga de aço



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados para os modelos numéricos de viga em aço e em concreto simples, de acordo com a discretização proposta no capítulo anterior. Os dados modais, obtidos numericamente, para os 3 primeiros modos de vibração são utilizados para identificar e localizar os danos através dos métodos apresentados no capítulo três. Para cada método, foi implementado um código utilizando o *software* Matlab®, versão R2015a.

As transformadas de *wavelets* são comparadas com relação a *wavelet*-mãe e a eficácia na localização do dano, utilizando dados dos 3 primeiros modos de vibração vertical com os valores da matriz massa normalizados, ou seja, deslocamentos com seus valores próximos dos reais.

Já o método MMCD é comparado primeiro com o MCD, utilizando os 5 primeiros modos de vibração vertical simultaneamente. Em seguida, os métodos MMCD, MSDBIM e MCD são comparados com o MSDBI. Em todos os casos, são utilizados os 5 primeiros modos de vibração vertical normalizados para o deslocamento, ou seja, deslocamento máximo igual a 1.

5.1 Viga em Aço

5.1.1 Transformadas de *Wavelet* (WT)

Para a modelagem numérica, foram obtidos os cinco primeiros modos de vibração que só incluem os deslocamentos verticais (y). Para as Transformadas de *Wavelet* (WT) só precisamos utilizar os 3 primeiros modos. Na Tabela 5 são apresentadas as frequências obtidas no Abaqus para os diferentes casos de danos.

Tabela 5 - Frequências (Hz) obtidas no ABAQUS

FREQUÊNCIAS NATURAIS (Hz)					
MODO	VA_INT	VA_D1	VA_D2	VA_D3	VA_D4
1	9,8901	9,8474	9,807	9,7227	9,5959
2	39,194	38,859	38,529	38,53	38,083
3	86,79	86,422	85,996	85,821	84,537
4	149,9	149,87	149,87	149,86	146,64
5	242,28	241,6	240,94	239,38	240,33

Nas figuras a seguir (Figura 29 a Figura 33), são mostrados os três primeiros modos de vibração correspondentes para cada situação de dano em cada viga.

Figura 29 - Modos de vibração para a viga VA_INT

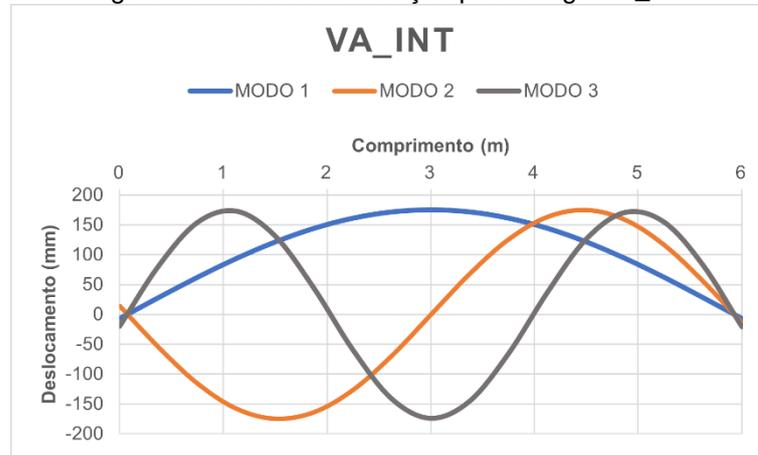


Figura 30 - Modos de vibração para a viga VA_D1

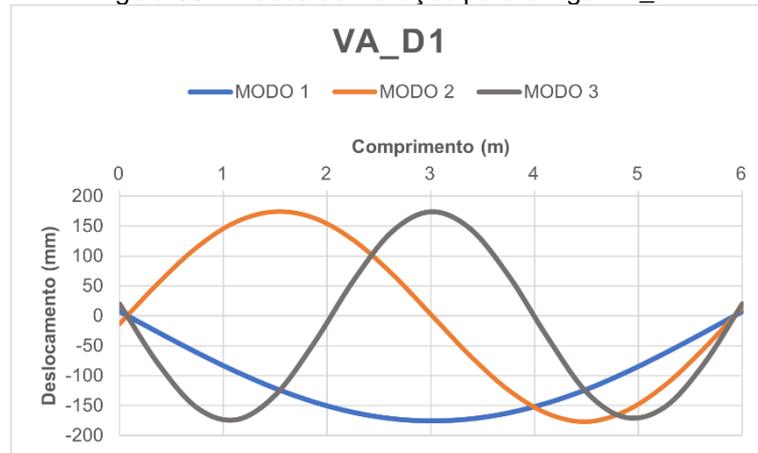


Figura 31 - Modos de vibração para a viga VA_D2

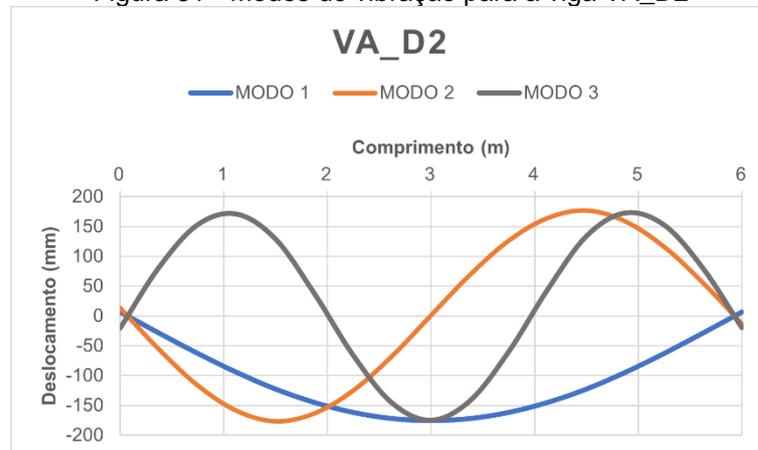


Figura 32 - Modos de vibração para a viga VA_D3

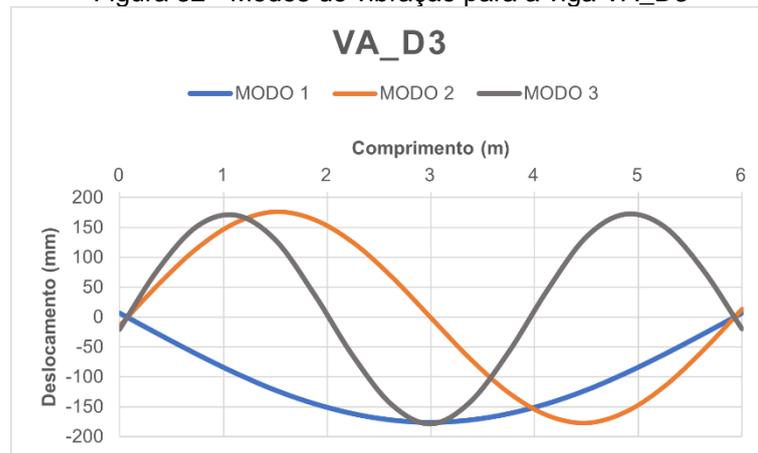
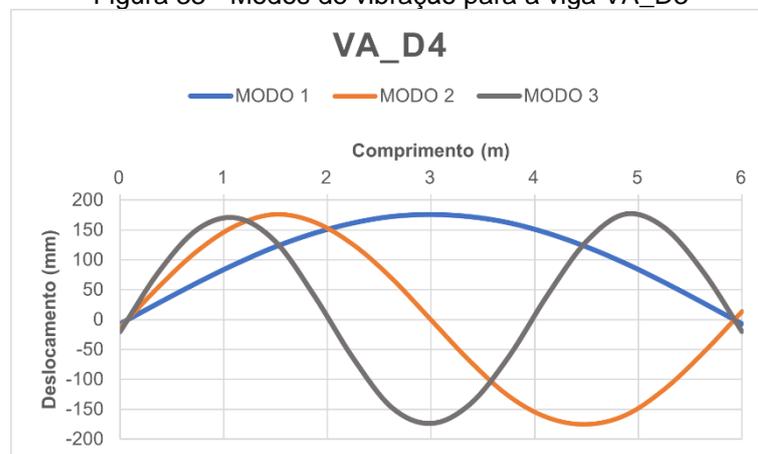


Figura 33 - Modos de vibração para a viga VA_D3



Os modos de vibração foram exportados para o Matlab®. Para as vigas VA_D1, VA_D2 e VA_D4 foram utilizados o primeiro e segundo modos de vibração. No caso da viga VA_D3, foram utilizados o primeiro e o terceiro modos de vibração, dado que a localização de um dos danos dessa viga fica exatamente na metade do seu comprimento, onde o segundo modo de vibração possui deslocamento zero (Figura 32 acima).

Com os deslocamentos nodais no Matlab®, foi aplicado o método de interpolação *Cubic-Spline* para a obtenção de uma maior quantidade de pontos. Esse método foi escolhido devido a sua facilidade de implantação e programação além dos resultados satisfatórios. Para a DWT foi de 17 pontos para 100 pontos; já a CWT foi de 17 pontos para 1000 pontos. Em seguida, foi aplicada a regularização de *Tikhonov* com o objetivo de aumentar a amplitude das variações ou mudanças geradas no sinal pela presença do dano. A Figura 34 a Figura 36 mostram exemplos da interpolação e

regularização dos dados nodais. No Apêndice A é apresentada a teoria dos métodos de interpolação e regularização utilizados.

Figura 34 – Interpolação e Regularização Modo 1 - VA_D1

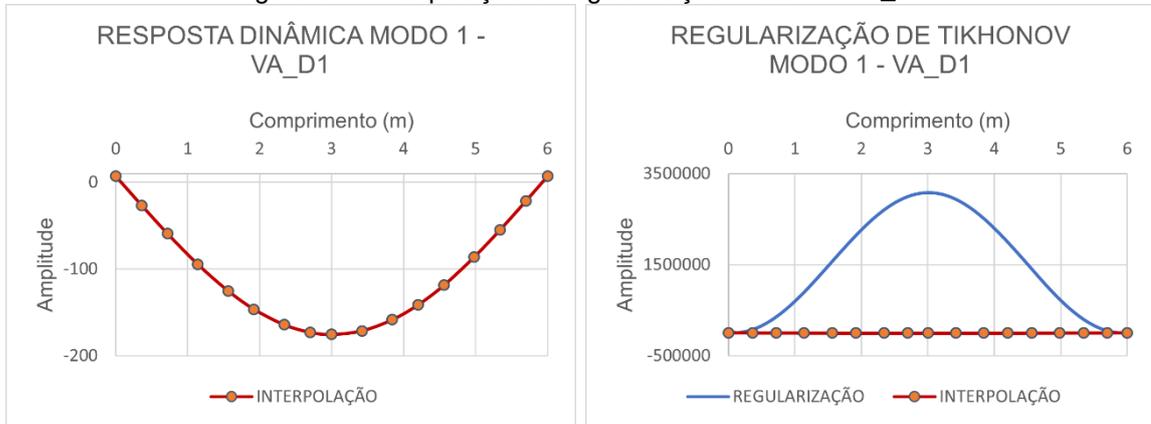


Figura 35 - Interpolação e Regularização Modo 2 - VA_D1

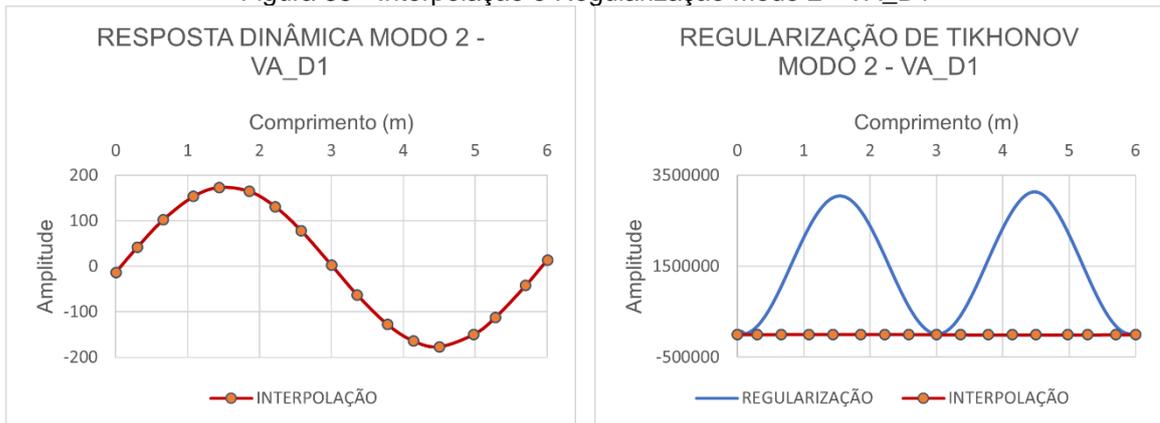
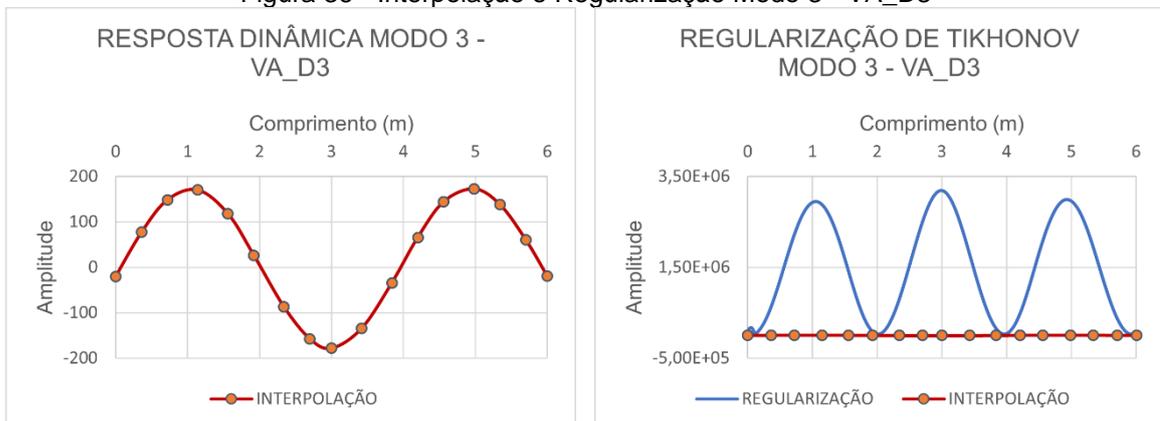


Figura 36 - Interpolação e Regularização Modo 3 - VA_D3



Aos dados interpolados, foram aplicados a DWT e a CWT. Para a DWT foram escolhidas quatro funções: Biorotogonal – bior6.8; Coiflets – coif3; Daubechies – db5 e

Symlet – sym6. Para a CWT foram escolhidas também quatro funções: Coiflets – coif4; Daubechies – db5; Gaus – gaus8 e Symlets – sym8. A Tabela 6 mostra a correspondência entre os nós e a distância do local do dano.

Tabela 6 - Relação entre nós e distância dos danos.

Correspondência entre nós (#) e Posição do Dano			
VIGA	Posição (m)	Nó DWT	Nó CWT
VA_D1	4,5m	75	750
VA_D2	1,5m e 4,5m	25 e 75	250 e 750
VA_D3	1,5m; 3,0m e 4,5m	25, 50 e 75	250, 500 e 750
VA_D4	1,5m; 2,625m; 3,75m e 4,875m	25; 44; 63 e 81	250; 440; 630 e 810

5.1.1.1 DWT

Primeiro Modo de Vibração – VA_D1

Figura 37 - DWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando bior6.8

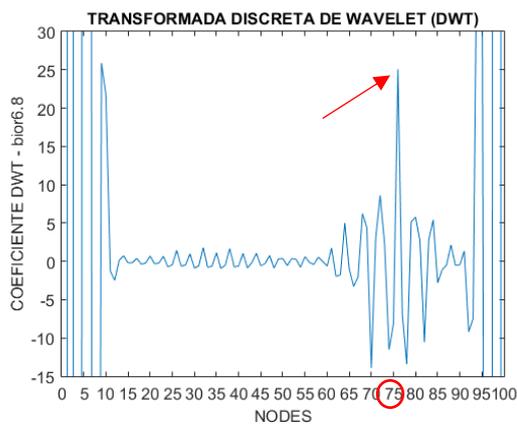


Figura 38 - DWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando coif3

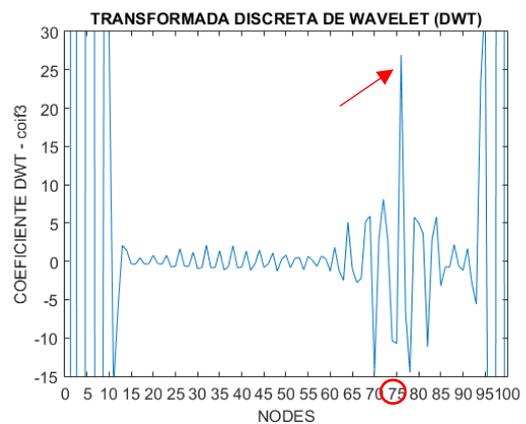


Figura 39 - DWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando db5

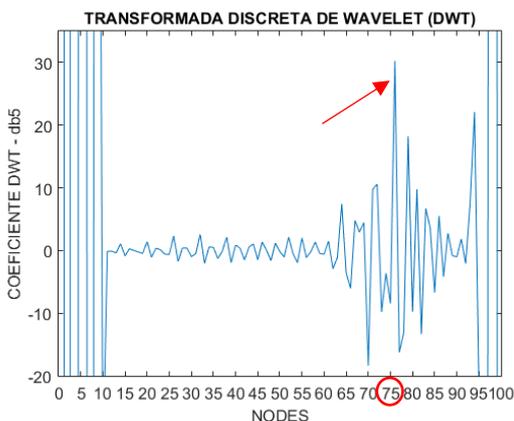
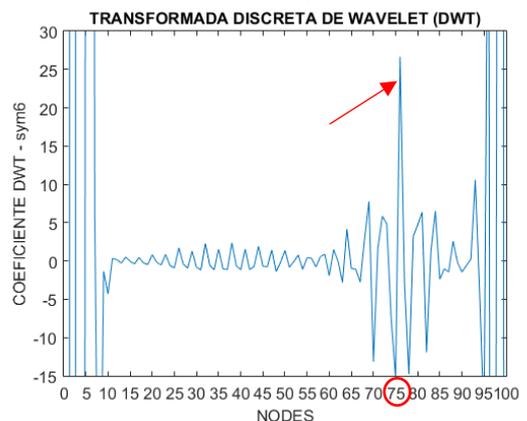


Figura 40 - DWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando sym6



Segundo Modo de Vibração – VA_D1

Figura 41 - DWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando bior6.8

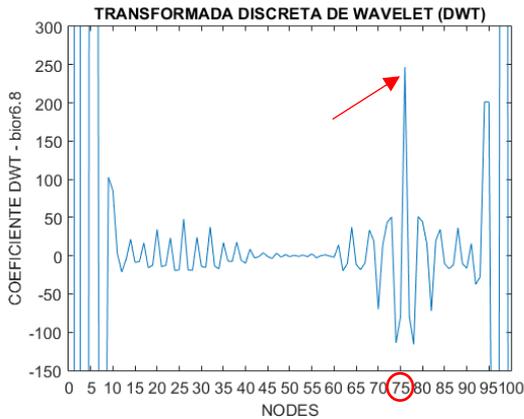


Figura 42 - DWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando coif3

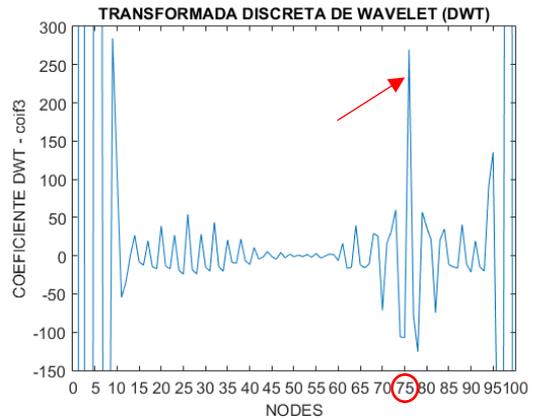


Figura 43 - DWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando db5

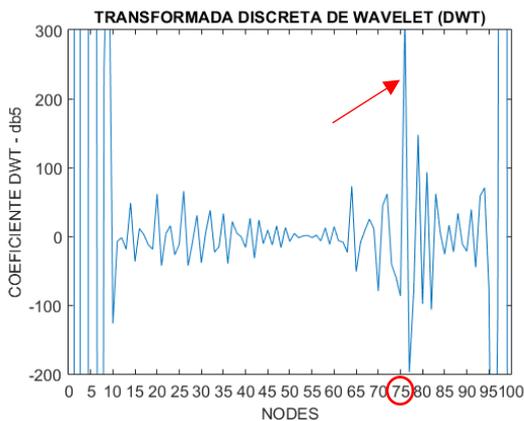
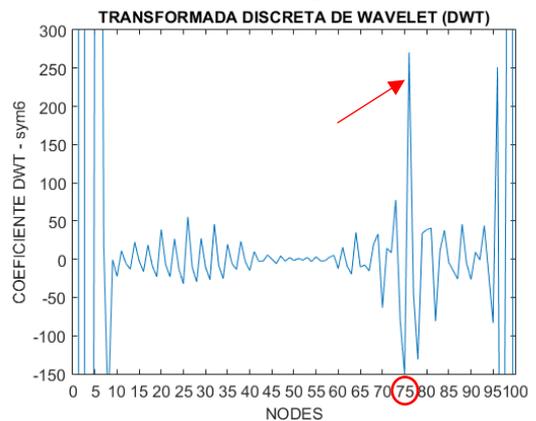


Figura 44 - DWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando sym6



Analisando os resultados apresentados, para ambos os modos de vibração da viga VA_D1, a DWT foi capaz de identificar bem o dano localizado no nó 75, a 4,5m do apoio esquerdo (Figura 37 a Figura 44). Os danos causaram algumas perturbações em região próxima e além dessas, existem perturbações causados pela descontinuidade geométrica dos apoios nas regiões mais extremas do gráfico. A *wavelet* db5 foi a que apresentou as maiores perturbações ao redor do dano.

Para os próximos casos, quanto para esse anterior, essas perturbações ainda estarão presentes. Uma maneira de diminuí-las é fazendo a análise da estrutura intacta e subtrair dos valores da análise danificada.

Primeiro Modo de Vibração – VA_D2

Figura 45 - DWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando bior6.8

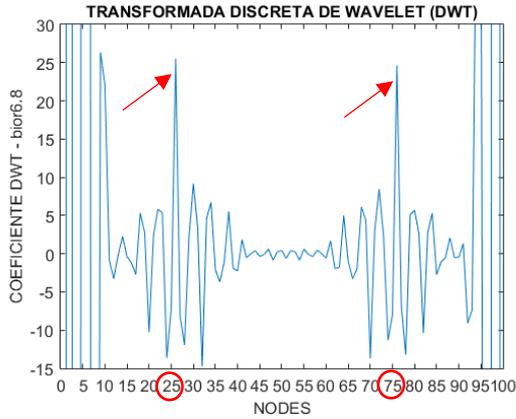


Figura 46 - DWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando coif3

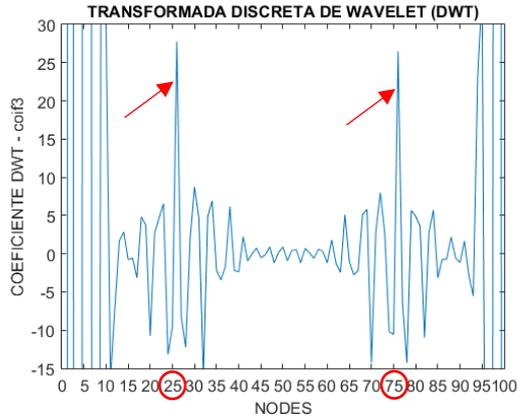


Figura 47 - DWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando db5

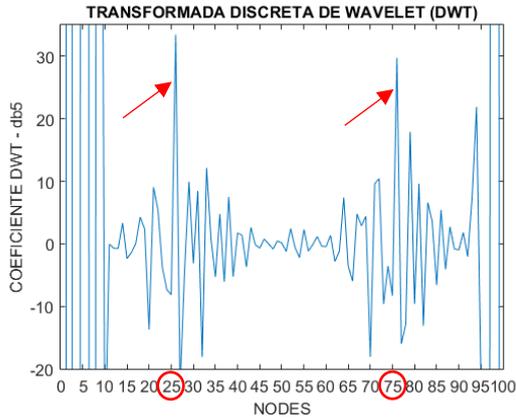
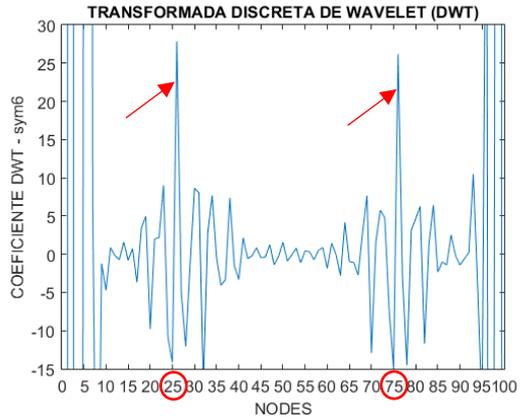


Figura 48 - DWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando sym6



Segundo Modo de Vibração – VA_D2

Figura 49 - DWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando bior6.8

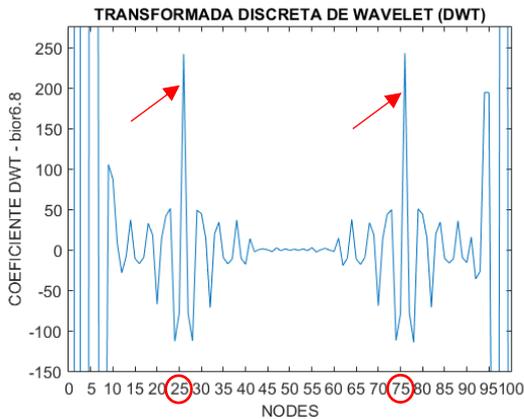


Figura 50 - DWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando coif3

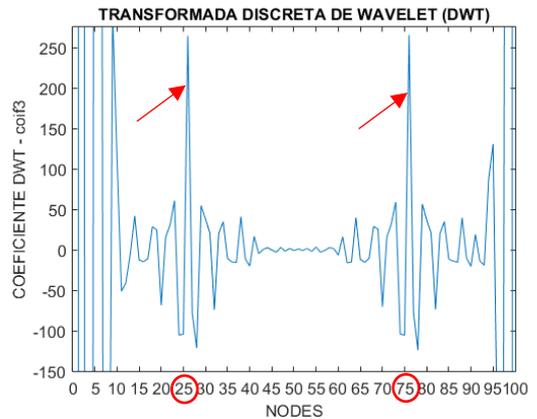


Figura 51 - DWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando db5

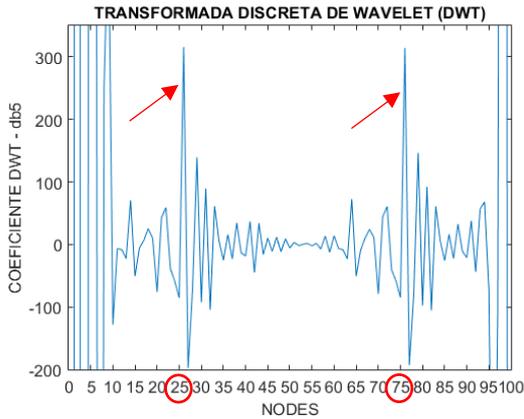
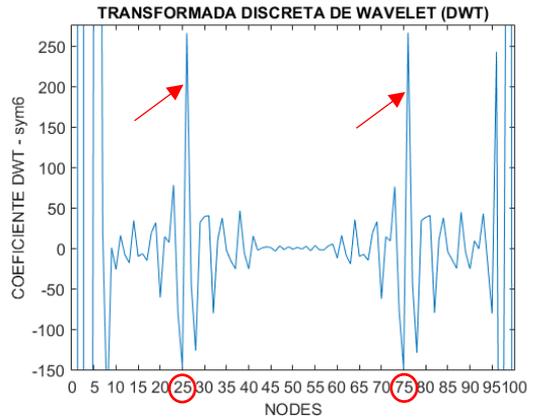


Figura 52 - DWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando sym6



Os resultados para a viga VA_D2 (Figura 45 a Figura 52) foram satisfatórios no primeiro modo de vibração e um pouco melhor no segundo modo de vibração. No primeiro modo, a região de perturbação causada por ambos os danos é mais significativa que no segundo. Em ambos os modos, a amplitude é maior na região dos danos, nos nós 25 e 75.

