

**MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM
ESTRUTURAS, BASEADO NA VARIAÇÃO DA
FREQUÊNCIA NATURAL CAUSADA PELA APLICAÇÃO
DE UMA MASSA MÓVEL ADICIONAL.**

ERWIN ULISES LOPEZ PALECHOR

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM
ESTRUTURAS, BASEADO NA VARIAÇÃO DA
FREQUÊNCIA NATURAL CAUSADA PELA APLICAÇÃO
DE UMA MASSA MÓVEL ADICIONAL.**

ERWIN ULISES LOPEZ PALECHOR

ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO
CIVIL**

**BRASÍLIA, DF
2018**

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

**MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM
ESTRUTURAS, BASEADO NA VARIAÇÃO DA
FREQUÊNCIA NATURAL CAUSADA PELA APLICAÇÃO
DE UMA MASSA MÓVEL ADICIONAL.**

ERWIN ULISES LOPEZ PALECHOR

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

APROVADA POR:

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

Prof. Marcus Vinicius Girão de Moraes, PhD (UNB)
(Coorientador)

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

Prof. Tulio Nogueira Bittencourt, Phd (USP)
(Examinador Externo)

Prof. Jorge Douglas Bonilla Rocha, Dr. Ing (UCLV)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA, 02 DE FEVEREIRO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

PALECHOR, ERWIN ULISES LOPEZ.

Método de Identificação de danos em Estruturas, Baseado na Variação da Frequência Natural Causada pela Aplicação de uma Massa Móvel Adicional. [Distrito Federal] 2018. xxxviii, 456p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2018).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Danos

2. Vigas metálicas

3. Massa Adicional

4. Frequências naturais

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PALECHOR, E. U. L. (2018). Método de Identificação de danos em Estruturas, Baseado na Variação da Frequência Natural Causada pela Aplicação de uma Massa Móvel Adicional. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.TD-001A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 456p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Erwin Ulises Lopez Palechor

TÍTULO: Método de Identificação de danos em Estruturas, Baseado na Variação da Frequência Natural Causada pela Aplicação de uma Massa Móvel Adicional.

GRAU: Doutor ANO: 2018

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

Erwin Ulises Lopez Palechor

Rua Abinadabe Bezerra Júnior 130, Residencial Varandas do Vale, apartamento 504.

63040-060 Juazeiro do Norte- Ceará -Brasil

e-mail: erwin@aluno.unb.br

Dedicatória.

Aos meus Pais Nidia Maria e Nilson Lopez

*À minha irmã Leydy Lopez
pelo apoio e amor incondicional*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus por me dar a oportunidade e sabedoria para conseguir realizar este sonho.

Aos meus pais: Nidia Palechor e Nilson Lopez, pois eles são o fundamento da minha vida e os verdadeiros arquitetos do meu crescimento como pessoa e como profissional. A minha irmã Leydy Evonne por ter sempre palavras de incentivo em tempos difíceis e a toda minha família pelo apoio.

Ao Professor Luciano Mendes Bezerra, pela consistente orientação, disponibilidade, apoio e motivação ao longo do trabalho.

Ao meu amigo Ramon Saleno pela colaboração e amizade.

Aos amigos e colegas do PECC pelo companheirismo, amizade e solidariedade, que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração desta tese de doutorado.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro.

RESUMO

MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS, BASEADO NA VARIACÃO DA FREQUÊNCIA NATURAL CAUSADA PELA APLICAÇÃO DE UMA MASSA MÓVEL ADICIONAL.

Autor: Erwin Ulises Lopez Palechor

Orientador: Luciano Mendes Bezerra, PhD

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Fevereiro de 2018

O objetivo de identificação de danos é a descrição de um modelo estrutural existente, com base em dados obtidos experimentalmente (resposta dinâmica ou estática). Muitas vezes é desejável detectar irregularidades ou alterações da resposta da estrutura, considerando propriedades que foram alteradas pelo dano. Dessa forma, esta pesquisa está direcionada à aplicação do método de identificação baseado na análise das propriedades dinâmicas de vigas metálicas em escala real, submetidas à ação de uma massa móvel adicional que gera uma mudança progressiva das frequências naturais devido ao diferente posicionamento desta. No entanto, a presença de um pequeno dano pode não ser tão evidente. Sendo assim, faz-se necessário uso das Transformadas de Wavelet para auxiliar no processo de localização de danos ou possíveis mudanças na rigidez da estrutura. O método proposto foi desenvolvido de forma experimental e numérica. Na análise experimental foram testadas vigas (perfis-I) de aço biapoiadas, submetidas à ação de cargas móveis adicionais e com danos induzidos nos flanges dos perfis. Na análise numérica, as mesmas vigas utilizadas na análise experimental foram modeladas no ANSYS, Foi desenvolvida uma análise modal prévia para verificar a eficácia do método e uma análise transiente, reproduzindo as condições reais dos ensaios experimentais. O sinal temporal e as frequências naturais obtidas foram processadas através do software MATLAB, para posteriormente aplicar o método de correção de frequências, interpolação e finalmente a aplicação das Transformadas Discretas de Wavelet. Os resultados obtidos mostraram que o método apresenta um bom comportamento para danos localizados no trecho central da viga, sendo capaz de identificar os danos localizados nesta região. O método mostra ruídos indesejáveis nos pontos de apoio das vigas examinadas. Portanto, o uso de massas adicionais associadas às Transformadas de Wavelet mostra-se promissor no processo de detecção e monitoramento dos danos em estruturas.

Palavras-chave: Transformada de Wavelet, vigas, danos, massas adicionais, resposta dinâmica.

ABSTRACT

METHOD OF IDENTIFICATION OF DAMAGE IN STRUCTURES, BASED ON THE VARIATION OF THE NATURAL FREQUENCY CAUSED BY THE APPLICATION OF AN ADDITIONAL MOBILE MASS.

Author: Erwin Ulises Lopez Palechor

Supervisor: Luciano Mendes Bezerra, PhD

Graduate Program in Structures and Civil Construction

Brasilia, february of 2018

The damage identification process is usually done from the responses obtained experimentally (dynamic or static) considering properties that have been changed by the damage. Thus, this research is directed to the application of the identification method based on the analysis of the dynamic properties of steel beams in a real scale, submitted to the action of a moving additional mass that generates progressive change of the natural frequencies due to the different positioning of this mass. However, the presence of minor damage may not be so obvious. Thus, it is necessary to use the Wavelet Transform to help in the process of damage identification, or possible stiffness changes of the structure. The proposed method was developed experimentally and numerically. In the experimental analysis, simply supported steel beams (I-profiles) were tested, subjected to the action of an additional rove mass and induced damage to the flange of the profiles. In the numerical analysis, the same beams used in the experimental analysis were modeled in ANSYS program. A previous modal analysis and a transient analysis were developed. The temporal signal and the natural frequencies obtained from the modeling were processed through MATLAB to later apply the method of frequency correction, interpolation and finally apply the Wavelet Discrete Transform. The results showed that the method presents a good behavior for localized damages in the central area of the beam span, being able to identify the localized damages in this region. The method shows undesirable noise next to the supporting points of the beam. Therefore, the use of additional masses associated with wavelet transformations is promising in the detection and monitoring of structural damage.

Keywords: Wavelet transform, beams, damages, additional masses, dynamic response.

SUMÁRIO

1.	– INTRODUÇÃO	39
1.1	– MOTIVAÇÃO	41
1.2	– OBJETIVOS	42
1.2.1	- Objetivo geral.....	42
1.2.2	- Objetivos específicos.....	42
1.3	– APECTOS INOVADORES E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	43
1.4	-ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	44
2.	- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	45
2.1	- CONCEITOS E GENERALIDADES	45
2.1.1	- Classificação do processo de detecção de danos.....	46
2.2	- ESTADO DA ARTE: USO DE MASAS MOVEIS E TRANSFORMADAS DE WAVELETS NA IDENTIFICAÇÃO DE DANOS.....	46
2.3	– REVISÃO DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS.....	57
2.4	– MÉTODOS DINÂMICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE DANOS.....	57
2.4.1	- Método COMAC.....	57
2.4.2	- Método da Curvatura.....	58
2.4.3	- Método Índice de dano (ID).....	58
2.4.4	– Método Mudança de Flexibilidade.....	59
2.4.5	– Método MAC.....	60
2.4.6	- Solução do problema inverso de Identificação de danos em treliça via método dos elementos finitos.....	61
2.4.7	- Procedimentos numéricos para solução do problema inverso de localização de danos em estruturas aporticadas.	61
2.5	- PROCESSAMENTO DE SINAIS.....	62
2.5.1	- Análise de sinais no domínio da frequência.....	62
2.5.2	Transformada de Fourier	64
2.5.3	Transformada Janelada de Fourier (TJF).....	65
2.5.4	Funções de janelas	66
3.	- ANÁLISE COM AS WAVELET.....	70
3.1	- INTRODUÇÃO AS WAVELET.....	70
3.1.1	- Transformada Contínua de Wavelet (TCW)	74
3.1.2	- Transformada Discreta de Wavelet (TDW)	77
3.2	– FAMÍLIAS	78
3.2.1	- Família Wavelet Haar.....	79
3.2.2	- Família Wavelet Daubechies.....	79
3.2.3	- Família Wavelet Biortogonal.	80
3.2.4	- Família Wavelet Coiflets.....	81
3.2.5	- Família Wavelet Symlets.	81
3.3	- PROPRIEDADES DAS WAVELETS	81
3.4	- APLICAÇÃO	84
3.5	- WAVELET TOOLBOX – MATLAB	84
3.6	- MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO	86
3.6.1	- Interpolação com splines.....	86
4.	METODOLOGIA PROPOSTA.....	90
4.1	– ROTEIRO DA METODOLOGIA.....	90

4.2	– FLUXOGRAMA METODOLOGIA.	96
4.3	– PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E DO MATERIAL DAS VIGAS ENSAIADAS.	98
4.4	– CÁLCULO DA ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL (A).....	99
4.5	CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA (I_x).....	101
4.6	CÁLCULO DA DENSIDADE (ρ)	101
4.7	- ESTIMATIVA MÓDULO DE ELASTICIDADE (E).....	102
4.8	– ANÁLISE MODAL PRÉVIA.....	105
4.8.2	Aplicação e resultados da metodologia proposta.	111
4.9	-CASOS DE DANO ANALISADOS ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	119
4.10	RESUMO CASOS DE DANO.	130
5.	ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	131
5.1	- SIMULAÇÃO DO DANO	131
5.2	- APOIOS	132
5.3	-MASSA ADICIONAL.....	133
5.4	- INSTRUMENTAÇÃO	134
5.5	– DISCRETIZAÇÃO DA VIGA.....	136
5.6	– IDENTIFICAÇÃO MODAL DA VIGA INTACTA.....	137
5.6.2	- Ensaio preliminar viga AA com uma massa adicional de 10 kg.....	151
5.7	- FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM (FS), NÚMERO DE DADOS (N) E TEMPO AQUISIÇÃO DO SINAL TEMPORAL (T)	157
5.8	- INTERPOLAÇÃO SINAL TEMPORAL	157
5.9	- JANELAMENTO SINAL TEMPORAL.....	158
5.10	- APLICAÇÃO FFT E CORREÇÃO DE FREQUÊNCIAS.....	160
5.10.1	Correção da frequência da janela retangular.....	162
5.10.2	Correção da frequência pela janela Hanning.	164
5.10.3	Estimação frequência utilizando a média ponderada.....	165
5.10.4	Spectre Centre Correction Method (SCCM).....	165
5.11	- TRATAMENTO RUÍDO ENSAIOS EXPERIMENTAIS.	170
5.12	– RESULTADOS	171
5.12.1	- Caso 1 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 1 entalhe)	171
5.12.2	–Caso 2 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes).....	189
5.12.3	–Caso 3 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes).....	194
5.12.4	– Caso 4 (Viga intacta L = 6,0 m).....	198
5.12.5	–Caso 5 (dano 2 a 5,6 m com 1 entalhe).....	202
5.12.6	– Caso 6 (dano 2 a 5,6 m com 2 entalhes)	207
5.12.7	–Caso 7 (dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)	211
5.12.8	– Caso 8 (dano 1 a 5,0 m com 1 entalhe e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)	215
5.12.9	–Caso 9 (dano 1 a 5,0 m com 2 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes).....	219
5.12.10	–Caso 10 (dano 1 a 5,0 m com 3 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes).	223
5.12.11	–Caso 11 (Viga intacta).....	238
5.12.12	– Caso 12 (dano 1 a 1,5 m com 1 entalhe)	242
5.12.13	– Caso 13 (dano 1 a 1,5 m com 2 entalhes)	250
5.12.14	– Caso 14 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes)	258
5.12.15	– Caso 15 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes)	261
5.12.16	– Caso 16 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes)	265
5.12.17	– Caso 17 (dano a 3,0 m com 1 entalhe).....	269
5.12.18	– Caso 18 (dano a 3,0 m com 3 entalhes)	273
5.12.19	–Resumo e observações sobre os ensaios experimentais.....	277
6.	- ANÁLISE NUMÉRICA.....	290

6.1	-MODELAGEM NUMÉRICA ELEMENTO SOLID45	295
6.2	- DISCRETIZAÇÃO DA VIGA (GERAÇÃO DA MALHA).....	297
6.3	- SIMULAÇÃO DO DANO	298
6.4	- APOIOS	299
6.5	- MASSA ADICIONAL	299
6.6	- TIPO DE ANÁLISE (TRANSIENTE)	301
6.7	- AMORTECIMENTO DA ESTRUTURA	302
6.8	- TEMPO DE ANÁLISE (T)	310
6.9	- ESPECTRO DE ACELERAÇÕES (SINAL TEMPORAL X(T)).....	311
6.10	- INCLUSÃO DO RUÍDO NO SINAL	312
6.11	JANELAMENTO.....	315
6.12	-APLICAÇÃO FFT E CORREÇÃO DE FREQUÊNCIAS.....	316
6.13	RESULTADOS	317
6.13.1	– Caso 1 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 1 entalhe)	317
6.13.2	– Caso 2 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes).....	337
6.13.3	– Caso 3 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes).....	341
6.13.4	– Caso 4 (Viga intacta L = 6,0 m).....	345
6.13.5	– Caso 5 (dano 2 a 5,6 m com 1 entalhe).....	347
6.13.6	– Caso 6 (dano 2 a 5,6 m com 2 entalhes)	351
6.13.7	– Caso 7 (dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)	355
6.13.8	– Caso 8 (dano 1 a 5,0 m com 1 entalhe e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)	359
6.13.9	– Caso 9 (dano 1 a 5,0 m com 2 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes).....	363
6.13.10	– Caso 10 (dano 1 a 5,0 m com 3 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)	367
6.13.11	– Caso 11 (Viga intacta).....	374
6.13.12	–Caso 12 (dano 1 a 1,5 m com 1 entalhe).....	376
6.13.13	–Caso 13 (dano 1 a 1,5 m com 2 entalhes)	380
6.13.14	–Caso 14 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes)	383
6.13.15	–Caso 15 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes) .	387
6.13.16	–Caso 16 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes) .	387
6.13.17	–Caso 17 (dano a 3,0 m com 1 entalhe)	387
6.13.18	–Caso 18 (dano a 3,0 m com 3 entalhes)	392
6.13.19	–Resumo e observações análise numérica.	396
7	-DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO VIGA INTACTA SOB AÇÃO DE UMA MASSA CONCENTRADA.	402
7.1	MÉTODO DE GALERKIN	403
8	- CONCLUSÕES	410
8.1	- EFICÁCIA DO MÉTODO PROPOSTO	410
8.2	- ANÁLISE DO RUÍDO NO SINAL	411
8.3	ANÁLISE DA MASSA ADICIONAL	411
8.4	- DIFERENÇA ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA	412
8.5	- APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO	413
8.6	- CONSIDERAÇÕES FINAIS	413
8.7	- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	414
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	415
	APÊNDICES	420
	APÊNDICE A. -DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO DA VIGA DE EULLER BERNOULLI. 421	

APÊNDICE B. – RESULTADOS DA ANÁLISE MODAL PREVIA	429
APÊNDICE C. - SCRIPT UTILIZADO PARA GERAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS - ANÁLISE DINÂMICA DAS VIGAS COM O ELEMENTO SOLID45. 446	
APÊNDICE D. – VERIFICAÇÃO CARGA ESTÁTICA MÁXIMA DA VIGA....	451
Verificação carga máxima da viga	451
Verificação da seção quanto à ocorrência de flambagem local.....	451

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Diferença TCW e TDW (Ovanesova, 2000).....	73
Tabela 3.2- Propriedades funções wavelet-mãe.	82
Tabela 3.3- Propriedades funções wavelet-mãe.	83
Tabela 3.4- Funções wavelet disponíveis no programa MATLAB.....	85
Tabela 4.1- Funções wavelet mãe utilizadas.	95
Tabela 4.2 - Características nominais da viga (Pfeil (2009))	99
Tabela 4.3- Área seção transversal viga metálica.....	100
Tabela 4.4- Momento de Inércia I_x	101
Tabela 4.5 - Determinação da densidade das vigas.....	102
Tabela 4.6 - Valores de λ para viga Livre- Livre.	103
Tabela 4.7- Valores de λ para viga Apoiada-Apoiada.	103
Tabela 4.8 - Estimativa módulo de elasticidade frequências viga L-L.	103
Tabela 4.9 - Estimativa módulo de elasticidade frequências viga A-A.....	104
Tabela 4.10 - Cálculo desvio padrão.	105
Tabela 4.11 - Melhor estimativa de E.	105
Tabela 4.12- Características elemento SOLID45.....	1071
Tabela 4.13 - Convergência malhado elemento SOLID45.....	107
Tabela 4.14 - Elementos eliminados para cada caso.	110
Tabela 4.15 - Frequências modelagem numérica elemento SOLID45.....	111
Tabela 4.16- Modos de Vibração Modelagem Numérica Beam3.	112
Tabela 4.17- Resumo Casos de dano.....	130
Tabela 5.1 - Algoritmo MATLAB para filtrar dados.	141
Tabela 5.2- Frequências experimentais L-L.	142
Tabela 5.3- Modos de vibração viga L-L.	144
Tabela 5.4 - Frequências experimentais A-A.	147
Tabela 5.5 - Modos de vibração viga A-A.	149
Tabela 5.6 - Algoritmo utilizado para processamento de sinais.....	153
Tabela 5.7 - Configurações equipamento	157
Tabela 5.8 – Avaliação resultados análise experimental.....	279
Tabela 6.1- Propriedades geométricas e do material – modelagem numérica.	292
Tabela 6.2 – Frequências obtidas na modelagem numérica com o elemento BEAM188.	293

Tabela 6.3 – Frequências obtidas na modelagem numérica com o elemento BEAM3.	293
Tabela 6.4 – Frequências obtidas na modelagem numérica com o elemento SHELL63..	293
Tabela 6.5 – Frequências obtidas na modelagem numérica com o elemento SOLID45...	294
Tabela 6.6 - Características do elemento SOLID45.....	297
Tabela 6.7 - Convergência malha do modelo com o elemento SOLID45.....	298
Tabela 6.8 – Frequências e coeficientes de amortecimento ARTeMIS	309
Tabela 6.9 – Coeficientes de Rayleigh análise experimental utilizados na análise numérica.	310
Tabela 6.10 – Configurações do equipamento adotadas na análise numérica.....	310
Tabela 6.11 - Avaliação resultados análise numérica.....	396
Tabela 6.12 – Diferença seção transversal.	400
Tabela A.1- Frequências (Hz) Análíticas viga biapoiada.....	428
Tabela D.1- Carga máxima que pode ser aplicada na viga intacta.....	456

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Inspeção de Estruturas.	40
Figura 2.1- Estudo identificação do dano (Ovanesova, 2000)	47
Figura 2.2- Cálculo de frequências viga danificada (Vahit Mermertas (2001)).....	48
Figura 2.3- Local do dano (Rucka e Wilde, 2006)	48
Figura 2.4- Identificação do dano na viga -Transformada Continua de Wavelet (TCW) (Rucka e Wilde, 2006).....	49
Figura 2.5- Identificação do dano na placa -Transformada Continua de Wavelet (TCW) (Rucka e Wilde, 2006).....	49
Figura 2.6- Estudo identificação do dano (Zhong e Oyadiji, 2007)	50
Figura 2.7- Estudo identificação do dano (Zhong; Oyadiji (2008))	50
Figura 2.8 - Estudo identificação do dano (Estrada, 2008)	51
Figura 2.9- Estudo identificação do dano (Zhichun e Le, 2010).....	51
Figura 2.10- Estudo identificação do dano (Papatheou et al., 2010).....	52
Figura 2.11- Análise Experimental (Radzieński et al., 2011)	53
Figura 2.12- Identificação do dano (Radzieński et al., 2011).....	53
Figura 2.13- Estudo Identificação do dano (Silva, 2011).....	54
Figura 2.14- Estudo identificação do dano (Wang e Li, 2012)	54
Figura 2.15- Estudo identificação do dano (Peng et al., 2013)	55
Figura 2.16- Estudo identificação do dano (Eun et al., 2014).....	55
Figura 2.17- Estudo identificação do dano (Silva, 2015)	56
Figura 2.18- Estudo identificação do dano (Gillich et al. (2017)).....	56
Figura 2.19- Estudo identificação do dano (Gillich et al. (2017)).....	57
Figura 2.20- Dois sinais com frequências diferentes.....	62
Figura 2.21- Soma dos sinais anteriores.....	62
Figura 2.22- Transformada de Fourier Discreta (TFD).....	63
Figura 2.23- Exemplo de sinais no domínio do tempo versus domínio da frequência.	63
Figura 2.24 - (a) Séries temporais de três argumentos de uma função seno; (b) Série temporal criada pela soma de cada série do gráfico superior (Bolzan, 2006).	64
Figura 2.25 – Espectro de frequência obtido pela TF da série temporal (Bolzan, 2006)...	65
Figura 2.26 - TF aplicada em cada segmento da série temporal da Figura 2.29b (Bolzan, 2006).....	66

Figura 2.27-Janelas Hann e Hamming (National Instrument, 2015)	68
Figura 2.28-Janela exponencial (Fladung (1997)).....	69
Figura 3.1- Transformada de Wavelet (modificada, Misiti e Poggi, 2001).....	70
Figura 3.2. Pontos de descontinuidade no sinal (modificada, Misiti e Poggi, 2001).	70
Figura 3.3- Coeficientes Fourier (Weeks, 2012).	71
Figura 3.4- Coeficientes Wavelet (Misiti e Poggi, 2001).....	71
Figura 3.5- Comparação sinais: Transformada Fourier - Transformada de Wavelet (Misiti e Poggi, 2001).	72
Figura 3.6- Processo Transformada de Wavelet (modificada, Misiti e Poggi, 2001).	74
Figura 3.7- Escala Transformada de Wavelet (Weeks, 2012).....	75
Figura 3.8- Função Wavelet (Weeks, 2012).....	75
Figura 3.9- Ilustração cálculo coeficientes wavelet (modificada, Misiti e Poggi, 2001). ...	76
Figura 3.10- Ilustração escala wavelet (modificada, Misiti e Poggi, 2001)..	76
Figura 3.11- Explicação eixos dos gráficos da TCW (modificado, Gutierrez, 2002).	77
Figura 3.12- Exemplo gráficos TCW (Misiti <i>et al</i> , 2002).....	77
Figura 3.13- Função wavelet Harr (Misiti e Poggi, 2001).	79
Figura 3.14- Funções wavelet- Daubechies (Weeks, 2012).....	79
Figura 3.15- Funções wavelet Biortognais (Daubechies (1992)).....	80
Figura 3.16- Funções wavelet coiflet (Daubechies, 1992).	81
Figura 3.17- Função wavelet Symlet (Weeks, 2012).	81
Figura 3.18- Janela "wavemenu"-MATLAB.....	85
Figura 3.19- Spline de grau 0 (Boor, 1990).....	87
Figura 3.20- Spline de grau 1 (Boor, 1990).....	87
Figura 4.1- Discretização da viga.	91
Figura 4.2- Posicionamento da massa adicional no primeiro nó.	92
Figura 4.3- Posicionamento da massa adicional no segundo nó.	92
Figura 4.4 - Posicionamento da massa adicional no terceiro nó.	93
Figura 4.5 - Posicionamento da massa adicional no nó <i>n</i>	93
Figura 4.6 - Plotagem das frequências obtidas para cada posição da massa.	94
Figura 4.7- Interpolação do gráfico obtido na Figura 4.6.....	94
Figura 4.8 - Gráfico Coeficiente Wavelet vs. Número do Elemento.	96
Figura 4.9 - Estrutura geral da tese.....	97
Figura 4.10 - Metodologia para a identificação de danos.....	98
Figura 4.11 - Amostras da viga Perfil-I Viga V1 e V2.....	99