Primeiro Modo de Vibração – VA_D3

Figura 53 - DWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando bior6.8

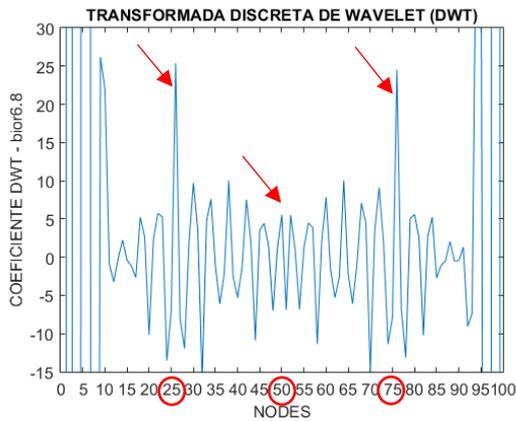


Figura 54 - DWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando coif3

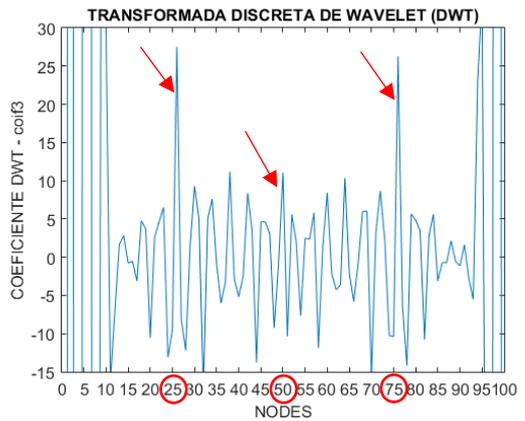


Figura 55 - DWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando db5

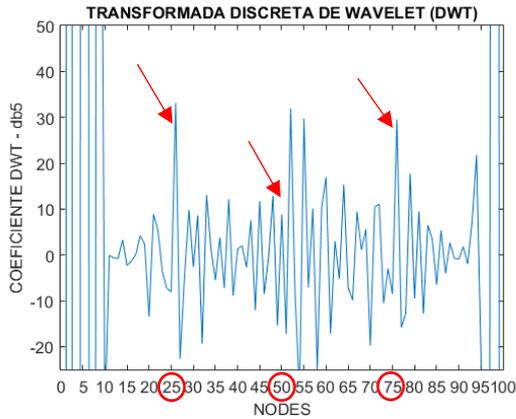
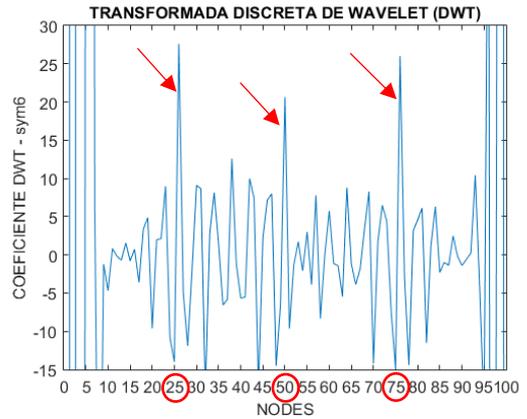


Figura 56 - DWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando sym6



Terceiro Modo de Vibração – VA_D3

Figura 57 - DWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando bior6.8

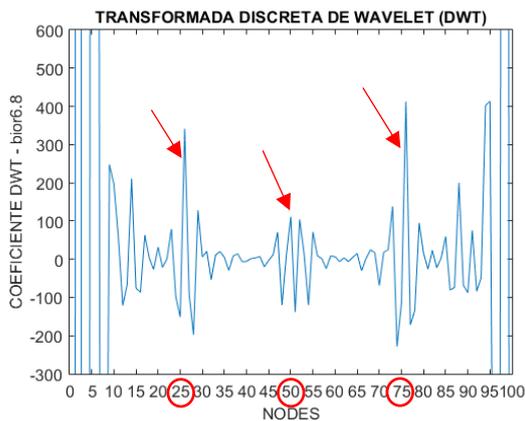


Figura 58 - DWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando coif3

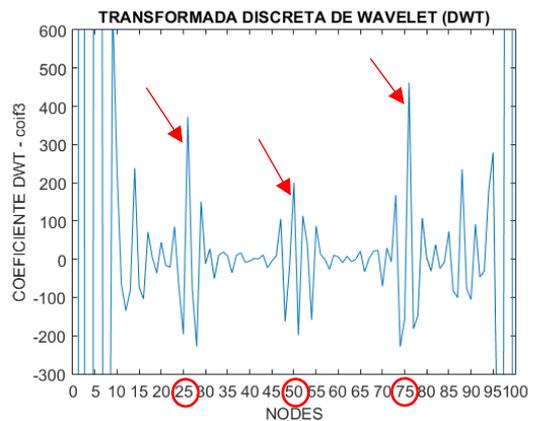


Figura 59 - DWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando db5

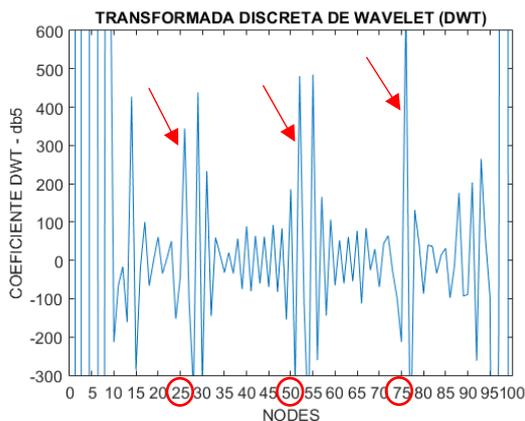
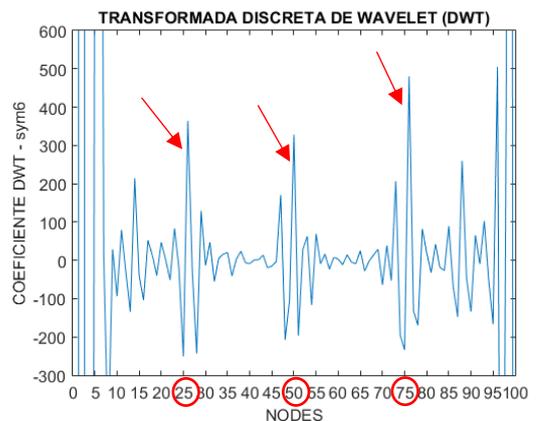


Figura 60 - DWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando sym6



No primeiro modo de vibração da viga VA_D3 (Figura 53 a Figura 56), percebe-se uma grande perturbação em torno do dano no nó 50, o que dificulta sua identificação. Os danos nos nós 25 e 75 são bem definidos e as *wavelets* sym6 e db5

são as que melhores representam os três danos existentes, embora com grandes perturbações no nó 50. No terceiro modo de vibração (Figura 57 a Figura 60), as perturbações diminuem um pouco, mas ainda persistem ao redor do dano no nó 50. A *wavelet* *coif3* ensaia uma identificação e as *wavelets* *sym6* e *db5* são as que melhor identificam os três danos, mesmo embora a *db5* apresente seu maior pico aproximadamente 4cm depois do local exato do dano.

Primeiro Modo de Vibração – VA_D4

Figura 61 - DWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando bior6.8

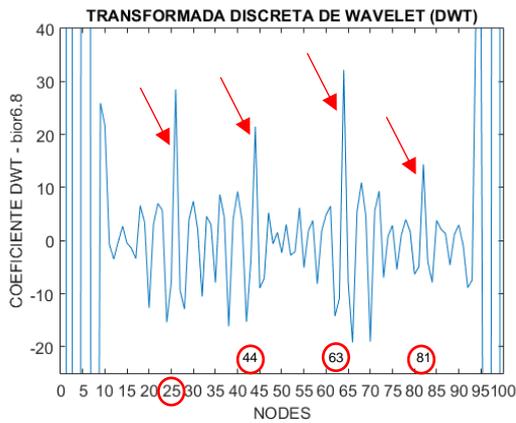


Figura 62 - DWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando coif3

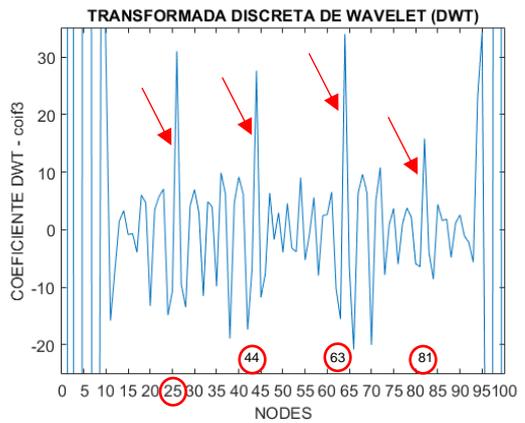


Figura 63 - DWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando db5

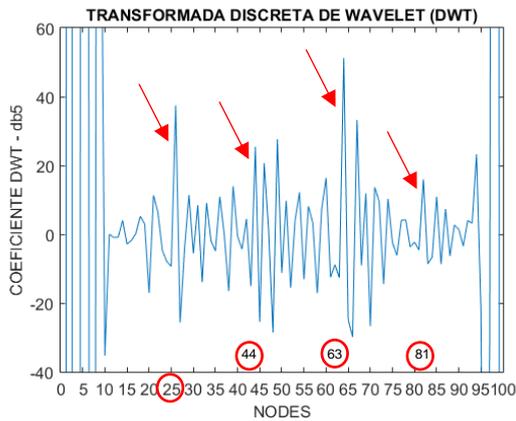
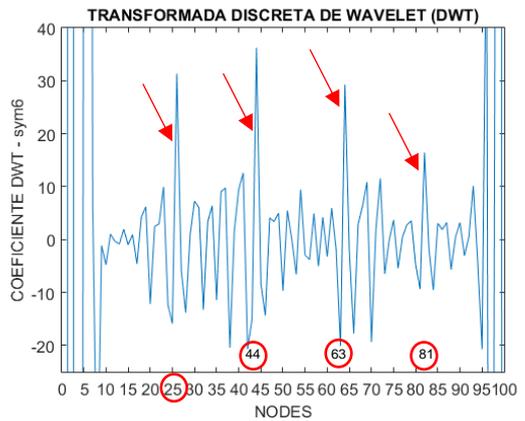


Figura 64 - DWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando sym6



Segundo Modo de Vibração – VA_D4

Figura 65 - DWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando bior6.8

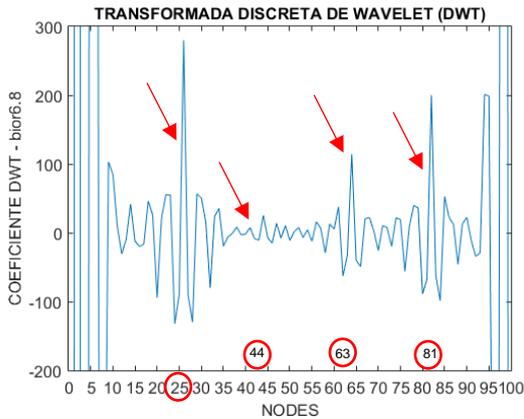


Figura 66 - DWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando coif3

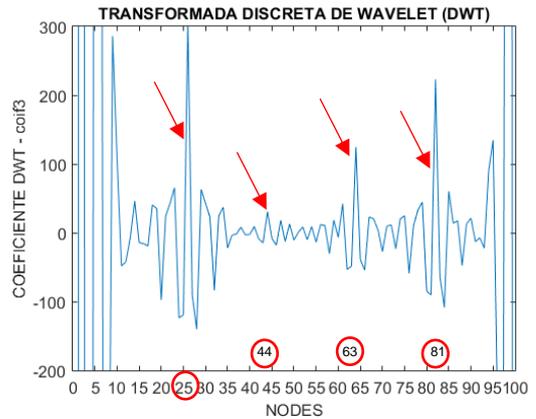


Figura 67 - DWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando db5

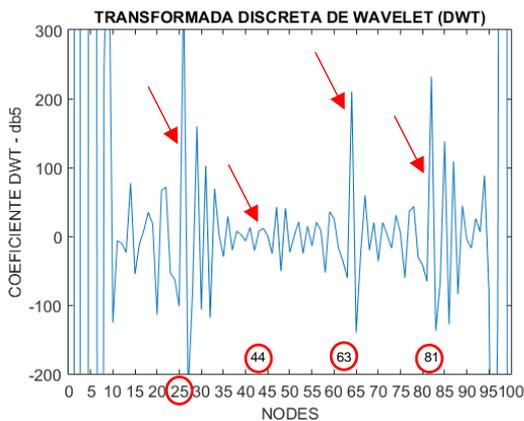
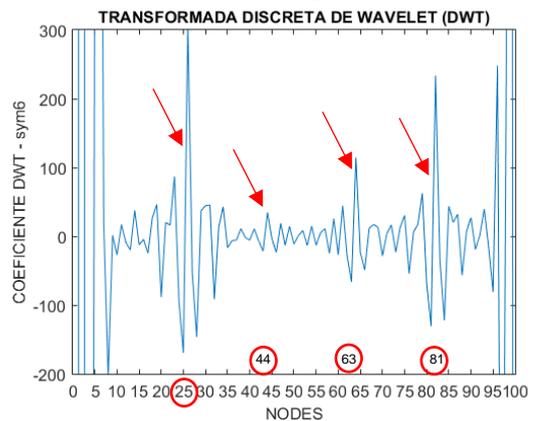


Figura 68 - DWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando sym6



Para a viga VA_D4 (Figura 61 a Figura 68), em que área dos danos foram menores que as áreas das três vigas anteriores, a DWT consegue definir bem o local do dano para as *wavelets*, exceto a db5 para o primeiro modo de vibração. A quantidade dos danos acaba contribuindo com a propagação das perturbações, e, por conseguinte, acaba escondendo alguns danos ao redor dessas perturbações locais. No segundo modo de vibração, o dano localizado no nó 43~44 não é bem localizado, enquanto os outros três são.

A Tabela 7 e a Tabela 8 faz um resumo da análise da DWT utilizando os dados obtidos na análise dinâmica numérica, onde: B = Bom; MB = Muito Bom; NI = Não Indicado. Para a viga VA_D3, considerar o Modo 3 onde estiver 2*

Tabela 7 - Resumo do uso da DWT

Função	bior6.8		coif3	
VIGA	Modo1	Modo 2*	Modo1	Modo 2*
VA_D1	B	B	B	B
VA_D2	B/B	MB/MB	B/B	MB/MB
VA_D3	B/NI/B	B/NI/B	B/NI/B	B/NI/B
VA_D4	B/B/B/B	B/NI/B/B	B/B/B/B	B/NI/B/B

Tabela 8 - Resumo do uso da DWT (continuação)

Função	sym6		db5	
VIGA	Modo1	Modo 2*	Modo1	Modo 2*
VA_D1	B	B	B	B
VA_D2	B/B	MB/MB	B/B	B/B
VA_D3	B/B/B	B/B/B	B/NI/NI	NI/NI/B
VA_D4	B/B/B/B	B/NI/B/B	B/NI/B/NI	B/NI/B/B

5.1.1.2 CWT

A CWT permite dois gráficos para a mesma *wavelet*: um 2D e outro 3D. Foram testados alguns valores para a escala a e o que apresentou melhor resultado foi o $a = 50$. A seguir são apresentados os resultados da CWT, para as quatro wavelets escolhidas.

Primeiro Modo de Vibração – VA_D1

Figura 69 - CWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando coif4

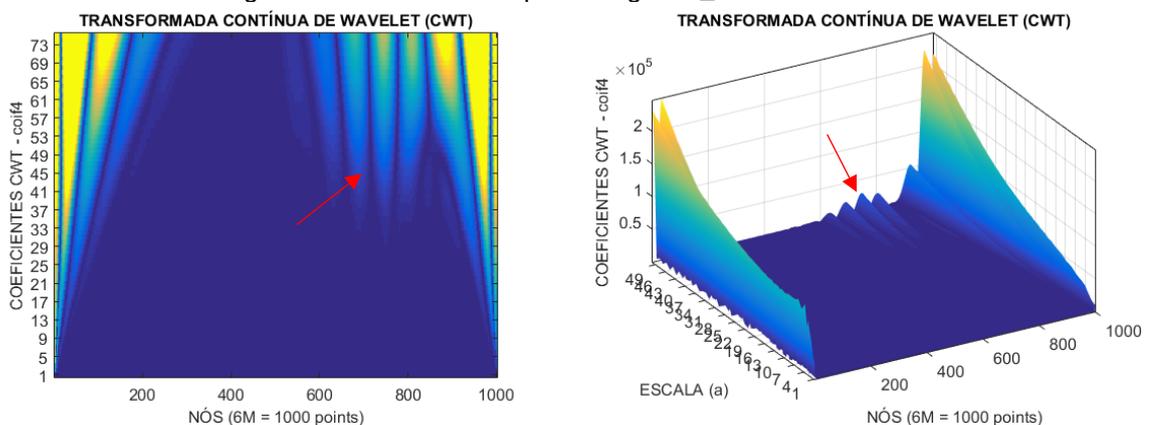


Figura 70 - CWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando db5

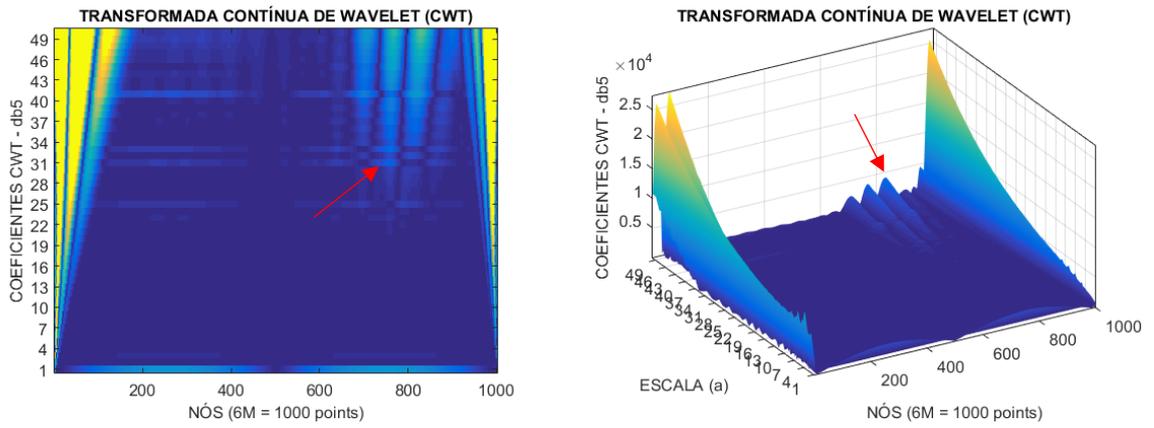


Figura 71 - CWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando gaus8

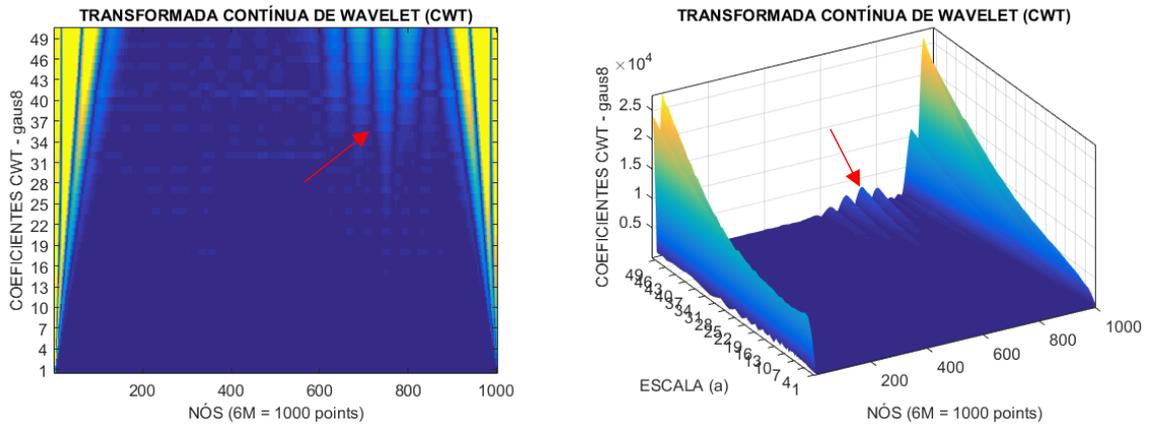
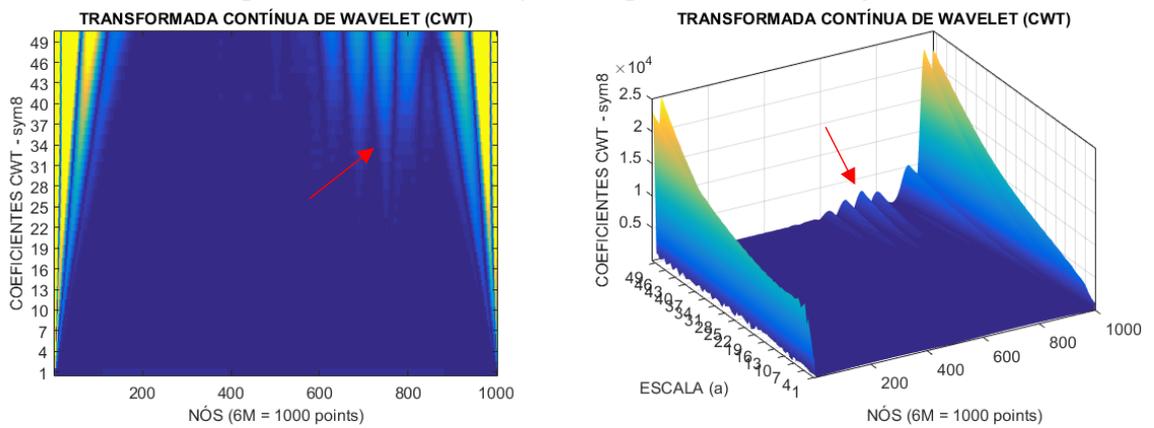


Figura 72 - CWT Modo 1 para a viga VA_D1 usando sym8



Segundo Modo de Vibração – VA_D1

Figura 73 - CWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando coif4

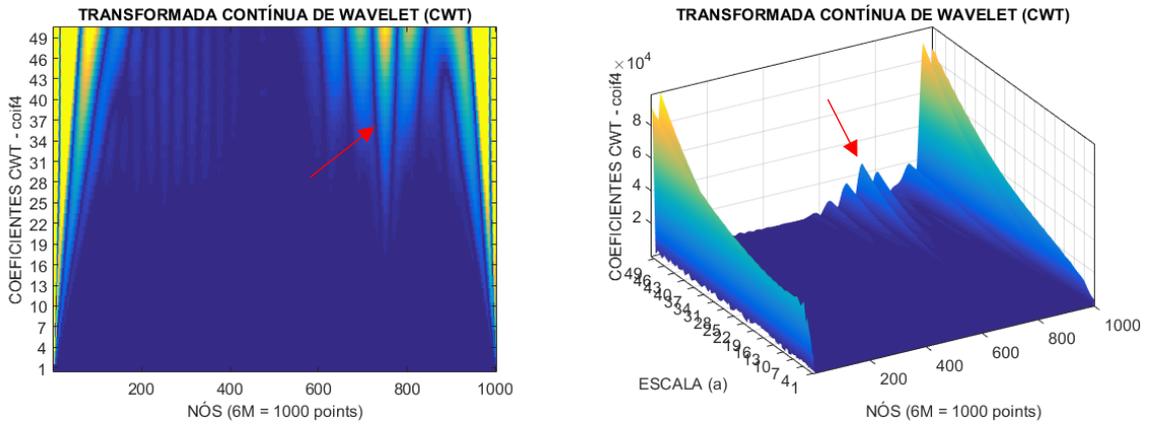


Figura 74 - CWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando db5

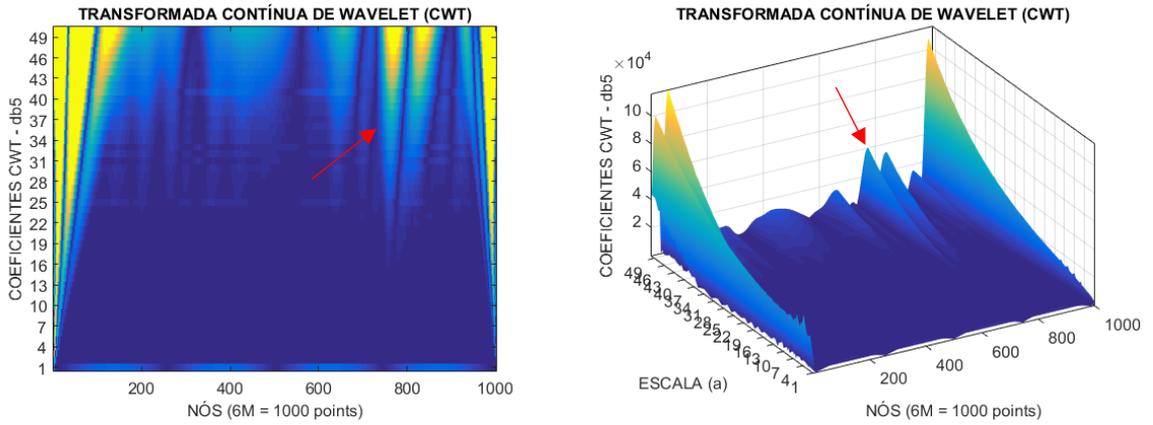


Figura 75 - CWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando gaus8

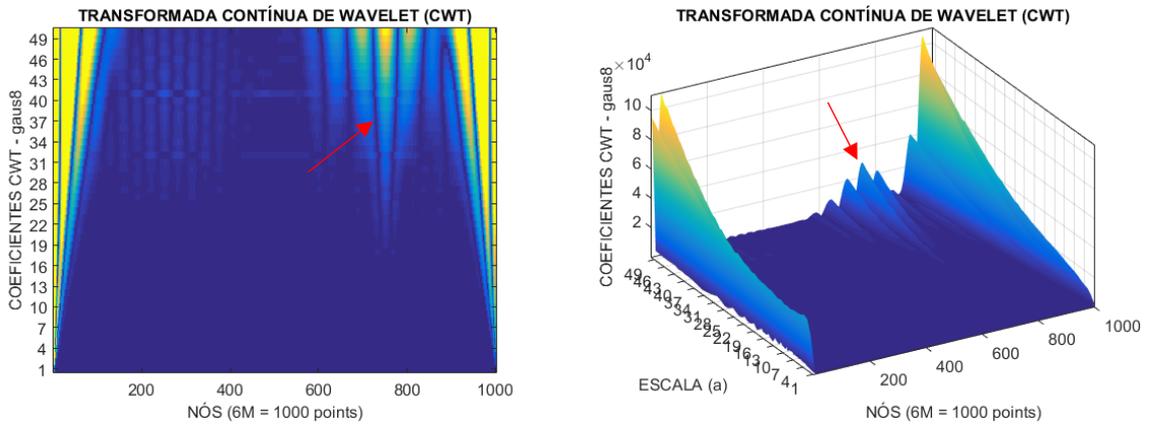
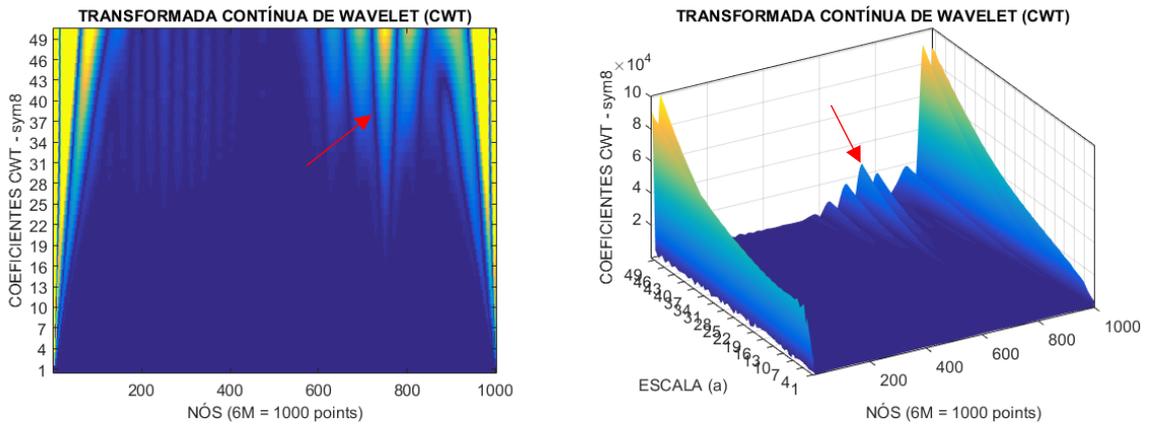


Figura 76 - CWT Modo 2 para a viga VA_D1 usando sym8



Observa-se que para a viga VA_D1, com o dano localizado ao nó 750, as wavelets-mãe conseguiram identificar o dano, gerando picos ao redor do nó 750 (Figura 69 a Figura 76). As *wavelets* *coif4*, *sym8* e *gaus8* demonstraram os melhores resultados para os dois modos vibração. Os gráficos apresentam perturbações nas extremidades devido às descontinuidades nos apoios.

Primeiro Modo de Vibração – VA_D2

Figura 77 - CWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando coif4

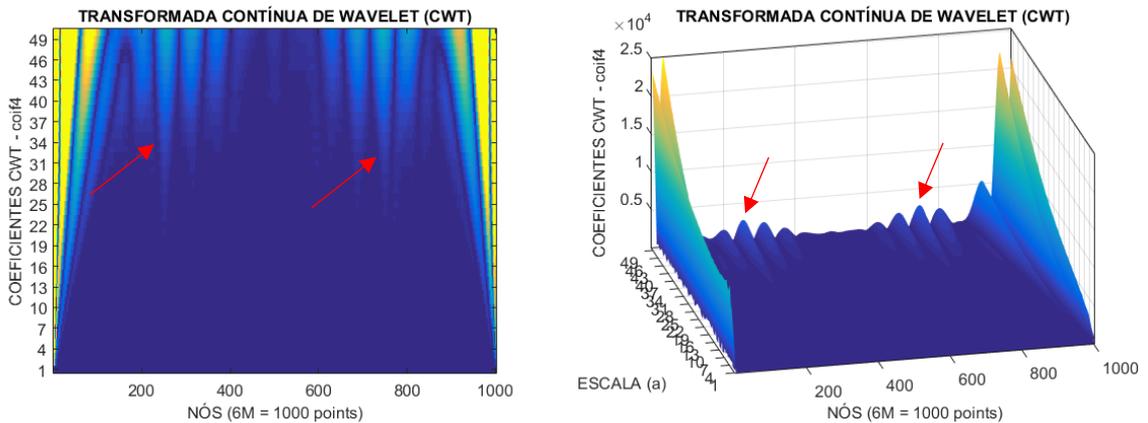


Figura 78 - CWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando db5

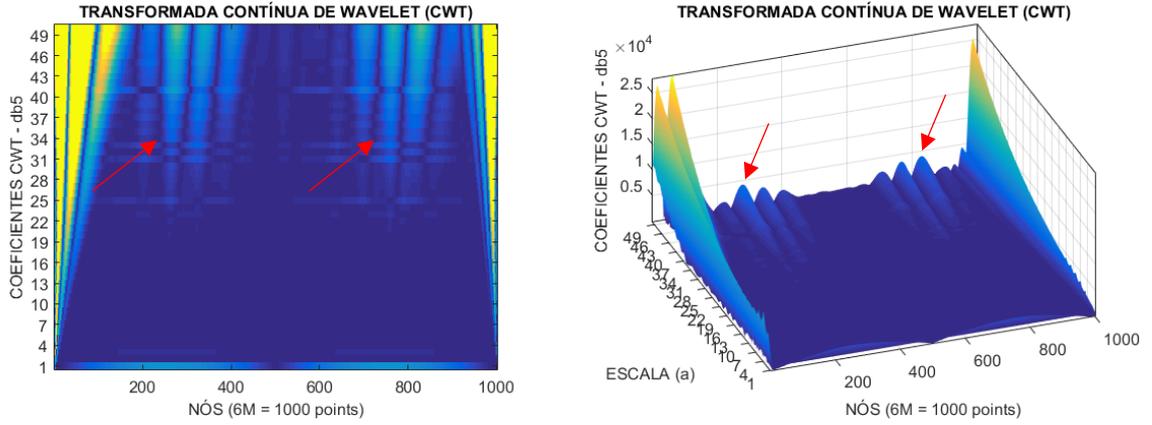


Figura 79 - CWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando gau8

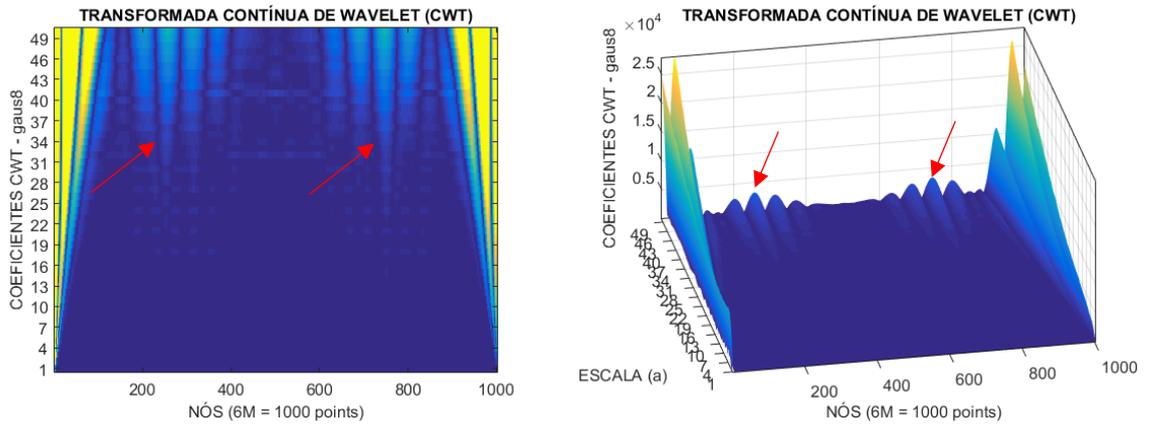
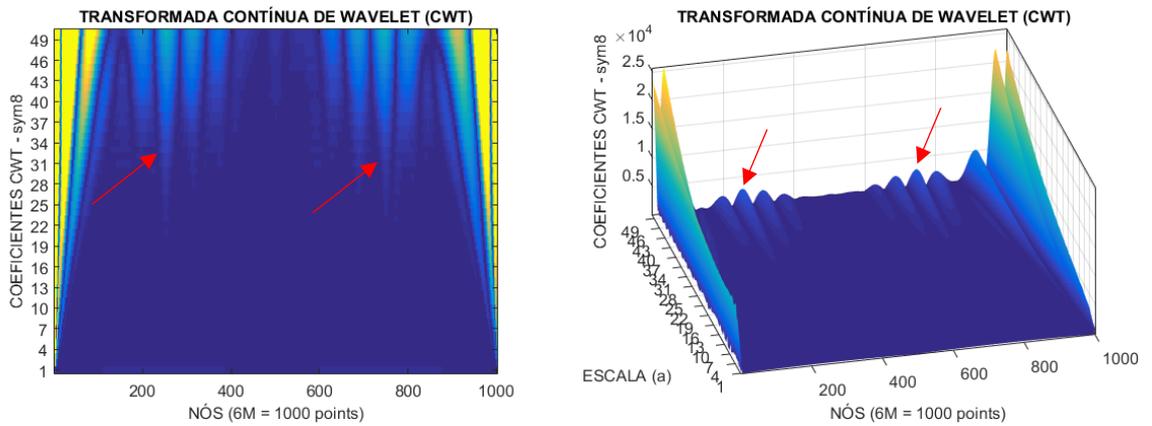


Figura 80 - CWT Modo 1 para a viga VA_D2 usando sym8



Segundo Modo de Vibração – VA_D2

Figura 81 - CWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando coif4

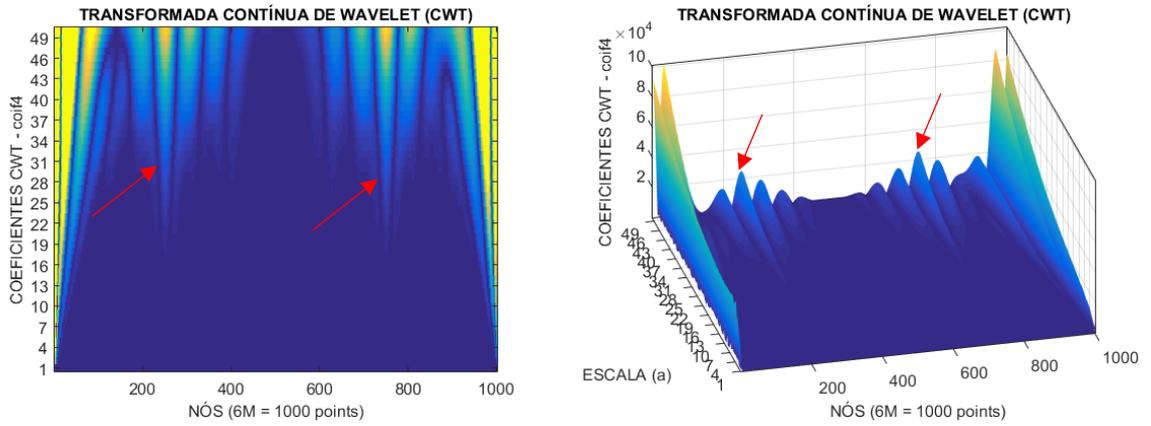


Figura 82 - CWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando db5

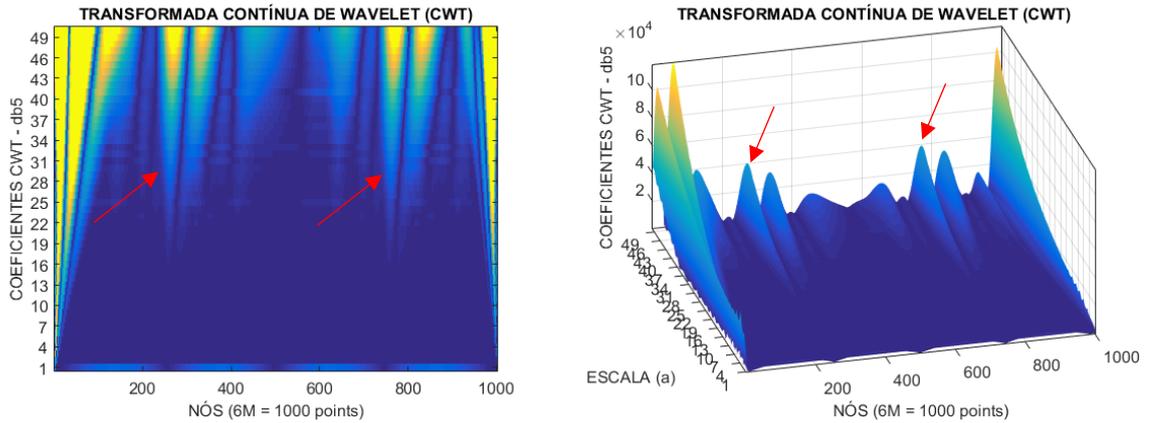


Figura 83 - CWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando gaus8

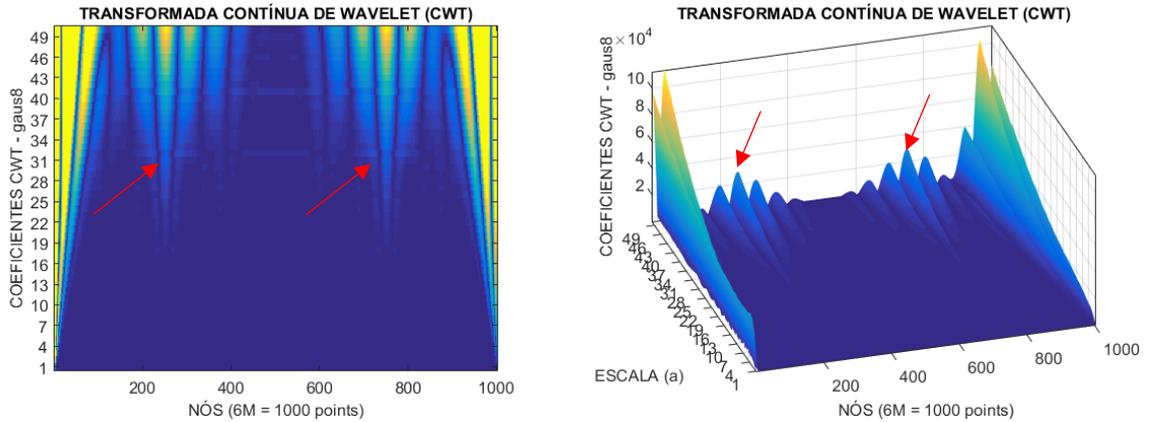
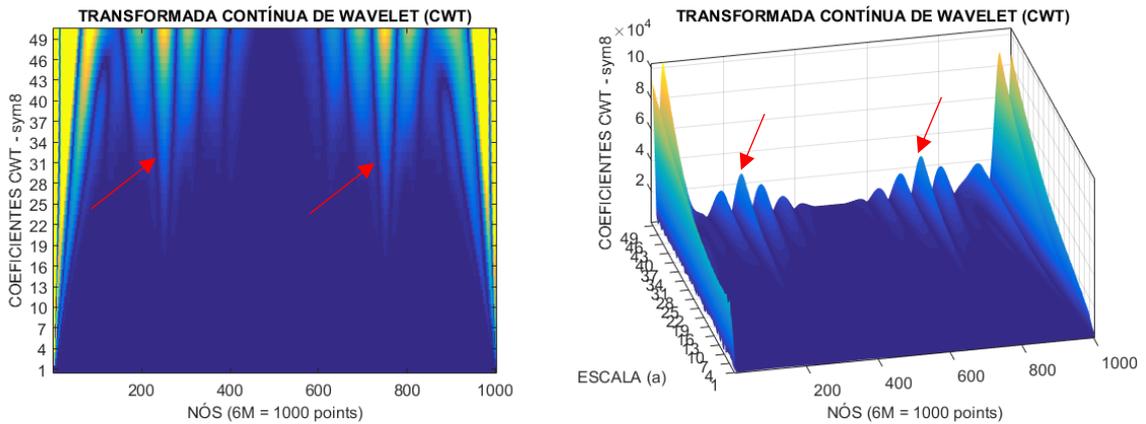


Figura 84 - CWT Modo 2 para a viga VA_D2 usando sym8



Na análise dos gráficos da viga VA_D2, que contém dois danos localizados nos nós 250 e 750, as *wavelets* apresentaram algumas perturbações na região dos danos (Figura 77 a Figura 84). As *wavelets* sym8 e coif4 apresentaram os melhores resultados para dos dois modos de vibração analisados, com os maiores picos exatamente nos nós danificados. A *wavelet* gaus8 funciona bem no segundo modo de vibração, conseguindo destacar melhor o pico do dano em relação aos gerados por perturbações.

Primeiro Modo de Vibração – VA_D3

Figura 85 - CWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando coif4

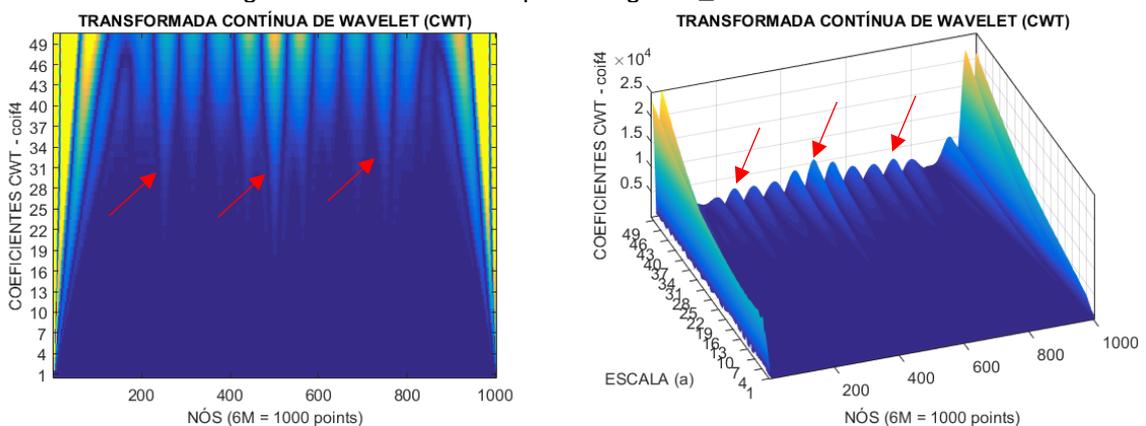


Figura 86 - CWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando db5

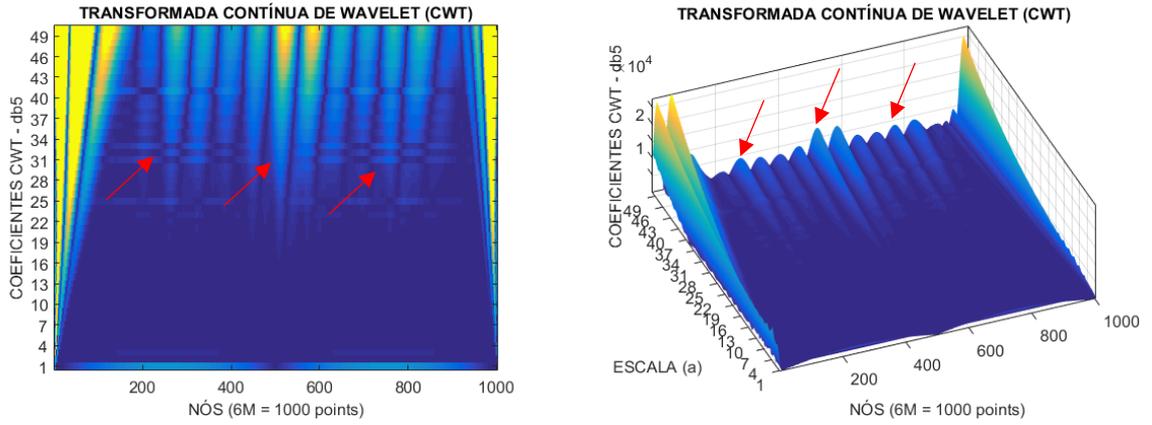


Figura 87 - CWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando gau8

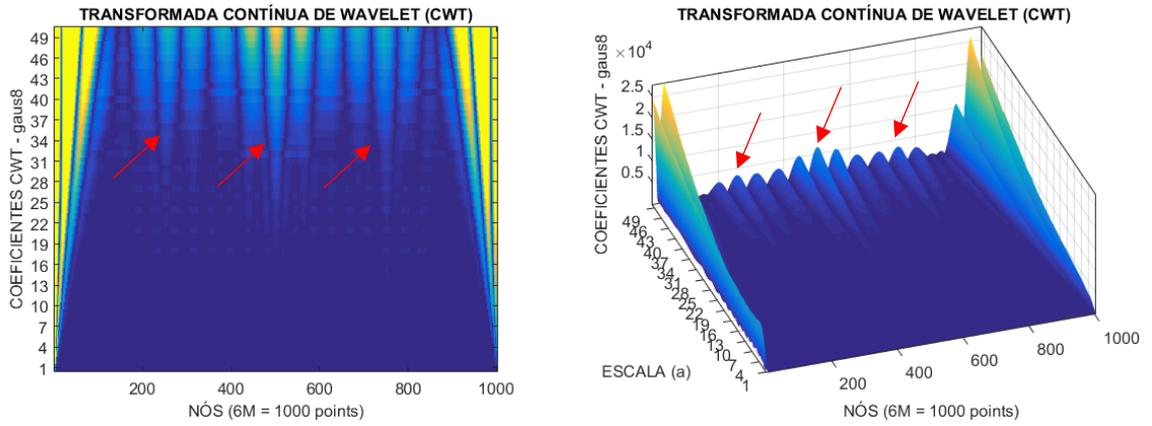
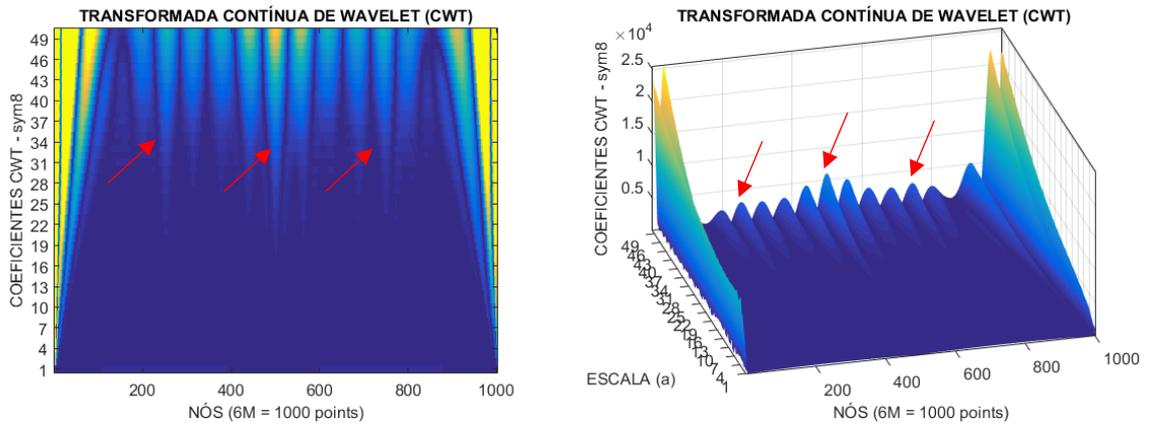