Figura 4.12- Medição área da seção transversal do perfil I.....	100
Figura 4.13 - Seção transversal do perfil - AutoCAD.	100
Figura 4.14- Cálculo momento de inércia Ix (AutoCAD 2015).....	101
Figura 4.15- Medição densidade.	101
Figura 4.16 - Elemento SOLID45, da Biblioteca (ANSYS, 2007).	106
Figura 4.17 - Modelagem 3-D com o elemento SOLID45, da Biblioteca (ANSYS, 2007).	107
Figura 4.18 - Gráfico da convergência para o elemento SOLID45.....	108
Figura 4.19 - Malha gerada no ANSYS - elemento SOLID45 (ANSYS, 2007).....	109
Figura 4.20 - Condições de contorno - elemento SOLID45 (ANSYS, 2007).....	109
Figura 4.21 - Simulação do dano - elemento SOLID45 (ANSYS, 2007).	110
Figura 4.22 - Elemento mass21 na modelagem 3D.....	111
Figura 4.23-Primeiro e Segundo modo de vibração.	112
Figura 4.24 -Terceiro e Quarto Modo de vibração.....	112
Figura 4.25 - Gráficos Frequências vs. Posição de massa.....	114
Figura 4.26- Gráficos Frequências vs. Posição de massa.....	114
Figura 4.27 - Interpolação Cubic Spline.....	115
Figura 4.28 - Interpolação Cubic Spline.....	115
Figura 4.29- TDW Caso1.	116
Figura 4.30- TDW Caso1.	116
Figura 4.31 - TDW (db5) – Caso1.....	116
Figura 4.32 - Gráficos Frequências vs. Posição de massa.....	117
Figura 4.33 - Gráficos Frequências vs. Posição de massa.....	117
Figura 4.34 - Interpolação Cubic Spline.....	118
Figura 4.35 - Interpolação Cubic Spline.....	118
Figura 4.36- TDW Caso2.	119
Figura 4.37 - TDW Caso2.	119
Figura 4.38- TDW (db5) – Caso2.....	119
Figura 4.39 - Caso 1.	121
Figura 4.40 - Caso 2.	121
Figura 4.41 - Caso 3.	122
Figura 4.42 - Caso 4 –viga intacta.....	122
Figura 4.43- Caso 5.	123
Figura 4.44- Caso 6.	123

Figura 4.45- Caso 7.	124
Figura 4.46- Caso 8.	124
Figura 4.47- Caso 9.	125
Figura 4.48- Caso 10.	125
Figura 4.49- Caso 11- viga intacta.	126
Figura 4.50- Caso 12.	126
Figura 4.51- Caso 13.	127
Figura 4.52- Caso 14.	127
Figura 4.53- Caso 15.	128
Figura 4.54- Caso 16.	128
Figura 4.55- Caso 17.	129
Figura 4.56- Caso 18.	129
Figura 5.1 - Simulação do dano.....	131
Figura 5.2 - Sistema de apoios da viga.....	132
Figura 5.3 - Sistema de apoios da viga.....	133
Figura 5.4 - Massa adicional.	133
Figura 5.5 - Montagens massa adicional testados.	134
Figura 5.6 - Instrumentação do ensaio: acelerômetros.	135
Figura 5.7 - Instrumentação do ensaio: (a) condicionador de sinal; (b) martelo.....	135
Figura 5.8 – Sistema de ensaio completo.	135
Figura 5.9 – Posicionamento acelerômetros.....	136
Figura 5.10 – Discretização da viga – Ensaio experimentais.	136
Figura 5.11 – Ensaio viga Livre-livre.	138
Figura 5.12 – Discretização da viga.	138
Figura 5.13 – Software LabView.	139
Figura 5.14 – Arquivo txt, gerado pelo Software LabView.	140
Figura 5.15 – Arquivo txt, filtrado.	140
Figura 5.16 – Interface gráfica – Software ARTeMIS.	142
Figura 5.17 – Modos de vibração 1 e 2 viga L-L.	142
Figura 5.18 – Modos de vibração 3 e 4 viga L-L.	143
Figura 5.19 – Ensaio viga Apoiada – Apoiada (A-A).....	146
Figura 5.20 – Apoios (viga A-A)	146
Figura 5.21 – Posição dos acelerômetros ensaio viga A-A.	147
Figura 5.22 – Modos de vibração 1 e 2 viga A-A.	148

Figura 5.23 – Modos de vibração 3 e 4 viga A-A.	148
Figura 5.24 - Ensaio viga intacta + massa adicional (10 kg).....	151
Figura 5.25 - Arquivo correspondente ao espectro de acelerações.	152
Figura 5.26- Janela de Hanning.....	154
Figura 5.27 - Aplicação janela Hanning (National Instruments (2009)).....	154
Figura 5.28 - Espectro de acelerações nó (posição da massa nó 14).....	155
Figura 5.29 - Espectro de acelerações – janela de Hanning.	155
Figura 5.30 - Espectro de Frequências (FFT).....	156
Figura 5.31 - Frequência vs. Posição de massa (m = 10 kg).....	156
Figura 5.32 - Espectro de acelerações	158
Figura 5.33 - Espectro de acelerações com incremento do vetor zeros.....	158
Figura 5.34 - Algoritmo matlab para aplicação da janela exponencial.	159
Figura 5.35 - Sinal temporal $x(t)$ janelado.....	160
Figura 5.36 - Algoritmo FFT matlab.....	160
Figura 5.37 - Algoritmo FFT matlab.....	161
Figura 5.38 - FFT matlab primeira frequência.	161
Figura 5.39 - Linhas espectrais.....	162
Figura 5.40 - Correção pela janela retangular (Ming; Kang (1996)).....	164
Figura 5.41 - Correção janela Hanning (Ming; Kang (1996)).....	165
Figura 5.42 - Espectro de frequência – Janela de Hanning (Zhong et al. (2008)).....	167
Figura 5.43- Espectro de frequência – janela de Hanning	168
Figura 5.44 - Configurações de apoios testadas.	170
Figura 5.45 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso1.	172
Figura 5.46 - Descrição danos Caso 1	172
Figura 5.47 - Posição de Massa (M=1,168 kg) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1...	173
Figura 5.48 - Posição de Massa (M= 1,168 kg) vs. Segunda Frequência (F1) - Caso 1..	173
Figura 5.49 - Posição de Massa (M = 1,168kg) vs. Terceira Frequência (F1) - Caso 1...	173
Figura 5.50 - Posição de Massa (M = 1,168 kg) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1..	174
Figura 5.51 - Posição de Massa (M = 1,168 kg) vs. Segunda Frequência (F1) - Caso 1..	174
Figura 5.52 - Posição de Massa (M = 1,168 kg) vs. Terceira Frequência (F1) - Caso 1...	175
Figura 5.53 - Posição de Massa (M = 1,168 kg) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1..	175
Figura 5.54 - Posição de Massa (M = 1,168 kg) vs. Segunda Frequência (F1) - Caso 1..	175
Figura 5.55 - Posição de Massa (M = 1,168 kg) vs. Terceira Frequência (F1) - Caso 1...	176
Figura 5.56 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso1.	176

Figura 5.57- Resultado do método de correção de frequências.....	177
Figura 5.58- Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1)	177
Figura 5.59 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	178
Figura 5.60 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso1	178
Figura 5.61 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	179
Figura 5.62 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	179
Figura 5.63 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso1.....	180
Figura 5.64 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	180
Figura 5.65 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	181
Figura 5.66 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso1.	181
Figura 5.67 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	182
Figura 5.68 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	182
Figura 5.69 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso1.	183
Figura 5.70 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	183
Figura 5.71- Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	183
Figura 5.72 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso1.....	184
Figura 5.73 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	184
Figura 5.74 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	184
Figura 5.75 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso1.	185
Figura 5.76 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	185
Figura 5.77 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	186
Figura 5.78 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso1.	186
Figura 5.79 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	187
Figura 5.80 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	187
Figura 5.81 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso1.....	188
Figura 5.82 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	188
Figura 5.83 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	188
Figura 5.84 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 2.	189
Figura 5.85 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 2.	190
Figura 5.86 - Caso 2 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	190
Figura 5.87 - Caso 2 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	190
Figura 5.88 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 2.	191
Figura 5.89 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	192
Figura 5.90 - Caso 2 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	192

Figura 5.91 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 2.....	193
Figura 5.92 - Caso 2 – TDW – Terceira Frequência (F3).	193
Figura 5.93 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	194
Figura 5.94 - Discretização da viga – Caso 3.....	194
Figura 5.95 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 3.	195
Figura 5.96 - Caso 3 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	195
Figura 5.97 - Caso 3 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	195
Figura 5.98 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso1.	196
Figura 5.99 - Caso 2 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	196
Figura 5.100 - Caso 2 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	197
Figura 5.101 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso3.....	197
Figura 5.102 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	198
Figura 5.103 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	198
Figura 5.104 - Discretização da viga – Caso 4.	199
Figura 5.105 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 4.	199
Figura 5.106 - Caso 4 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	199
Figura 5.107 - Caso 4 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	200
Figura 5.108 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 4.	200
Figura 5.109 - Caso 4 – TDW – segunda Frequência (F2).	201
Figura 5.110 - Caso 4 – TDW – segunda Frequência (F2).	201
Figura 5.111 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 4.....	201
Figura 5.112 - Caso 4 – TDW – terceira Frequência (F3).....	202
Figura 5.113 - Caso 4 – TDW – terceira Frequência (F3).....	202
Figura 5.114 - Dano Caso 5.....	203
Figura 5.115 - Discretização da viga - Caso 5.....	203
Figura 5.116 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 5.	203
Figura 5.117 - Caso 5 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	204
Figura 5.118 - Caso 5 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	204
Figura 5.119 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 5.	205
Figura 5.120 - Caso 5 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	205
Figura 5.121 - Caso 5 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	205
Figura 5.122 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3)-Caso 5.....	206
Figura 5.123 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 5.	206
Figura 5.124 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 5.	206

Figura 5.125 - Dano Caso 6.....	207
Figura 5.126 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 6.	207
Figura 5.127 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	208
Figura 5.128 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	208
Figura 5.129 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 6.	209
Figura 5.130 - Caso 6 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	209
Figura 5.131 - Caso 6 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	209
Figura 5.132 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 5.	210
Figura 5.133 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	210
Figura 5.134 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	210
Figura 5.135 - Dano Caso 7.....	211
Figura 5.136 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 7.	211
Figura 5.137 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	212
Figura 5.138 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	212
Figura 5.139 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 7.	212
Figura 5.140 - Caso 7 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	213
Figura 5.141 - Caso 7 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	213
Figura 5.142 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 5.	214
Figura 5.143 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	214
Figura 5.144 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	214
Figura 5.145 - Discretização Caso 8.....	215
Figura 5.146 - Dano Caso 8.....	215
Figura 5.147 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 8.	215
Figura 5.148 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	216
Figura 5.149 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	216
Figura 5.150 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 8.	217
Figura 5.151 - Caso 8 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	217
Figura 5.152 - Caso 8 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	217
Figura 5.153 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 8.	218
Figura 5.154 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	218
Figura 5.155 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	218
Figura 5.156 - Dano Caso 9.....	219
Figura 5.157 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 9.	219
Figura 5.158 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	220

Figura 5.159 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	220
Figura 5.160 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 9.	221
Figura 5.161 - Caso 9 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	221
Figura 5.162 - Caso 9 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	221
Figura 5.163 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 5.	222
Figura 5.164 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	222
Figura 5.165 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	223
Figura 5.166 - Dano Caso 10.....	223
Figura 5.167 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	223
Figura 5.168 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	224
Figura 5.169 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	224
Figura 5.170 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	225
Figura 5.171 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	225
Figura 5.172 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	225
Figura 5.173 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	226
Figura 5.174 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	226
Figura 5.175 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	226
Figura 5.176 - Testes massa adicional Caso 10.....	227
Figura 5.177 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	227
Figura 5.178 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	228
Figura 5.179 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	228
Figura 5.180 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	229
Figura 5.181 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	229
Figura 5.182 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	229
Figura 5.183 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	230
Figura 5.184 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	230
Figura 5.185 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	230
Figura 5.186 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	231
Figura 5.187 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	231
Figura 5.188 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	232
Figura 5.189 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	232
Figura 5.190 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	233
Figura 5.191 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	233
Figura 5.192 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	233

Figura 5.193 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	234
Figura 5.194 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	234
Figura 5.195 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	235
Figura 5.196 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	235
Figura 5.197 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	235
Figura 5.198 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	236
Figura 5.199 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	236
Figura 5.200 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	236
Figura 5.201- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	237
Figura 5.202 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	237
Figura 5.203 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	238
Figura 5.204 - Discretização da viga – Caso 11.....	238
Figura 5.205 - Montagem experimental viga intacta – Caso 11.....	238
Figura 5.206 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 11.	239
Figura 5.207- Caso 11 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	239
Figura 5.208 - Caso 11 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	239
Figura 5.209 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 11.	240
Figura 5.210 - Caso 11 – TDW – segunda Frequência (F2).	240
Figura 5.211 - Caso 12 – TDW – segunda Frequência (F2).	241
Figura 5.212 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 11.....	241
Figura 5.213 - Caso 11 – TDW – terceira Frequência (F3).....	242
Figura 5.214 - Caso 11 – TDW – terceira Frequência (F3).....	242
Figura 5.215 - Discretização da viga – Caso 12.....	243
Figura 5.216 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 12.	244
Figura 5.217 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	244
Figura 5.218 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	244
Figura 5.219 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso12.	245
Figura 5.220 - Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	245
Figura 5.221 - Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	245
Figura 5.222 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 12.....	246
Figura 5.223 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 12.....	246
Figura 5.224 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 12.....	247
Figura 5.225 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 12.	247
Figura 5.226 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	248

Figura 5.227 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	248
Figura 5.228 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso12.	248
Figura 5.229 - Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	249
Figura 5.230 - Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	249
Figura 5.231 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 12.....	249
Figura 5.232 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 12.....	250
Figura 5.233 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 12.....	250
Figura 5.234 - Caso 13.	251
Figura 5.235 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 13.	251
Figura 5.236 - Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	252
Figura 5.237 - Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	252
Figura 5.238 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso13.	252
Figura 5.239 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	253
Figura 5.240 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	253
Figura 5.241 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 13	253
Figura 5.242 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).	254
Figura 5.243 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).	254
Figura 5.244- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 13.	255
Figura 5.245 - Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1)	255
Figura 5.246 - Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1)	255
Figura 5.247- Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso13.	256
Figura 5.248 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	256
Figura 5.249 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	256
Figura 5.250 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 13.....	257
Figura 5.251 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).	257
Figura 5.252 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).	257
Figura 5.253 - Caso 14.	258
Figura 5.254 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 14.	258
Figura 5.255 - Caso 14 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	259
Figura 5.256 - Caso 14 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	259
Figura 5.257- Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso14.	259
Figura 5.258 - Caso 14 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	260
Figura 5.259 - Caso 14 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	260
Figura 5.260 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 14.....	260

Figura 5.261 - Caso 14 – TDW – Terceira Frequência (F3).	261
Figura 5.262 - Caso 14 – TDW – Terceira Frequência (F3).	261
Figura 5.263- Caso 15.	262
Figura 5.264 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 15.	262
Figura 5.265 - Caso 15 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	263
Figura 5.266 - Caso 15 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	263
Figura 5.267 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso15.	263
Figura 5.268 - Caso 15 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	264
Figura 5.269 - Caso 15 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	264
Figura 5.270 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 15.....	264
Figura 5.271 - Caso 15 – TDW – Terceira Frequência (F3).	265
Figura 5.272 - Caso 15 – TDW – Terceira Frequência (F3).	265
Figura 5.273 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 16.	266
Figura 5.274 - Caso 16 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	266
Figura 5.275 - Caso 16 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	266
Figura 5.276 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso16.	267
Figura 5.277 - Caso 16 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	267
Figura 5.278 - Caso 16 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	267
Figura 5.279 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 16.....	268
Figura 5.280 - Caso 16 – TDW – Terceira Frequência (F3).	268
Figura 5.281 - Caso 16 – TDW – Terceira Frequência (F3).	268
Figura 5.282 - Caso 17.	269
Figura 5.283 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 17	270
Figura 5.284 - Caso 17 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	270
Figura 5.285 - Caso 17 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	270
Figura 5.286 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso17.	271
Figura 5.287 - Caso 17 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	271
Figura 5.288 - Caso 17 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	271
Figura 5.289 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 17.....	272
Figura 5.290 - Caso 17 – TDW – Terceira Frequência (F3).	272
Figura 5.291 - Caso 17 – TDW – Terceira Frequência (F3).	272
Figura 5.292 - Caso 18.	273
Figura 5.293 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 18.	273
Figura 5.294 - Caso 18 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	274

Figura 5.295 - Caso 18 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	274
Figura 5.296 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2)-Caso18.	274
Figura 5.297 - Caso 18 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	275
Figura 5.298 - Caso 18 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	275
Figura 5.299 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 18	275
Figura 5.300 - Caso 18 – TDW – Terceira Frequência (F3).	276
Figura 5.301 - Caso 18 – TDW – Terceira Frequência (F3).	276
Figura 5.302 - Deslocamento nulo – Caso 18.	277
Figura 5.303- Posição dano viga 5m	279
Figura 5.304- Descrição dano 3 entalhes.....	280
Figura 5.305 – Resumo Primeira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 5m).....	280
Figura 5.306 - Resumo Segunda Frequência vs. Posição da Massa (viga de 5m).	281
Figura 5.307 – Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada.	281
Figura 5.308– Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada.	282
Figura 5.309– Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada (F1).	283
Figura 5.310– Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada (F2).	283
Figura 5.311– Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada (F3).	284
Figura 5.312– Resumo Primeira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6m).....	284
Figura 5.313 – Resumo Primeira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6 m).....	285
Figura 5.314 – Resumo Segunda Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6 m).....	285
Figura 5.315 – Resumo Segunda Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6 m).....	286
Figura 5.316 – Resumo Terceira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6 m).	286
Figura 5.317 – Resumo Terceira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6 m).	287
Figura 5.318– Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada.	288
Figura 5.319– Gráfico Coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada.	289
Figura 5.320 – Gráfico Coeficientes Wavelets (db5) viga intacta.	289
Figura 6.1 - Elemento BEAM3, da Biblioteca (ANSYS, 2007).	291
Figura 6.2 - BEAM188, elemento do ANSYS.	291
Figura 6.3 - Elemento SHELL63, da Biblioteca (ANSYS, 2007).....	292
Figura 6.4 – Fluxograma modelagem numérica transiente.	295
Figura 6.5 - Elemento SOLID45 obtido da Biblioteca do ANSYS (ANSYS, 2007).	295
Figura 6.6 - Modelagem 3-D com o elemento SOLID45 obtido da Biblioteca do ANSYS (ANSYS, 2007).	296
Figura 6.7 – Discretização da viga na modelagem numérica.	297

Figura 6.8 - Gráfico da convergência para o elemento SOLID45.....	298
Figura 6.9 – Simulação do dano na análise numérica.	299
Figura 6.10 – Apoios análise numérica.	299
Figura 6.11- Características do elemento MASS21 (ANSYS, 2007).	300
Figura 6.12- Aplicação do elemento MASS21 na modelagem numérica.	300
Figura 6.13- Características inércia rotacional gerada pelas chapas de aço.....	300
Figura 6.14 – Força de excitação considerada no modelo numérico.....	301
Figura 6.15 – Função impulso $F(t)$	302
Figura 6.16 – Amortecimento de Rayleigh (Ansys (2012)).	305
Figura 6.17 – Montagem experimental análise modal.	305
Figura 6.18 – Análise modal experimental para o cálculo do amortecimento.	306
Figura 6.19 – Processamento dados experimentais no software ARTeMIS.	306
Figura 6.20- Inserção das leituras dos acelerômetros no software ARTeMIS.	307
Figura 6.21 – Vinculação dos sinais dos acelerômetros no software ARTeMIS.	307
Figura 6.22 – Método EFDD.....	308
Figura 6.23 – Primeiro modo de vibração $F1=9,357\text{Hz}$, amortecimento $\xi=4,612\%$	308
Figura 6.24 – Segundo modo de vibração $F2=34,058\text{Hz}$, amortecimento $\xi=1,601\%$	309
Figura 6.25 – Terceiro modo de vibração $F3=83,199\text{Hz}$, amortecimento $\xi=0,489\%$	309
Figura 6.26 – Leitura acelerações na análise numérica.	311
Figura 6.27 – Modelo do espectro de aceleração obtido do ANSYS.....	312
Figura 6.28 – Sinal temporal $a(t)$, ruído $r(t)$ de 1%.....	313
Figura 6.29 – Sinal temporal $a(t)$ com ruído $r(t)$ de 2%.....	314
Figura 6.30 – Sinal temporal $a(t)$ com ruído $r(t)$ de 5%.....	314
Figura 6.31 – Sinal temporal $a(t)$ com a adição do ruído $r(t)$	315
Figura 6.32- Interpolação Espectro de Frequências.	315
Figura 6.33 – Aplicação janela exponencial.....	316
Figura 6.34 – Espectro de Frequências.....	316
Figura 6.35 – Discretização modelo numérico ANSYS.....	317
Figura 6.36 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.	318
Figura 6.37 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	318
Figura 6.38 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	319
Figura 6.39 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 1.	319
Figura 6.40 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	320
Figura 6.41- Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	320

Figura 6.42 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 1.....	321
Figura 6.43 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	321
Figura 6.44 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	321
Figura 6.45 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.	322
Figura 6.46 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	322
Figura 6.47 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	323
Figura 6.48 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 1.	323
Figura 6.49 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	324
Figura 6.50 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	324
Figura 6.51- Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 1.....	325
Figura 6.52 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	325
Figura 6.53 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	325
Figura 6.54 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.	326
Figura 6.55 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	326
Figura 6.56 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	327
Figura 6.57 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 1.	327
Figura 6.58 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	328
Figura 6.59 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	328
Figura 6.60 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 1.....	328
Figura 6.61- Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	329
Figura 6.62 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	329
Figura 6.63 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.	330
Figura 6.64 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	330
Figura 6.65 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	330
Figura 6.66 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2)-Caso 1.	331
Figura 6.67 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	331
Figura 6.68 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	331
Figura 6.69 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3)-Caso 1.....	332
Figura 6.70 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	332
Figura 6.71- Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	333
Figura 6.72- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1)-Caso 1	333
Figura 6.73 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	334
Figura 6.74 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	334
Figura 6.75 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2)-Caso 1.	335

Figura 6.76 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	335
Figura 6.77 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	335
Figura 6.78 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 1.....	336
Figura 6.79 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	336
Figura 6.80 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).	336
Figura 6.81- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1)-Caso 2.	338
Figura 6.82 - Caso 2 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	338
Figura 6.83 - Caso 2 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	338
Figura 6.84 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 2.	339
Figura 6.85 - Caso 2 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	339
Figura 6.86 - Caso 2 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	340
Figura 6.87 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 2.....	340
Figura 6.88 - Caso 2 – TDW – Terceira Frequência (F3).	341
Figura 6.89 - Caso 2 – TDW – Terceira Frequência (F3).	341
Figura 6.90 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 3.	342
Figura 6.91- Caso 3 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	342
Figura 6.92 - Caso 3 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	342
Figura 6.93 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 3.	343
Figura 6.94 - Caso 3 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	343
Figura 6.95 - Caso 3 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	343
Figura 6.96 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 3.....	344
Figura 6.97 - Caso 3 – TDW – Terceira Frequência (F3).	344
Figura 6.98 - Caso 3 – TDW – Terceira Frequência (F3).	345
Figura 6.99 - Discretização da viga – Caso 4.....	345
Figura 6.100 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 4.	346
Figura 6.101- Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 4.	346
Figura 6.102 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 4.....	347
Figura 6.103 - Discretização da viga - Caso 5.....	347
Figura 6.104 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 5.	348
Figura 6.105 - Caso 5 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	348
Figura 6.106 - Caso 5 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	348
Figura 6.107 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 5.	349
Figura 6.108 - Caso 5 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	349
Figura 6.109 - Caso 5 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	349

Figura 6.110 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 5.....	350
Figura 6.111 - Caso 5 – TDW – Terceira Frequência (F3).	350
Figura 6.112 - Caso 5 – TDW – Terceira Frequência (F3).	351
Figura 6.113 - Discretização da viga - Caso 6.....	351
Figura 6.114 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 6.	352
Figura 6.115 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	352
Figura 6.116 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	352
Figura 6.117 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 6.	353
Figura 6.118 - Caso 6 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	353
Figura 6.119 - Caso 6 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	353
Figura 6.120 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 6.	354
Figura 6.121- Caso 6 – TDW – Terceira Frequência (F3).	354
Figura 6.122 - Caso 6 – TDW – Terceira Frequência (F3).	355
Figura 6.123 - Discretização da viga - Caso 7.....	355
Figura 6.124 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1)-Caso 7.	356
Figura 6.125 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	356
Figura 6.126 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	356
Figura 6.127 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2)-Caso 7.	357
Figura 6.128 - Caso 7 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	357
Figura 6.129 - Caso 7 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	357
Figura 6.130 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 7.....	358
Figura 6.131 - Caso 7 – TDW – Terceira Frequência (F3).	358
Figura 6.132 - Caso 7 – TDW – Terceira Frequência (F3).	359
Figura 6.133 - Discretização da viga - Caso 8.....	359
Figura 6.134 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 8	360
Figura 6.135 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	360
Figura 6.136 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	360
Figura 6.137 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 8.	361
Figura 6.138 - Caso 8 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	361
Figura 6.139 - Caso 8 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	361
Figura 6.140 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 8.....	362
Figura 6.141 - Caso 8 – TDW – Terceira Frequência (F3).	362
Figura 6.142 - Caso 8 – TDW – Terceira Frequência (F3).	362
Figura 6.143 - Discretização da viga - Caso 9.....	363

Figura 6.144 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 9.	363
Figura 6.145 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	364
Figura 6.146 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	364
Figura 6.147 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2)-Caso 9.	365
Figura 6.148 - Caso 9 – TDW – Segunda Frequência (F2)	365
Figura 6.149 - Caso 9 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	365
Figura 6.150 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 9.....	366
Figura 6.151 - Caso 9 – TDW – Terceira Frequência (F3).	366
Figura 6.152 - Caso 9 – TDW – Terceira Frequência (F3).	366
Figura 6.153 - Discretização da viga - Caso 10.....	367
Figura 6.154 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	367
Figura 6.155 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	368
Figura 6.156 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	368
Figura 6.157 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 10.	369
Figura 6.158 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	369
Figura 6.159 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	369
Figura 6.160 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 10.....	370
Figura 6.161 - Caso 10 – TDW – Terceira Frequência (F3).	370
Figura 6.162 - Caso 10 – TDW – Terceira Frequência (F3).	370
Figura 6.163 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.	371
Figura 6.164 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	371
Figura 6.165 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	372
Figura 6.166 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 10.	372
Figura 6.167 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	373
Figura 6.168 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	373
Figura 6.169 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 10	373
Figura 6.170 - Caso 10 – TDW – Terceira Frequência (F3).	374
Figura 6.171 - Caso 10 – TDW – Terceira Frequência (F3).	374
Figura 6.172 - Discretização da viga – Caso 11.....	374
Figura 6.173 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1)-Caso 11.	375
Figura 6.174 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 11.	375
Figura 6.175 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 11.....	376
Figura 6.176 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 12.	376
Figura 6.177 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	377

Figura 6.178 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	377
Figura 6.179 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 2.	377
Figura 6.180 - Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	378
Figura 6.181- Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2)	378
Figura 6.182 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 2.....	379
Figura 6.183 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3).	379
Figura 6.184 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3).	379
Figura 6.185 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 13.	380
Figura 6.186 - Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	380
Figura 6.187- Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	381
Figura 6.188 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 13.	381
Figura 6.189 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	382
Figura 6.190 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	382
Figura 6.191 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 13.....	382
Figura 6.192 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).	383
Figura 6.193 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).	383
Figura 6.194 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 14.	384
Figura 6.195 - Caso 14 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	384
Figura 6.196 - Caso 14 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	384
Figura 6.197 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 14.	385
Figura 6.198 - Caso 14 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	385
Figura 6.199 - Caso 14 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	386
Figura 6.200 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 14.....	386
Figura 6.201 - Caso 14 – TDW – Terceira Frequência (F3).	387
Figura 6.202 - Caso 14 – TDW – Terceira Frequência (F3).	387
Figura 6.203 - Discretização da viga - Caso 17.....	388
Figura 6.204 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 17.	388
Figura 6.205 - Caso 17 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	389
Figura 6.206 - Caso 17 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	389
Figura 6.207 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 18.	389
Figura 6.208 - Caso 17 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	390
Figura 6.209 - Caso 17 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	390
Figura 6.210 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 17.....	391
Figura 6.211 - Caso 17 – TDW – Terceira Frequência (F3).	391

Figura 6.212 - Caso 17 – TDW – Terceira Frequência (F3).	391
Figura 6.213 - Discretização da viga - Caso 18.....	392
Figura 6.214- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1)-Caso 18	392
Figura 6.215 - Caso 18 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	393
Figura 6.216 - Caso 18 – TDW – Primeira Frequência (F1).....	393
Figura 6.217 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 18.	393
Figura 6.218 - Caso 18 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	394
Figura 6.219 - Caso 18 – TDW – Segunda Frequência (F2).....	394
Figura 6.220 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 18.	395
Figura 6.221 - Caso 18 – TDW – Terceira Frequência (F3).	395
Figura 6.222 - Caso 18 – TDW – Terceira Frequência (F3).	395
Figura 6.223 – Resumo Primeira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 5 m).....	397
Figura 6.224 – Resumo Segunda Frequência vs. Posição da Massa (viga de 5 m).....	397
Figura 6.225 – Resumo terceira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 5 m).	398
Figura 6.226 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso1.	398
Figura 6.227 - Comparação análise numérica vs. análise experimental.....	399
Figura 6.228 – Seção transversal aproximada.	399
Figura 6.229 – Variação do amortecimento com a posição de massa.	400
Figura 7.1 – 1ª frequência vs. posição de massa análise analítica (M = 3,266 kg).	405
Figura 7.2 – 2ª frequência vs. posição de massa análise analítica (M = 3,266 kg).	406
Figura 7.3 – 3ª frequência vs. posição de massa análise analítica (M = 3,266 kg).	406
Figura 7.4 – 1ª frequência vs. Posição de Massa análise numérica, experimental e analítica (M = 3,266 kg).....	407
Figura 7.5 – 2ª frequência vs. Posição de Massa análise numérica, experimental e analítica (M = 3,266 kg).....	407
Figura 7.6 - Frequência Fundamental viga biapoiada (Blevins, (1979)).....	408
Figura 7.7- Frequência Fundamental viga biapoiada.	409
Figura 8.1 – Dano 3 entalhes.	410
Figura 8.2 – Danos localizados no trecho central.....	410
Figura 8.3 – Danos localizados próximo aos apoios.	411
Figura B.1 – Gráficos de Frequência vs. Posição de massa.	429
Figura B.2 - Gráficos de Frequências vs. Posição de massa.	429
Figura B.3 - Interpolação da curva de frequência pelo método Cubic Spline.....	430
Figura B.4- Interpolação da curva de frequência pelo método Cubic Spline.....	430

Figura B.5- TDW Caso3.....	431
Figura B.6- TDW Caso 3.....	431
Figura B.7- TDW (db5) – Caso3.....	431
Figura B.8- Gráficos de Frequências vs. Posição de massa.	432
Figura B.9 – Gráficos de Frequências vs. Posição de massa.....	432
Figura B.10 – Interpolação das curvas pelo método Cubic Spline.....	433
Figura B.11 – Interpolação das curvas pelo método Cubic Spline.....	433
Figura B.12 - TDW Caso 4.....	433
Figura B.13- TDW Caso4.....	434
Figura B.14 - TDW (db5) – Caso 4.....	434
Figura B.15- Gráficos Frequências vs. Posição de massa.	435
Figura B.16- Gráficos das Frequências vs. Posição de massa.....	435
Figura B.17 – Interpolação da curva pelo método Cubic Spline.....	435
Figura B.18- Interpolação da curva pelo método Cubic Spline.	436
Figura B.19 - TDW Caso 5.....	436
Figura B.20 - TDW Caso 5.....	437
Figura B.21 - TDW (db5) – Caso 5.....	437
Figura B.22- Gráficos Frequências vs. Posição de massa.	438
Figura B.23- Gráficos das Frequências vs. Posição de massa.....	438
Figura B.24-Interpolação da curva pelo método Cubic Spline..	438
Figura B.25- Interpolação da curva pelo método Cubic Spline.	439
Figura B.26- TDW Caso6.....	439
Figura B.27- TDW Caso6.....	439
Figura B.28- TDW (db5) – Caso 6.....	440
Figura B.29- Gráficos Frequências vs. Posição de massa.	440
Figura B.30 - Gráficos das Frequências vs. Posição de massa.....	440
Figura B.31-Interpolação da curva pelo método Cubic Spline..	441
Figura B.32 – Interpolação da curva pelo método Cubic Spline.....	441
Figura B.33- TDW Caso 7.....	441
Figura B.34- TDW Caso 7.....	442
Figura B.35- TDW (db5) – Caso 7.....	442
Figura B.36- Gráficos Frequências vs. Posição de massa.	443
Figura B.37- Gráficos das Frequências vs. Posição de massa.....	443
Figura B.38 - Interpolação das curvas pelo método Cubic Spline.	443

Figura B.39 - Interpolação das curvas pelo método Cubic Spline.	444
Figura B.40 - TDW Caso 8.....	444
Figura B.41 - TDW Caso 8.....	444
Figura B.42 - TDW (db5) – Caso 8.....	445
Figura D.1- Flambagem local da mesa (Pfeil, 2009).....	452
Figura D.2- Flambagem local da alma (Pfeil, 2009).....	453
Figura D.3- Flambagem lateral por flexo-torção (Pfeil, 2009).....	454

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

K -	matriz de rigidez
K^{-1} -	inversa matriz de rigidez
M -	matriz de massa
C -	amortecimento
u -	vetor de deslocamentos
F -	vetor de forças
ΔK -	alterações na matriz de rigidez
B_i -	matriz Booleana
E_i -	rigidez
β -	razão entre a rigidez efetiva
D_i^M -	deslocamento medido
D_i^C -	deslocamento calculado
I -	momento de inércia
P -	carga
y -	deslocamentos
δ -	deslocamentos unitários
s -	Regularidade de uma função
nl -	número de elementos
α -	índice de dano
ψ -	modo de vibração, estrutura intacta
ψ^* -	modo de vibração, estrutura danificada
M -	momento
ϵ -	curvatura
U -	energia de deformação
ϕ -	modos de vibração estrutura intacta
ϕ^* -	modos de vibração estrutura danificada
N_t -	número de nós
ΔM -	perturbações matriz massa
F_5 -	assinatura
Δu_x^j -	diferenças deslocamentos eixo x
Δu_y^j -	diferenças deslocamentos eixo y

Δw -	diferenças entre as frequências
$\hat{f}(w)$ -	Transformada de Fourier da função $f(t)$
w -	frequência
$w(t)$ -	função janela
C -	coeficientes wavelet
a -	parâmetro de escala
b -	parâmetro de posição
W_{ψ}^f -	Transformada de Wavelet
$\psi^{a,b}$ -	funções wavelet-mãe
$F(w)$ -	Transformada de Fourier
$S(x)$ -	spline
$P_{in}(t)$ -	binômio de Newton
kN-	kilonewton
λ -	parâmetro adimensional utilizado para o cálculo da frequência natural;
Ω -	matriz diagonal com os quadrados das frequências naturais de vibração;
t -	tempo
ν -	coeficiente de Poisson
EI -	Rigidez à flexão
$\Delta\omega$ -	quadrados das diferenças entre as frequências naturais obtidas com a estrutura intacta (ω^i) e com a estrutura danificada (ω^d)
Δu -	diferença entre os deslocamentos nodais da estrutura intacta (u^i) e da estrutura danificada (u^d)
m -	massa por unidade de comprimento;
ρ -	massa específica
i -	índice de escala
MEF -	método dos elementos finitos
ND -	número de elementos danificados
COMAC -	Coordinate Modal Assurance Criterion
ID -	método índice de dano
MAC -	Modal Assurance Criterion
TF -	Transformada de Fourier
TPJF -	Transformada por Janelas de Fourier
TRF -	Transformada Rápida de Fourier

TDW -	Transformada Discreta de Wavelet
TCW -	Transformada Continua de Wavelet
MPa-	megapascal
2D-	duas dimensões
3D-	três dimensões
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PECC -	Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
CEB -	Comitê Euro-Internacional do Concreto
UnB-	Universidade de Brasília
ENC -	Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB
SHM-	Structural Health Monitoring
NDE-	Nondestructive examination
F-	Frequência
F1-	Primieira frequência
F2-	Segunda frequência
F3-	Terceira frequência
FFT-	Fast Fourier Transform
TRF-	Transformada Rapida de Fourier
AA-	Apoiada - Apoiada
LL-	Livre - Livre

1. – INTRODUÇÃO

As fissuras ocorrem frequentemente em membros estruturais e causam graves patologias estruturais ou colapso. Os efeitos desses danos influenciam na resposta dinâmica da estrutura (frequências e modos de vibração). Tais fissuras devem ser identificadas no seu estado inicial antes de comprometer a integridade da estrutura. Entretanto se a fissura é relativamente pequena, é difícil de detectar. .

O conceito de identificação estrutural foi introduzido na Engenharia Civil somente há duas décadas (Aktan et al., 1997) é importante que a engenharia proponha métodos eficazes e práticos para identificar este tipo de problema.

Assim sendo muitas fissuras superficiais em vigas de pontes, oleodutos superficiais, asas de aviões, podem ser detectadas utilizando-se técnicas de inspeção visual. Isto não é possível em estruturas com revestimento externo e isolamento ou fissuras superficiais em lugares de difícil acesso. Para superar estas dificuldades, técnicas não destrutivas tem sido aplicadas para possibilitar a tomada rápida de decisão quanto à minimização ou eliminação dos danos, visando uma manutenção adequada.

Como exemplo, poderemos citar que em estruturas de grande porte, a detecção de danos é uma questão muito importante do ponto de vista da segurança. Portanto, é essencial realizar a inspeção periódica em cada componente para detectar alterações na sua estabilidade estrutural. O custo de fazer reparos é geralmente menor em comparação a reconstrução parcial ou total do sistema estrutural.

Em pontes, os danos ocorrem em diferentes membros estruturais tais como: vigas longarinas, tabuleiro, vigas transversinas. Isso acontece em decorrência de muitos fatores, dentre eles, a ação de carregamentos cíclicos responsáveis pelo fenômeno da fadiga que pode chegar a comprometer seriamente a segurança da estrutura, das pessoas e veículos que circulam pela ponte.

Os procedimentos de manutenção e avaliação para pontes incluem: inspeção visual, ensaios de carga, ultrassom, raio X (Nasrollahi et al. (2017)). E na manutenção de oleodutos é comum o uso *pigs*, sigla que significa “pipeline inspection gauge” (Figura 1.1b). Estes dispositivos são lançados dentro do oleoduto e são impulsionados pelo próprio fluido para serem recebidos em qualquer outra estação (Bagheri et al. (2017)).



(a) Ponte de Omaha do Sul- sobre o rio Missouri (Tatsumi, 2007)



(b) *pigs*.

Figura 1.1- Inspeção de Estruturas.

Com o rápido progresso de dispositivos de medição e custos decrescentes de instrumentação, maior atenção tem sido dada à identificação de danos em estruturas. Essas necessidades exigem o desenvolvimento de novas tecnologias para identificação e avaliação estrutural com precisão. É por isso que o desenvolvimento de um método não destrutivo e mais eficaz para a detecção de danos nas estruturas é extremamente importante para o Monitoramento da Saúde Estrutural (MSE), termo mais conhecido em inglês como Structural Health Monitoring (SHM). O método utilizando a variação das frequências naturais associadas às Transformadas de Wavelet (TW) pode ser uma alternativa viável em relação aos demais métodos tradicionais, visto que pode ser aplicado utilizando apenas a resposta da estrutura danificada, isso se aproxima mais da realidade, já que a resposta da estrutura intacta é raramente conhecida (Estrada, 2008), especialmente em estruturas antigas.

O objetivo dos sistemas de identificação de danos é solucionar um problema inverso, isto é: identificar um sistema cujo sinal de entrada é desconhecido, mas o sinal de saída é dado. Isso significa que o objetivo de identificação de danos é a descrição de um modelo estrutural existente, com base em dados obtidos experimentalmente (resposta dinâmica ou estática). Muitas vezes, é desejável detectar irregularidades ou alterações da resposta da estrutura, considerando propriedades que foram alteradas pelo dano (Ren e Roeck (2002)).

Dessa forma, esta pesquisa está direcionada à aplicação do método de identificação baseado na análise das propriedades dinâmicas de vigas metálicas em escala real, submetidas à ação de uma massa móvel adicional que gera uma mudança progressiva

das frequências naturais devido ao posicionamento desta ao longo da estrutura. No entanto, a presença de um pequeno dano pode não ser tão evidente. Sendo assim, faz-se necessário o uso das Transformadas de Wavelet para auxiliar no processo de localização de danos, ou possíveis alterações devidas ao enfraquecimento da estrutura (Andreaus et al. (2017)).

1.1 – MOTIVAÇÃO

O desempenho estrutural de uma estrutura diminui ao longo de sua vida útil devido a diversos processos de deterioração a saber: fadiga, carbonatação, deslocamento do concreto, corrosão de armaduras, oxidação de estruturas metálicas, ligações, etc.. A falha de um elemento estrutural é responsável por perdas econômicas e também perda de vidas humanas, o que é mais grave ainda (Estrada (2008)).

Um dos requisitos mais importantes para a manutenção estrutural é a detecção de danos, ainda em fase inicial de desenvolvimento. As fissuras em elementos estruturais podem causar variações locais de rigidez que podem afetar o comportamento dinâmico da estrutura. Em particular, as alterações das frequências naturais e modos de vibração podem ocorrer por causa da existência de fissuras. Isto levou a proposta de utilizar a variação das frequências naturais e as wavelets, como método para identificar a presença de danos em estruturas metálicas, mais especificamente em vigas metálicas biapoiadas.

A escolha da condição de apoio da viga foi devido a existência de muitas pontes de pequenos vãos que utilizam vigas em longarinas metálicas biapoiadas, por isso interesse deste trabalho em utilizar perfis I. Os ensaios foram realizados no laboratório de vibrações da Universidade de Brasília, mas mesmo sendo executados dentro de um ambiente de laboratório, o tamanho dos perfis ensaiados e as dimensões correspondem a bitolas comerciais das estruturas que se encontram nos catálogos disponíveis no mercado.

Nesta pesquisa, foram escolhidos como parâmetro de medição das propriedades dinâmicas da estrutura as frequências naturais que agem como indicadores sensíveis da integridade estrutural. Portanto, uma análise periódica de medições de frequência pode ser usada para monitorar o estado da estrutura. Estas medições de frequência devidas a uma massa móvel adicional associadas às Transformadas de Wavelet fornecem uma técnica de avaliação de baixo custo e alta praticidade, por causa da facilidade na medição das frequências naturais, as quais precisam da leitura de poucos acelerômetros localizados estrategicamente ao longo da estrutura.

A premissa desta técnica baseada na variação das frequências naturais associadas às Transformadas de Wavelet está baseada em pequenas perturbações locais geradas por

um enfraquecimento da estrutura. Embora estas perturbações não possam ser evidentes através de análise convencional, elas são frequentemente detectáveis a partir das componentes da Wavelet, que é uma alternativa a maioria dos métodos baseados na Transformada de Fourier, o qual utiliza comparação entre a resposta da estrutura antes e após do dano (Taik et al. (2014)). A análise Wavelet ultrapassa estes problemas, conseguindo determinar a localização do dano a partir da resposta da estrutura danificada (Ovanesova 2000). As técnicas de processamento de sinais baseadas na análise de Fourier, por sua vez, apresentam apenas as componentes de frequência do sinal, mas não as suas ocorrências em intervalos de tempo específico.

Na Universidade de Brasília, estudantes de mestrado e doutorado fizeram estudos na área de identificação de danos, alguns dos trabalhos desenvolvidos foram feitos por: Caldeira (2009), Brito (2008), Silva (2011), Palechor (2013) e Silva (2015). A proposta deste trabalho é contribuir na linha de pesquisa e no desenvolvimento de metodologias capazes de identificar danos em estruturas utilizando somente a resposta da estrutura danificada.

1.2 – OBJETIVOS

1.2.1 - Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é implementar um método para identificação de danos utilizando a variação das frequências naturais geradas pela presença de uma massa móvel adicional, associada às Transformada de Wavelet. A eficácia do método será comprovada por meio da sua aplicação na resposta dinâmica de vigas metálicas em escala real. Esta resposta será obtida e comparada numérica e experimentalmente.

1.2.2 - Objetivos específicos

- Propor uma metodologia de identificação de danos em vigas metálicas em escala real e sob condições de apoio reais, metodologia baseada na variação das frequências naturais devidas a aplicação de uma massa móvel adicional associada às Transformadas de Wavelet;

- Validar a metodologia proposta por intermédio de ensaios experimentais (dinâmicos) e modelos numéricos (análise modal e transiente) desenvolvidos no ANSYS.
- Recomendar um roteiro da metodologia proposta e listar as considerações mais importantes para a sua aplicação.

1.3 – APECTOS INOVADORES E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Como caráter inovador dessa pesquisa, destaca-se a aplicação de um método baseado na variação das frequências naturais de vigas (perfis metálicos) causada pela adição de uma massa móvel no sistema para localizar o dano. Este método foi aplicado em vigas metálicas em escala real, com as dimensões e comprimentos encontrados nos catálogos dos principais fabricantes de aço do Brasil.

A validação desta metodologia foi desenvolvida de forma experimental e numérica, constatando-se a efetividade do método para danos localizados no trecho central da estrutura.

Além do exposto anteriormente, este trabalho utilizou testes de impacto e análise transiente, o que permitiria implementar o método mais facilmente na vida real, devido ao fato de que a estrutura somente precisaria de uma excitação de curta duração que poderia ser gerada, por exemplo em pontes pela excitação gerada pelo trânsito de veículos com a ponte em serviço.

Desta pesquisa, derivam-se duas publicações em anais de congressos, uma publicação em revista e três em processo de submissão, listadas a seguir:

Anais de Congressos:

- a) Método de identificação de danos em estruturas, baseado na variação das frequências naturais causadas pela aplicação de uma massa adicional usando as Transformadas de Wavelet. XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE 2015. Palechor et al. (2015).
- b) Dynamic analysis of a beam with additional auxiliary mass spatial via spectral element method. Dynamical Systems Theory and Applications DST-2017. Palechor et al. (2017)

Revista:

- a) Damage Identification in Beams Using Experimental Data. Key Engineering Materials Vol. 607 (2014) pp 21-29. Palechor et al. (2014).

- b) Damage identification in beams using additional rove mass and wavelet transform. Inverse Problems in Science and Engineering (em submissão).
- c) Identificação de Danos em Vigas Metálicas Utilizando Massas Itinetantes Adicionais, Análise Experimental. Revista Sul Americana de Engenharia (em submissão).
- d) Damage Identification in Steel Beams Using Additional Mass and Numerical Analysis (em submissão).

1.4 -ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para alcançar os objetivos propostos, esta tese está estruturada em nove capítulos.

No primeiro capítulo, é apresentada uma abordagem geral da pesquisa, com a introdução do tema, a motivação, as contribuições e os objetivos deste estudo.

O segundo capítulo mostra alguns conceitos fundamentais relacionados à área da pesquisa, uma descrição geral dos métodos de detecção de danos e, além disso, são apresentados alguns trabalhos já desenvolvidos na área de detecção de danos, utilizando masas adicionais e as Transformadas de Wavelets (TW).

O terceiro capítulo relata de forma mais detalhada a formulação matemática e a utilização das Transformadas de Wavelets e as suas propriedades.

O quarto capítulo apresenta o roteiro da metodologia proposta neste trabalho, as ferramentas utilizadas, os estudos preliminares e a determinação das propriedades e geometria das vigas em estudo.

O quinto capítulo reporta às características, o desenvolvimento e os resultados dos ensaios experimentais dos casos de danos propostos.

O sexto capítulo mostra os modelos numéricos desenvolvidos de acordo com as características definidas anteriormente na análise experimental.

O sétimo capítulo relata o desenvolvimento analítico para o cálculo das frequências naturais de uma viga intacta submetida a ação de uma massa móvel adicional.

O oitavo capítulo apresenta uma análise global das análise numérica e experimental, as características, o desenvolvimento e os resultados dos ensaios experimentais dos casos de danos propostos.

O nono capítulo apresenta as conclusões.

2. - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns aspectos, definições e contribuições feitas por alguns autores relacionadas a utilização de massas moveis e Transformadas de Wavelets no processo de identificação de danos.

2.1 - CONCEITOS E GENERALIDADES

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

Recentemente a detecção, localização e quantificação dos danos em estruturas por meio de resposta de vibração estrutural têm sido um dos muito tópicos importantes na pesquisa de identificação do sistema. Uma pesquisa recente na literatura técnica mostra que os algoritmos de identificação de danos foram desenvolvidos utilizando-se as características dinâmicas, especialmente no domínio da frequência (Doebbling et al.,1996). Nesta linha de pesquisa, Bezerra e Saigal (1993) estudaram a detecção de trincas em painéis a partir de métodos numéricos, utilizando o método dos elementos de contorno.

As frequências naturais são indicadores sensíveis de integridade estrutural. Assim, uma análise de medições de frequência periódica pode ser usada para monitorar o estado da estrutura. As medições de frequência fornecem uma técnica de avaliação de baixo custo estrutural (Salawu, 1997). Nas últimas décadas, os exames não destrutivos (nondestructive examination - NDE) e as técnicas de monitoramento têm recebido especial atenção, entre as quais a análise de vibração para a detecção de danos tem sido a mais popular, devido a

simplicidade de implementação e por ser um dos parâmetros mais sensível ao dano (Radziński et al., 2011).

2.1.1 - Classificação do processo de detecção de danos.

Os sistemas de identificação de danos são classificados, principalmente, no domínio da frequência e do tempo. Os sistemas de identificação de danos, em grande parte, fazem uso de parâmetros dinâmicos.

Rytter (1993) classifica o processo de detecção de danos em estruturas como:

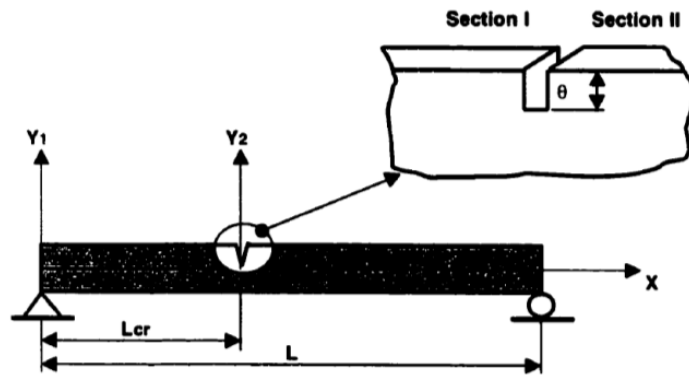
- I. Detecção de dano;
- II. Localização geométrica do dano;
- III. Avaliação da severidade do dano;
- IV. Determinação da vida útil remanescente da estrutura.

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

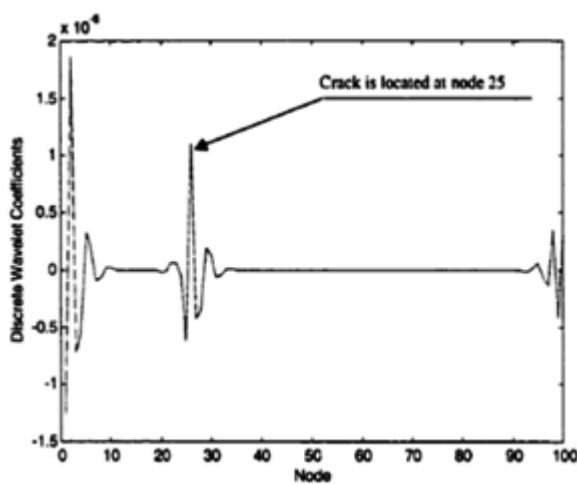
2.2 - ESTADO DA ARTE: USO DE MASAS MOVEIS E TRANSFORMADAS DE WAVELETS NA IDENTIFICAÇÃO DE DANOS.