Figura 88 - CWT Modo 1 para a viga VA_D3 usando sym8



Terceiro Modo de Vibração – VA_D3

Figura 89 - CWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando coif4

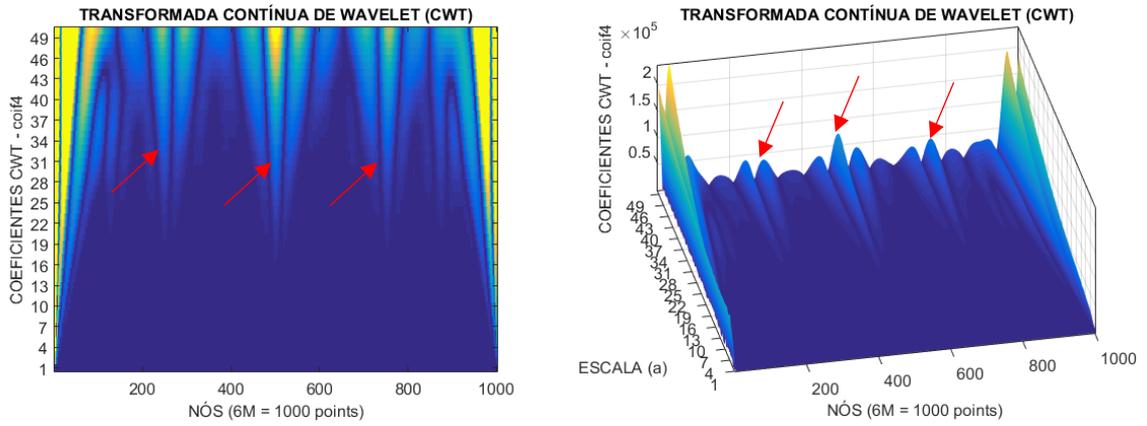


Figura 90 - CWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando db5

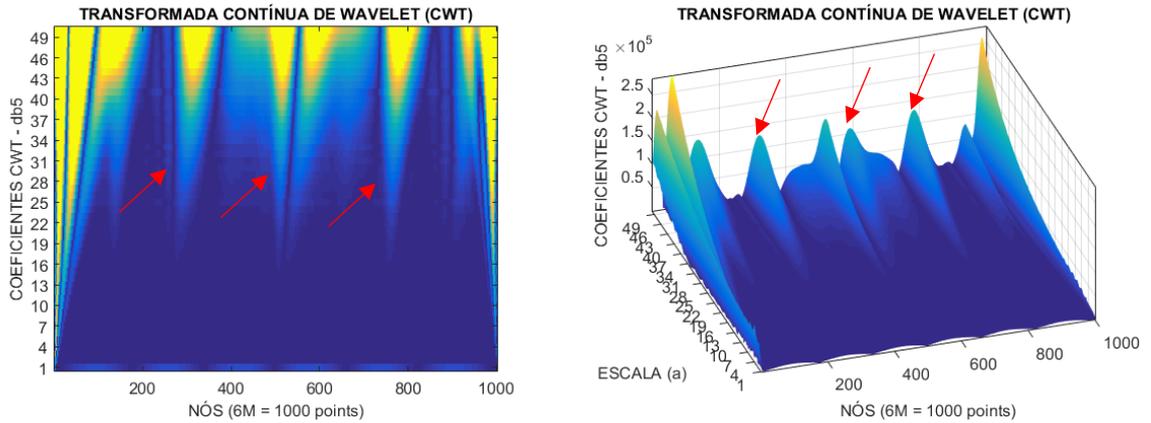


Figura 91 - CWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando gaus8

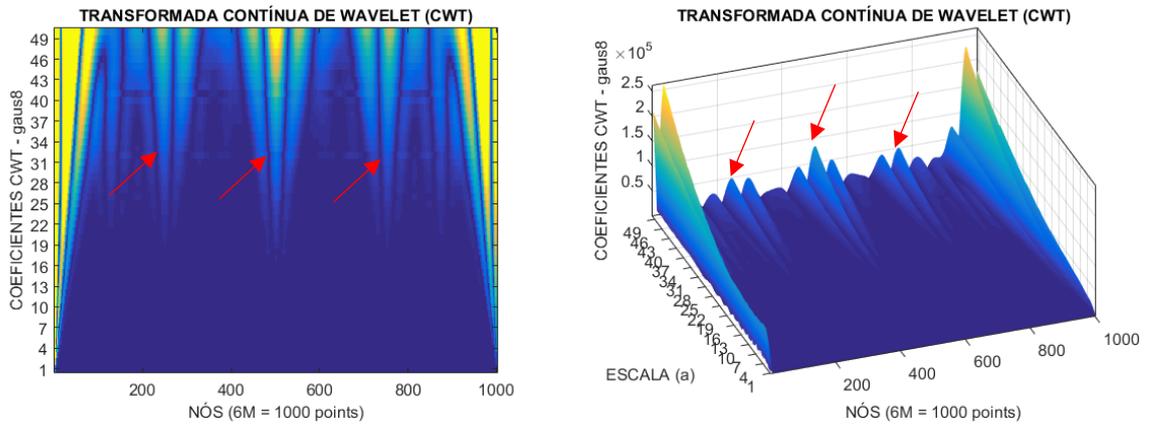
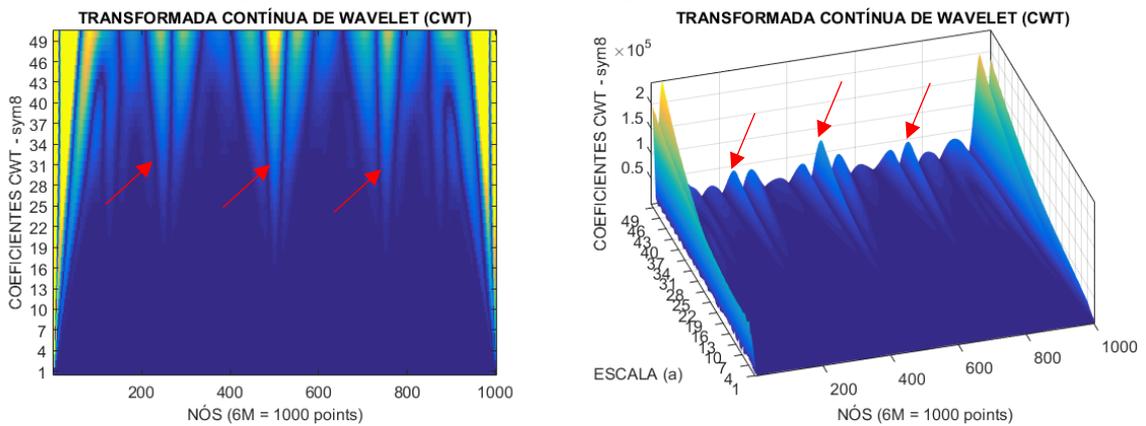


Figura 92 - CWT Modo 3 para a viga VA_D3 usando sym8



Para a viga VA_D3 (Figura 85 a Figura 92), que possui três danos localizados nos nós 250, 500 e 750, para o primeiro modo de vibração as *wavelets* apresentam muitas perturbações ao redor dos danos. Em todas, o maior pico coincide com o dano do nó 500, mas elas não conseguem detectar com precisão os outros dois danos, embora nos nós 250 e 750 os picos sejam levemente maiores que os seus vizinhos. Para o terceiro modo de vibração, as *wavelets* conseguem detectar melhor os danos, com os maiores picos sendo em seus nós danificados. Entretanto, as perturbações ainda permanecem, especialmente nas extremidades devido às descontinuidades geométricas dos apoios. A *wavelet* db5, para o terceiro modo de vibração, não demonstra bons resultados para a aplicação da CWT.

Primeiro Modo de Vibração – VA_D4

Figura 93 - CWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando coif4

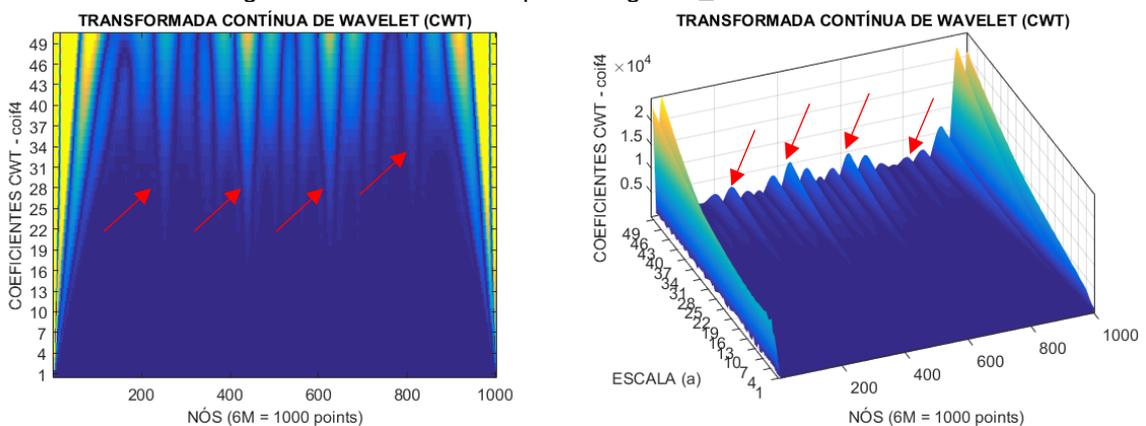


Figura 94 - CWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando db5

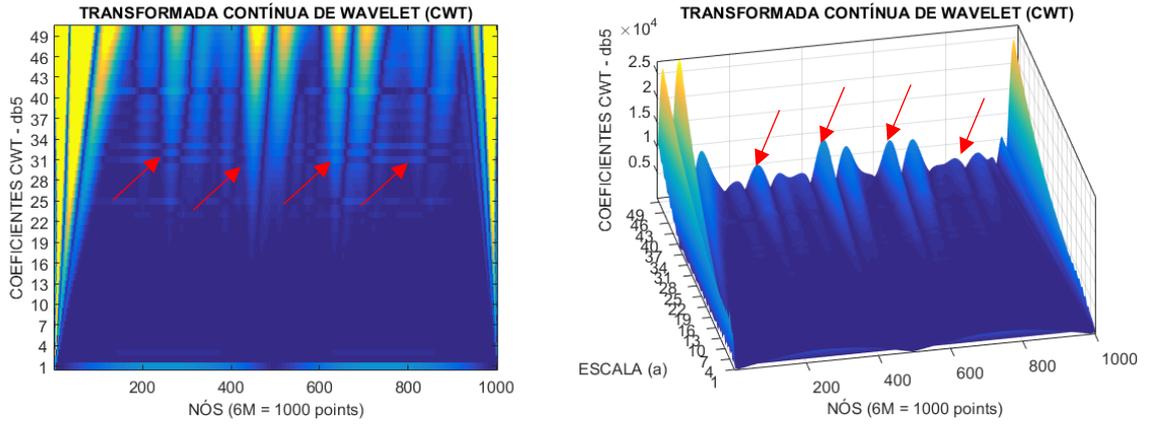


Figura 95 - CWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando gau8

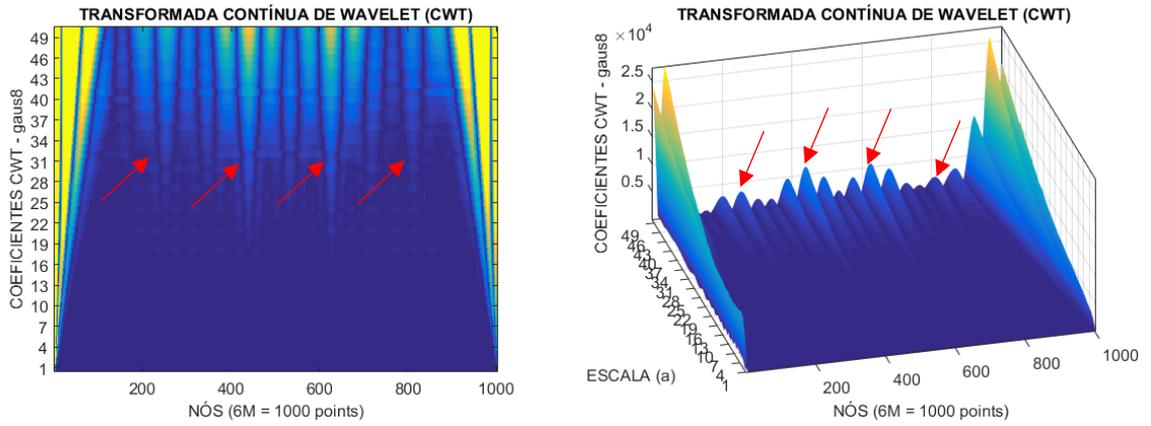
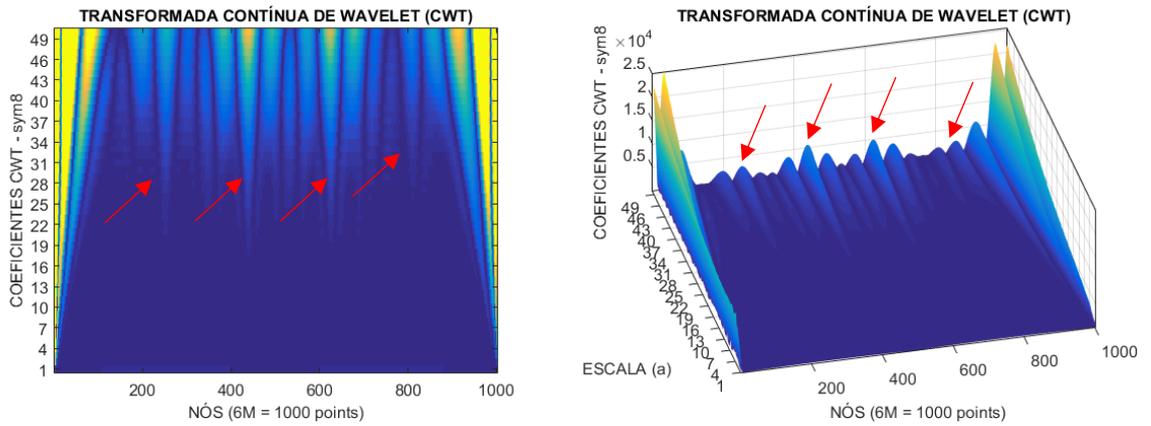


Figura 96 - CWT Modo 1 para a viga VA_D4 usando sym8



Segundo Modo de Vibração – VA_D4

Figura 97 - CWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando coif4

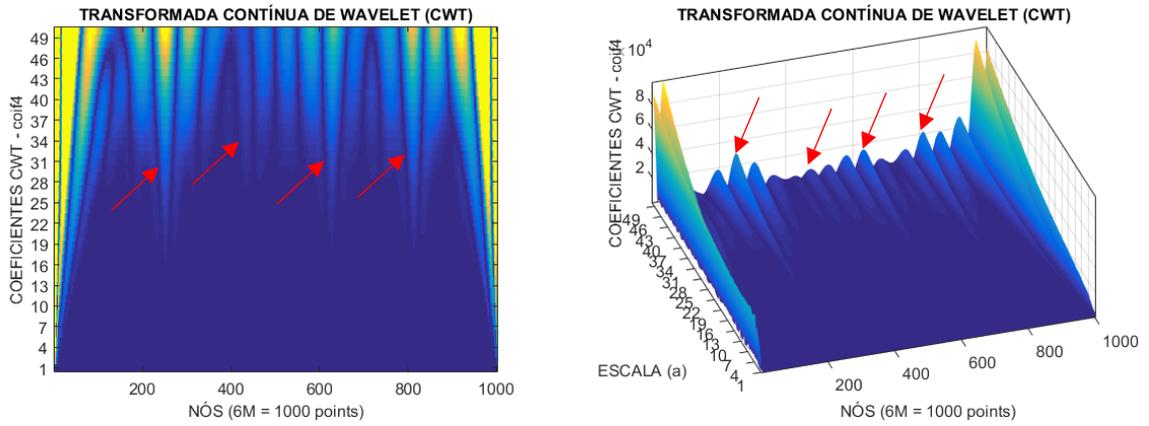


Figura 98 - CWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando db5

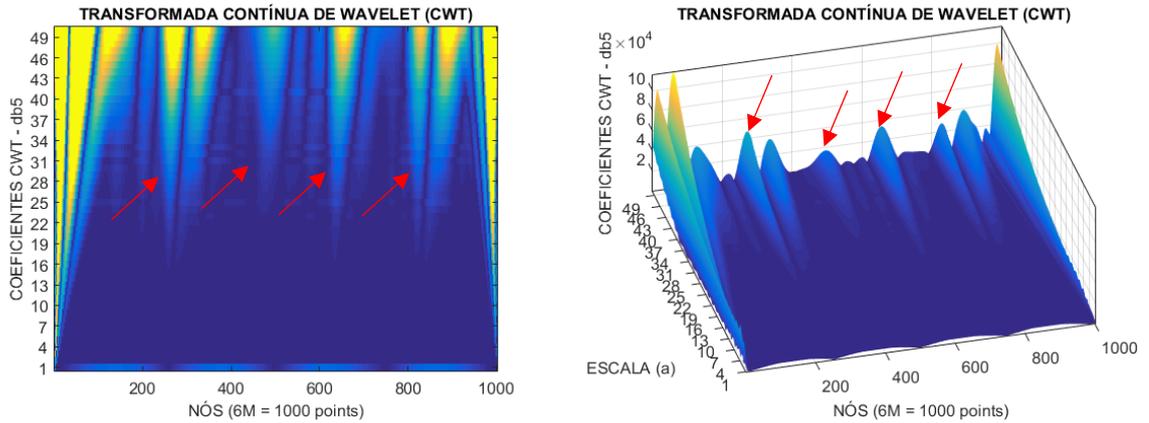


Figura 99 - CWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando gaus8

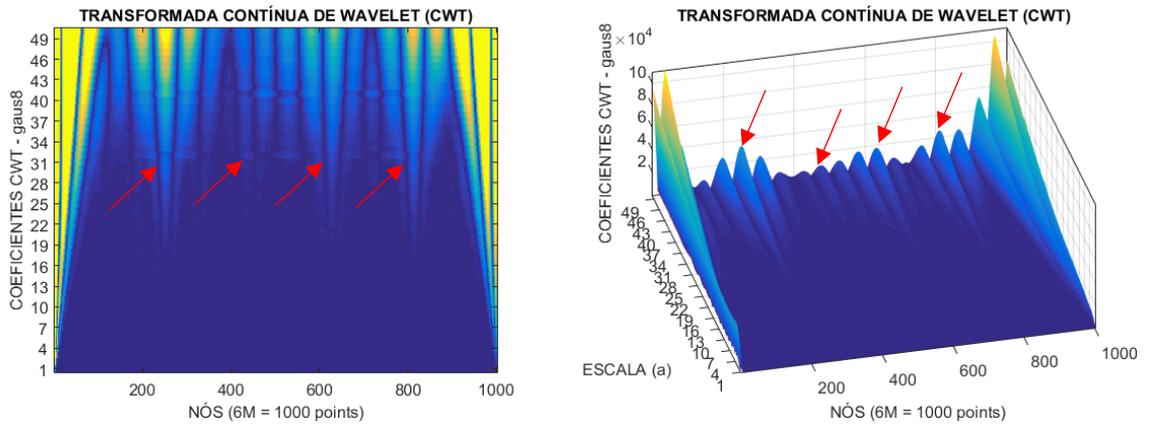
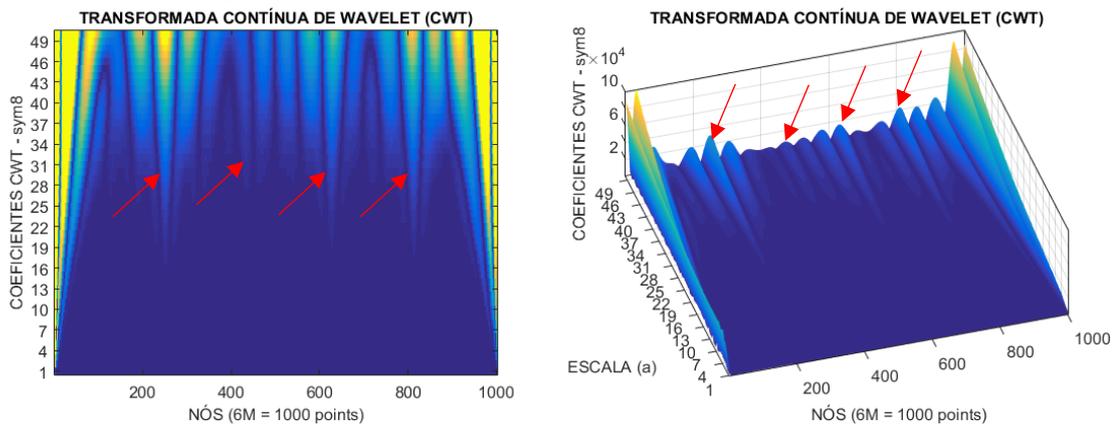


Figura 100 - CWT Modo 2 para a viga VA_D4 usando sym8



A viga VA_D4 possui danos localizados nos nós 250, 440, 630 e 810 (Figura 93 a Figura 100). Em ambos os modos de vibração, existem perturbações ao redor do dano. Para o primeiro modo, os danos nos nós 440 e 630 são bem definidos, com os maiores picos nesses pontos. A *wavelet* *coif4* e *sym8* conseguem definir ainda o dano do nó 250, porém com grandes perturbações ao seu redor. Já no segundo modo de vibração, as *wavelets* não conseguem definir bem o dano do nó 440, conseguindo definir os outros três. Todas as *wavelets* apresentam grandes perturbações nas extremidades devido às descontinuidades geométricas dos apoios.

A Tabela 9 e a Tabela 10 faz um resumo da análise da CWT utilizando os dados obtidos na análise dinâmica numérica, onde: MB = Muito Bom; B = Bom; R = Ruim; NI = Não Indicado

Tabela 9 - Resumo do uso da CWT

VIGA	coif4		db5	
	Modo1	Modo 2*	Modo1	Modo 2*
VA_D1	B	MB	B	B
VA_D2	B/B	MB/MB	B/B	B/B
VA_D3	R/B/R	B/MB/B	R/B/R	NI
VA_D4	B/MB/MB/R	MB/R/B/B	NI	R/R/MB/B

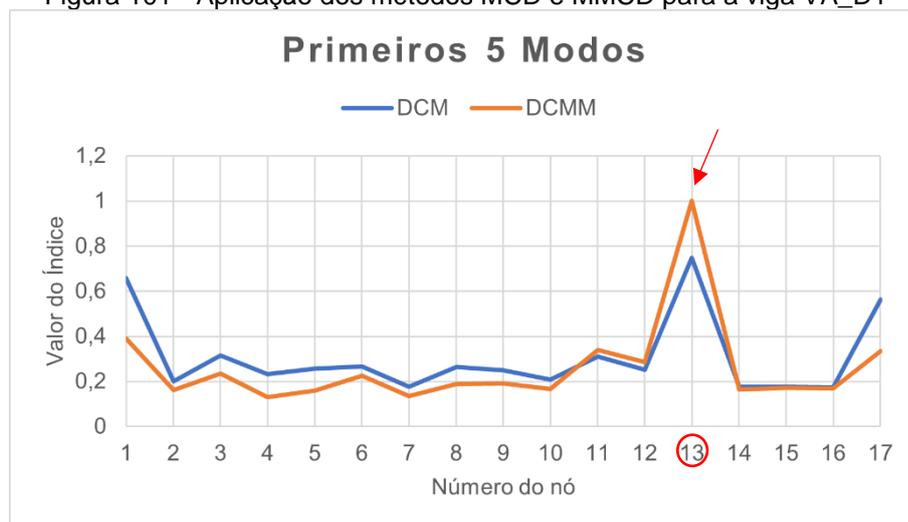
Tabela 10 - Resumo do uso da CWT (continuação)

VIGA	gaus8		sym8	
	Modo1	Modo 2*	Modo1	Modo 2*
VA_D1	B	MB	B	MB
VA_D2	B/B	MB/MB	B/B	MB/MB
VA_D3	R/B/R	B/MB/B	R/B/R	B/MB/B
VA_D4	R/MB/MB/R	MB/R/B/MB	B/MB/MB/R	MB/R/B/B

5.1.2 MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM

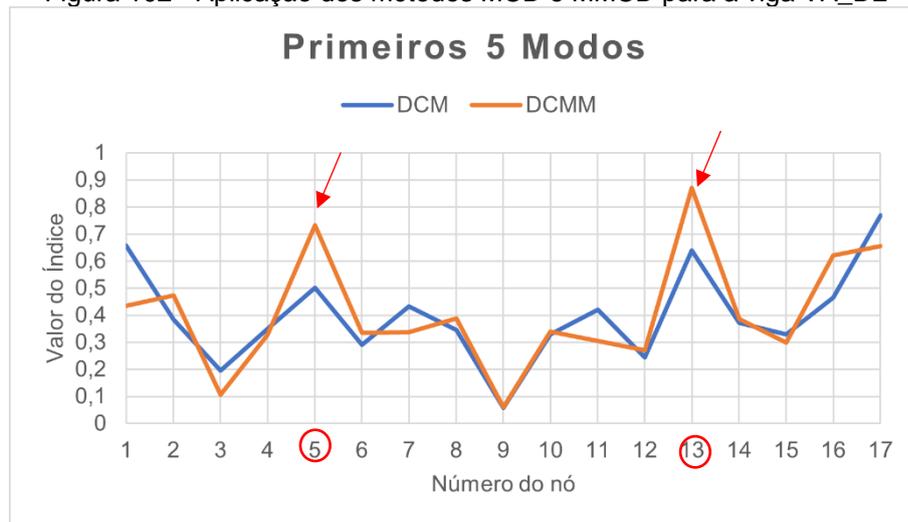
Para a viga VA_D1 (Figura 101), com dano único, os métodos MCD (Equação 3.8) e MMCD (Equação 3.15) apresentam maiores valores de índice na região danificada da viga, no nó 13, e valores menores fora dessa faixa.