Identificação e localização de danos por meio da resposta dinâmica têm recebido especial atenção nos últimos anos. Sendo assim, será apresentada uma revisão da literatura que abrange estudos anteriores a fim de selecionar as principais análises e conclusões que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

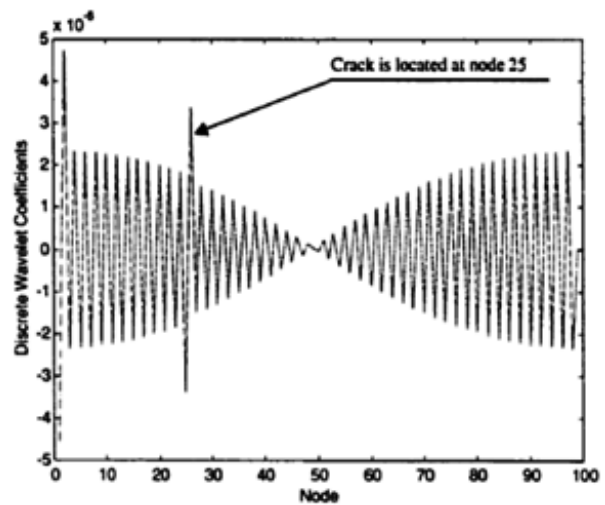
O estudo realizado por Ovanesova (2000) apresenta o desenvolvimento analítico de um método não destrutivo baseado no uso das Wavelets. O método proposto baseia-se na análise do sinal de resposta estática da estrutura, submetida às diferentes condições de carga (Figura 2.1).



(a) Local do dano (Ovanesova, 2000)



Identificação do dano utilizando a wavelet-mãe “boir6.8”.



Identificação do dano utilizando a wavelet-mãe “Haar”

Figura 2.1- Estudo identificação do dano (Ovanesova, 2000)

Vahit Mermertas (2001) propôs uma forma de calcular as frequências naturais para uma posição de massa adicional a partir da equação do movimento da viga de Euler Bernauli. O dano foi simulado com uma mola torsional, cuja constante de rigidez está associada à teoria da mecânica da fratura por meio de um polinômio específico para cada posição e geometria de dano diferentes (Figura 2.2).

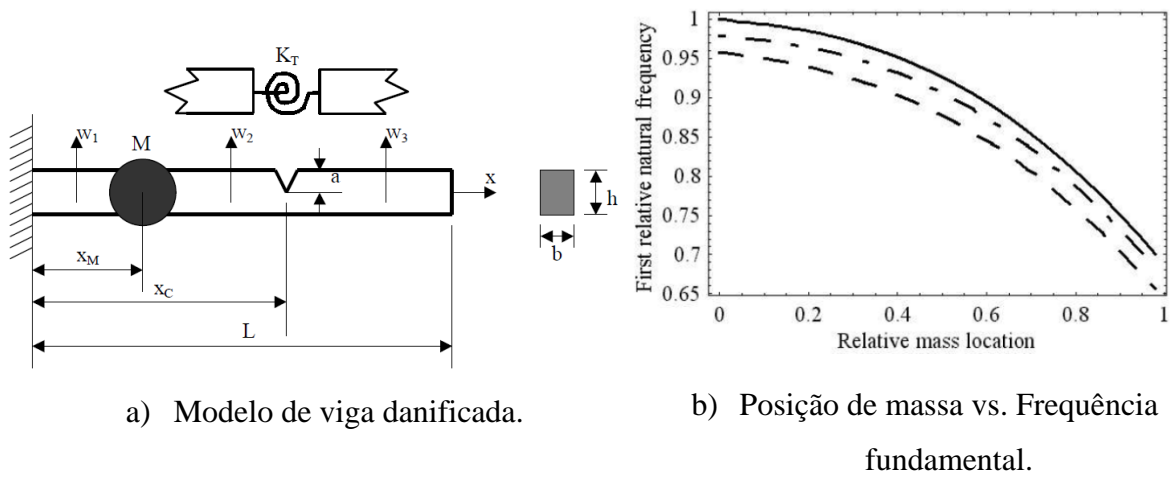


Figura 2.2- Cálculo de frequências viga danificada (Vahit Mermertas (2001))

Rucka e Wilde (2006) apresentaram um método numérico para estimar e localizar danos em vigas e placas. Uma viga e uma placa de aço com quatro condições de apoio foram testadas (Figura 2.3). Os modos de vibração foram analisados com a Transformada Contínua e Discreta de Wavelet. As wavelet aplicadas foram a wavelet Gauss e, para a Transformada Discreta, a wavelet Biortogonal (Figura 2.4 e Figura 2.5).

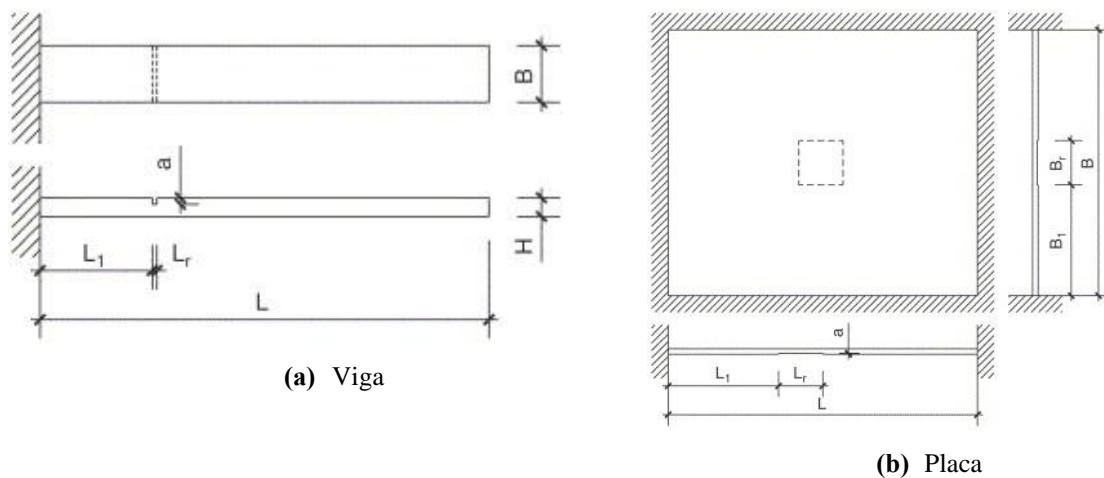


Figura 2.3- Local do dano (Rucka e Wilde, 2006)

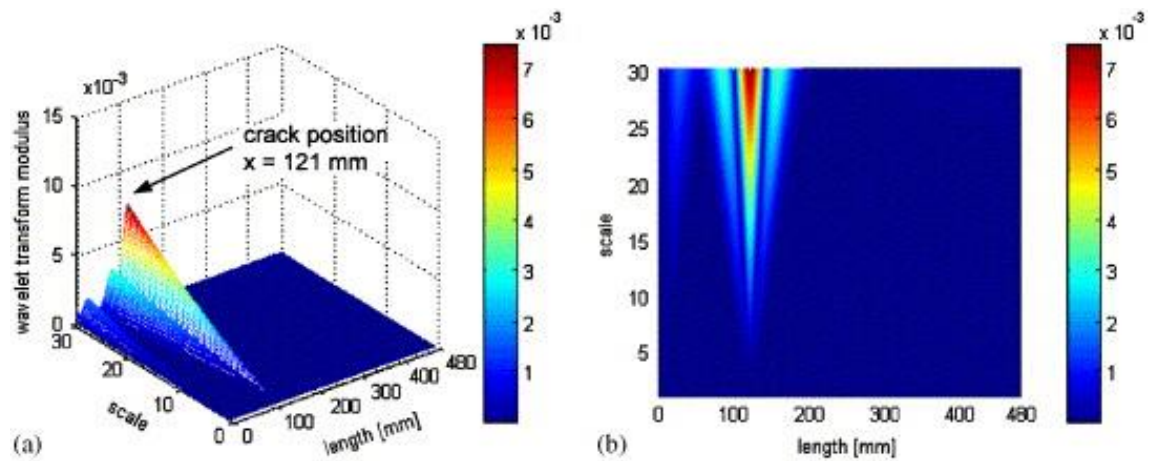


Figura 2.4- Identificação do dano na viga -Transformada Continua de Wavelet (TCW) (Rucka e Wilde, 2006)

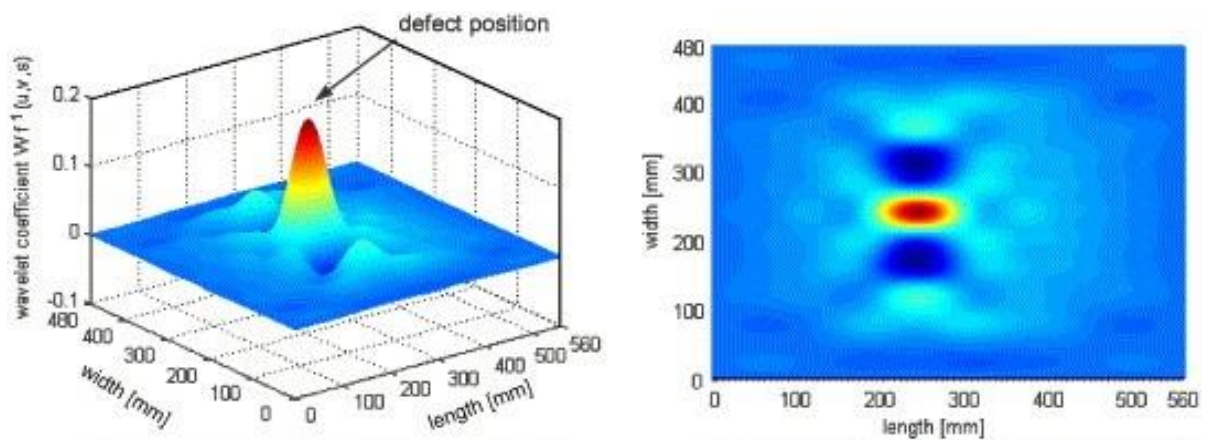


Figura 2.5- Identificação do dano na placa -Transformada Continua de Wavelet (TCW) (Rucka e Wilde, 2006)

Zhong et al. (2008) fizeram um estudo teórico e numérico de uma viga simplesmente apoiada, por meio da adição de uma função polinomial que representa a presença do dano. Eles determinaram a posição do dano por meio da variação nas frequências devidas a adição de uma massa adicional no sistema (Figura 2.6).

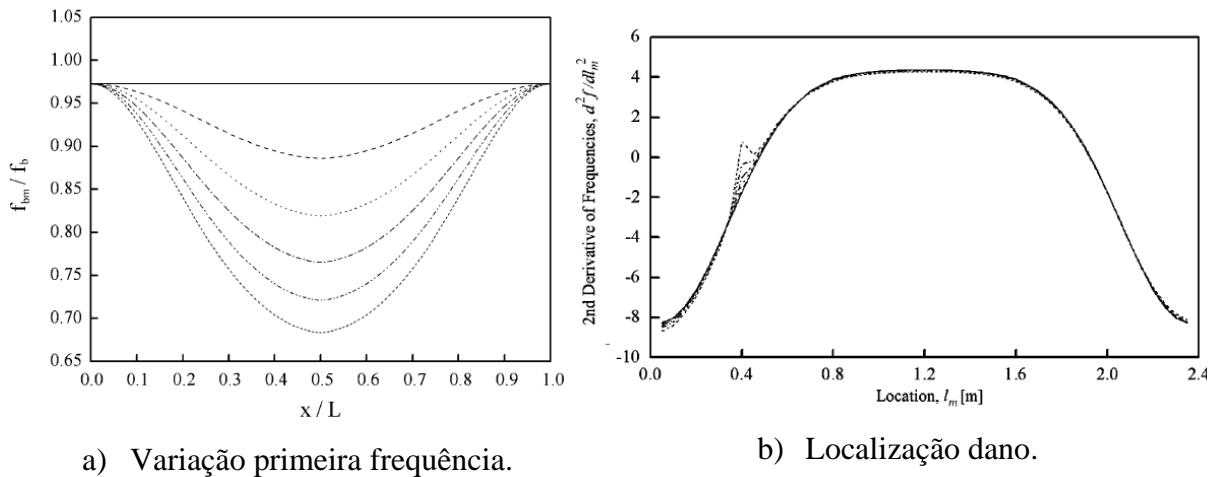


Figura 2.6- Estudo identificação do dano (Zhong e Oyadiji, 2007)

Zhong; Oyadiji (2008) realizou ensaios experimentais em vigas de alumínio de seção transversal retangular. Estes ensaios dinâmicos foram aplicados em modelos reduzidos e de seção transversal retangular, submetidos a ação de uma massa que variava de posição ao longo do comprimento total da viga. O cálculo das frequências naturais foi realizado sob sinais permanentes gerados pela excitação de um shaker. Os resultados foram comparados de forma numérica, experimental e analítica (Figura 2.7).

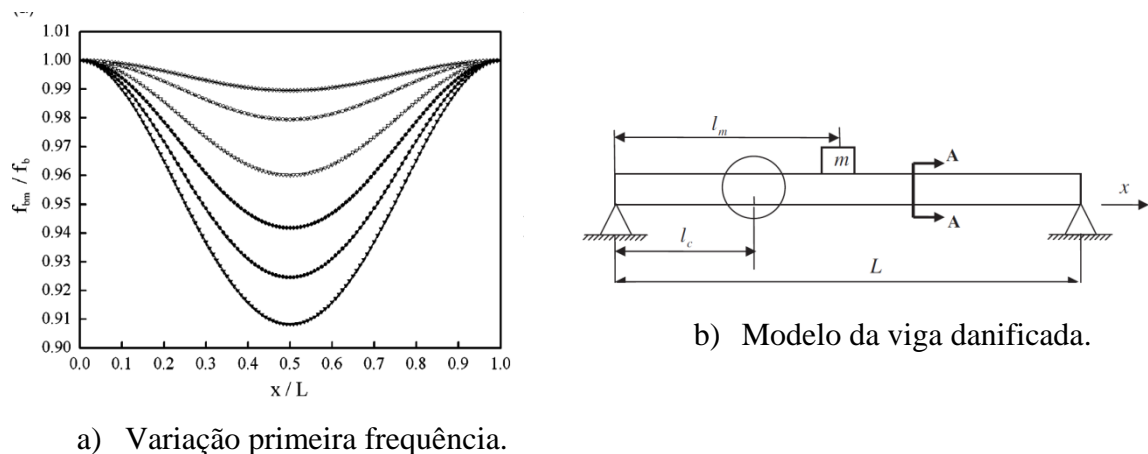


Figura 2.7- Estudo identificação do dano (Zhong; Oyadiji (2008))

O trabalho desenvolvido por Estrada (2008) apresenta uma análise comparativa detalhada da eficácia de métodos de detecção de dano em pontes. Uma atenção especial foi dada aos métodos baseados exclusivamente na resposta dinâmica da estrutura danificada.

Para este efeito são escolhidos os métodos baseados na análise de wavelets, na curvatura das formas modais e na modificação da matriz de flexibilidade Figura 2.8.

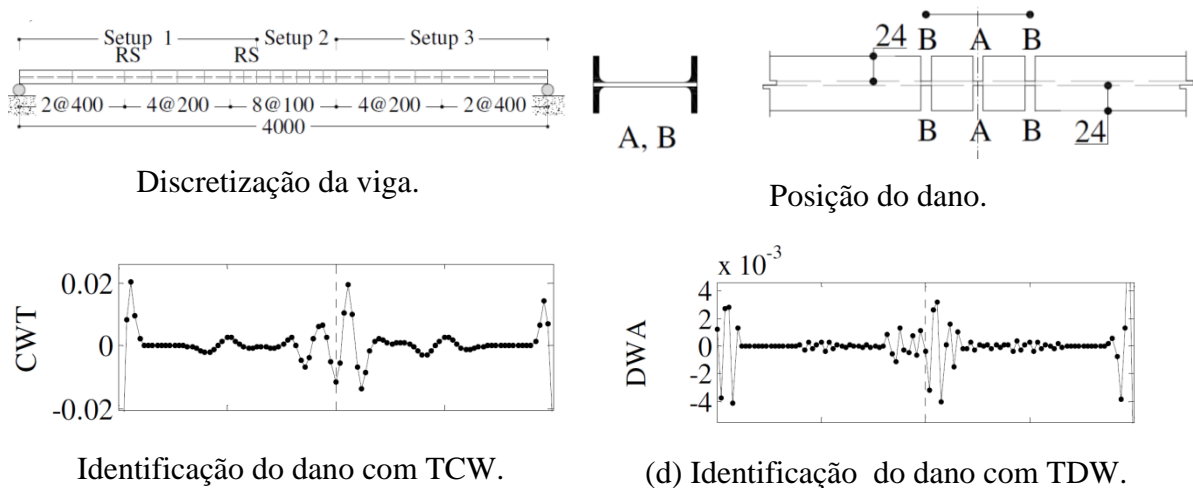


Figura 2.8 - Estudo identificação do dano (Estrada, 2008)

Zhichun e Le (2010) desenvolveram análises com base na nova concepção do vetor de frequência natural (NFV-Natural Frequency Vector) usando as frequências naturais para localizar danos. Para uma estrutura específica, uma série de estados de danos pode ser simulada com base no modelo de elementos finitos da estrutura intacta. Em seguida, os NFVs da estrutura danificada podem ser calculados e utilizados para construir um banco de dados. Por fim, o NNFVAC (NNFVAC-Natural Frequency Vector Assurance Criterion), que é definida pela relação de danos NFVs no banco de dados e a característica NFV medido sobre a estrutura corrente são utilizados como índice de dano. Um modelo de pórtico de oito andares é adotado como um exemplo para verificar a viabilidade e validade do método proposto. Ambas as simulações numéricas e experimentais foram realizadas para verificar a viabilidade do método proposto. Demonstrou-se com o índice proposto, que a localização do dano pode ser corretamente identificada e as extensões estimadas (Figura 2.9).

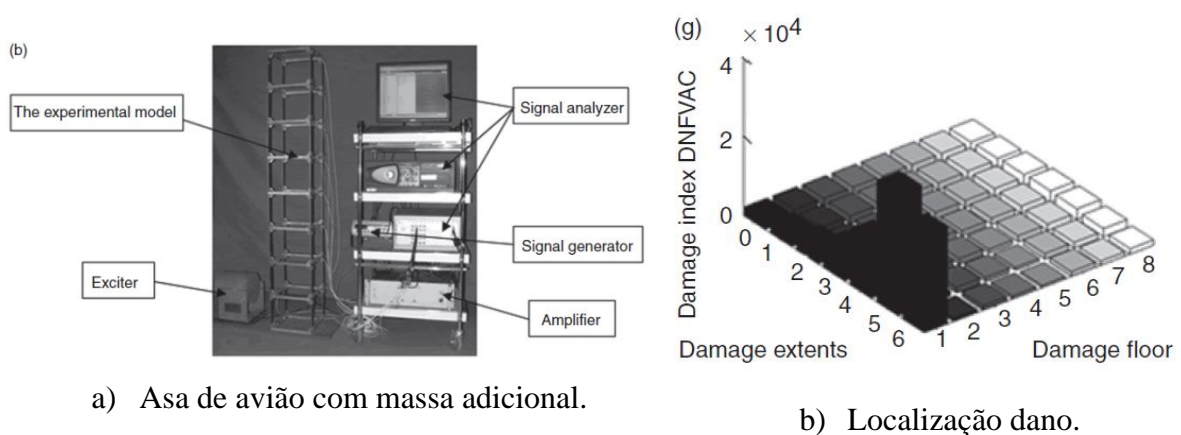
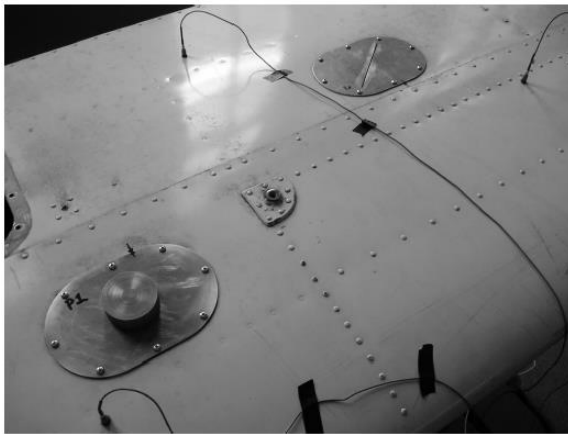
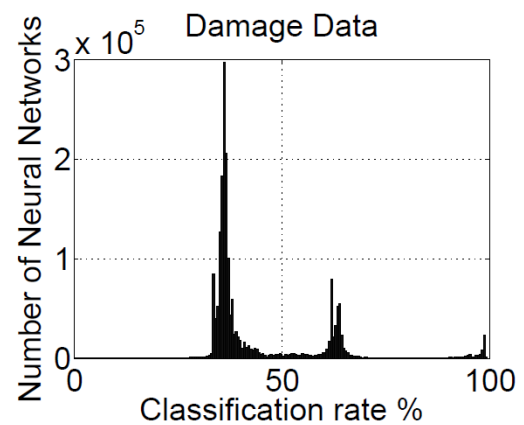


Figura 2.9- Estudo identificação do dano (Zhichun e Le, 2010)

Papatheou et al. (2010) aplicaram reconhecimento de padrões (PR) com sucesso para muitos projetos de monitoramento estrutural e levou ao desenvolvimento de algoritmos de identificação confiável de danos. No entanto, a tentativa para localizar ou avaliar os danos em estruturas com a ajuda de todos os algoritmos, comumente usados em abordagens PR, inevitavelmente exigiam dados de todos os estados de possíveis danos. A utilização de tais dados podia tornar-se excessivamente custosa no caso de estruturas de engenharia de alto valor. Papatheou et al. (2010) propuseram uma abordagem muito simples de adição de massas com o objetivo de simular danos em uma asa de avião de grande escala e localizar as alterações provocadas. As redes neurais artificiais foram utilizadas como classificadores, a fim de localizar as massas adicionais e em seguida, a metodologia é testada em casos de danos reais.



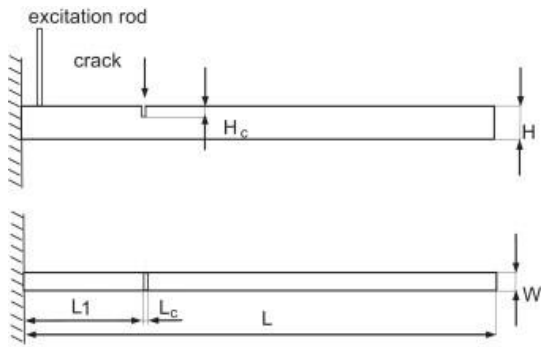
a) Asa de avião com massa adicional.



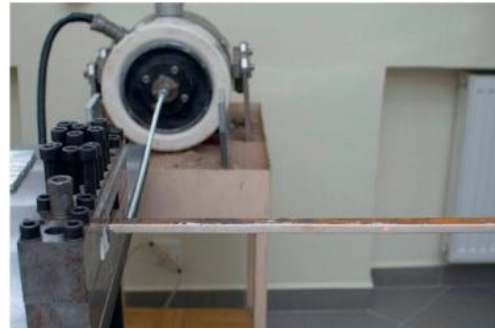
b) Localização dano.

Figura 2.10- Estudo identificação do dano (Papatheou et al., 2010)

Radziński et al. (2011) apresentam um novo método para detecção de danos estruturais com base em parâmetros modais obtidos experimentalmente. O novo método é adequado para a detecção de danos por fadiga que ocorre numa viga de alumínio. O dano foi realizado com cortes de serra de tamanhos distintos e em locais diferentes. A montagem do ensaio experimental é mostrada na Figura 2.11, e os resultados utilizando a Transformada de Wavelet são apresentados na Figura 2.12.

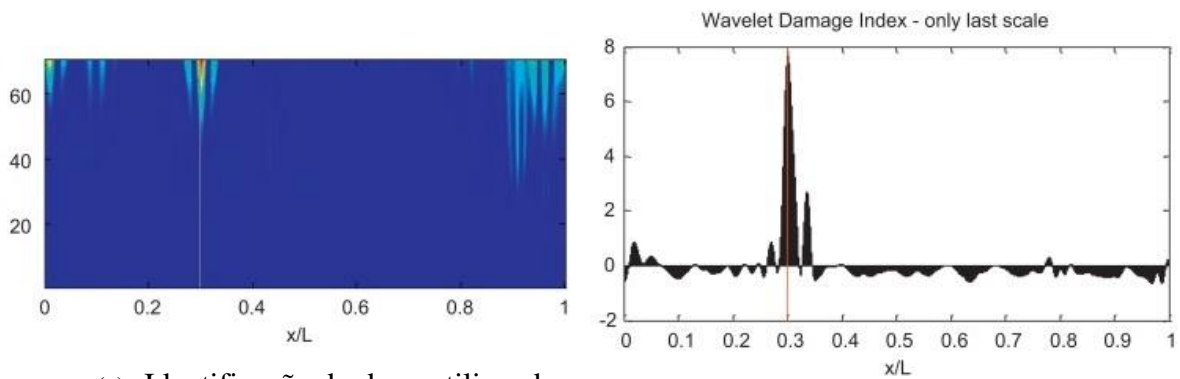


(a) Local do dano



(b) Ensaio experimental

Figura 2.11- Análise Experimental (Radzieński et al., 2011)

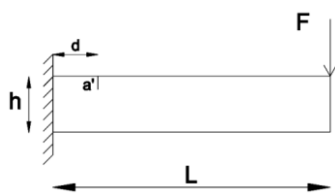


(a) Identificação do dano utilizando TCW.

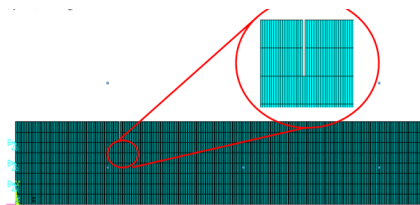
(b) Identificação do dano utilizando TDW.

Figura 2.12- Identificação do dano (Radzieński et al., 2011)

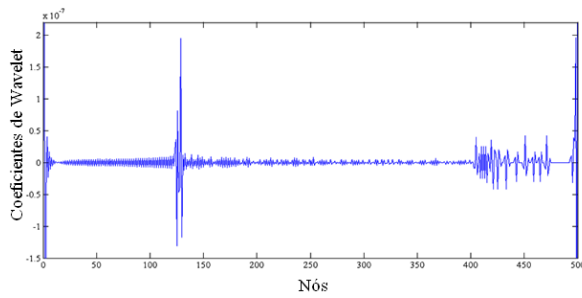
Silva (2011) realizou um estudo de detecção de danos em estruturas utilizando modelagem numérica em elementos finitos e a Transformada de Wavelet. Para isto, diversas situações de dano foram simuladas numericamente em vigas, treliças e pontes. Sinais de deslocamento e modos de vibração foram utilizados para avaliar a eficiência das Transformadas de Wavelet na detecção de danos para diferentes condições de contorno e de carregamentos aplicados nessas estruturas como mostrado na Figura 2.13.



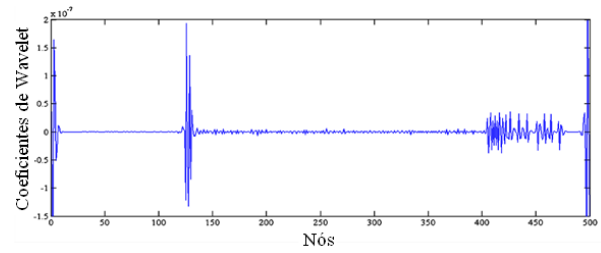
Modelo da viga em balanço.



Discretização do modelo em elementos finitos da viga em balanço.



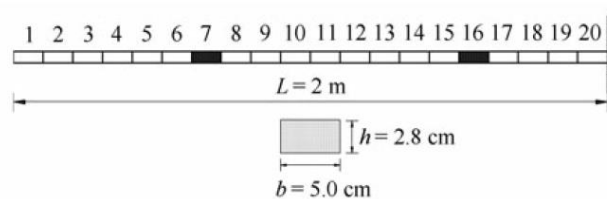
Identificação do dano usando db2.



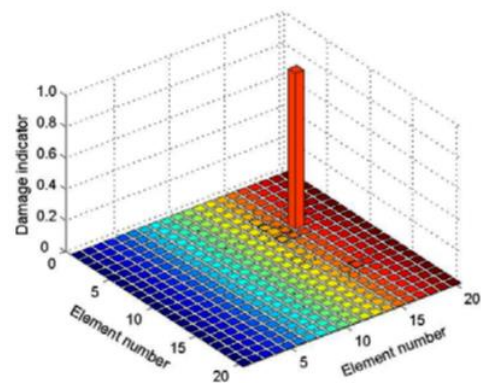
Identificação do dano usando bior6.8.

Figura 2.13- Estudo Identificação do dano (Silva, 2011)

Wang e Li (2012) desenvolveram um novo método para localização e quantificação de danos com base no emprego da energia de deformação modal. Este método é confiável para determinar o dano e estimar sua localização, requerendo apenas informações das alterações das frequências naturais mais baixas. Na Figura 2.14 são apresentados, a viga e os resultados obtidos, por Wang e Li (2012).



a) Discretização da viga .



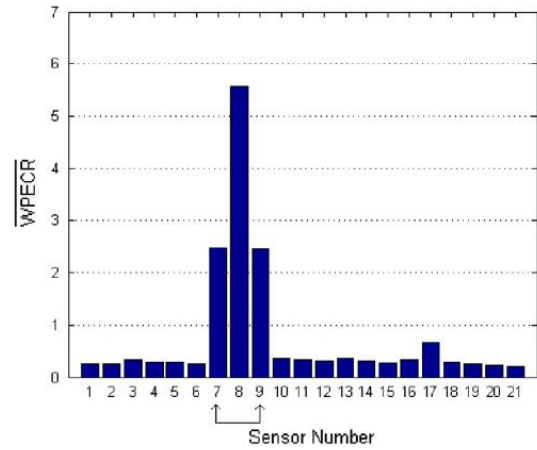
b) Localização dano.

Figura 2.14- Estudo identificação do dano (Wang e Li, 2012)

Peng et al. (2013) abordaram o problema do vão livre (free-sapans) ao longo de gasodutos submarinos, tanto na fase de projeto de gasodutos e durante a operação. Um indicador de dano, WPECR, foi proposto com base na Transformada de Wavelet pacote para identificar o vão livre ao longo de gasodutos submarinos. A confiabilidade e a eficiência do indicador de danos proposto é comprovada com dados de vibração de gasoduto sob forças marinhas ambiente (Figura 2.15).



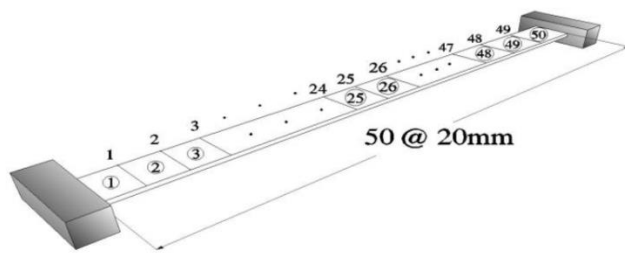
a) Posição do vão livre.



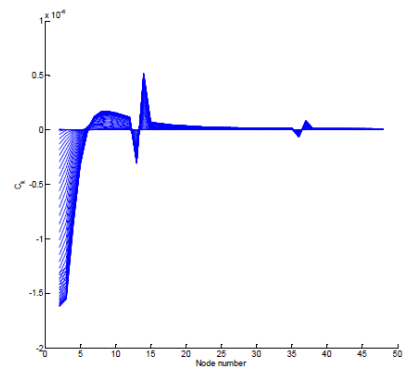
b) Localização *free -span*.

Figura 2.15- Estudo identificação do dano (Peng et al., 2013)

Eun et al. (2014) apresentou um método de detecção de danos utilizando a variação nos dados FRF (função resposta em frequência) medido ao mover uma massa adicional. A variação entre os POMs (Proper Orthogonal Modes) para transformar duas respostas diferentes FRF, é transformada para a curvatura e a essa é utilizada como um índice para avaliar o dano. Mostra-se que o método à base de curvatura FRF pode ser explicitamente utilizado sob a existência do ruído externo através de uma experiência numérica (Figura 2.16).



a) Discretização da viga.

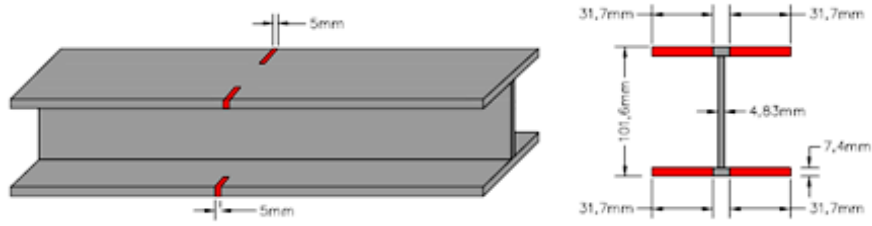


b) Localização dano.

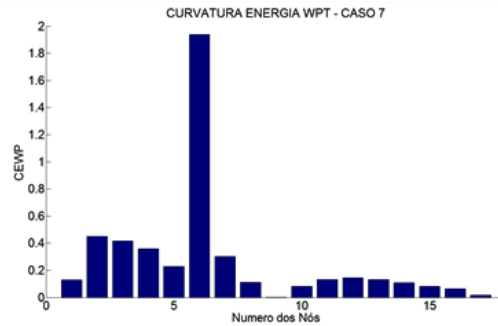
Figura 2.16- Estudo identificação do dano (Eun et al., 2014)

Silva (2015), propôs um índice de dano levando em consideração a Curvatura da Energia dos Coeficientes da Wavelet Pacote (*CEWP*), aplicando a equação (2.1), os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.17.

$$CEWP = \left| \frac{E_{f_i}'' - E_{f_d}''}{E_{f_i}''} \right| \quad (2.1)$$



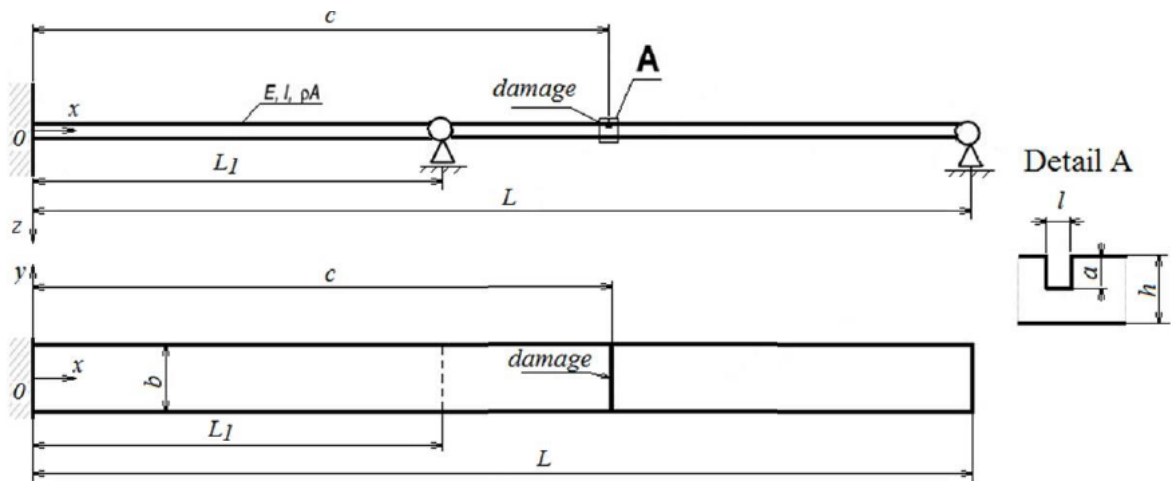
a) Posição do dano.



b) Localização do dano.

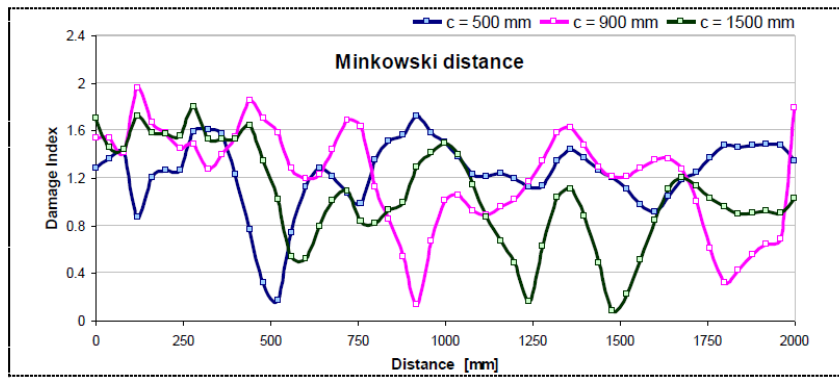
Figura 2.17- Estudo identificação do dano (Silva, 2015)

Gillich et al. (2017) propuseram um método para localizar danos em vigas contínuas de dois vãos, validando o método de forma analítica e numérica. O método proposto por eles se baseia no cálculo do índice de dano utilizando os modos de vibração da estrutura danificada (Figura 2.18 e Figura 2.19).



a) Detalhe da viga utilizada e dano modelados.

Figura 2.18- Estudo identificação do dano (Gillich et al. (2017))



a) Exemplo de localização do dano nas posições 500mm, 900mm e 1500mm.

Figura 2.19- Estudo identificação do dano (Gillich et al. (2017))

2.3 – REVISÃO DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DANOS

Os métodos de identificação de danos em estruturas são baseados, principalmente, na resposta da estrutura (estática ou dinâmica). A resposta estática faz referência aos deslocamentos provocados pela ação de uma carga estática e a resposta dinâmica faz referência às frequências e aos modos de vibração. Na seção seguinte, discutem-se alguns métodos de identificação de danos que utilizam a resposta dinâmica da estrutura. Infelizmente estes métodos apresentados em sua grande maioria precisam do conhecimento da resposta da estrutura intacta, o que resulta em um problema importante na identificação do dano, já que tais estruturas dificilmente têm dados da sua resposta intacta e para obtê-la tem que se idealizar a resposta da estrutura, o que gera uma grande quantidade de imprecisões.

2.4 – MÉTODOS DINÂMICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE DANOS

Nesta seção é apresentada uma descrição geral de alguns dos métodos de detecção de danos baseados na resposta dinâmica de estruturas mais utilizados.

2.4.1 - Método COMAC.

Um dos métodos mais simples de detecção de danos é o Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC). Este método mede a correlação entre vários vetores. Se os deslocamentos no nó i de um conjunto de modos de vibração são idênticos, então o valor COMAC é um para este nó. Em contraste, quando temos uma perturbação gerada pelo dano, os deslocamentos no nó i serão diferentes para o conjunto de modos de vibração. Em consequência disso, o valor COMAC para este nó pode dar valores menores que um. Sua interpretação matemática é dada pela seguinte equação (Estrada, 2008; Ndambi et al., 2002):

$$COMAC_j = \frac{\left[\sum_{i=1}^N |\psi_{ij} \psi_{ij}^*| \right]^2}{\sum_{i=1}^N \psi_{ij}^2 \sum_{i=1}^N \psi_{ij}^{*2}} \quad (2.2)$$

Onde ψ_{ij} e ψ_{ij}^* são os modos de vibração correspondentes ao j-ésimo nó do i-ésimo modo de vibração da estrutura intacta e a estrutura danificada respectivamente.

2.4.2 - Método da Curvatura.

Há algum tempo, descobriu-se que a curvatura formada pela resposta da estrutura é um bom parâmetro para identificação de danos. Esse método, proposto pela primeira vez por Pandey et al. (1991), baseia-se no fato de que a curvatura do modo de vibração está relacionada à rigidez de flexão da estrutura da seguinte maneira:

$$\epsilon = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{d^2 \sum_{i=1}^{\infty} \psi_i}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (2.3)$$

Onde ϵ é a curvatura da seção transversal, M o momento de flexão correspondente à seção transversal, E o módulo de elasticidade, y é a deflexão total, I o momento de inércia da seção e $d^2 \sum_{i=1}^{\infty} \psi_i / dx^2$ corresponde à segunda derivada e à soma dos modos de vibração com relação a uma distância longitudinal x . Deste modo, se um dano aparece, a rigidez de flexão da viga (EI) irá diminuir o que causa um aumento na magnitude da curvatura.

Nesse método, o dano pode ser detectado apenas com a informação do modo de vibração da estrutura danificada. As principais desvantagens desse método estão relacionadas à técnica utilizada para obter as segundas derivadas dos modos de vibração. O método das diferenças centrais é comumente usado nesses casos. Com essa técnica, pequenas irregularidades nos modos de vibração não correspondentes aos danos também são ampliadas, contaminando os resultados com vários picos. Outros métodos para a obtenção da segunda derivada têm sido testados. No entanto, nenhum deles até agora têm resolvido esse problema (Maeck et al., 2000).

2.4.3 - Método Índice de dano (ID)

O método Índice de dano (ID), proposto por Kim e Stubbs (1995), calcula a mudança da energia armazenada na viga quando esta se deforma. Considerando-se uma

viga de Euler-Bernoulli de comprimento L , na qual apenas a flexão em torno do eixo vertical é permitida, a energia de deformação da viga, correspondente ao modo de vibração ϕ_i , pode ser expressa da seguinte forma:

$$U_i = \frac{1}{2} \int_0^L EI(x) \left(\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (2.4)$$

A formulação do método de índice de dano pode ser expressa como segue:

$$\beta_{ij} = \frac{(\epsilon_{i,j}^*)^2 + \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j}^*)^2 \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j})^2}{(\epsilon_{i,j})^2 + \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j}^*)^2 \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j})^2} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_{i,j} = \left[\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \right]_{x=x_i} ; \quad \epsilon_{i,j}^* = \left[\frac{\partial^2 \phi_i^*}{\partial x^2} \right]_{x=x_i} \quad (2.6)$$

Onde N_t é o total de nós na viga, ϵ é a curvatura do modo de vibração, ϕ_i e ϕ_i^* são os modos de vibração da viga intacta e da viga danificada respectivamente.

2.4.4 – Método Mudança de Flexibilidade

Zimmerman e Kaouk (1994) desenvolveram um método de detecção de danos baseado nas alterações da matriz de rigidez de uma estrutura. O parâmetro proposto é deduzido a partir do problema de valores próprios de uma estrutura intacta e não amortecida:

$$(-\Omega M + K) \Phi = 0 \quad (2.7)$$

Onde M e K são a matriz de massa e de rigidez da estrutura intacta respectivamente. Se ΔM e ΔK são perturbações da matriz de massa e a matriz de rigidez respectivamente, o problema de eigenvalores da estrutura não amortecida resulta em:

$$[-\Omega^*(M - \Delta M) + (K - \Delta K)] \Phi^* = 0 \quad (2.8)$$

Onde o asterisco denota os parâmetros correspondentes à estrutura danificada. Separando as perturbações dos parâmetros originais, o parâmetro de índice D_i é definido como:

$$D_i = (w_i^{2*}M + K)\Phi_i^* = (w_i^{2*}\Delta M + \Delta K)\Phi_i^* \quad (2.9)$$

A matriz de rigidez da estrutura intacta e danificada pode ser obtida a partir de seus parâmetros modais de uma forma semelhante, como foi obtida a matriz de flexibilidade:

$$K = \Phi\Omega\Phi^T = \sum_{i=1}^N w_i^2 \Phi_i\Phi_i^T \quad (2.10)$$

$$K^* = \Phi^*\Omega^*\Phi^{*T} = \sum_{i=1}^N w_i^{*2} \Phi_i^*\Phi_i^{*T} \quad (2.11)$$

$$\Delta K = K^* - K \quad (2.12)$$

2.4.5 – Método MAC

Um dos mais conhecidos métodos para determinar a correlação entre dois conjuntos de vetores é o método Modal Assurance Criterion (MAC). Este método permite determinar a proteção de um vetor para outro de tal maneira que ambos os vetores sejam iguais. Quando o valor MAC é igual a um, significa que os vetores são iguais; quando o resultado é um valor próximo de zero, indica que os vetores não são correlacionados. O método MAC entre dois vetores modais é definido como (Allemang, 2003):

$$\text{MAC}(\phi_i, \phi_i^*) = \frac{|\phi_i^T \phi_i^*|^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_i^{*T} \phi_i^*)} \quad (2.13)$$

Onde ϕ_i e ϕ_i^* são o i -ésimo modo de vibração da estrutura intacta e da estrutura danificada respectivamente, e T denota a transposta do vetor.

2.4.6 - Solução do problema inverso de Identificação de danos em treliça via método dos elementos finitos.

Brito (2008) apresenta o problema inverso na identificação de danos em estruturas, especialmente em treliças planas. Inicialmente, o autor apresenta a análise de um conjunto de “assinaturas estruturais”. Os melhores resultados foram obtidos com a seguinte assinatura:

$$F_5(z) = \frac{\sum_{j=1}^N (|\Delta u_x^j| + |\Delta u_y^j|)}{\sum_{j=1}^K |\Delta w_j^2|} \quad (2.14)$$

A assinatura $F_5(z)$ dada pela Equação (2.14) tem formulação estático-dinâmica. Esta assinatura utiliza diferenças de deslocamentos estáticos nas duas direções x e y ($\Delta u_x^j + \Delta u_y^j$) e diferenças entre as frequências (ao quadrado) Δw_j^2 , entre a estrutura intacta e a estrutura danificada. A assinatura é computada para todos os N graus de liberdade das barras da treliça e para as K primeiras frequências naturais extraídas para a estrutura.

A formulação $F_5(z)$ possui maior robustez no que diz respeito ao tratamento dos parâmetros utilizados em seu equacionamento. Capturando muito bem o dano no elemento proposto.

2.4.7 - Procedimentos numéricos para solução do problema inverso de localização de danos em estruturas aperticadas.

Caldeira (2009) apresenta um trabalho que aborda o problema inverso de identificação de danos em estruturas que é a análise de assinaturas. Estas assinaturas são aqui analisadas e escritas em termos de características de rigidez, deslocamentos às cargas estáticas e modos de vibrar das estruturas. Os melhores resultados foram obtidos com a assinatura $F_4(z)$, representada pela Equação (2.15, criada pela multiplicação do somatório dos quadrados das diferenças Δu_j^2 (entre estrutura intacta e danificada) de todos os N deslocamentos nodais resultantes, nas direções x e y ; e do somatório quadrado das diferenças (entre estrutura intacta e danificada) das seis primeiras frequências da estrutura (Δw_k^2).

$$F_4(z) = \left[\sum_{j=1}^N (\Delta u_x^j{}^2 + \Delta u_y^j{}^2) \right] \left[\sum_{k=1}^6 \Delta w_k^2 \right] \quad (2.15)$$

2.5 - PROCESSAMENTO DE SINAIS

As técnicas de processamento de sinais podem ser classificadas em: análise no domínio do tempo, análise no domínio da frequência e análise no domínio tempo-frequência. Para o propósito de detecção de danos em estruturas, mudanças nas frequências naturais, modos de vibração e relações de amortecimento são usadas para identificar danos (Zhou, 2006).

2.5.1 - Análise de sinais no domínio da frequência

A transformada de Fourier é uma ferramenta útil para compreender os sinais e a solução de problemas de erro no sinal. Embora a transformada de Fourier seja uma função matemática complicada, não é um conceito complicado de entender e se relaciona com os sinais medidos. Essencialmente, um sinal pode ser dividido em componentes senoidais de diferentes amplitudes e frequências.

Ao olhar para os sinais do mundo real, estes são geralmente como uma tensão mudando ao longo do tempo. Isto é referido como o domínio do tempo. O teorema de Fourier afirma que qualquer forma de onda no domínio do tempo pode ser representada pela soma ponderada de senos e cosenos. Por exemplo, tomar duas ondas senoidais, onde um é três vezes mais rápido que o outro, ou a frequência é $1/3$ o primeiro sinal (Figura 2.20). Quando os sinais são adicionados, resulta um sinal diferente (Figura 2.21).

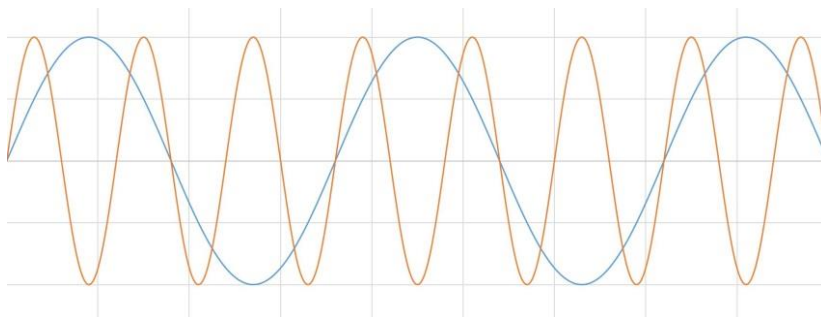


Figura 2.20- Dois sinais com frequências diferentes.



Figura 2.21- Soma dos sinais anteriores.

Desta forma, todos os sinais no domínio do tempo podem ser representados por uma decomposição de senos, tornando-se possível a análise das diferentes frequências do sinal original, representadas como acumulação de energia. Assim, a transformada de Fourier decompõe o sinal no domínio do tempo, para um sinal no domínio de frequência. O domínio da frequência acumula energia em valores próximos das frequências do sistema que esta sendo analisadas.

Os sinais são valores discretos, devido a isto, a transformada de Fourier não funcionará nesses dados. Em vez disso, a transformada de Fourier discreta (DFT) é utilizada, o que produz como resultado os componentes do domínio de frequência de valores discretos (Figura 2.22). A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é uma implementação otimizada de uma DFT que precisa menos recursos computacionais para executar e processar o sinal.

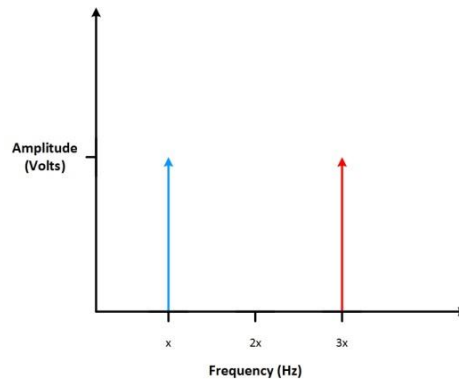


Figura 2.22- Transformada de Fourier Discreta (TFD).

A representação no domínio do tempo dá a amplitude do sinal no instante do tempo escolhido. Já no domínio da frequência são identificadas as senóides que formam o sinal. A Figura 2.23 apresenta um exemplo de sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência.

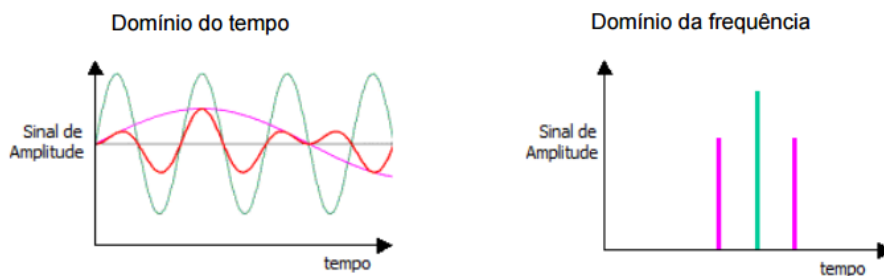


Figura 2.23- Exemplo de sinais no domínio do tempo versus domínio da frequência.