Figura 101 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VA_D1



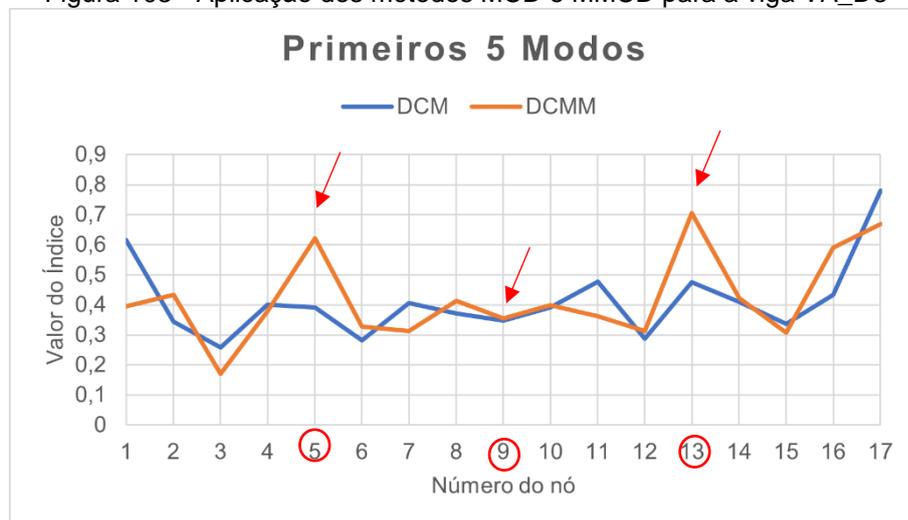
Na viga VA_D2 (Figura 102), o método MMCD apresenta maiores valores de índice na região dos nós 5 e 13, locais dos danos. O MCD (Equação 3.8), entretanto, apresenta valores variáveis e consideráveis em toda extensão da viga, bem como o MMCD (Equação 3.15) fora das regiões de dano, não sendo capaz de identificar os danos.

Figura 102 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VA_D2



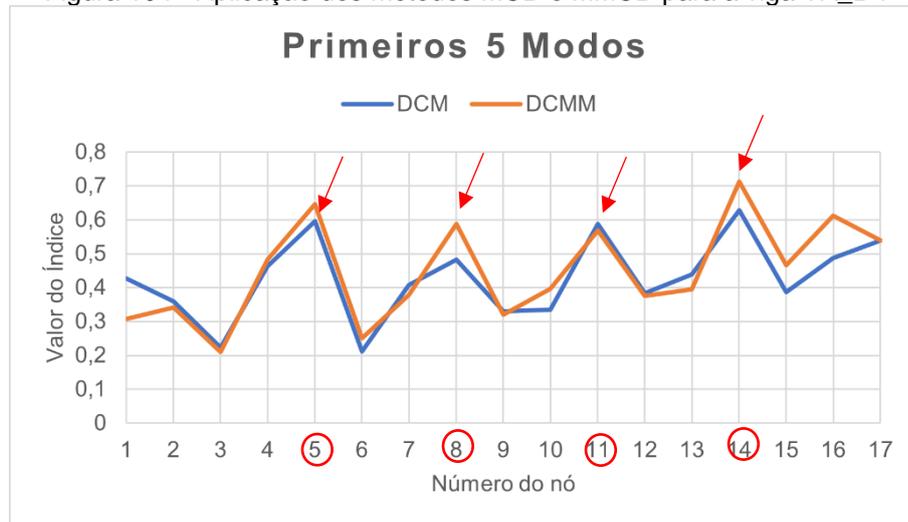
A viga VA_D3 (Figura 103) tem o mesmo comportamento, com o método MMCD (Equação 3.15) localizando bem os danos nos nós 5 e 13, mas não sendo capaz de localizar o dano do nó 9. O MCD (Equação 3.8) para esse caso também não consegue identificar os danos.

Figura 103 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VA_D3



Por fim, na VA_D4 (Figura 104) ambos os métodos apresentam os maiores valores de índice na região dos danos, nos nós 5, 8, 11 e 14.

Figura 104 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VA_D4



Os métodos possuem uma discordância nos modelos e essa discordância pode ser justificada pelo uso simultâneo dos cinco primeiros modos de vibração, pois à medida que os modos de vibração apresentam espelhamento, o algoritmo de identificação de danos não se mostra um bom indicador. Nos modelos estudados, tais eventos ocorrem com os modos 2 e 3 da viga VA_D1, modos 2 e 4 das vigas VA_D2 e VA_D3 e com o modo 3 da viga VA_D4, conforme Figura 105 a Figura 109.

Figura 105 - Modos de vibração para a viga VA_INT

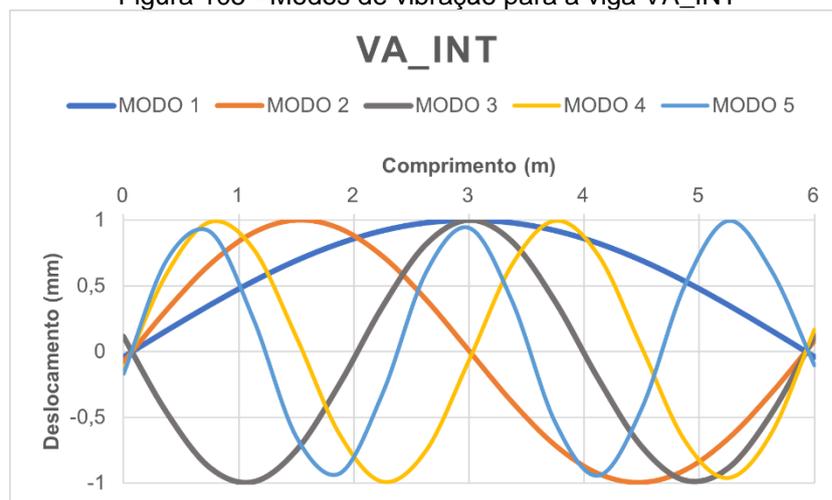


Figura 106 - Modos de vibração para a viga VA_D1

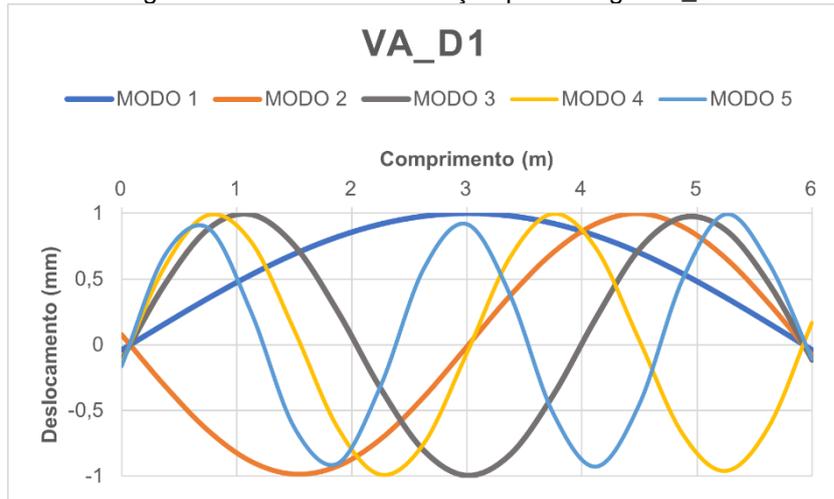


Figura 107 - Modos de vibração para a viga VA_D2

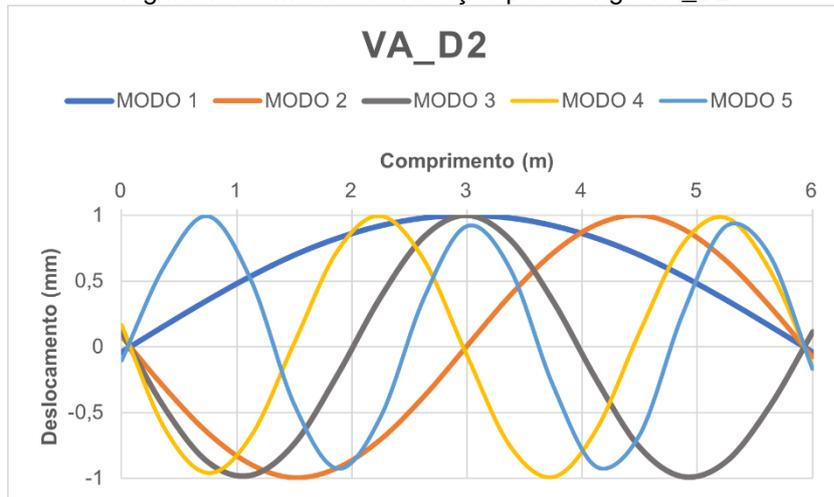


Figura 108 - Modos de vibração para a viga VA_D3

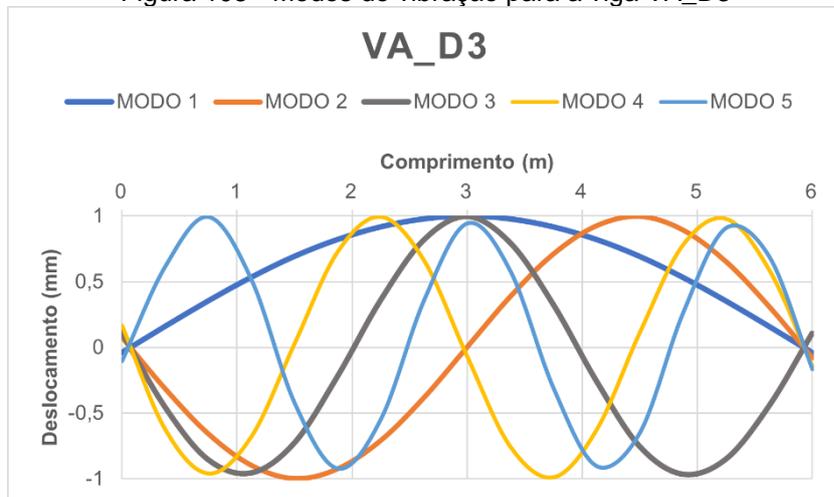
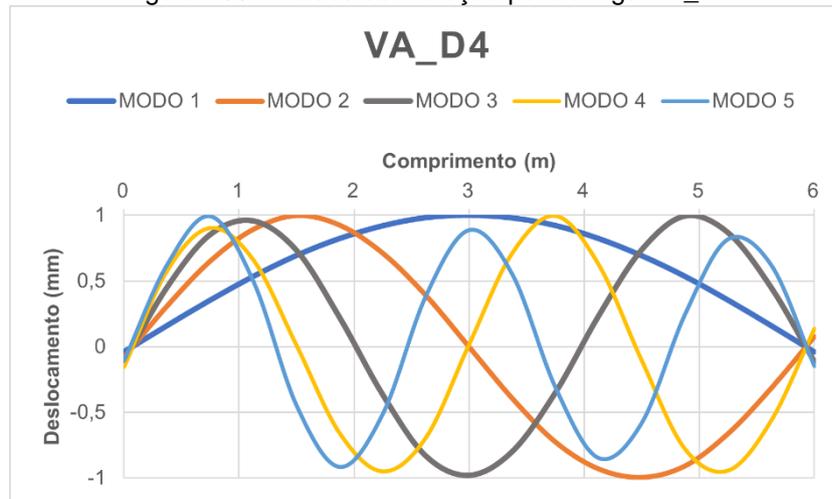


Figura 109 - Modos de vibração para a viga VA_D4



Quando a comparação é feita entre os métodos normalizados MCD (Equação 3.22), MMCD (Equação 3.21), MSDBI (Equação 3.14) e MSDBIM (Equação 3.20), nota-se que para as vigas VA_D1 (

Figura 110), VA_D2 (Figura 111) e VA_D4 (Figura 113), os métodos modificados embora não apresentem valores de índice iguais a zero em todos os nós que estão fora da região danificada, apresentam maiores valores nas regiões danificadas. Os métodos normalizados MCD e MMCD apresentam a identificação de forma mais clara que os demais métodos, enquanto o método MSDBI não identificou nenhum dos danos, com exceção do dano localizado no nó 14 da viga VA_D4, além de apresentar mais de uma região de dano ou estar fora da região correta erroneamente, não sendo assim, bom indicador do dano. Já para a viga VA_D3 (Figura 112), o método MMCD consegue identificar o dano nos nós 5 e 13, enquanto os outros métodos conseguem apontar uma região danificada, mas não conseguem identificar nenhum dos três danos com precisão, apresentando mais de uma região ou apresentando o dano localizado no nó anterior ou posterior ao real.

Figura 110 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VA_D1

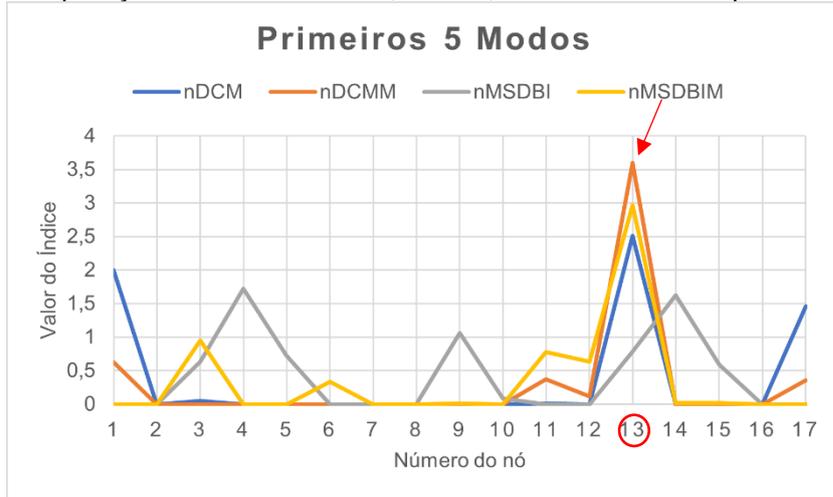


Figura 111 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VA_D2

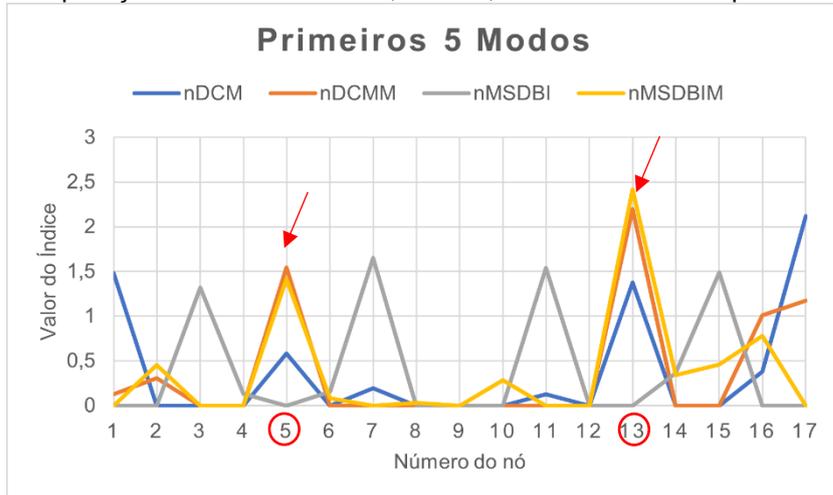


Figura 112 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VA_D3

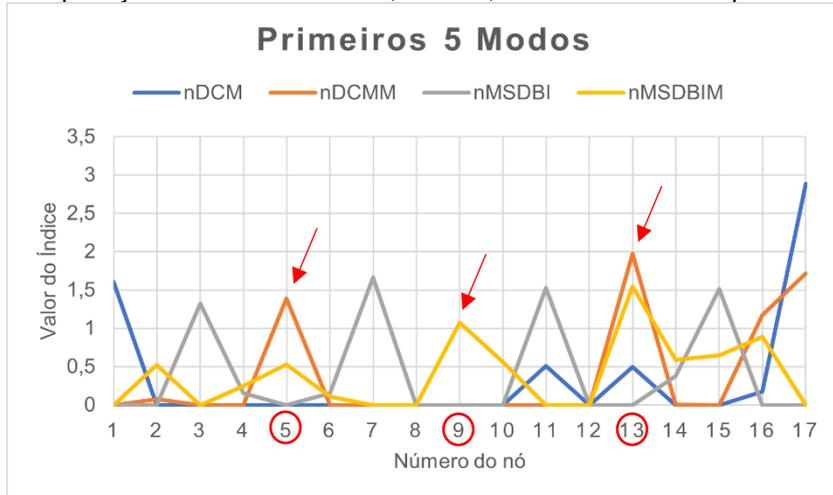
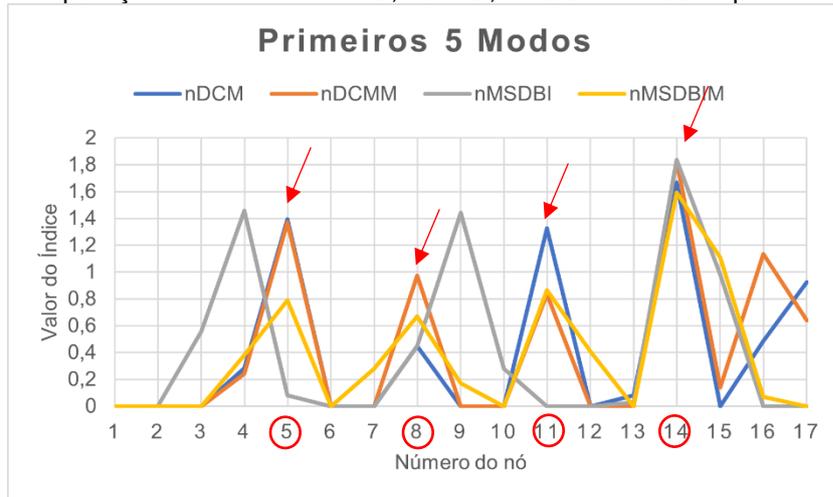


Figura 113 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VA_D4



5.2 Viga em Concreto

5.2.1 Transformada de Wavelet (WT)

Tal qual no modelo numérico da viga de aço, para a viga em concreto simples foram obtidos os 5 primeiros modos de vibração com deslocamentos verticais (y) e utilizamos os somente os 3 primeiros modos. Na Tabela 11 são apresentadas as frequências obtidas para o modelo numérico e os diferentes casos de danos.

Tabela 11 - Frequências (Hz) obtidas no ABAQUS para viga em concreto

FREQUÊNCIAS NATURAIS (Hz)				
MODO	VC_INT	VC_D1	VC_D2	VC_D3
1	948,88	934,51	926,73	916,99
2	3054,7	3046,7	3036,6	3023,7
3	5560,6	5539,6	5514	5482,2
4	7907,4	7895,6	7879,8	7857,1
5	9057,6	9013	8956,8	8884,5

A Figura 114 a Figura 117 mostram os três primeiros modos de vibração correspondentes para cada situação analisada da viga.

Figura 114 - Modos de vibração para a viga VC_INT

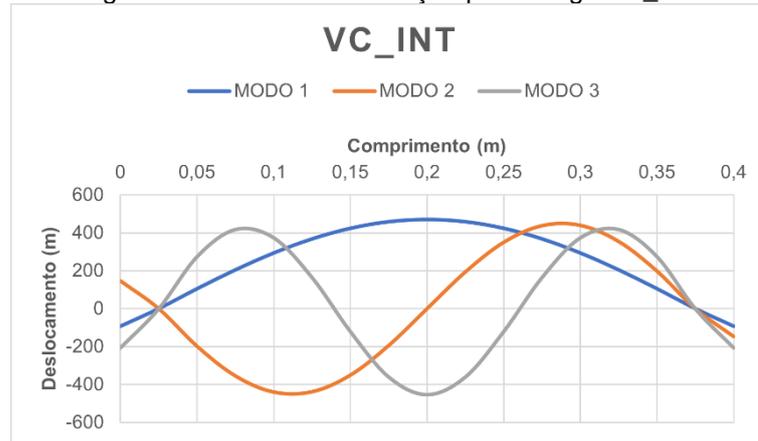


Figura 115 - Modos de vibração para a viga VC_D1

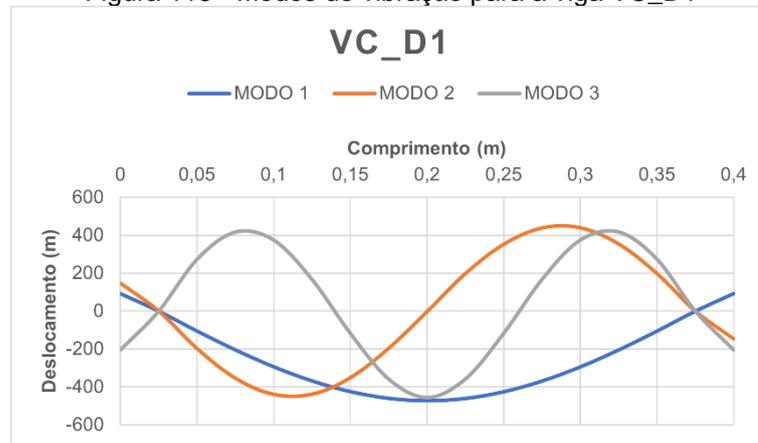


Figura 116 - Modos de vibração para a viga VC_D2

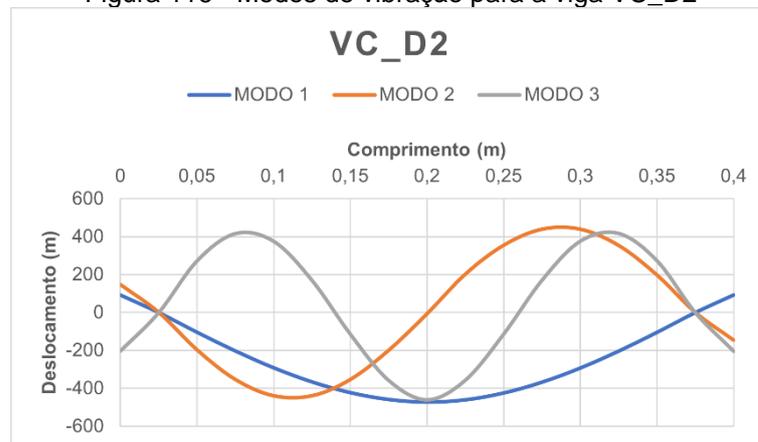
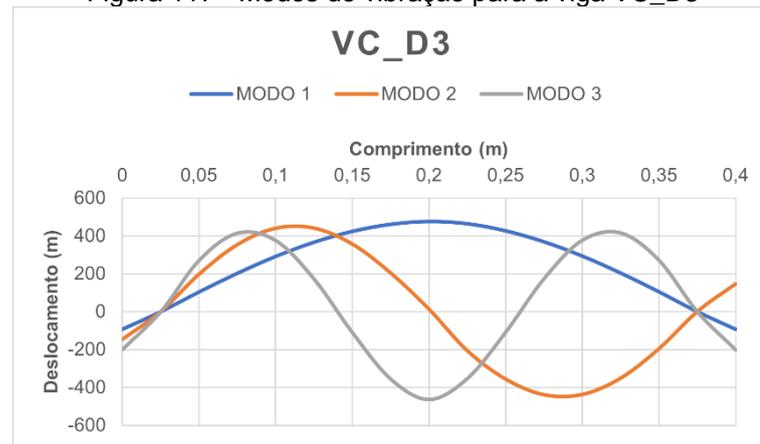


Figura 117 - Modos de vibração para a viga VC_D3



Os dados foram exportados para o *Matlab*®, e como nesse modelo de viga, o dano se localiza exatamente no meio do vão para todos os casos, o segundo modo de vibração foi desconsiderado por possuir deslocamento zero.

Foi aplicado a interpolação *Cubic-Spline* para obter novos pontos e, em seguida, foi aplicada a regularização de *Tikhonov* para aumentar a amplitude das variações no sinal devido ao dano. No Apêndice A é apresentada a teoria dos métodos de interpolação e regularização utilizados. A

Figura 118 e a

Figura 119 mostram a interpolação e a regularização dos dados para um dos casos dessa viga.