2.5.2 Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier (TF) é uma ferramenta útil que possibilita determinar a contribuição que cada função seno e cosseno, presentes numa série temporal, apresentam para a energia total desta série (periódica). A TF é definida da seguinte forma:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2\pi i\omega x} dx \quad (2.16)$$

Onde $f(x)$ é a série temporal ou sinal analisado, ω é a frequência que cada componente oscilatória inerente ao sinal apresenta, ou seja, representa as diferentes frequências contidas na série e a exponencial transforma para o espaço das frequências.

A TF é amplamente utilizada na engenharia para obtenção de informações adicionais contidas em um sinal temporal, tais informações são obtidas no espectro de frequência obtido após a transformação matemática.

As Figura 2.24 e Figura 2.25 apresentam um exemplo de aplicação da TF em três séries temporais dos argumentos de uma função seno, com 16 segundos de duração cada uma, tendo amplitudes e frequências distintas: 1, 5 e 10 Hz (Figura 2.24a). A Figura 2.24b mostra a resultante da soma das três frequências nos 8 primeiros segundos e a soma das frequências de 1 e 10 Hz para os 8 segundos restantes.

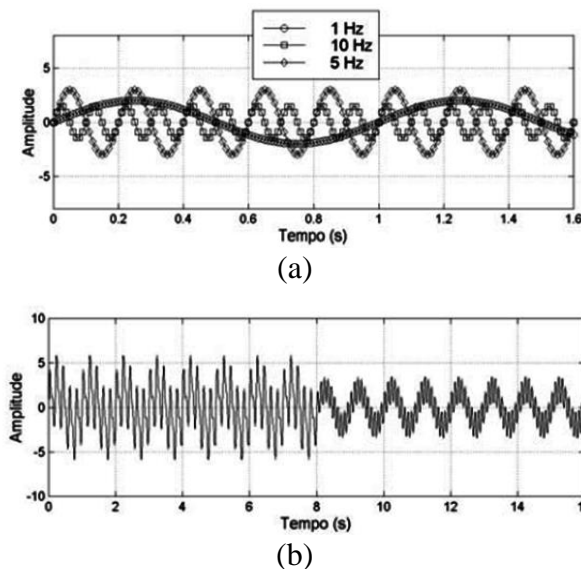


Figura 2.24 - (a) Séries temporais de três argumentos de uma função seno; (b) Série temporal criada pela soma de cada série do gráfico superior (Bolzan, 2006).

O resultado da aplicação da TF sobre a série temporal do gráfico da Figura 2.24b é chamado de espectro de frequência da série e está apresentado na Figura 2.25.

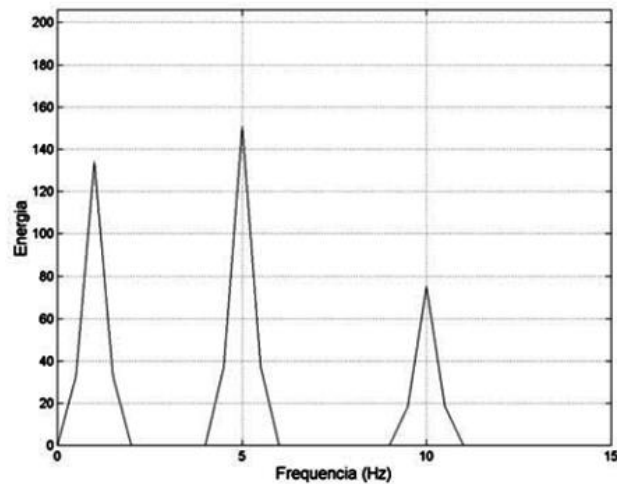


Figura 2.25 – Espectro de frequência obtido pela TF da série temporal (Bolzan, 2006).

Observa-se na Figura 2.25 a presença das três frequências, definidas na série temporal. Porém a TF aplicada a toda a série temporal (16s) não mostra distinção com relação às somas das componentes oscilatórias das séries e suas respectivas localizações temporais, ou seja, toda informação temporal é perdida.

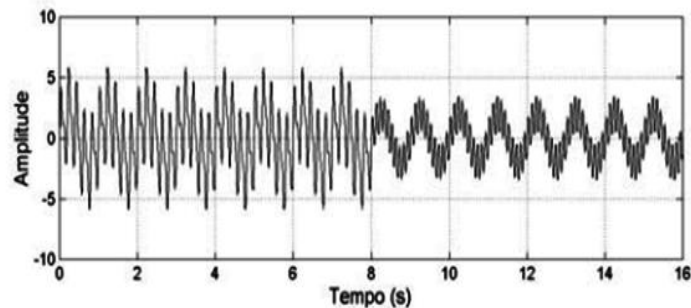
A Equação (2.16) apresenta uma deficiência referente à decomposição das várias frequências de um sinal com relação à sua localização no tempo. Gabor (1946) percebeu esta deficiência da TF em séries temporais não estacionárias, o que de fato é o caso da maioria dos fenômenos encontrados na natureza. Em consequência ele modificou a TF visando a melhor representatividade deste tipo de séries temporais. Neste esquema, a série temporal é dividida em intervalos iguais e a TF é aplicada em cada um destes. Este método ficou conhecido como a Transformada Janelada de Fourier (TJF) e será apresentada a seguir.

2.5.3 Transformada Janelada de Fourier (TJF)

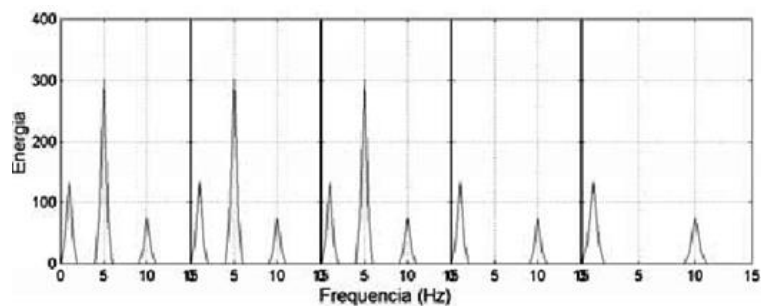
A diferença que existe entre a TF e a TJF é que nesta última o sinal é dividido em pequenos segmentos, onde estes segmentos do sinal são assumidos como sendo estacionários. Para este propósito, uma função janela “W” é escolhida. A largura desta janela deve ser igual ao segmento do sinal onde a estacionaridade é válida (Polikar, 1994). A TJF nada mais é do que o produto da TF por uma função janela. Para cada valor t e ω , um novo coeficiente da TJF é calculado pela seguinte expressão:

$$TJF(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)W(x - t)e^{-2\pi i\omega x} dx \quad (2.17)$$

Bolzan (2006) dividiu a série temporal da Figura 2.26a em cinco segmentos com intervalos iguais de tempo, ou seja, cada segmento com três segundos de duração. Em seguida foi aplicada a TF em cada um deles, a Figura 2.26 apresenta o resultado da aplicação da TFF.



(a)



(b)

Figura 2.26 - TF aplicada em cada segmento da série temporal da Figura 2.29b (Bolzan, 2006).

Na Figura 2.26 percebe-se a presença das diferentes frequências de cada argumento da função seno (5Hz, 10Hz e 15Hz), em suas respectivas localizações temporais. Ou seja, nos oito primeiros segundos aparecem as três frequências, enquanto nos oito últimos segundos a frequência de 5Hz não está presente.

2.5.4 Funções de janelas

O Janelamento de sinais é uma técnica simples que pode melhorar as características do sinal e diminuir efeitos como o ruído inerente dos equipamentos eletrônicos ou o efeito de vazamento espectral (Andrade, A. O. e Soares). Existem vários tipos de funções de janela que podem ser aplicadas dependendo do sinal. Cada função de janela tem suas próprias características para diferentes aplicações. Algumas dessas janelas são:

- Retangular (Nenhuma)

- Hanning
- Hamming
- Triangular
- Exponencial

Para escolher uma função de janela deve-se considerar o seguinte:

- Se o sinal contem fortes sinais de interferência (ruído) próximos das frequências de interesse, escolher uma função de alisamento.
- Se a frequência de interesse contém dois o mais sinais muito próximos, neste caso é melhor escolher uma janela de alisamento como um lóbulo principal estreito.
- Se a precisão da amplitude de um componente de frequência único é mais importante do que a localização exata do componente de frequência, escolher uma função de janela com uma largura do lóbulo principal alta.

Serão expostas as características das três janelas mais utilizadas no processamento de sinais, a seguir:

2.5.4.1 –Retangular

A janela retangular possui o valor igual a 1 sobre todo o seu intervalo de tempo. Matematicamente, uma janela de tamanho N pode ser definida através da Equação (2.18)

$$w[n] = 1, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2.18)$$

Aplicar uma janela retangular é equivalente a não utilizar qualquer janela. A janela retangular possui o maior volume de perda espectral. Ela é útil para a análise de transientes que possuem uma duração menor do que a da janela em análise.

2.5.4.2 -Hanning

As janelas de Hamming e Hann têm uma forma senoidal. Ambas as janelas resultam em um pico maior central e lóbulos laterais baixos. No entanto, a janela Hann é zero em ambas as extremidades e elimina qualquer descontinuidade. A janela de Hamming não chega a atingir zero Figura 2.27. Devido a essa diferença, a janela de Hamming faz um trabalho melhor de cancelar o lóbulo lateral mais próxima, mas um trabalho mais pobre de

cancelar quaisquer outros. Estas funções de janela são úteis para medições de ruído (National Instrument, 2015).

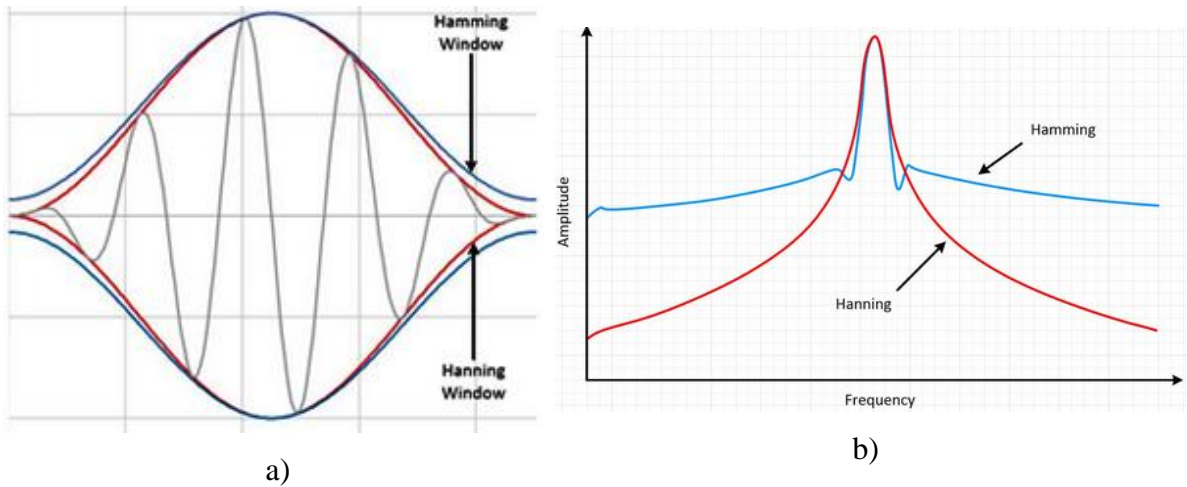


Figura 2.27-Janelas Hann e Hamming (National Instrument, 2015) .

2.5.4.3 -Hamming

A janela de Hammin é uma versão modificada da janela de Hanning. A forma também é similar a de uma onda cossenoidal. Uma janela de tamanho N é definida pela Equação (2.19) (Oppenheim (1999)).

$$W[n] = 0.54 - 0.46\cos(2\pi n/N), n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2.19)$$

2.5.4.4 -Triangular

A forma dessa janela é a de uma onda triangular. Matematicamente uma janela de tamanho N é definida pela Equação (2.20).

$$W[n] = 0.54 - 0.46\cos(2\pi n/N), n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2.20)$$

2.5.4.5 -Exponencial

A forma dessa janela é a de uma função exponencial. Ela pode ser matematicamente expressa pela Equação (2.21).

$$w[n] = e^{\left(\frac{n \ln f}{N-1}\right)}, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2.21)$$

Onde:

N = tamanho da janela;

f = valor final da exponencial.

Na Figura 2.28 é apresentado um sinal temporal não permanente, antes e depois da aplicação da janela exponencial, com um parâmetro f de 1%.

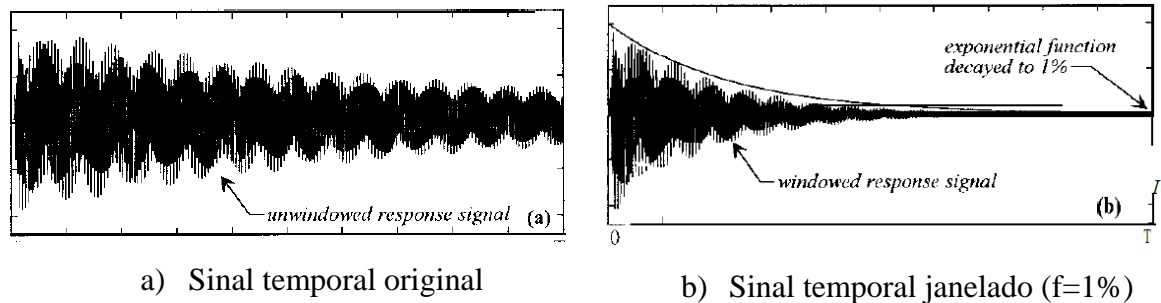


Figura 2.28-Janela exponencial (Fladung (1997)).

Em resumo:

- Todos os sinais do domínio de tempo podem ser representados por uma série de senos.
- Uma FFT decompõe um sinal no domínio do tempo para uma representação no domínio de frequência.
- Fuga espectral é causada por descontinuidades no número original, não inteiro de períodos de um sinal e pode ser melhorada usando janelas.
- Janelamento reduz a amplitude das descontinuidades nos limites de cada sequência finita adquirida pelo digitalizador.

3. - ANÁLISE COM AS WAVELET

Neste capítulo são apresentados alguns aspectos, definições e características da Transformada de Wavelet como ferramenta matemática para localização de danos.

3.1 - INTRODUÇÃO AS WAVELET

A análise de Wavelet baseia-se na ideia de que qualquer sinal pode ser dividido em uma série de funções básicas chamadas de “ondas”. Esta técnica também permite a utilização de janelas com tamanho variável, e a utilização de intervalos de tempo e espaço longos e curtos para captar a informação necessária (Figura 3.1).

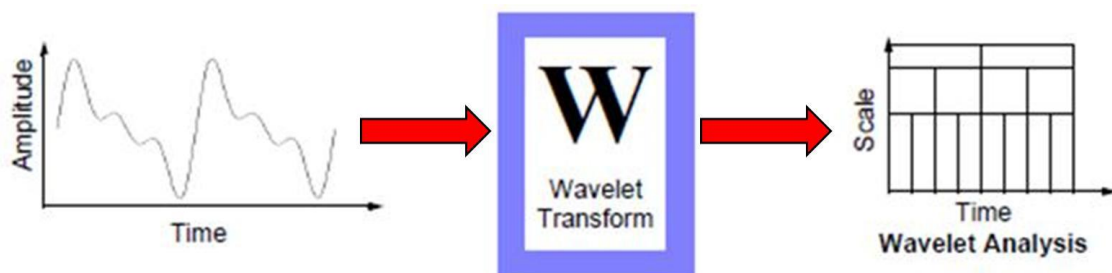


Figura 3.1- Transformada de Wavelet (modificada, Misiti e Poggi, 2001).

Uma grande vantagem proporcionada pelas wavelets é a capacidade de realizar análises locais. Considere-se um sinal sinusoidal com uma pequena descontinuidade - uma tão pequena quanto a ser pouco visível como na Figura 3.2.

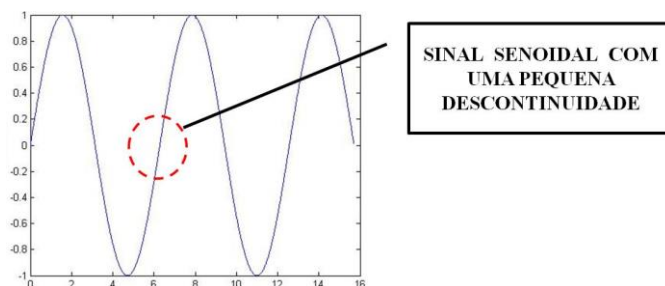


Figura 3.2. Pontos de descontinuidade no sinal (modificada, Misiti e Poggi, 2001).

Um gráfico dos coeficientes de Fourier deste sinal não mostra nada em particular, exceto pelos picos que representam as frequências (Figura 3.3). No entanto, uma parcela de coeficientes wavelet mostra claramente a localização exata no tempo da descontinuidade gerada pela perturbação no sinal (Figura 3.4).

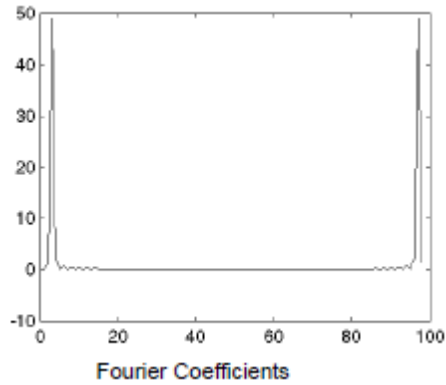


Figura 3.3- Coeficientes Fourier (Weeks, 2012).

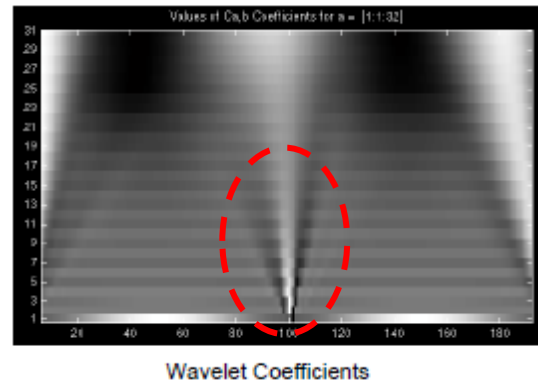


Figura 3.4- Coeficientes Wavelet (Misiti e Poggi, 2001).

Uma wavelet é uma forma de onda de duração limitada com uma média de valor igual a zero. Uma das principais vantagens fornecidas pelas Wavelet é a capacidade de realizar análise local, isto é, para analisar uma área localizada de um sinal maior. Esta análise é capaz de revelar aspectos que outras técnicas de processamento de sinais não podem obter, aspectos como: as tendências, pontos de degradação, discontinuidades. No caso da identificação de danos, essas discontinuidades são provocadas pelo dano (Ovanesova 2000).

A decomposição wavelet consiste em calcular um “índice de semelhança”, entre o sinal e a função wavelet. Se o índice é grande, então a semelhança é forte, caso contrário, a semelhança é fraca. A transformada de Wavelet de um sinal $f(x)$, é a família $C(a, b)$, que depende de dois índices a e b , os valores $C(a, b)$ que são chamados de coeficientes (Figura 3.10).

As wavelet têm sido amplamente utilizadas para analisar os sinais do domínio do tempo. Para a análise Wavelet de sinais de domínio espacial, podemos simplesmente substituir o tempo por uma coordenada espacial $f(x)$, correspondente aos modos de vibração ou deslocamentos devido à carga estática (Wu e Wang, 2011).

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

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

Onde $\psi^*(.)$ indica o conjugado complexo de $\psi(.)$ é assumido que o valor médio da função $\psi(x)$ desaparece:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (3.2)$$

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

$$w^{w,\tau}(x) = \frac{1}{2\pi} w(x - \tau) e^{-iwx} \quad (3.3)$$

A respectiva função para a transformada de wavelet é dada por:

$$\psi^{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \psi^*\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (3.4)$$

As funções $\psi^{a,b}$ são chamadas de wavelets ou funções wavelet-mãe. As funções da transformada de Fourier por janelas usualmente oscilam e decaem rapidamente. Em contraste com as funções $\psi^{a,b}(x)$, o número de oscilações permanece constante com a mudança de janela. Isso significa que uma wavelet é “esticada” ou “dilatada” ao longo do eixo do tempo (ou espaço). Para a transformação de Fourier com janelas, o tamanho das janelas permanece constante, enquanto o número de oscilações muda. Este princípio é ilustrado na Figura 3.5.

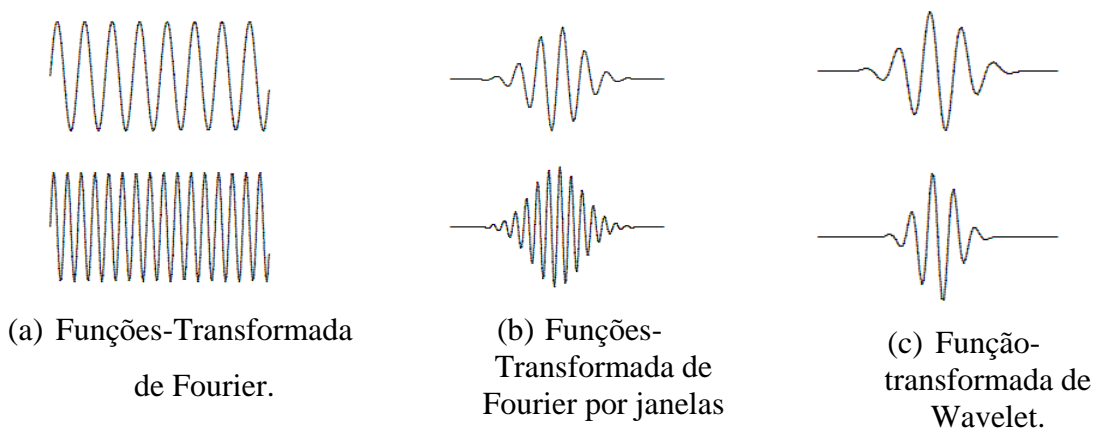


Figura 3.5- Comparação sinais: Transformada Fourier - Transformada de Wavelet (Misiti e Poggi, 2001).

Para a análise da transformada wavelet, $\psi(x)$ é a função complexa de valores localizada no domínio espacial x . $\psi(x)$ é a wavelet mãe, a partir da qual são gerados os coeficientes wavelet por translação e dilatação (Wang e Deng, 1999). A translação a partir da wavelet-mãe pode ser definida como:

$$\psi_{a,b}(x) = 2^{\frac{a}{2}}\psi(2^a x - b) \quad (3.5)$$

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

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

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{a,b}(x) dx \quad (3.6)$$

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

A Transformada de Wavelet inclui a Transformada Contínua de Wavelet (TCW) e Transformada Discreta de Wavelet (TDW). A principal vantagem da TCW é a sua capacidade de fornecer informação do tempo e escala (Li et al., 2009). A diferença entre as duas transformações está na forma de representação da escala, como é mostrado na seguinte tabela:

Tabela 3.1- Diferença TCW e TDW (Ovanesova, 2000)

Tempo Contínuo	Tempo Contínuo	Tempo Discreto ($\Delta = 1$)
Análise Contínua	Análise Discreta	Análise Discreta
$C_{a,b} = \int_R S(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$ $a \in R^+, b \in R$	$C_{a,b} = \int_R S(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$ $a = \Delta 2^j, b = \Delta k 2^j$ $j, k \in Z^2$	$C_{j,k} = \sum_{n \in Z} s(n) g_{j,k}(n)$ $a = 2^j, b = k 2^j$ $j \in N, k \in Z$

- Na análise contínua, a escala varia quase continuamente entre: por exemplo, 2^1 e 2^5 . Quando uma escala é pequena, apenas pequenos detalhes são analisados. Esta é a razão pela qual a análise contínua é muitas vezes mais fácil de ser interpretada;

- Na análise discreta, a escala é diádica, por exemplo, 2^1 , 2^2 , 2^3 , 2^4 e 2^s . Cada coeficiente de nível k é repetido 2^k vezes. Esta é a razão pela qual a análise discreta garante economia de espaço de codificação e é suficiente para a síntese (Ovanesova, 2000).

3.1.1 - Transformada Contínua de Wavelet (TCW)

A Transformada Contínua de Wavelet (TCW) é definida como a soma sobre todo o tempo (ou espaço) do sinal temporal multiplicado pela escala.

$$C(\text{escala}, \text{posição}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\psi(\text{escala}, \text{posição})dx \quad (3.7)$$

O resultado da TCW é os coeficientes C , que estão em função da escala e da posição. Multiplicando cada coeficiente pela wavelet adequadamente dimensionada, produz os wavelets constitutivos do sinal original:

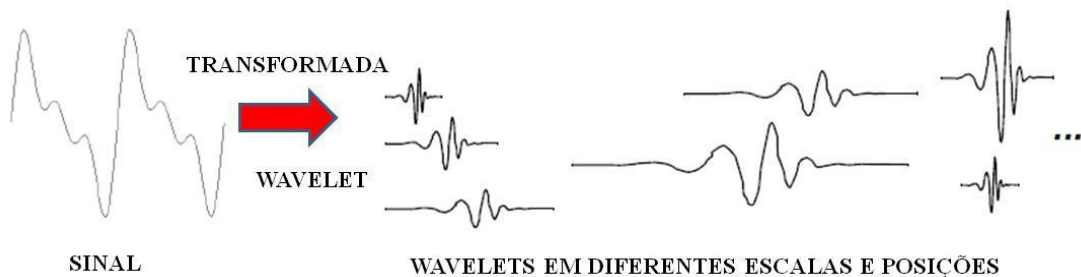


Figura 3.6- Processo Transformada de Wavelet (modificada, Misiti e Poggi, 2001).

3.1.1.1 - Escala.

Escalar uma wavelet significa que a wavelet está alongando ou comprimindo. Se os sinais forem sinusóides, o efeito do fator de escala será muito fácil de ver, como mostrado na Figura 3.7, para a função $f(t)$, com fator de escala a :

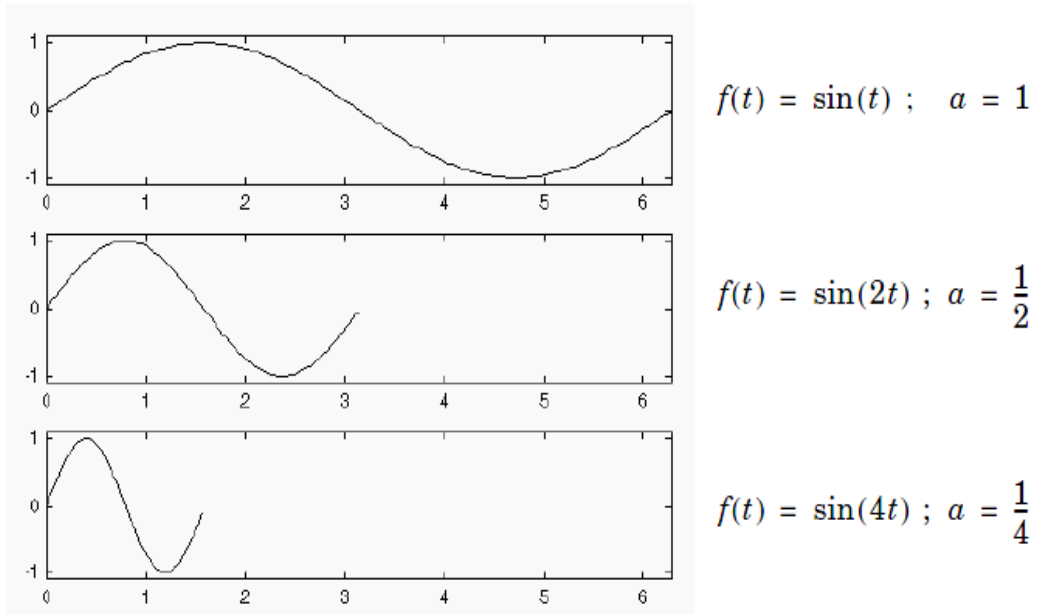


Figura 3.7- Escala Transformada de Wavelet (Weeks, 2012).

3.1.1.2 - Deslocamento.

O deslocamento das wavelet é simplesmente atrasar ou acelerar o seu aparecimento. Matematicamente, atrasar k vezes, uma função $f(t)$ é representada por $f(t - k)$ (Figura 3.8).

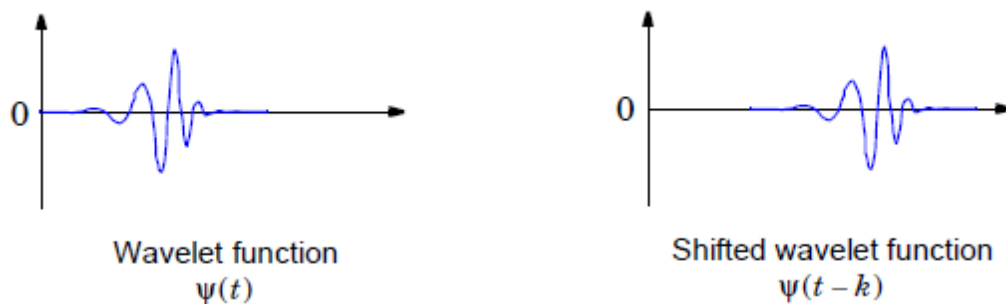


Figura 3.8- Função Wavelet (Weeks, 2012).

A TCW 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 TCW:

1. Escolher uma wavelet-mãe e compará-la a uma seção no início do sinal original.
2. Calcular um número C , que representa a semelhança entre a wavelet e o sinal no intervalo analisado. Note-se que os resultados dependem da forma da wavelet escolhida Figura 3.9.

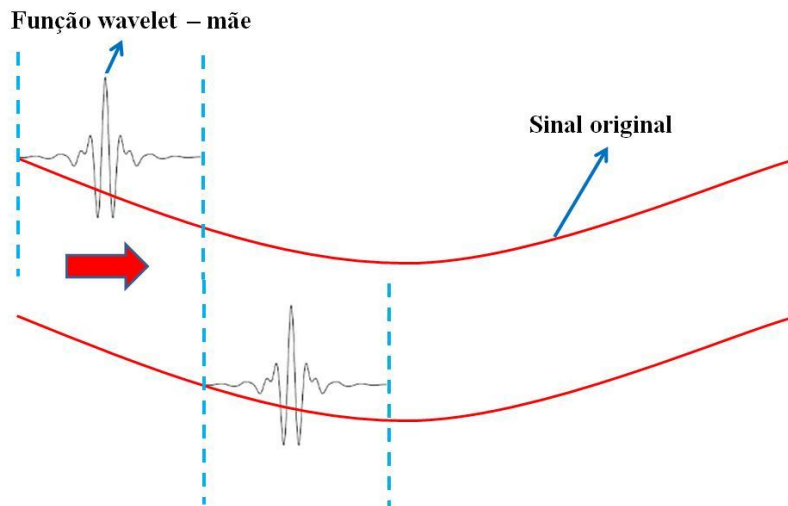


Figura 3.9- Ilustração cálculo coeficientes wavelet (modificada, Misiti e Poggi, 2001).

3. O passo seguinte é colocar a wavelet para a direita e repetir os passos 1 e 2, até que seja coberto todo o sinal (Figura 3.9).
4. Escalar a wavelet no tramo analisado e repetir os passos 1 a 3 .

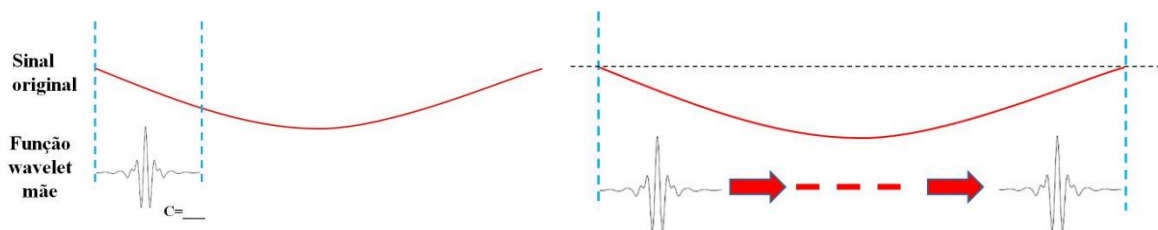


Figura 3.10- Ilustração escala wavelet (modificada, Misiti e Poggi, 2001)..

5. Repetir os passos 1 a 4 para todas as escalas.

Como resultado final, obten-se coeficientes produzidos para diferentes escalas. Para a representação dos resultados, o eixo x representa a posição ao longo do sinal (tempo ou espaço), o eixo y representa a escala (a), e a cor de cada ponto xy representa a magnitude dos coeficientes wavelet C . A Figura 3.12 mostra o gráfico dos coeficientes gerados pela TCW.

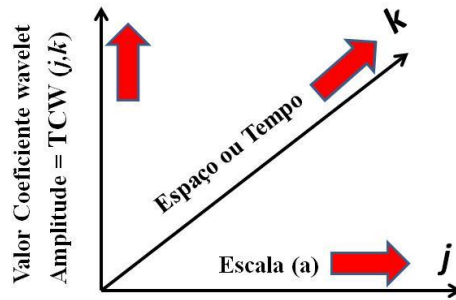
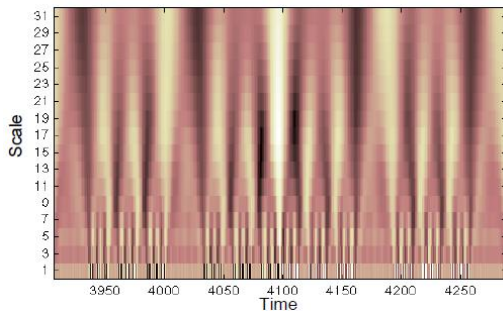
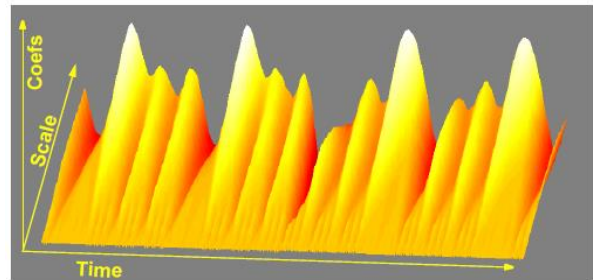


Figura 3.11- Explicação eixos dos gráficos da TCW (modificado, Gutierrez, 2002).



(a) Gráfico 2D TCW



(b) Gráfico 3D TCW

Figura 3.12- Exemplo gráficos TCW (Misiti *et al*, 2002).

Para a transformada contínua de wavelet, a wavelet $\psi^{a,b}$ pode ser descrita como uma função analítica, que depende do parâmetro a (escala), e do parâmetro b (translação) que muda continuamente sobre todo real, \mathbb{R} , excluindo $a = 0$. A transformada contínua de wavelet é definida pela seguinte equação:

$$W_{\psi}^f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (3.8)$$

3.1.2 - Transformada Discreta de Wavelet (TDW)

O cálculo dos coeficientes wavelet em cada escala possível gera uma boa quantidade de dados. Para minimizar esta tarefa, faz-se a escolha de apenas um subconjunto de escalas e posições. As escalas e posições escolhidas são baseadas em potências de dois, chamadas de escalas diádicas, o que resulta em uma análise muito mais eficiente. Esta análise é chamada de Transformada Discreta de Wavelet (TDW) (Ovanesova 2000).

Para este fim, a escala é definida como $a = 2^j$ e a translação ou deslocamento $b = k2^j$ onde $(j, k) \in Z$ e Z é o conjunto dos números inteiros. Usando estes parâmetros, a TDW é dada como:

$$TDW_{j,k} = 2^{-j/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\psi(2^{-j}x - k)dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\psi_{j,k}(x)dx \quad (3.9)$$

Abaixo, estão os passos para a detecção de danos usando o TDW:

1. Obtenção de um sinal associado à resposta da estrutura completa ou examinar apenas uma área específica da estrutura;
2. Cálculo dos coeficientes de wavelet, efetuando a TDW do sinal em níveis diferentes ou escalas diferentes. Os coeficientes Wavelet $C_{j,k}$ são obtidos a partir da seguinte equação:

$$C_{j,k} = \int_Z f(x) \psi_{j,k}(x)dx \quad (3.10)$$

Onde $f(x)$ é o sinal analisado, $j \in N$ é a escala, e $k \in Z$ é a posição; N é o conjunto de todos os inteiros positivos; Z é o conjunto de todos os números inteiros, e $\psi_{j,k}(x)$ é a Wavelet expressa como:

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}}\psi_{j,k}(2^j x - k) \quad (3.11)$$

3. Plotagem do gráfico dos coeficientes de Wavelet para cada nível da decomposição.

Examinar a distribuição dos coeficientes Wavelet para cada nível. A mudança brusca (isto é, um pico) na distribuição dos coeficientes wavelet significa uma perturbação local. Se a perturbação detectada não é causada por uma fonte conhecida, como a descontinuidade geométrica ou do material, então isso significa que existe um dano perto do local da perturbação.

3.2 – FAMÍLIAS

Matematicamente, uma função $\psi(x)$, para ser considerada uma wavelet-mãe, deve pertencer ao espaço $L^2 \mathbb{R}$ e satisfazer a condição de admissibilidade. Sem muito rigor matemático, uma wavelet-mãe é uma função que oscila, tem energia finita e tem valor médio nulo. As diferentes famílias de funções wavelet são:

3.2.1 - Família Wavelet Haar.

A primeira e a mais simples das wavelets é a wavelet Haar. A wavelet Haar se assemelha a uma função degrau. Ela representa a wavelet Daubechies db1 mesmo.

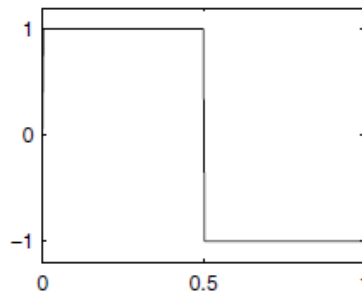


Figura 3.13- Função wavelet Harr (Misiti e Poggi, 2001).

3.2.2 - Família Wavelet Daubechies.

Ingrid Daubechies (Daubechies (1992)), uma das estrelas mais brilhantes no mundo da pesquisa das wavelet, inventou as que são chamadas de wavelets ortonormais. Os nomes das wavelets Daubechies são escritos como “dbN”, onde N é a ordem, e db o "sobrenome" da wavelet. A wavelet db1, como mencionado acima, é o mesmo que wavelet Haar. Aqui estão as principais funções wavelet dos próximos nove membros da família:

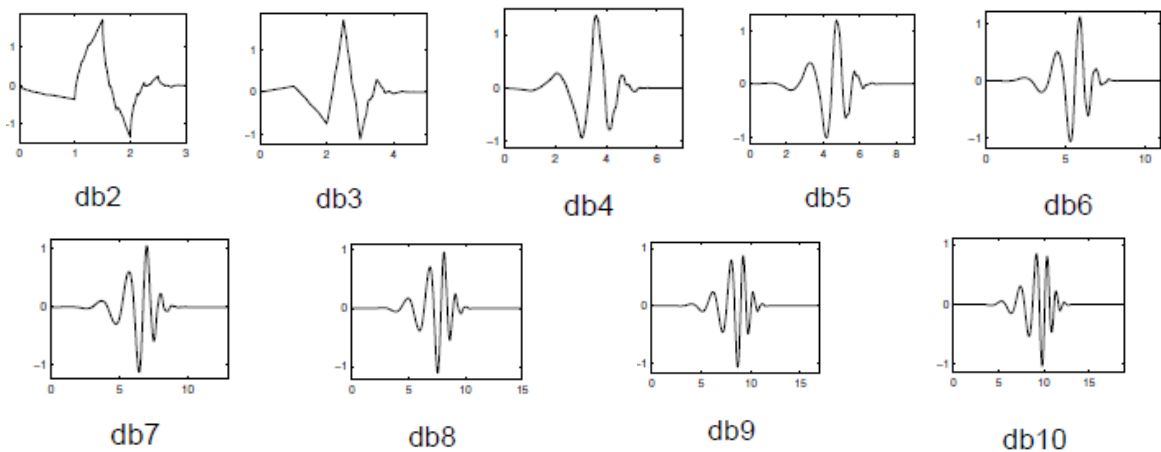


Figura 3.14- Funções wavelet- Daubechies (Weeks, 2012)..

As *wavelets* ortogonais de Daubechies, “dbN” são perfeitamente compactas no tempo, mas no domínio da frequência tem um alto grau de superposição espectral entre as escalas. Sua principal vantagem é serem ortogonais, o que significa que um erro no sinal de entrada não cresce com a transformação, e a estabilidade numérica computacional é assegurada.

3.2.3 - Família Wavelet Biortogonal.

Bases de wavelets biortogonais foram introduzidas por Daubechies (1992) com o intuito de obter wavelets que fossem simétricas e de suporte compacto (De Souza et al., 2007). A Figura 3.14 mostra alguns exemplos de wavelets biortogonais.

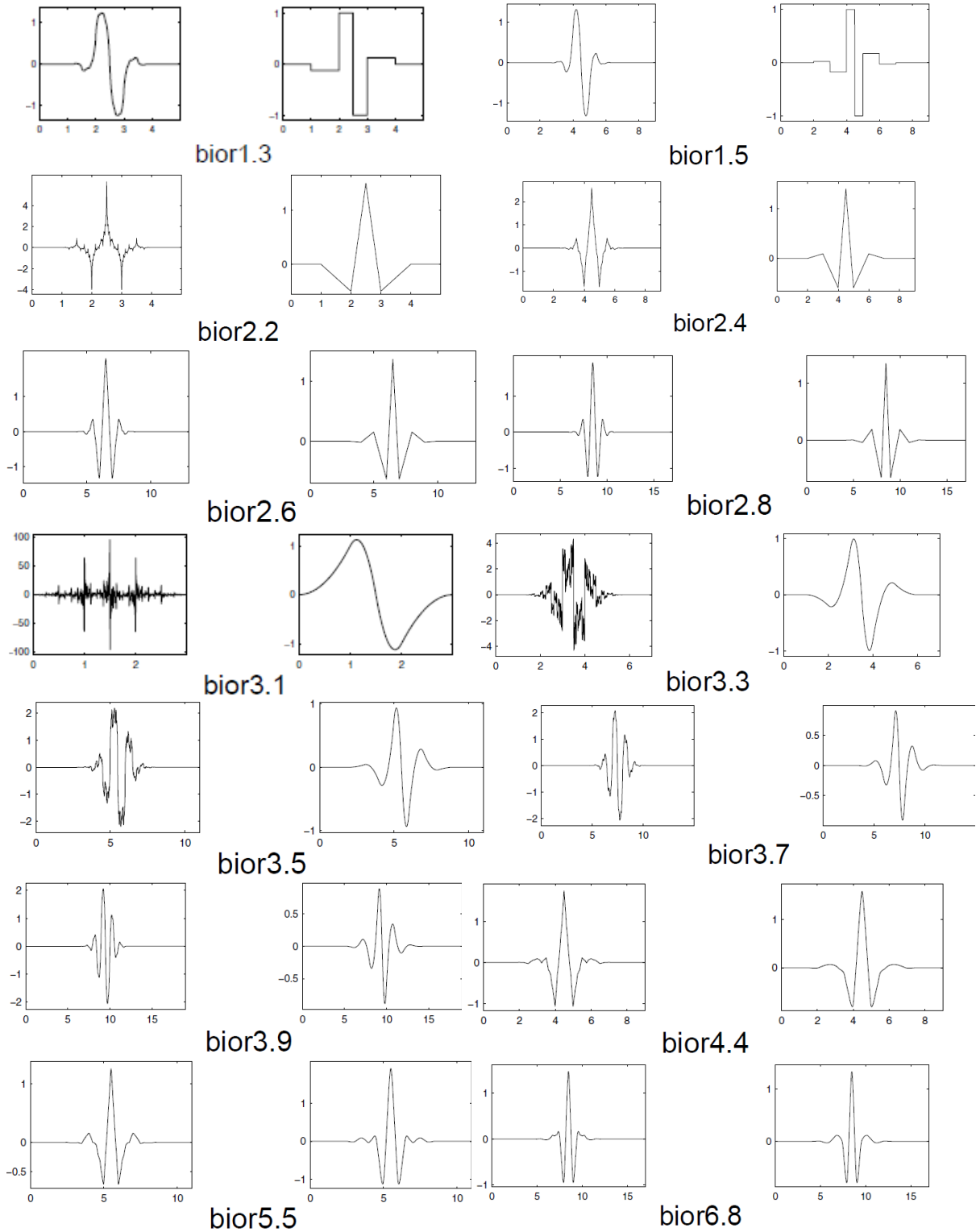


Figura 3.15- Funções wavelet Biortogonais (Daubechies (1992)).

3.2.4 - Família Wavelet Coiflets.

Construída por I. Daubechies a pedido de R. Coifman, a função de onda tem $2N$ momentos iguais a “0” e a função de escala tem $2n-1$ momentos iguais a 0. As duas funções têm um comprimento de apoio de $6N-1$ (Figura 3.16).

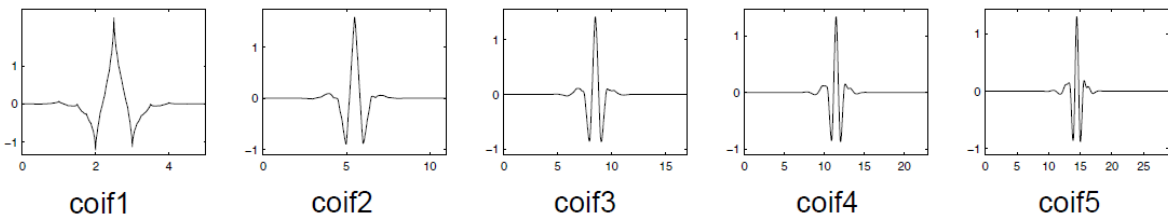


Figura 3.16- Funções wavelet coiflet (Daubechies, 1992).

3.2.5 - Família Wavelet Symlets.

As wavelets symlets são quase simétricas, e são propostas por Daubechies como modificações para da família db. As propriedades das duas famílias (dbN e Sym) são semelhantes, mas as funções *symlets* tendem a ser simétricas. Aqui estão as principais funções wavelet.

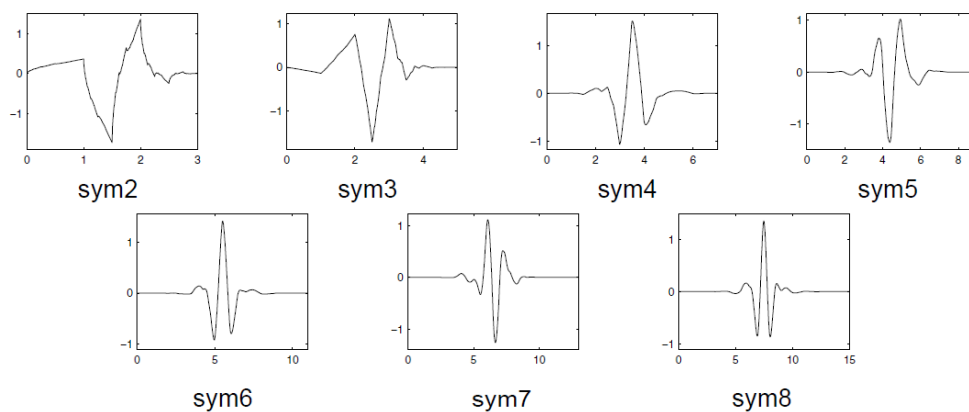


Figura 3.17- Função wavelet Symlet (Weeks, 2012).

3.3 - PROPRIEDADES DAS WAVELETS

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

- (a) **Ortogonalidade e biortogonalidade:** estas propriedades garantem o cálculo rápido dos coeficientes de wavelet. Infelizmente, nem todas as funções de wavelet possuem estas duas propriedades.

Duas funções $u(x)$ e $g(x)$ são ortogonais se seu produto interno é nulo:

$$\langle u(x), g(x) \rangle = \int_a^b u(x)g^*(x) dx \quad (3.12)$$

$$= 0 \quad ; \quad g^*: \text{complexo cojugado de } g(x)$$

O termo "bi-ortogonal" refere-se às duas bases diferentes que são ortogonais entre si, mas que não formam um conjunto ortogonal.

(b) **Suporte compacto:** Esta propriedade significa que a função *wavelet* não assume o valor zero para intervalos finitos, permitindo representar de forma mais eficiente os sinais que têm características localizadas.

(c) **Momentos nulos:** esta propriedade determina o grau do polinômio que podem ser aproximados. Esta propriedade é usada para selecionar a *wavelet*-mãe mais adequada para a detecção de danos. Mais precisamente, se o valor médio de $x^k \psi(x)$ é igual a zero (onde $\psi(x)$ é a função *wavelet*), para $k = 0, 1, \dots, n$, então a função *wavelet* tem $n + 1$ momentos de fuga e polinômios de grau n são suprimidos por esta função *wavelet*.

(d) **Regularidade:** é o número de vezes que uma função é diferenciável no ponto x_0 . Singularidades em uma função podem ser detectadas por essa regularidade. s é a regularidade da função f ; se a derivada de f de ordem m aproxima-se a $|x - x_0|^r$ localmente ao redor de x_0 , então $s = m + r$, com $0 < r < 1$.

Tabela 3.2- Propriedades funções *wavelet*-mãe.

Propriedade	morl	mexh	meyr	haar	dbN	symN	coifN	BiorNr.Nd
Infinitamente Regular	x	x	x					
Suporte Compacto Ortogonal				x	x	x	x	
Suporte Compacto Biorortogonal								x
Ortogonal			x	x	x	x	x	
Biorortogonal			x	x	x	x	x	x
Número de momentos nulos arbitrarios					x	x	x	x
Transformada continua	x	x	x	x	x	x	x	x
Transformada Discreta			x	x	x	x	x	x

Tabela 3.3- Propriedades funções wavelet-mãe.

Propriedade	rbioNr.Nd	gaus	dmey	cgau	cmor	fbsp	shan
Infinitamente Regular		x		x	x	x	x
Suporte Compacto Ortogonal							
Suporte Compacto Biortogonal	x						
Ortogonal							
Biortogonal	x						
Número de momentos nulos arbitrários	x						
Transformada continua	x	x					
Transformada Discreta	x		x				

De acordo com essas propriedades, a maioria das wavelets-mãe conhecidas são classificadas em (Ovanesova e Suárez, 2004):

- As funções: Haar, Daubechies de ordem n, Meyer, Symlets de ordem n e as Coiflets de ordem n são exemplos de wavelets mães ortogonais.
- As funções: Haar, Daubechies de ordem n, Symlets de ordem n e os Coiflets de ordem n são wavelets mãe tem um suporte compacto.
- As funções: Daubechies de ordem n, Symlets de ordem n e as Coiflets de ordem n, são funções wavelet-mãe que tem um número arbitrário de momentos de fuga;
- As funções: Morlet, Meyer e Gaussian wavelets são regulares. Por outro lado, as funções Daubechies de ordem n, Symlets de ordem n e as Coiflets de ordem n são wavelets-mãe que apresentam pouca regularidade.