Figura 118 – Interpolação e Regularização Modo 1 - VC_D1

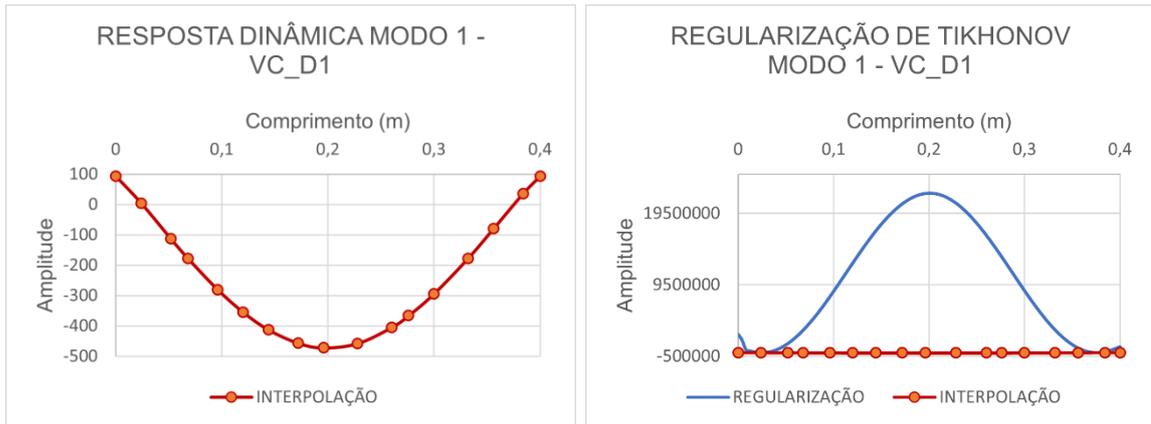
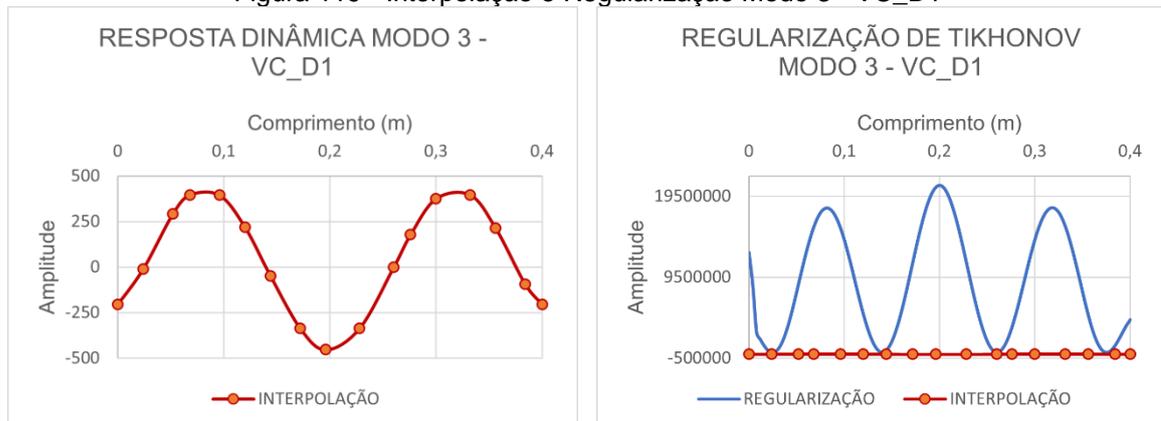


Figura 119 - Interpolação e Regularização Modo 3 - VC_D1



Após a interpolação e regularização, foi aplicado a DWT e a CWT. As *wavelets* utilizadas para a viga em aço, não apresentaram bons resultados para a viga de concreto, não encontrando o dano de modo eficaz. Com isso buscou-se outras *wavelets* e as que melhor identificaram o dano para a DWT foram a: Daubechies – db9; Biortogonal – bior5.5 e Symlets – sym7. No método CWT utilizamos a Biortogonal – bior5.5; Gaus – gaus8 e Symlets – sym8. A localização do dano está nó 50, na DWT, e o nó 500 na CWT.

5.2.1.1 DWT

Primeiro Modo de Vibração – VC_D1

Figura 120 - DWT Modo 1 para a viga VC_D1 usando bior5.5

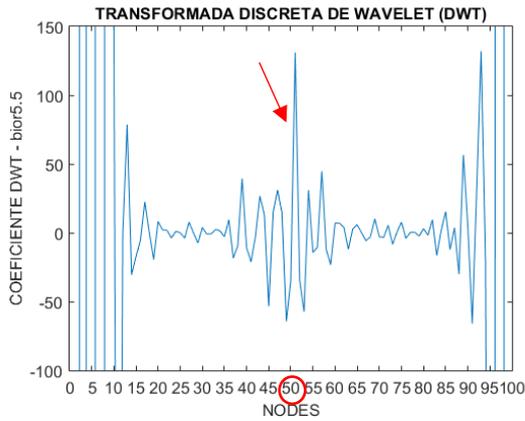


Figura 121 - DWT Modo 1 para a viga VC_D1 usando db9

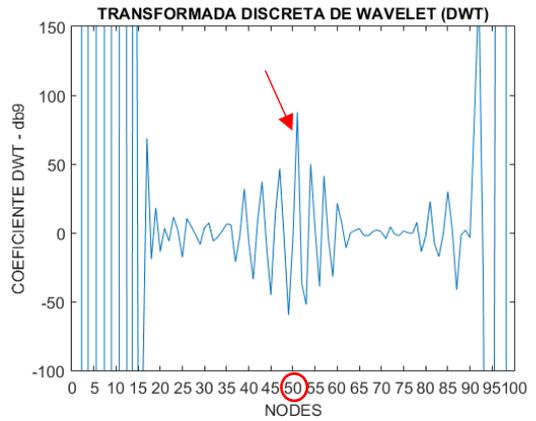
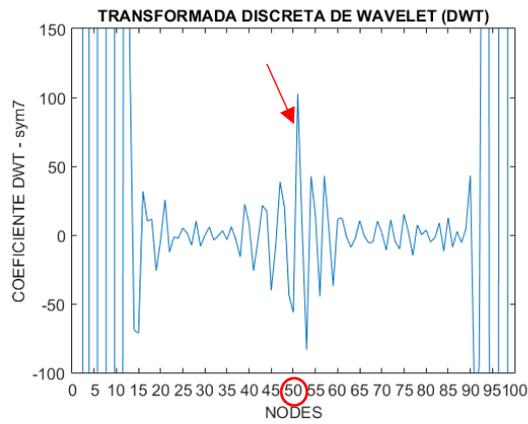


Figura 122 - DWT Modo 1 para a viga VC_D1 usando sym7



Terceiro Modo de Vibração – VC_D1

Figura 123 - DWT Modo 3 para a viga VC_D1 usando bior5.5

Figura 124 - DWT Modo 3 para a viga VC_D1 usando db9

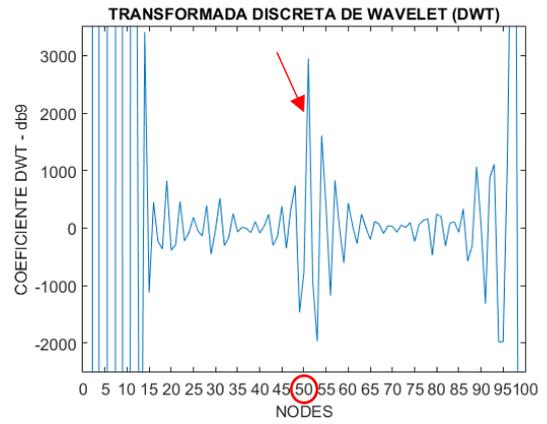
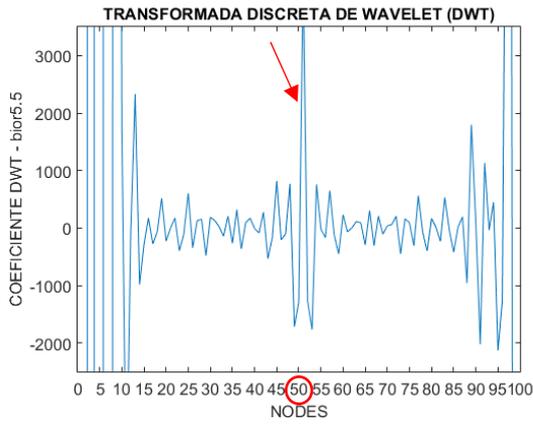
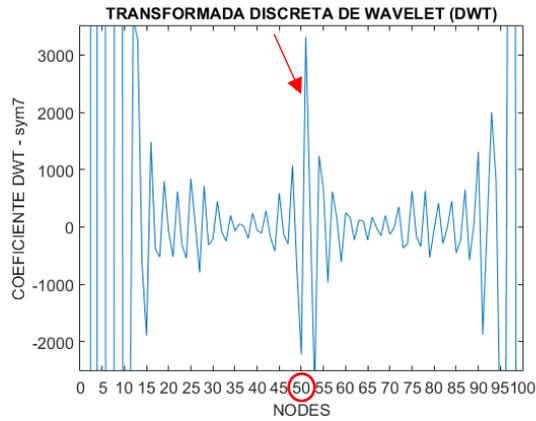


Figura 125 - DWT Modo 3 para a viga VC_D1 usando sym7



Primeiro Modo de Vibração – VC_D2

Figura 126 - DWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando bior5.5

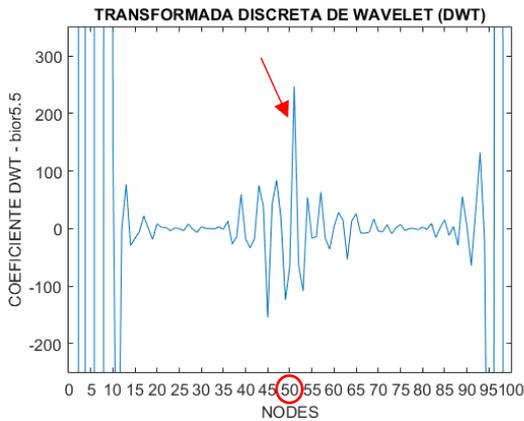


Figura 127 - DWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando db9

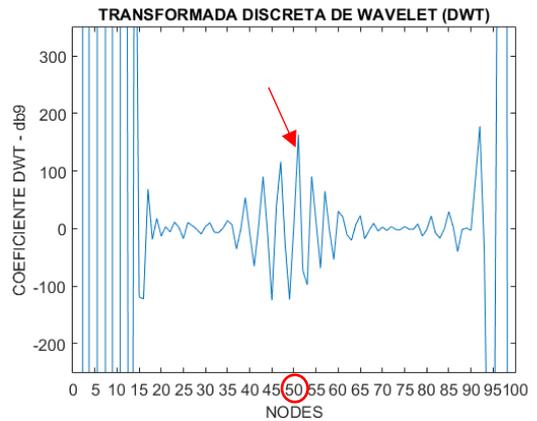
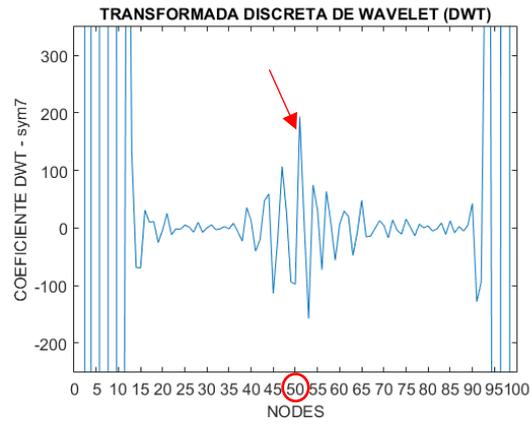


Figura 128 - DWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando sym7



Terceiro Modo de Vibração – VC_D2

Figura 129 - DWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando bior5.5

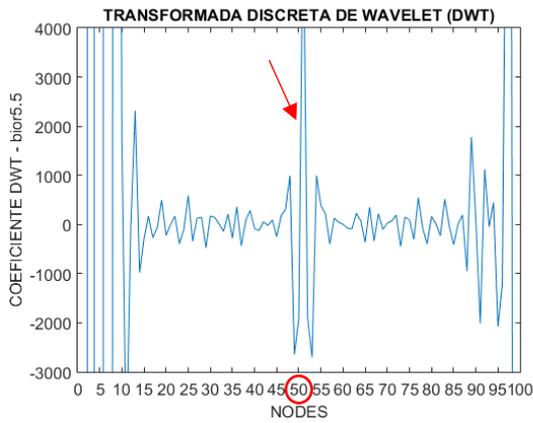


Figura 130 - DWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando db9

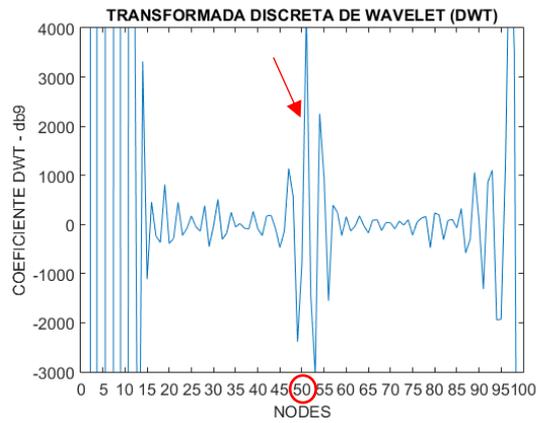
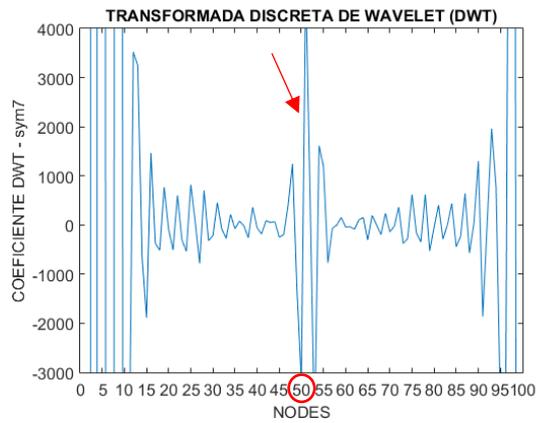


Figura 131 - DWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando sym7



Primeiro Modo de Vibração – VC_D3

Figura 132 - DWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando bior5.5

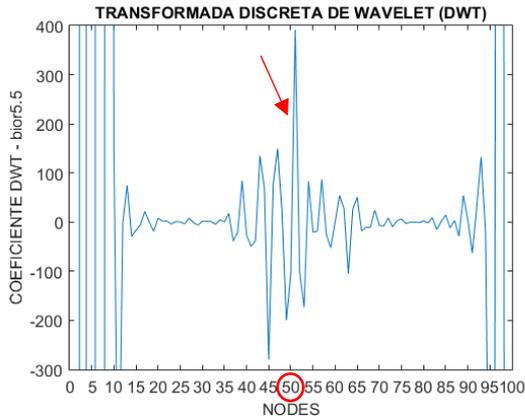


Figura 133 - DWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando db9

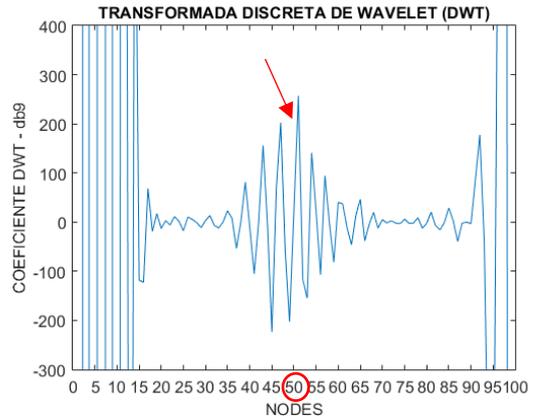
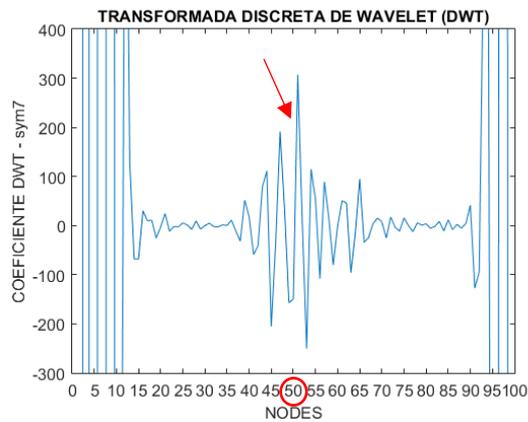


Figura 134 - DWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando sym7



Terceiro Modo de Vibração – VC_D3

Figura 135 - DWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando bior5.5

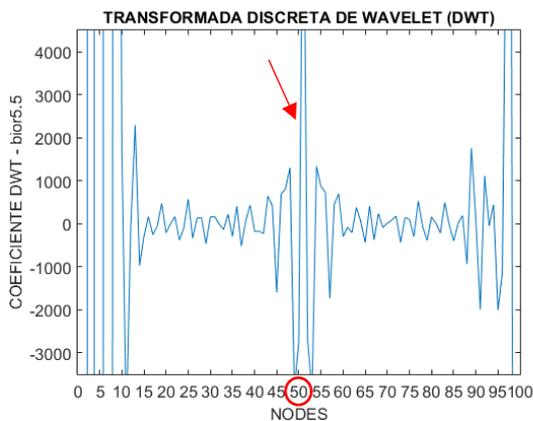


Figura 136 - DWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando db9

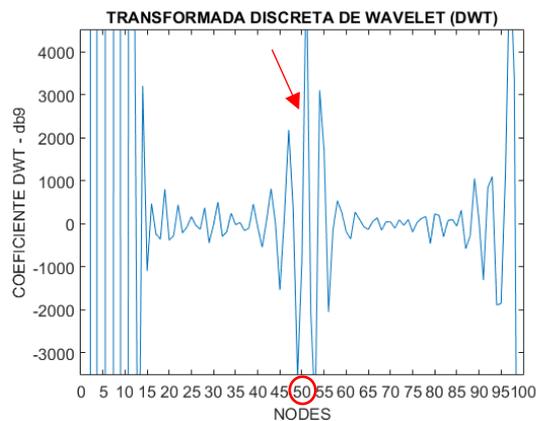
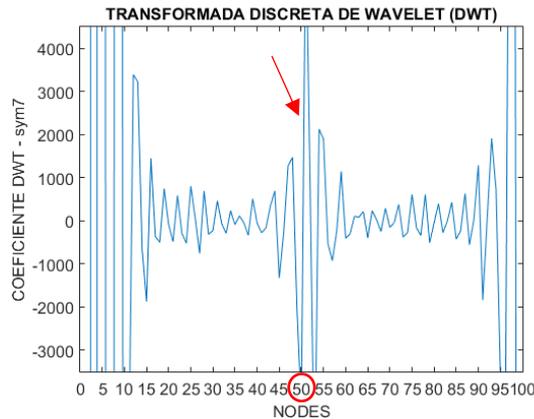


Figura 137 - DWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando sym7



Para os três casos de danos da viga de concreto, no primeiro modo de vibração as *wavelets* escolhidas foram capazes de identificar o dano. Todas as *wavelets* mostram perturbações ao redor do dano e nas extremidades devido aos apoios. Para o primeiro modo de vibração, as funções sym7 e bior5.5 apresentaram os melhores resultados.

No terceiro modo de vibração, para todos os casos de danos, os danos são localizados com eficácia. Embora ainda apresentem perturbações ao redor do local do dano no sinal, o pico no nó 50, correspondente ao dano, é muito maior em todas as funções.

A Tabela 12 apresenta um resumo da análise da DWT, onde: MB = Muito Bom; B = Bom;

Tabela 12 - Resumo do uso da DWT para viga de concreto

Função	bior5.9		db9		sym7	
VIGA	Modo1	Modo 3	Modo1	Modo 3	Modo1	Modo 3
VC_D1	MB	MB	B	MB	MB	MB
VC_D2	MB	MB	B	MB	B	MB
VC_D3	MB	MB	B	MB	B	MB

5.2.1.2 CWT

No primeiro modo de vibração, a escala que apresentou o melhor resultado foi $a = 100$. Para o terceiro modo de vibração, a melhor escala é $a = 50$. A seguir são apresentados os resultados da CWT para as três *wavelets* escolhidas.

Diferente do modelo da viga em aço, em que os danos foram inseridos removendo elementos da malha, os danos do modelo da viga em concreto simples

são simulados através de uma redução da rigidez em um dos seus elementos. Isso justifica a CWT não ter obtido resultado para a viga VC_D1, onde o elemento foi reduzido em apenas 10% da rigidez.

Primeiro Modo de Vibração – VC_D2

Figura 138 - CWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando bior5.5

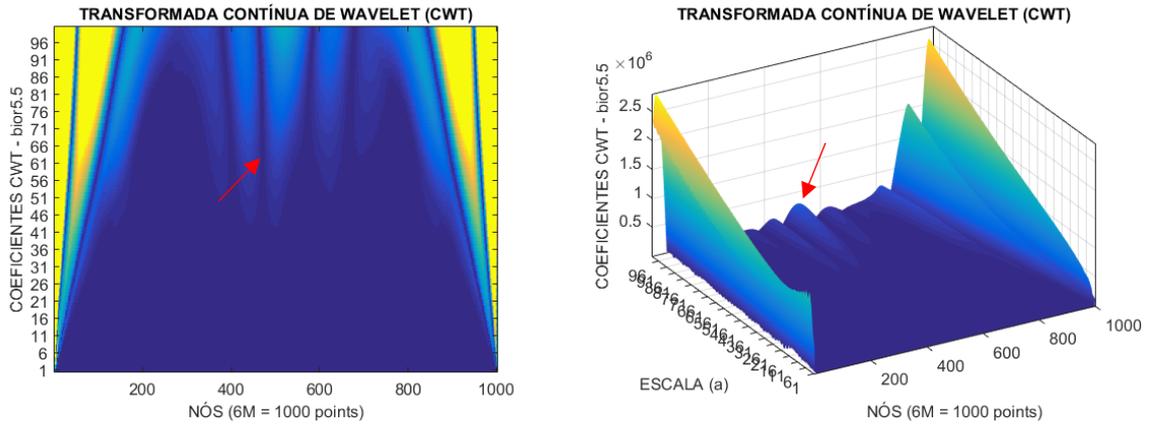


Figura 139 - CWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando gaus8

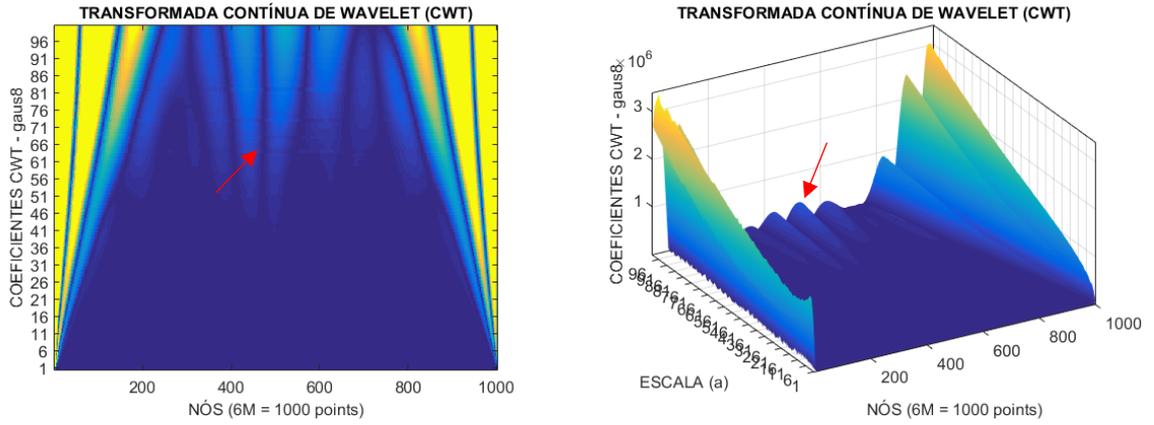
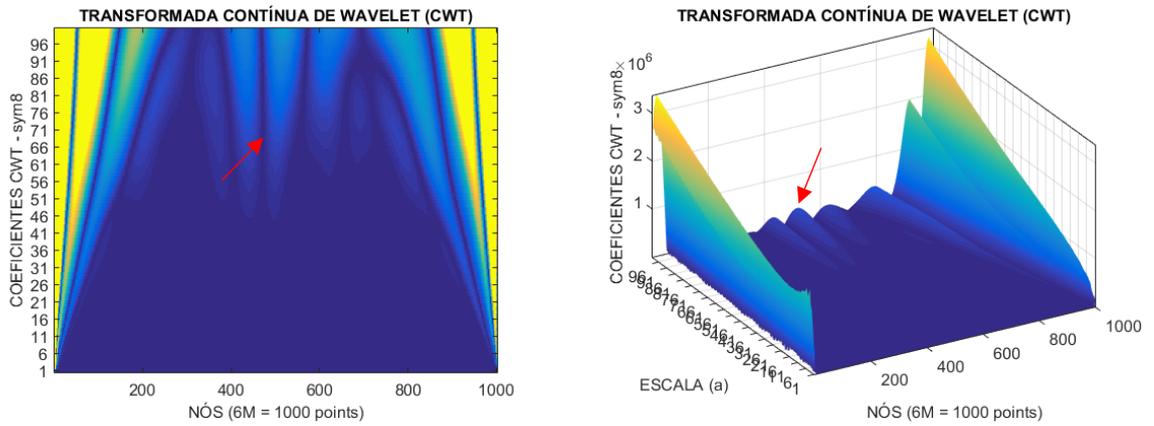


Figura 140 - CWT Modo 1 para a viga VC_D2 usando sym8



Terceiro Modo de Vibração – VC_D2

Figura 141 - CWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando bior5.5

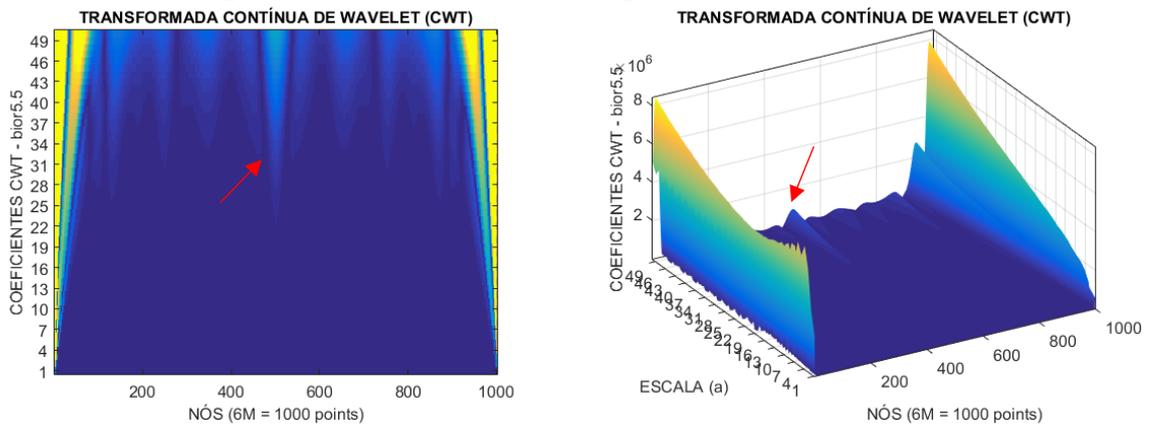


Figura 142 - CWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando gaus8

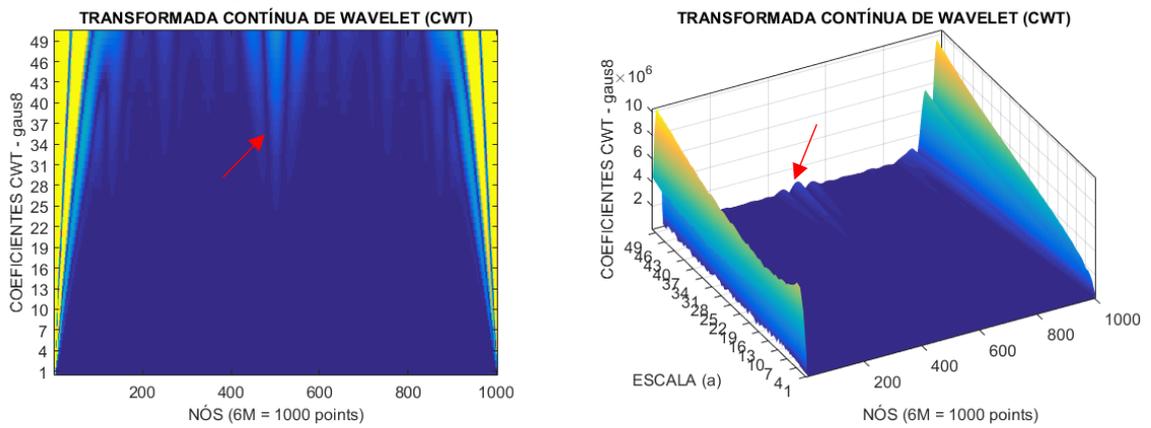
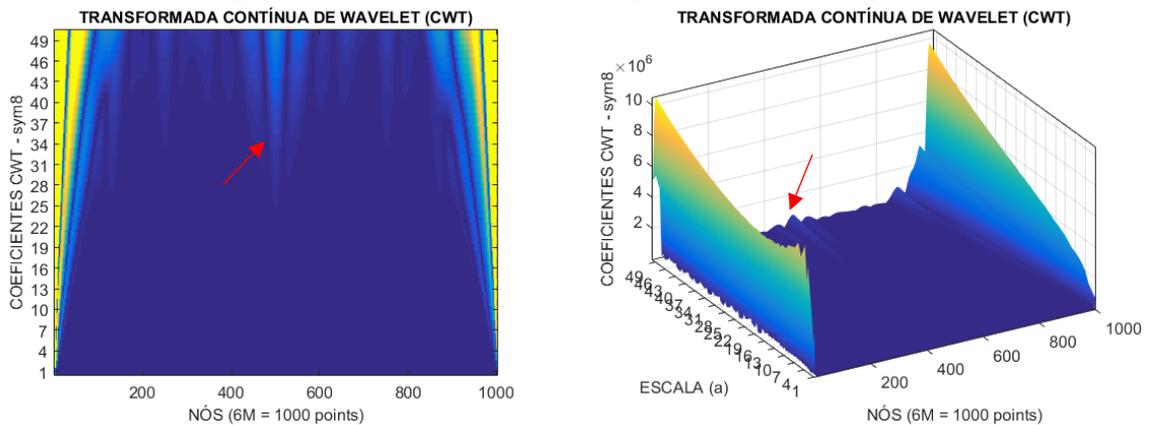


Figura 143 - CWT Modo 3 para a viga VC_D2 usando sym8



Para a viga VC_D2, no primeiro modo de vibração (Figura 138 a Figura 140) as *wavelets* conseguem identificar o dano, já que o maior pico é exatamente no nó 500, porém existem perturbações ao redor do dano que podem mascara-lo. No terceiro modo de vibração (Figura 141 a Figura 143), as *wavelets* conseguem destacar melhor o dano, com relativa diminuição das perturbações ao redor, e com destaque para a *wavelet* bior5.5 ao apresentar o melhor resultado.

Primeiro Modo de Vibração – VC_D3

Figura 144 - CWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando bior5.5

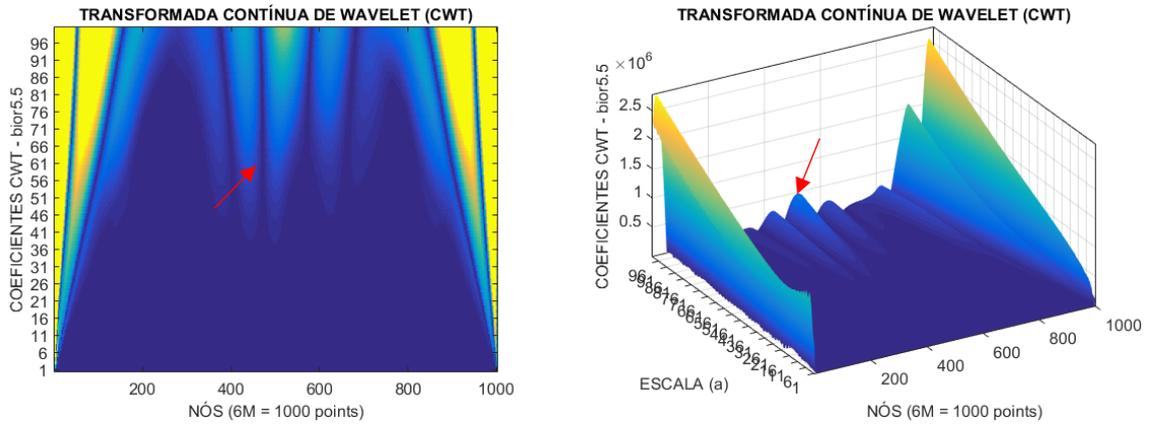


Figura 145 - CWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando gau8

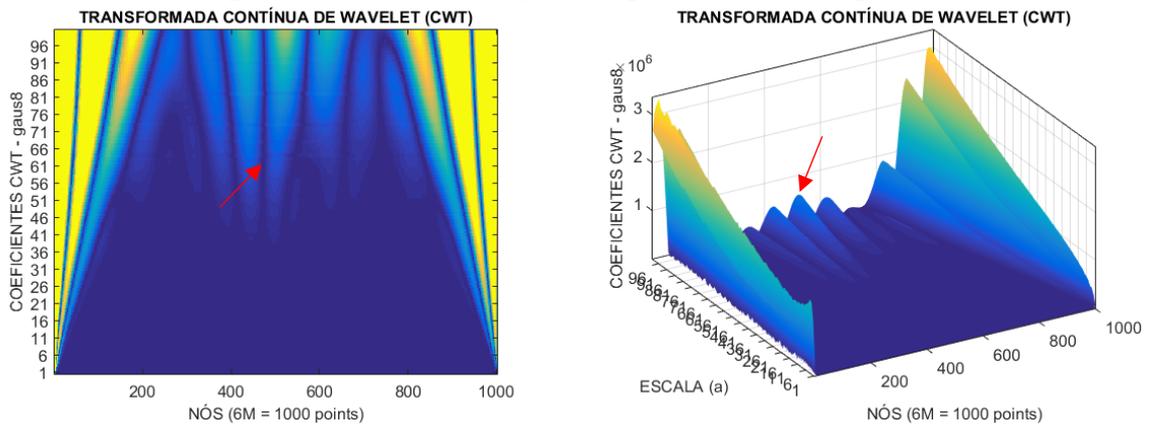
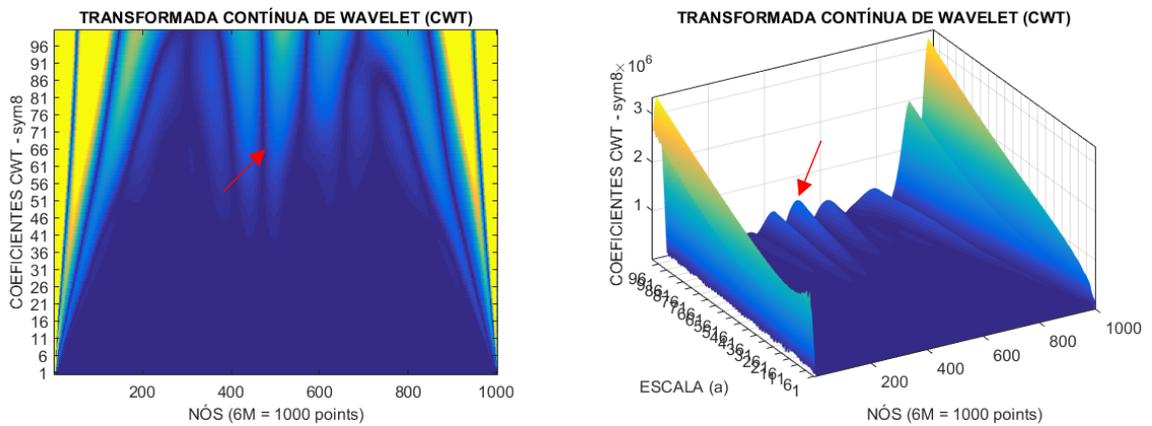


Figura 146 - CWT Modo 1 para a viga VC_D3 usando sym8



Terceiro Modo de Vibração – VC_D3

Figura 147 - CWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando bior5.5

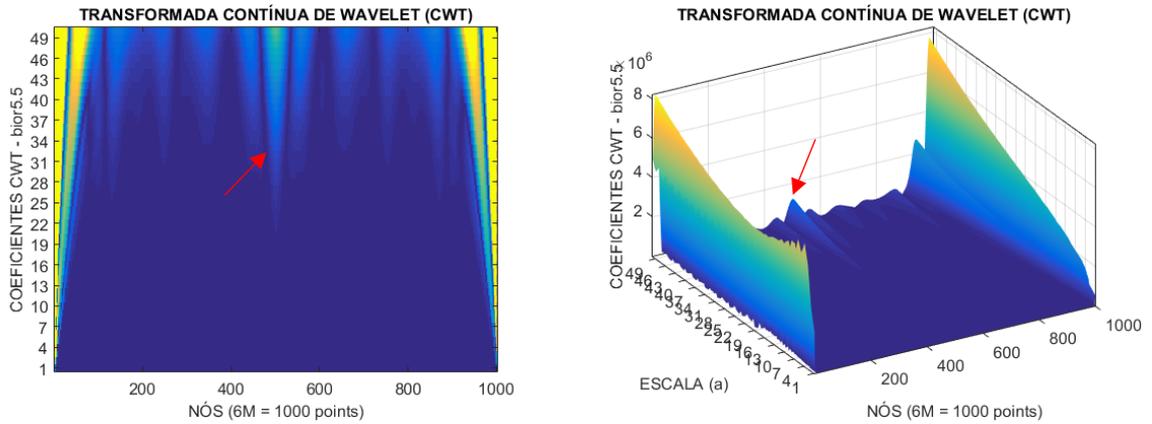


Figura 148 - CWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando gaus8

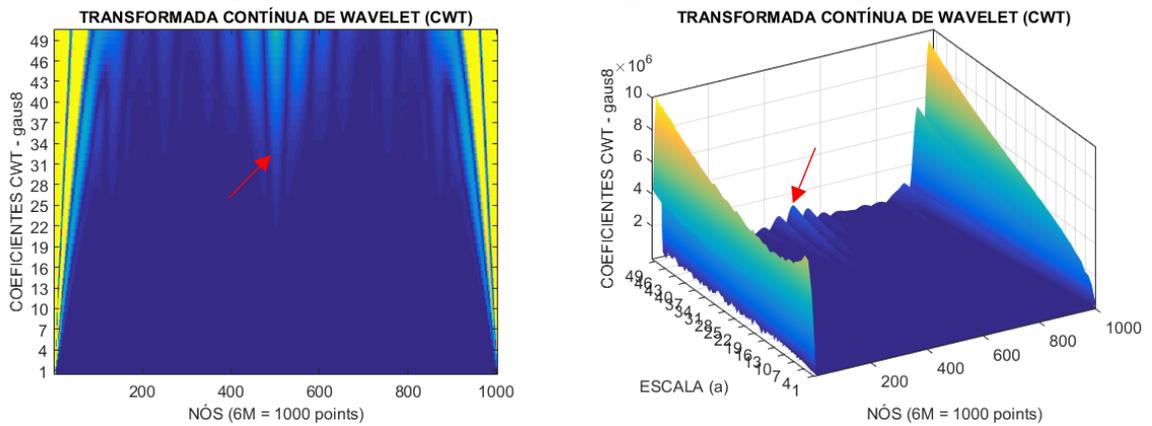
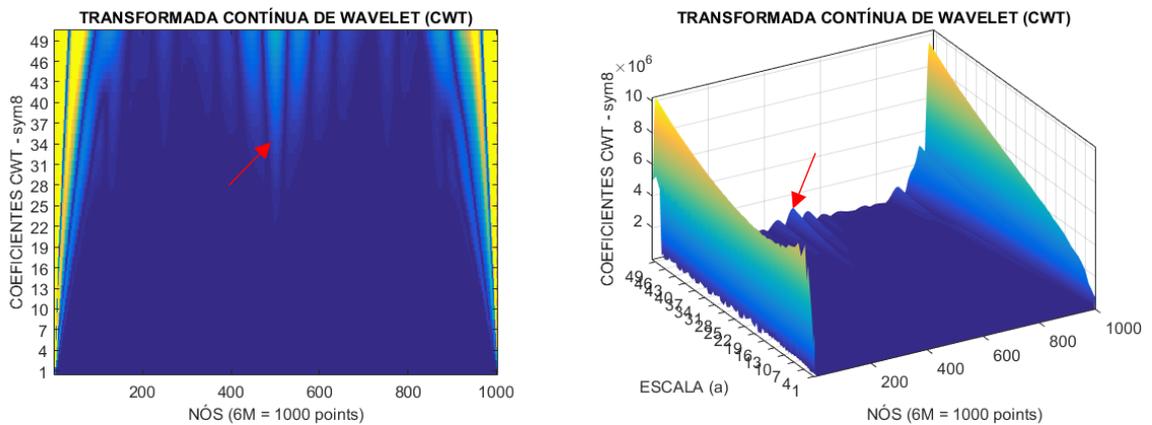


Figura 149 - CWT Modo 3 para a viga VC_D3 usando sym8



O último caso, a viga VC_D3 (Figura 144 a Figura 149), em ambos os modos as *wavelets* conseguem identificar bem o dano, novamente com destaque para a

wavelet bior5.5 por apresentar os melhores resultados nos dois modos de vibração analisados. No primeiro modo, ainda existem perturbações ao redor do dano, mas os picos no nó 500 já são maiores que os gerados pela viga VC_D2. Em todas os modelos, os gráficos apresentam perturbações nas extremidades devido às descontinuidades geométricas dos apoios.

A Tabela 13 mostra um resumo da análise da vida em concreto através da CWT, onde: MB = Muito Bom; B = Bom; NI = Não Indicado

Tabela 13 - Resumo do uso da CWT para viga de concreto

Função	bior5.5		gaus8		sym8	
	Modo1	Modo 3	Modo1	Modo 3	Modo1	Modo 3
VC_D1	NI	NI	NI	NI	NI	NI
VC_D2	B	MB	B	B	B	B
VC_D3	MB	MB	B	MB	B	MB

5.2.2 MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM

Para a viga em concreto simples, alguns cenários de dano foram assumidos para o estudo da sensibilidade dos métodos. Cada viga possui uma redução de rigidez de 10%, 20% e 30% no elemento 9 (entre nós 9 e 10) caracterizando os danos. Em todos os 3 cenários estudados (

Figura 150 a Figura 152), o método MMCD (Equação 3.15) apresenta os maiores valores de índice na região do dano. O método MCD (Equação 3.8) também identifica bem a área danificada, entretanto para a viga VC_D1, que possui redução de 10% da rigidez, as extremidades apresentaram consideráveis valores, não relacionado de forma clara com o dano existente.

Figura 150 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VC_D1

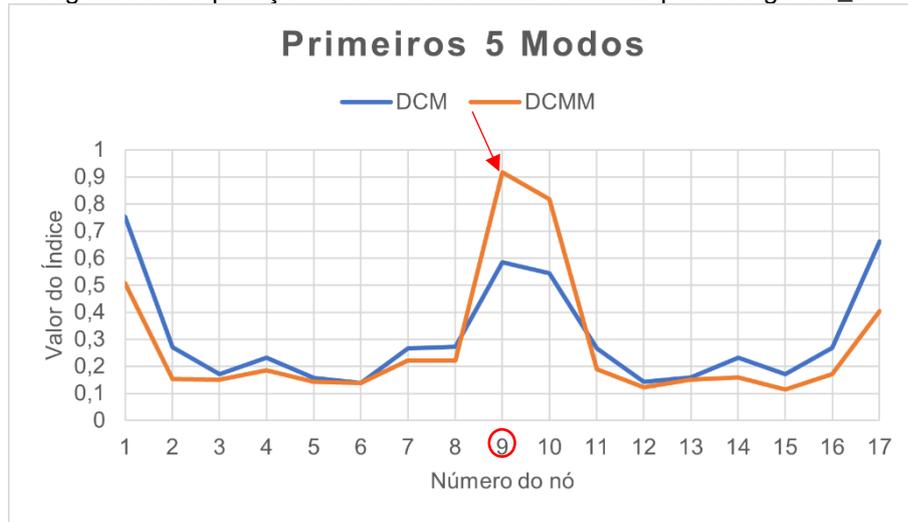


Figura 151 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VC_D2

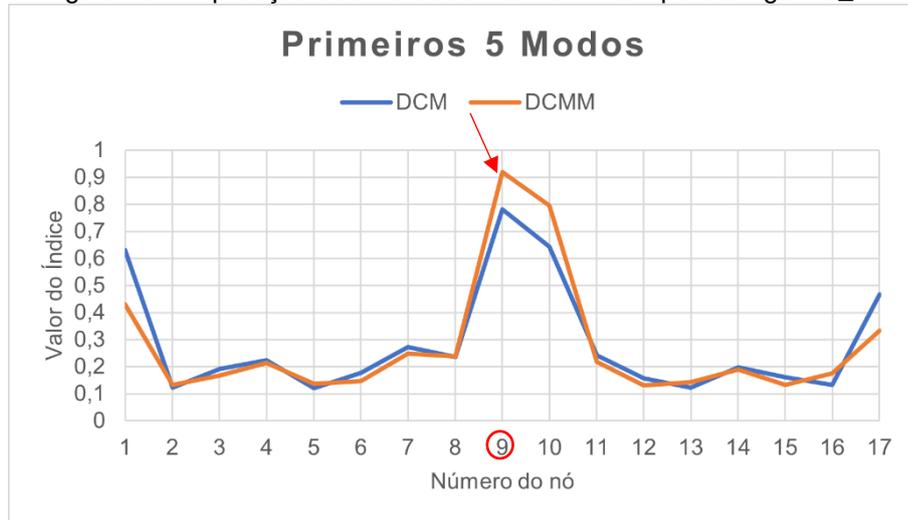
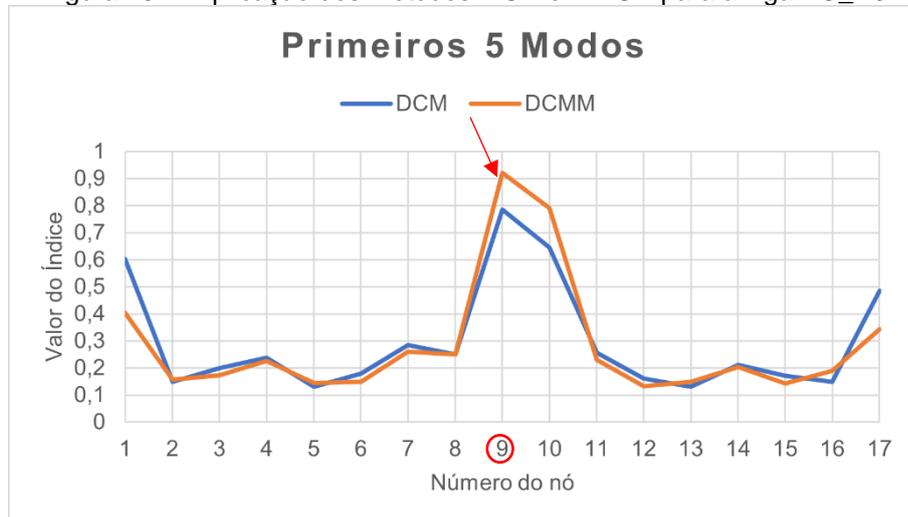


Figura 152 - Aplicação dos métodos MCD e MMCD para a viga VC_D3



O espelhamento dos modos de vibração apresenta grande influência nesse comportamento, dado que com esse fator, o algoritmo de identificação do dano não se mostra indicado já que os índices seriam nulo. Para a viga VC_D1, os modos de vibração 4 e 5 apresentam espelhamento e nas vigas VC_D2 e VC_D3, o modo de vibração 4 apresenta espelhamento (Figura 153 a Figura 156).

Figura 153 - Modos de vibração para a viga VC_INT

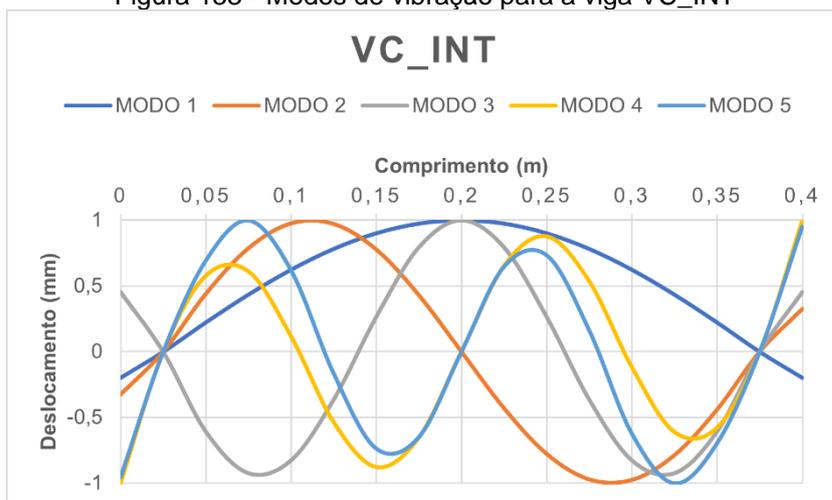


Figura 154 - Modos de vibração para a viga VC_D1

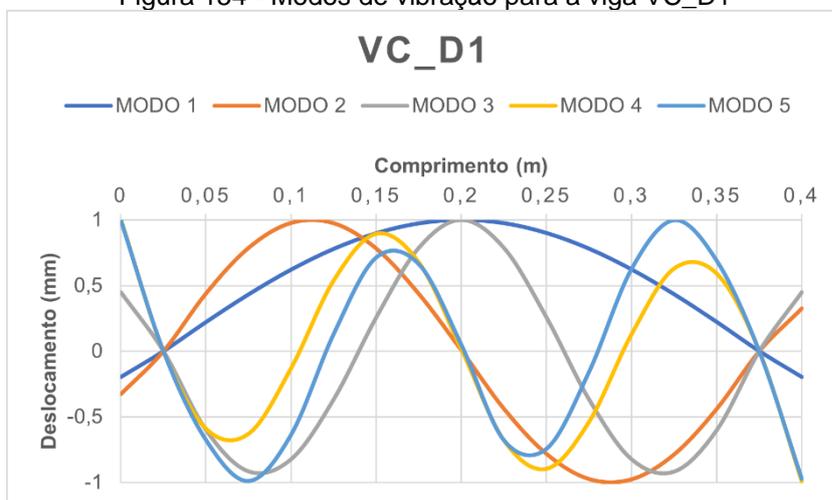


Figura 155 - Modos de vibração para a viga VC_D2

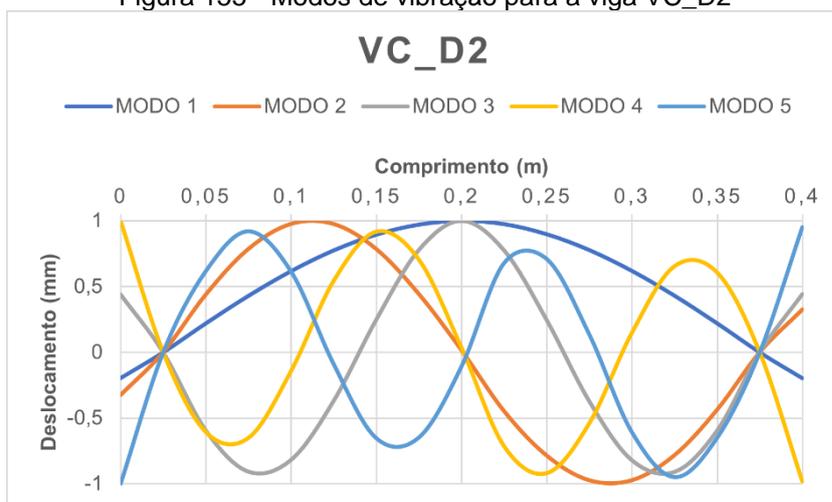
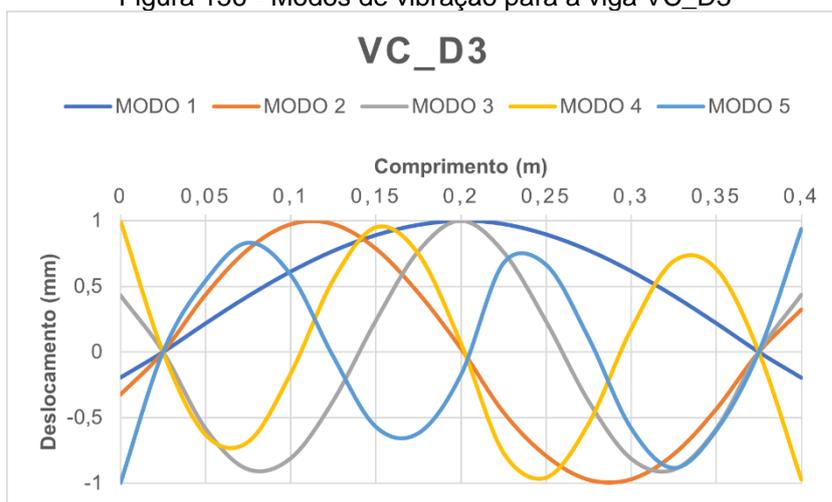


Figura 156 - Modos de vibração para a viga VC_D3



Comparando agora os métodos MCD (Equação 3.22), MMCD (Equação 3.21), MSDBI (Equação 3.14) e MSDBIM (Equação 3.20) -

Figura 157 a Figura 159 -, todos normalizados, para todas as vigas simuladas os métodos modificados, MMCD e MSDBIM, embora não apresentem valor zero nos nós onde não há dano, possuem valores maiores na região do dano, entre o nó 9 e 10. O método MCD só não é eficaz na viga VC_D1, com 10% de redução da rigidez, pois que a área danificada possui um pico menor que as extremidades, não ficando claro qual elemento está danificado. O MSDBI, por sua vez, não localiza o dano em nenhum caso.

Figura 157 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VC_D1

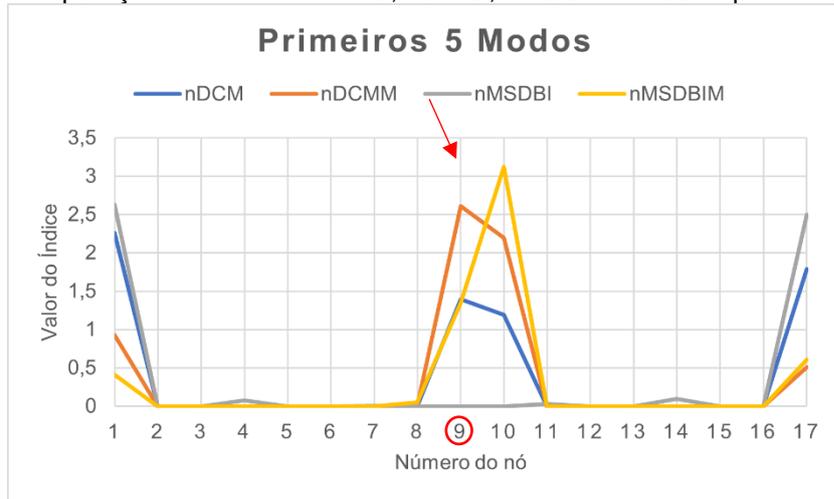


Figura 158 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VC_D2

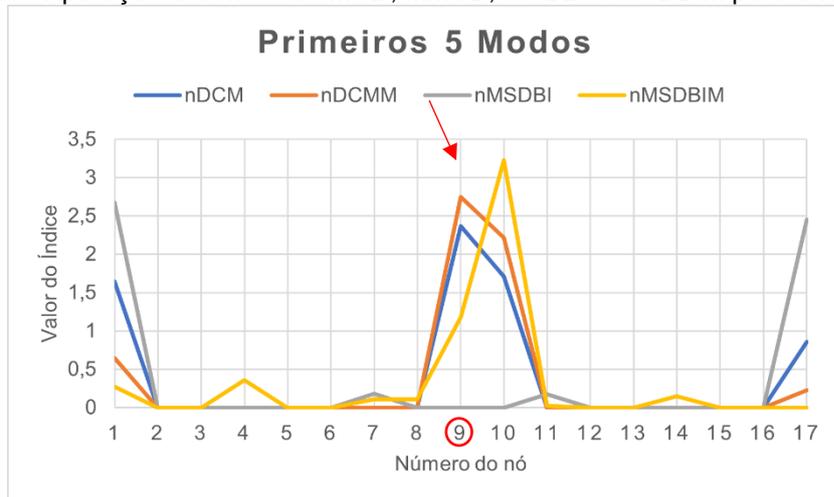
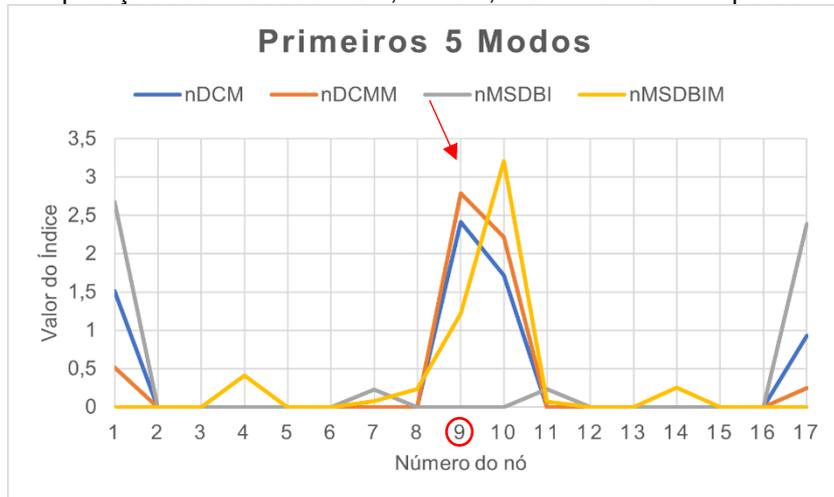


Figura 159 - Aplicação dos métodos MCD, MMCD, MSDBI e MSDBIM para a viga VC_D3



6 CONCLUSOES E SUGESTÕES

A presença de dano na estrutura gera uma pequena diminuição das frequências naturais da viga. Esse efeito foi observado em todas as modelagens estudadas. Para a Transformada de *Wavelet* foram utilizados o primeiro e o segundo ou o primeiro e o terceiro modos de vibração, a depender da posição do dano (dano no meio do vão utilizou o terceiro modo). Já os outros dois métodos e suas variações, Diferença da Curvatura Modal e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração, utilizaram a combinação dos cinco primeiros modos de vibração.

A Transformada de *Wavelet* tem como conceito a geração de picos nos sinais de respostas pela presença dos danos. Nos modelos estudados foi identificado pequenas perturbações na resposta estrutural causado pelos danos, as mesmas ocorrendo nas proximidades da região danificada, com características particulares, sendo detectada pela Transformada de *Wavelet*. Para o cenário de dano com 2cm de comprimento, o sinal apresentou uma região de perturbação maior que o dano de 0,5cm. Entretanto, isso não garante a possibilidade de a Transformada de *Wavelet* calcular o tamanho do dano. A Transformada de *Wavelet* é eficaz somente na detecção da localização do dano.

Foram utilizadas as transformadas contínua e discreta de *wavelets* para analisar os sinais dos dois modelos numéricos, sendo que o dano foi detectado. A localização do dano é vista de forma mais fácil através do gráfico da Transformada Discreta de *Wavelet*, já que por ser em 2D necessita de uma quantidade menor de pontos que a Transformada Contínua de *Wavelet*. A Transformada de *Wavelet* se configura como uma alternativa aos métodos de identificação de danos clássicos, em especial nos casos em que a resposta da estrutura intacta seja difícil de se obter.

Com relação as *wavelet*-mãe escolhidas, para o modelo de viga em aço as melhores funções para a Transformada Contínua de *Wavelet* foram a *coif4* e a *sym8*. Já para a Transformada Discreta de *Wavelet* as quatro *wavelets* escolhidas, *bior6.8*, *coif3*, *db5* e *sym6*, apresentaram eficácia na identificação dos danos. Para a viga de concreto, a melhor *wavelet* na CWT foi a *bior5.5* e para a DWT todas as três escolhidas, *bior5.5*, *db9* e *sym7*, foram eficazes na proposta do método. Essas *wavelets* possuem algumas características em comum, tais quais: grau de regularidade arbitrário, momentos nulos arbitrários, simetria no eixo *y* e suporte compacto.

Devido às descontinuidades geométricas, os apoios geram grandes perturbações nos extremos dos gráficos de coeficientes de *wavelets*. Quanto mais próximo do apoio estiver o dano, mais essas perturbações podem afetar as perturbações geradas pelo dano. Nos casos estudados, os apoios esquerdos, de segundo gênero, geraram perturbações maiores que aqueles de primeiro gênero (apoio direito).

Para os métodos Diferença da Curvatura Modal e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração, foram também estudadas suas versões modificada. Primeiro, foi feita uma comparação entre os métodos Diferença da Curvatura Modal e Diferença da Curvatura Modal Modificado. Para o modelo da viga em concreto simples, os resultados mostram que o método Diferença da Curvatura Modal Modificado identificou corretamente os danos, enquanto o método Diferença da Curvatura Modal, embora apresente um valor de índice maior na região danificada, para a viga VC_D1 não foi capaz de identificar claramente. Para os modelos em aço, no caso com somente um dano os métodos são capazes de identificar a região do dano, entretanto o método Diferença da Curvatura Modal apresenta um valor de índice considerável nas extremidades não sendo um bom indicador para esse caso. No caso da viga com dois danos, o método Diferença da Curvatura Modal Modificado identificou com eficiência, enquanto o Diferença da Curvatura Modal não identificou os danos de forma clara. Para o caso com três danos, nenhum dos dois métodos foi um bom indicador. E no caso de quatro danos, os dois métodos localizam a região danificada com clareza, embora o Diferença da Curvatura Modal Modificado possua valores de índice considerável entre os nós 16 e 17.

Comparando, depois, os métodos Diferença da Curvatura Modal e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração e suas variações Diferença da Curvatura Modal Modificado e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração Modificado, todos normalizados, no modelo da viga em concreto simples, os métodos Diferença da Curvatura Modal, Diferença da Curvatura Modal Modificado e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração Modificado identificaram o dano único, sendo os métodos modificados (Diferença da Curvatura Modal Modificado e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração Modificado) mais eficazes. Embora exista um valor considerável de índice nas extremidades, a região do dano, entre os nós 9 e 10, é identificada de forma clara. No entanto, o método Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração não identificou corretamente os elementos danificados. Já para o

modelo em aço, os métodos Diferença da Curvatura Modal, Diferença da Curvatura Modal Modificado e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração Modificado identificam bem o dano no caso do modelo de dano único. Para a viga com dois danos, os métodos Diferença da Curvatura Modal Modificado e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração Modificado identificam com clareza o dano, enquanto o Diferença da Curvatura Modal identifica a região de dano, mas não deixa claro a localização devido aos valores de índice das extremidades. Para o caso com três danos, nenhum dos métodos conseguiu identificar de forma clara e eficiente todos os danos, embora o Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração Modificado tenha sido o único capaz de detectar a região do dano no nó 9. E para o caso de quatro danos, os métodos Diferença da Curvatura Modal, Diferença da Curvatura Modal Modificado e Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração Modificado identificam os danos com clareza, embora o Diferença da Curvatura Modal Modificado aponte um dano não existente no nó 16. Para todos os modelos da viga de aço, o método Indicador Baseado em Dados dos Modos de Vibração não foi um bom indicador dos danos, para os casos de estudo nessa dissertação, não fornecendo resultados compatíveis com os esperados e apontando a presença de danos em outros locais das vigas.

A análise dos cinco primeiros modos de vibração vertical simultaneamente, possibilitaram a conclusão da segurança dos métodos para a identificar os elementos danificados, dado que individualmente um modo pode não apresentar o maior valor de índice no elemento danificado ou identificar erroneamente o dano em outros elementos. Assim, espera-se que na análise simultânea dos cinco modos de vibração a maior parte deles apresentem uma discordância maior no elemento danificado, levando a uma identificação mais clara e segura do dano. Os métodos modificados apresentaram uma eficiência superior que os originais devido ao espelhamento do deslocamento da deformada modal em relação a estrutura intacta. Nessas situações, os algoritmos originais não foram capazes de identificar os danos de forma adequada. Nota-se ainda, que o número de modos espelhados e a ordem de ocorrência do fenômeno foram fatores que interferiram nos resultados fornecidos pelos métodos originais.

Constata-se, assim, que os métodos apresentados nessa dissertação foram capazes de identificar os danos, embora com algumas limitações.

Para aplicações práticas, é sugerido o desenvolvimento de métodos associados que estudem e avaliem o tamanho do dano. O escopo deste trabalho foi a localização e posição de danos ao longo de estruturas e não sua amplitude.

Os métodos que fazem uso das *wavelets*, devem fazer um estudo mais aprofundado com relação a uma metodologia para a seleção das mesmas. Esses métodos são muito sensíveis com relação ao tipo de *wavelet* selecionada para análise. Nesta pesquisa a seleção foi através de tentativa e erro, baseada em algumas funções disponíveis no *Toolbox* do *Matlab*®. Por isso, é importante a investigação da sensibilidade da *wavelet*.

REFERÊNCIAS

ABAQUS®. Documentation. SIMULIA, 2016.

ADAMS, R. D.; CAWLEY, P. The Location of Defects in Structures From Measurements of Natural Frequencies. **Journal of Strain Analysis**, 14(2), p. 49-57, 1979.

ALLEMANG, R.J. and D.L. BROWN, 1982: "A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis" **Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference**, pp. 110-116, Orlando, Florida, USA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

CARVALHO, P. P. M. **Estudo Teórico-Experimental do Dano em Vigas de Concreto**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

CLOUGH, R. W., PENZIEN, J. 1995, **Dynamics of Structures**. Third Edition, Berkeley, Computers & Structures, Inc, 1995.

COLOMBO, A. B. **Applications of structural health monitoring and field testing techniques to probabilistic based life-cycle evaluation of reinforced concrete bridges**. São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 2 dez. 2016.

DAS, S.; SAHA, P.; PATRO, S. K. Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 6, n. 3, p. 477–507, 2016.

DAUBECHIES, I. (1992). **Ten Lectures on Wavelets**.

DAWARI, V. B e VESMAWALA, G. R.: 2013 – "Structural damage identification using modal curvature differences" **Journal of Mechanical and Civil Engineering**. ISSN, 1678-1684.

D'AMBRA, R. B.; ITURRIOZ, I; DOZ, G. N. **Determinación de la magnitud y localización del daño em estructuras através del cambio de sus propiedades dinâmicas**. CILAMCE, 3, 1161-1168, 1997.

ESTRADA, E. S. (2008). "**Damage detection Methods in Bridges trough Vibration Monitoring: Evaluation and Application**". Doctoral Thesis, University of Minho.

FIGUEIREDO, E. J. F. **Damage Identification in Civil Engineering Infrastructure under Operational and Environmental Conditions**. 2010. 196f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Porto, 2010.

HAAR, A. (1910). “Zur Theorie der Orthogonalen Funktionensysteme”. **Math. Ann.** **69**, Pages 331-371.

HE, J.; FU, Z.-F. **Modal Analysis**. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 2001.

HOU, Z.; NOORI, M.; AMAND, R. ST. WAVELET-BASED APPROACH FOR STRUCTURAL DAMAGE DETECTION. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 126, n. July, p. 677–683, 2000.

KHENNANE, Amar. **Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB® and Abaqus**. Boca Raton, FL: Crc Press, 2013. 486 p.

LIMA JÚNIOR, Wiu José de. **Identificação de danos em vigas via análise modal**. 2020. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020

LIEVEN, N. e EWINS, D. J.: 1988 – “Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (comac)” - **Proc. 6th International Modal Analysis Conference**.

MATLAB®. **The Language of Technical Computing**, versão R2014b, MathWorks. 2014.

MEHRA, Mani. **Wavelets Theory and Its Applications: a first course**. New Delhi, Delhi, India: Springer, 2018. 185 p.

MEYER, Y (1989), Wavelets and Applications. **Proceedings of the International Conference**, Marseille, France.

NICKOLAS, Peter. **Wavelets: a student guide**. Melbourne: Cambridge University Press, 2017. 275 p.

OVANESOVA, A. V., (2000). “**Application of wavelet to crack detection in frame structures**.” Tese de Doutorado da Universidade do Porto Rico, 235p.

PALECHOR, E. U. L. (2013). **Identificação de danos em vigas metálicas utilizando wavelets e dados numéricos e experimentais**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.

PALECHOR, E. U. L. **Método de Identificação de Danos em Estruturas, baseado na variação da frequência natural causadas pela aplicação de uma massa móvel adicional**. 2018. 462p. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2018.

PANDEY, A.K., BISWAS M. e SAMMAN, M.M.: 1991 – “Damage detection from changes in curvature mode shapes” - **Journal of sound and vibration**, 145(2).

PENNY, J.E.T., D.A.L. WILSON, and M.I. FRISWELL, 1993, "Damage Location in Structures Using Vibration Data," in **Proc. of the 11th International Modal Analysis Conference**, 861–867.

RATCLIFFE, C. P. Damage detection using a modified laplacian operator on mode shape data. **Journal of Sound and Vibration**, 204 (3), 505-517, 1997.

RUCKA, M., WILDE, K. (2006) "Crack identification using wavelets on experimental static deflection profiles". **Journal of Engineering Structures**, Volume 28, Pages 279-288.

RYTTER, A.(1993). **Vibration based inspection of civil engineering structures**, Ph.D. Thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.

SILVA, R. S. (2011). "**Determinação de Patologias Estruturais em Vigas Treliças e Pontes Via Modelagem Numérica**". Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.

SILVA, R. S. R. C. **Monitoramento e Identificação Numérico e Experimental de Danos em vigas e pontes de aço e concreto utilizando Transformadas de Wavelet**. 2015. 274p. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2015.

SILVA, Rodrigo Lopes. **Identificação e localização de danos em estruturas de concreto por meio de análise modal, experimental e numérica**. 2018. 1 recurso online (175 p.). Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP.

TAHA, M. M. R. et al. Wavelet Transform for Structural Health Monitoring: A Compendium of Uses and Features. **Structural Health Monitoring**, v. 5, n. 3, p. 267–29, 2006.

VANDIVER, J.K., 1975, "Detection of Structural Failure on Fixed Platforms by Measurement of Dynamic Response," in **Proc. of the 7th Annual Offshore Technology Conference**, 243–252.

VANDIVER, J.K., 1977, "Detection of Structural Failure on Fixed Platforms by Measurement of Dynamic Response," **Journal of Petroleum Technology**, March, 305–310.

WEST, W.M., 1984, "Illustration of the Use of Modal Assurance Criterion to Detect Structural Changes in an Orbiter Test Specimen," in **Proc. Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity**, 1–6.

WU, N., WANG, Q. (2011). "Experimental studies on damage detection of beam structures with wavelet transform." **International Journal of Engineering Science**, Volume 49, Pages 253-261.

YAZDANPANA, O.; SEYEDPOOR, S. M.; BENGAR, H. A. A new damage detection indicator for beams based on mode shape data. **Struct. Eng. Mech.** 53, 725-744 (2015).

ZONTA, D. **Structural damage detection and localization by using vibrational measurements**. Bologna: Università Degli Studi Di Bologna, 2000.

APÊNDICE A – Métodos de Interpolação e Regularização

Figura 161 - Exemplo de aplicação da função *spline* em código

```

x = P.Var1
y = P.Var2
u(:,2) = spline(x,y,[0:6/100:6]); %%6 é o comprimento da viga%%
u(:,1) = 0:6/100:6; %%100 é a quantidade de pontos a gerar%%

```

REGULARIZAÇÃO DE TIKHONOV

Nesse trabalho, o método proposto em 1990 por Tikhonov foi aplicado para suavizar a perturbação gerada pela presença de dano nos gráficos das wavelets. Estes métodos buscam ainda reduzir as oscilações numéricas na solução, modificando a função objetiva. Os termos regularização mais utilizados são da ordem zero, primeira ordem e os termos de segunda ordem. O termo de ordem zero controla as alterações de grandeza do vetor u , o termo de primeira ordem controla as mudanças na amplitude da taxa de variação do vetor u e os termos de segunda ordem podem ser expressos na forma integral tal qual (SILVA, 2015):

$$\rho = \beta_0 \int (u^2) ds + \beta_1 \int \left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)^2 ds + \beta_2 \int \left(\frac{\partial^2 u}{\partial s^2} \right)^2 ds \quad (\text{A.6})$$

Uma forma análoga, escrita em diferenças finitas é utilizado nesse trabalho:

$$\rho = \beta_0 \sum_{i=1}^p (u_i^n)^2 + \beta_1 \sum_{i=1}^p (u_i^n - u_i^{n-1})^2 + \beta_2 \sum_{i=1}^p (u_i^n - 2u_i^{n-1} + u_i^{n-2})^2 \quad (\text{A.7})$$

onde β_j são parâmetros de regularização; s é um parâmetro espacial; n é o número de iteração; u_i são as componentes de u . A figura xx mostra o código utilizado no Matlab para essa diferença finita:

Figura 162 - Exemplo de aplicação da função de Tikhonov em código

```
%%%% Regularização de Tikhonov
```

```

B0 = 100;
B1 = 100;
B2 = 100;
n = length(u);
Parte1 = 0;
Parte2 = 0;
Parte3 = 0;

for i = 1:n
    if i==1
        a = (u(i,2))^2;
        Parte1 = a;
        b = ((u(i,2)))^2;
        Parte2 = b;
        c = ((u(i,2)))^2;
        Parte3 = c;
        Ponto(i) = (B0*(Parte1))+(B1*(Parte2))+(B2*(Parte3));
    elseif i==2
        a = (u(i,2))^2;
        Parte1 = a;
        b = ((u(i,2))-(u(i-1,2)))^2;
        Parte2 = b;
        c = ((u(i,2))-(2*(u(i-1,2))))^2;
        Parte3 = c;
        Ponto(i) = (B0*(Parte1))+(B1*(Parte2))+(B2*(Parte3));
    else
        a = (u(i,2))^2;
        Parte1 = a;
        b = ((u(i,2))-(u(i-1,2)))^2;
        Parte2 = b;
        c = ((u(i,2))-(2*(u(i-1,2)))+u(i-2,2))^2;
        Parte3 = c;
        Ponto(i) = (B0*(Parte1))+(B1*(Parte2))+(B2*(Parte3));
    end
end

```

APÊNDICE B – Código fonte dos métodos analisados

MCD

Figura 163 - Exemplo código MCD

```

for b = 1
    for a = 1:N
        DCMJ_M1(a) = ((DCM_M1(a,b))/(max(DCM_M1)));
        DCMJ_M2(a) = ((DCM_M2(a,b))/(max(DCM_M2)));
        DCMJ_M3(a) = ((DCM_M3(a,b))/(max(DCM_M3)));
        DCMJ_M4(a) = ((DCM_M4(a,b))/(max(DCM_M4)));
        DCMJ_M5(a) = ((DCM_M5(a,b))/(max(DCM_M5)));
    end
end

DCMJ = (1/T)*(DCMJ_M1 + DCMJ_M2 + DCMJ_M3 + DCMJ_M4 + DCMJ_M5);

for b = 1
    for a = 1:N
        nDCMJ(a) = max(0, (((DCMJ(a,b) - (mean(DCMJ)))) / (std(DCMJ))));
    end
end

```

MSDBI

Figura 164 - Exemplo código MSDBI

```

for f = 1
    for e = 1:N
        MSDBI_M1(e) = abs((DCM_M1(e,f)*(DISD_M1(e,f)^2))-((abs(INCD_M1(e,f))-abs(INCI_M1(e,f)))^2)*DISI_M1(e,f));
        MSDBI_M2(e) = abs((DCM_M2(e,f)*(DISD_M2(e,f)^2))-((abs(INCD_M2(e,f))-abs(INCI_M2(e,f)))^2)*DISI_M2(e,f));
        MSDBI_M3(e) = abs((DCM_M3(e,f)*(DISD_M3(e,f)^2))-((abs(INCD_M3(e,f))-abs(INCI_M3(e,f)))^2)*DISI_M3(e,f));
        MSDBI_M4(e) = abs((DCM_M4(e,f)*(DISD_M4(e,f)^2))-((abs(INCD_M4(e,f))-abs(INCI_M4(e,f)))^2)*DISI_M4(e,f));
        MSDBI_M5(e) = abs((DCM_M5(e,f)*(DISD_M5(e,f)^2))-((abs(INCD_M5(e,f))-abs(INCI_M5(e,f)))^2)*DISI_M5(e,f));
    end
end

MSDBI = (1/T)*(MSDBI_M1 + MSDBI_M2 + MSDBI_M3 + MSDBI_M4 + MSDBI_M5);

for h = 1
    for g = 1:N
        nMSDBI(g) = max(0, (((MSDBI(g,h) - (mean(MSDBI)))) / (std(MSDBI))));
    end
end

```

CWT

Figura 165 - Exemplo código CWT

```

%%TCW
figure(71)
coef = cwt(Ponto,1:100,'coif5','3Dplot');
title('TRANSFORMADA CONTÍNUA DE WAVELET (CWT)','fontsize',12);
xlabel('NÓS (6M = 1000 points)','fontsize',12);
ylabel('ESCALA (a)','fontsize',12);
zlabel('COEFICIENTES CWT - gaus8','fontsize',12);
set(gca,'FontSize',12);
colormap('default')
figure(73)
coef = cwt(Ponto,1:100,'coif5','plot');
title('TRANSFORMADA CONTÍNUA DE WAVELET (CWT)','fontsize',12);
xlabel('NÓS (6M = 1000 points)','fontsize',12);
ylabel('COEFICIENTES CWT - gaus8','fontsize',12);
set(gca,'FontSize',12);
colormap('default')

```

DWT

Figura 166 - Exemplo código DWT

```

%%TDW
y4 = Ponto;
s = y4(1:length(y4));
ls = length(s);
[cA1, cD1] = dwt(s,'db9');
D1 = upcoef('d',cD1,'db9',1,ls)
figure(4);
plot(D1);
axis([0 100 -50 50]);
%ylim([-0.8,0.8]);
hold on
set(gca,'Xtick',0:5:100)
tamano_rotulos_ejes = 12;
tamano_letra_ejes = 12;
title('TRANSFORMADA DISCRETA DE WAVELET (DWT)','fontsize',tamano_rotulos_ejes)
xlabel('NODOS','fontsize',tamano_rotulos_ejes)
ylabel('COEFICIENTE DWT - bior5.5','fontsize',tamano_rotulos_ejes)
set(gca,'FontSize',tamano_letra_ejes)

```