As principais vantagens da identificação de dano utilizando o método Wavelet são (Ovanesova, 2000):

1. Capacidade de realizar análise local de um sinal no domínio do espaço ou no tempo. Assim, as wavelets são capazes de revelar aspectos que outras técnicas de análise de sinal não conseguem detectar;
2. Capacidade de analisar o sinal em qualquer intervalo de espaço ou de tempo em que as mudanças de função são rápidas, o que causa problemas para a transformada rápida de Fourier. A análise de Fourier espalha uma mudança rápida em um pequeno intervalo de tempo ao longo do espectro de frequências. A transformada wavelet, no entanto, produz não só a informação de frequência, mas também informação de tempo;

3. Eliminação dos problemas de *aliasing* (ruído), exibidas pela Transformada Rápida de Fourier (TRF);
4. Oferecem uma redução potencial em recursos computacionais necessários para processar uma transformação do sinal;

Os métodos de identificação do dano baseados na análise das Wavelets podem se tornar uma ferramenta confiável que pode ser aplicada à manutenção e reabilitação de infraestruturas existentes (pontes, conduto de água, distribuição de gás, energia elétrica e torres de transmissão, barragens e outras estruturas hidráulicas).

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

3.4 - APLICAÇÃO

Para a aplicação da transformada de wavelet nesta pesquisa foi utilizado o programa MATLAB, a seguir é apresentada a descrição desta ferramenta:

3.5 - WAVELET TOOLBOX – MATLAB

A caixa de ferramentas Wavelet é uma coleção de funções construídas no programa MATLAB, ambiente de computação técnica. Ele fornece ferramentas para a análise e síntese de sinais e imagens, e ferramentas para aplicações estatísticas, usando wavelets e pacotes wavelet no âmbito do MATLAB. A caixa de ferramentas fornece duas categorias de ferramentas:

- Linha de funções de comando;
- Gráficos e ferramentas interativas.

A primeira categoria de ferramentas é composta de funções, chamadas diretamente a partir a linha de comando ou de seus próprios aplicativos. A maioria destas funções são M – files. Um resumo das funções Wavelet Toolbox que estão disponíveis no programa MATLAB.

A segunda categoria de ferramentas é um conjunto de ferramentas de interface gráfica que permite o acesso a uma ampla funcionalidade. O acesso a essas ferramentas se faz digitando “**wavemenu**”, onde aparece uma janela que é mostrada na Figura 3.18:

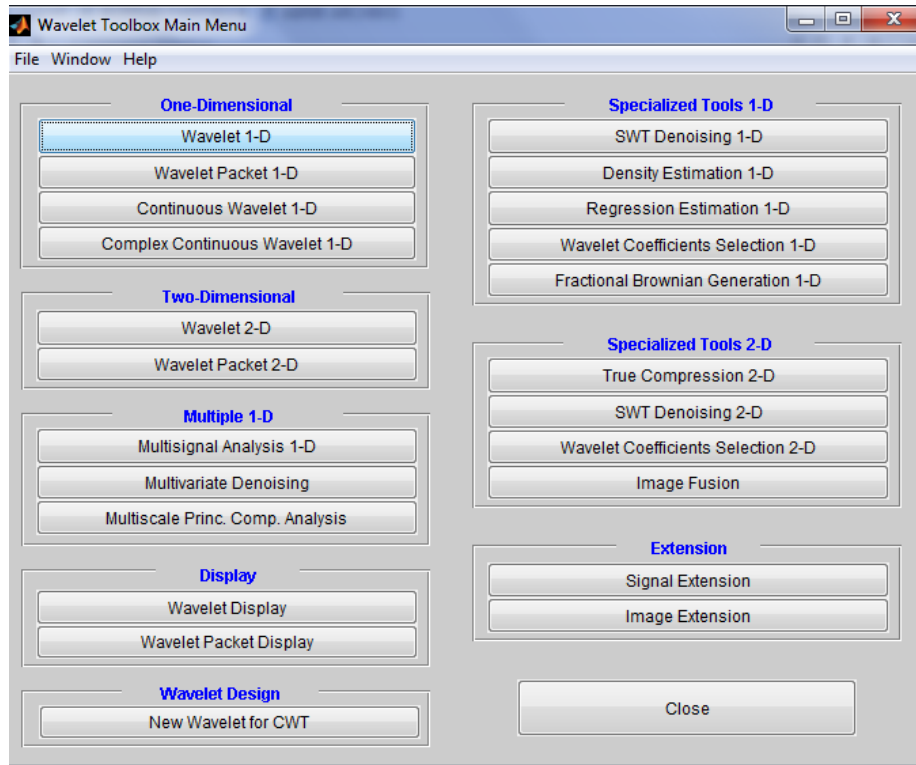


Figura 3.18- Janela "wavemenu"-MATLAB

As diferentes funções wavelet disponíveis nas ferramentas do programa MATLAB são mostradas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Funções wavelet disponíveis no programa MATLAB.

Família Wavelet- Nome curto	Família Wavelet Nome
“haar”	Wavelet Haar
“db”	Wavelet Daubechies
“sym”	Wavelet Symlets
coif“”	Wavelet Coiflets
“bior”	Wavelet Biortogonal
“rbior”	Wavelet Inversa Biortogonal
“meyr”	Wavelet Meyer
“dmey”	Wavelet Discreta Meyer

Família Wavelet- Nome curto	Família Wavelet Nome
“gaus”	Wavelet Gaussiana
“mexh”	Wavelet Chapéu Mexicano
“morl”	Wavelet Morlet
“cgau”	Wavelet Gaussiana Complexa
“shan”	Wavelet Shannon
“fbsp”	Wavelet Freqüência B-spline
“cmor”	Wavelet Morlet complexa

3.6 - MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

Os métodos de interpolação foram necessários, para aumentar o número de dados obtidos na análise experimental, numérica e analítica. A coleta dos dados experimentais limita-se ao número de pontos que podem ser medidos com a instrumentação disponível.

Para aplicar a Transformada de Wavelet, é necessário aumentar os dados discretos, a fim de que se possam obter bons resultados na localização do dano. O método de interpolação utilizado nesta pesquisa foi o Spline Cubico, que de acordo com Palechor (2013), apresentou os melhores resultados na identificação de danos em vigas metálicas sob ensaios estáticos e dinâmicos.

3.6.1 - Interpolação com splines

Uma função spline é formada por vários polinômios, cada um definido sobre um intervalo. Esses polinômios se unem seguindo certas condições de continuidade. Suponhamos que dispomos de $n + 1$ pontos, que denominaremos nós (Boor, 1990):

$$t_0 < t_1 < \dots \dots t_n \quad (3.13)$$

Suponha que tem um inteiro fixo $k \geq 0$. Dizemos que uma função **spline de grau k** com nós em t_0, t_1, \dots, t_n é uma função S que satisfaz as seguintes condições:

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

Os splines de grau zero são funções constantes por zonas. Uma forma de apresentar um spline de grau zero é a seguinte:

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x) = c_0 & x \in [t_0, t_1) \\ S_1(x) = c_1 & x \in [t_1, t_2) \\ \vdots & \vdots \\ S_{n-1}(x) = c_{n-1} & x \in [t_{n-1}, t_n) \end{cases} \quad (3.14)$$

Os intervalos de $[t_{i-1}, t_i)$ não se intersectam entre si, de modo que não existe ambiguidade na definição da função nos nós. Um spline de grau um pode-se ser definido por:

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x) = a_0x + b_0 & x \in [t_0, t_1) \\ S_1(x) = a_1x + b_1 & x \in [t_1, t_2) \\ \vdots & \vdots \\ S_{n-1}(x) = a_{n-1}x + b_{n-1} & x \in [t_{n-1}, t_n) \end{cases} \quad (3.15)$$

Nas Figura 3.19 a Figura 3.20 apresentam os gráficos correspondentes ao spline de grau zero, e ao spline de grau um:

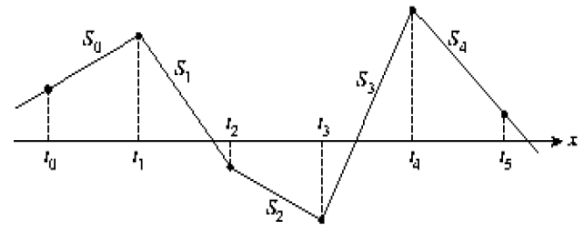
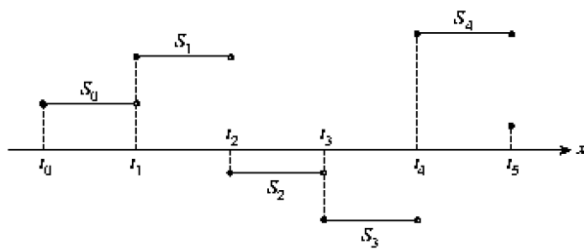


Figura 3.19- Spline de grau 0 (Boor, 1990).

Figura 3.20- Spline de grau 1 (Boor, 1990).

3.6.1.1 - Splines cúbicos.

O spline cúbico ($k = 3$) é o spline mais empregado e o mais eficiente na área de identificação de danos, devido ao fato de proporcionar um excelente ajuste aos pontos sem perder informação do local danificado e seu cálculo não é excessivamente complexo (Cristina e Cunha, 1993).

Sobre cada intervalo $[t_0, t_1]$, $[t_1, t_2]$, ..., $[t_{n-1}, t_n]$, S é definido por um polinômio cúbico diferente. S_i é um polinômio cúbico que representa a S no intervalo $[t_i, t_{i+1}]$. Assim:

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x) = S_0 & x \in [t_0, t_1) \\ S_1(x) = S_1 & x \in [t_1, t_2) \\ \vdots & \vdots \\ S_{n-1}(x) = S_{n-1} & x \in [t_{n-1}, t_n) \end{cases} \quad (3.16)$$

Os polinômios S_{i-1} e S_i interpolam o mesmo valor no ponto t_i , quer dizer, se cumpre que:

$$S_{i-1}(t_i) = y_i = S_i(t_i) \quad (1 \leq i \leq n-1) \quad (3.17)$$

Garante-se, assim, que S seja contínua ao longo de todo o intervalo. Além disso, é assumido que S' e S'' são contínuas, uma condição que é usada na dedução de uma expressão analítica para a função spline cúbica.

Aplicando as condições de continuidade do spline S e das derivadas primeiras S' e segunda S'' , é possível encontrar a expressão analítica do spline. A expressão resultante é:

$$S_i(x) = \frac{z_i}{6h_i}(t_{i+1} - x)^3 + \frac{z_{i+1}}{6h_i}(x - t_i)^3 + \left(\frac{y_{i+1}}{h_i} + \frac{z_{i+1}h_i}{6}\right)(x - t_i) + \left(\frac{y_i}{h_i} - \frac{z_i h_i}{6}\right)(t_{i+1} - x) \quad (3.18)$$

Na expressão anterior $h_i = t_{i+1} - t_i$ e z_0, z_1, \dots, z_n são incógnitas. Para determinar os valores, utilizamos as condições de continuidade que devem cumprir as funções. O resultado é o seguinte:

$$h_{i-1}z_{i-1} + 2(h_i + h_{i-1})z_i + h_i z_{i+1} + 1 = \frac{6}{h_{i-1}}(y_{i+1} - y_i) - \frac{6}{h_{i-1}}(y_i - y_{i-1}) \quad (3.19)$$

A Equação (3.19), com $i = 1, 2, \dots, n-1$ gera um sistema de $n-1$ equações lineares com $n+1$ incógnitas z_0, z_1, \dots, z_n . Podemos escolher z_0 e z_1 de forma arbitrária e desenvolver o sistema de equações resultante para obter os valores de z_1, z_2, \dots, z_{n-1} . Uma escolha particularmente adequada é fazer $z_0 = z_1 = 0$. A função spline resultante é denominada spline cúbico natural e o sistema de equações linear em forma matricial é:

$$\begin{pmatrix} u_1 & h_1 & & & & & \\ h_1 & u_2 & h_2 & & & & \\ & h_2 & u_3 & h_3 & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & & h_{n-3} & u_{n-2} & h_{n-2} & \\ & & & & h_{n-2} & u_{n-1} & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ z_{n-2} \\ z_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_{n-2} \\ v_{n-1} \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

Onde:

$$h_i = t_{i+1} - t_i \quad (3.21)$$

$$u_i = 2(h_i + h_{i-1}) - \frac{h_{i-1}^2}{u_{i-1}} \quad (3.22)$$

$$b_i = \frac{6}{h_i}(y_{i+1} - y_i) \quad (3.23)$$

$$v_i = b_i - b_{i-1} - \frac{h_{i-1}v_{i-1}}{u_{i-1}} \quad (3.24)$$

Este sistema de equações, que é tridiagonal, pode ser resolvido pela eliminação Gaussiana. O valor de spline S em qualquer ponto x pode ser calculado de forma eficiente, interpolando, com a seguinte expressão:

$$S_i(x) = y_i + (x - t_i)[C_i + (x - t_i)[B_i + (x - t_i)A_i]] \quad (3.25)$$

Onde:

$$A_i = \frac{1}{6h_i}(z_{i+1} - z_i) \quad (3.26)$$

$$B_i = \frac{z_i}{2} \quad (3.27)$$

$$C_i = -\frac{h_i}{6}z_{i+1} - \frac{h_i}{3}z_i + \frac{1}{h_i}(y_{i+1} - y_i) \quad (3.28)$$

4. METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta nesta pesquisa, utilizada na avaliação e identificação de danos em vigas metálicas biapoiadas (Perfil-I) de 5m e 6m de comprimento, utilizando somente a resposta danificada da estrutura. O método proposto consiste na obtenção das frequências naturais da estrutura quando é adicionada no sistema uma massa posicionada em diferentes nós definidos na discretização prévia (Palechor et al. (2017)).

O processo de obtenção das frequências é repetido ao longo da estrutura previamente discretizada em elementos de igual comprimento. Após a obtenção das frequências, estas são interpoladas pelo método cubic spline de terceiro grau para obter uma curva e em seguida aplica-se a Transformada Discreta de Wavelet para localizar as regiões de possíveis enfraquecimentos da estrutura por causa da presença do dano.

Esta metodologia foi avaliada de forma experimental e numérica. Na análise experimental foram feitos testes de impacto, analisando o comportamento das vigas após uma força de excitação aplicada em um período de tempo curto. Na análise numérica feita no software ANSYS, foram consideradas modelagens prévias e posteriores aos ensaios experimentais. Nas modelagens prévias foi comprovada a eficácia e viabilidade do método realizando uma análise modal aplicando a metodologia proposta. Esta análise modal requer um gasto computacional baixo e serve como ferramenta para determinar a viabilidade do método. Na análise numérica posterior foram considerados todos os parâmetros e características de um ensaio transiente. Isto, com o propósito de reproduzir mais efetivamente o comportamento real das vigas nos ensaios experimentais. Este tipo de análise requer um gasto computacional maior e como resultado têm-se os diferentes sinais temporais (espectros de acelerações), para cada posição da massa adicional, da mesma que nos ensaios experimentais, estes sinais temporais tiveram o mesmo tratamento, inclusive considerando a adição de ruído no sinal para ter uma maior aproximação dos resultados reais obtidos nos ensaios experimentais.

4.1 – Roteiro da metodologia.

O roteiro da metodologia proposta e validada experimentalmente e numericamente é apresentado a seguir:

- 1) Discretização da estrutura.

Antes de começar a análise da estrutura deve-se fazer uma discretização, no caso da viga (Perfil-I) a discretização foi feita na mesa superior ao longo do eixo longitudinal da viga (Figura 4.1). Para a viga metálica de 5m e 6m de comprimento foram testados diferentes tamanhos de elemento: 10cm, 20cm, 30cm, 40cm e 50cm. Isto para determinar a influência da separação dos nós na discretização utilizada e assim, estabelecer uma discretização ótima para as viga em estudo tornando o método o mais prático possível.

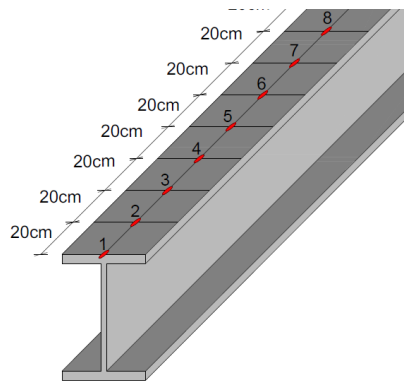


Figura 4.1- Discretização da viga.

2) Definição da massa concentrada.

Foram testadas diferentes massas adicionais, com o intuito de estabelecer qual a massa necessária para gerar perturbações nas regiões danificadas da viga. Os valores de massa adotados dependeram do corte de chapas metálicas retangulares, cujas massas foram: 1,1680 kg, 3,266 kg, 5,526 kg e 10,320 kg, valores que representam entre 1% e 20% da massa total das vigas metálicas ensaiadas. Massas maiores foram testadas não apresentando bons resultados, além de se tornar pouco prático devido à dificuldade de posicioná-las e dos efeitos de carga estática, provocando uma diminuição da resistência.

3) Posicionamento da massa no primeiro nó.

Após a escolha da massa adicional, esta deve ser posicionada sobre o primeiro nó. Durante este processo deve evitar a trepidação da massa adicional com a estrutura, isto para evitar uma interferência tanto do ruído gerado, quanto pela frequência rotacional da massa com a frequência natural da estrutura objeto de estudo (Figura 4.2).

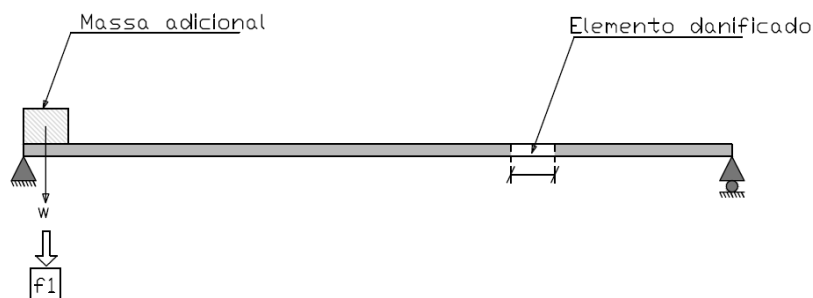


Figura 4.2- Posicionamento da massa adicional no primeiro nó.

4) Obtenção das frequências naturais.

Nesta etapa são obtidas as primeiras três frequências naturais de flexão.

Durante a pesquisa, as frequências obtidas nos ensaios experimentais foram o resultado do processamento das leituras de dois acelerômetros localizados estrategicamente, nos pontos de máxima amplitude. Estes dados foram processados aplicando: Janelamento exponencial, Transformada Rápida de Fourier (TFF), métodos de correção de frequências e métodos de interpolação.

Na análise numérica desenvolvida no ANSYS, foi realizada a modelagem transiente, dando como resultado os diferentes espectros de acelerações para cada posição de massa.

Estes sinais logo foram processados da mesma forma como foram executados os sinais nos ensaios experimentais.

5) Reposicionamento da massa concentrada no seguinte nó.

Após a obtenção das frequências naturais para a primeira posição de massa, esta é reposicionada no próximo nó (Figura 4.3).

6) Obtenção das primeiras três frequências para a posição de massa atual.

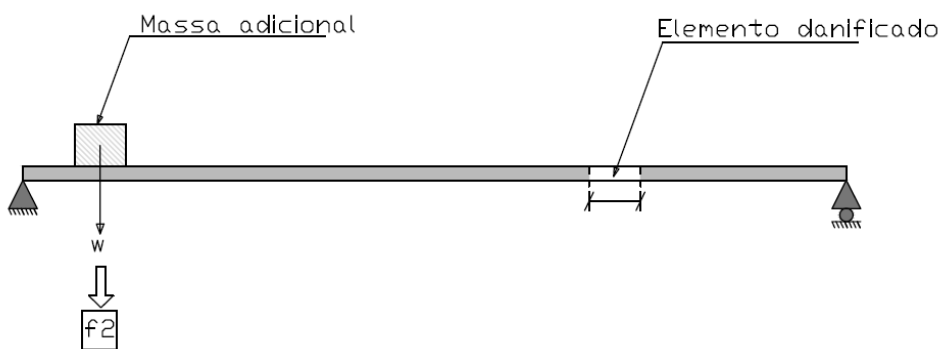


Figura 4.3- Posicionamento da massa adicional no segundo nó.

7) O passo 5) e 6) é repetido até percorrer a totalidades de nós da estrutura (Figura 4.4 e Figura 4.5).

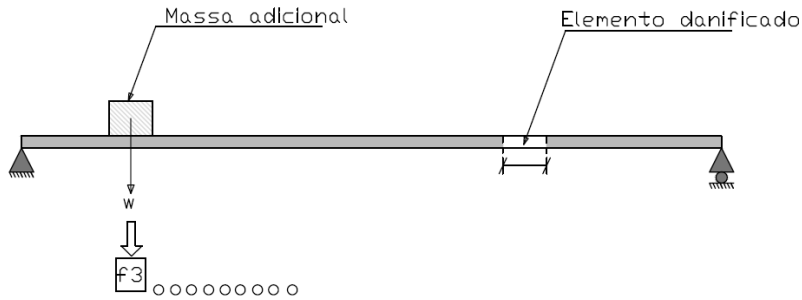


Figura 4.4 - Posicionamento da massa adicional no terceiro nó.

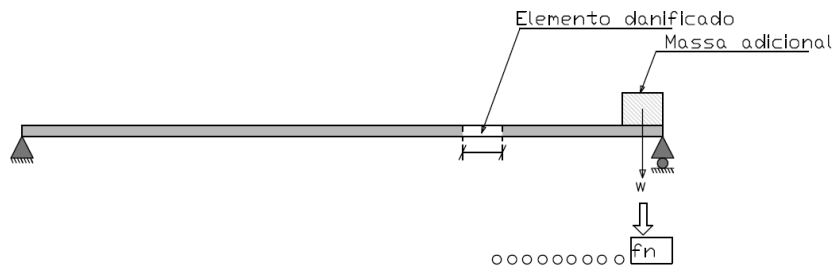


Figura 4.5 - Posicionamento da massa adicional no nó n .

Os dados de Frequência vs. Posição de Massa são plotados (Figura 4.6) e interpolados com o método de interpolação *cubic spline* (Figura 4.7), conforme foi apresentado no item 3.6 do cap.

No método de identificação de danos proposto é utilizada a Transformada Discreta (TDW), para isso é necessário aumentar o número de dados em relação aos obtidos na análise experimental, por isso foi necessário aplicar métodos de interpolação na curva Frequências vs. Posição da Massa (Figura 4.6).

Segundo Palechor et al. (2014), dentre os métodos de interpolação analisados, o método de interpolação mais adequado para identificação de danos é o *Cubic-Spline*, cuja função está disponível no software MATLAB:

- **A sintaxe:**

$$yy = spline(x, Y, xx)$$

$$pp = spline(x, Y)$$

Algoritmo 4.1- Sintaxe interpolação cubic-spline – MATLAB.

- **Descrição:**

Para nosso caso a sintaxe é:

```

P(a, b) = [Posição de massa, Frequência]
x = P(:,1)
y = P(:,2)
u(:,2) = spline(x, y, [0: 6/200: 6]);
u(:,1) = 0: L/200: L;

```

Algoritmo 4.2 - Algoritmo interpolação *Cubic-Spline*.

Onde:

$P(a, b)$, é a matriz das frequências; $x = P(:,1)$ que corresponde à posição da massa; $y = P(:,2)$ a frequência correspondente a cada posição de massa.

$u(m, n)$ é a matriz na qual se guarda os valores interpolados; $u(:,1)$ é o número de total de pontos, e $u(:,2)$ são os dados interpolados. O número 200 corresponde ao número total de pontos interpolados.

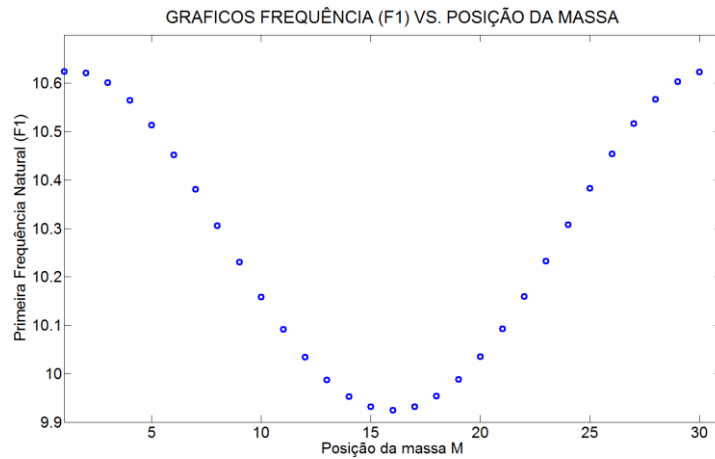


Figura 4.6 - Plotagem das frequências obtidas para cada posição da massa.

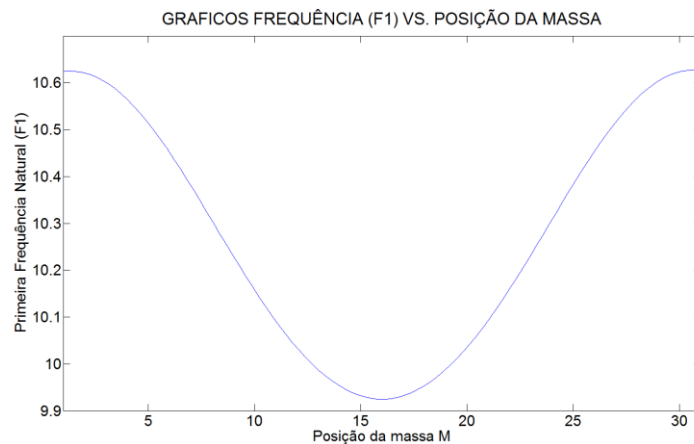


Figura 4.7- Interpolação do gráfico obtido na Figura 4.6.

8) Na curva interpolada (Figura 4.7) é aplicada a Transformada Discreta de Wavelet.

De acordo com Palechor (2013) as funções wavelet mãe escolhidas para a TDW que apresentaram bons resultados na identificação de danos foram: rbio2.6, bior6.8, sym6 e db5. Estas funções têm as seguintes características em comum: grau arbitrário de regularidade, número arbitrário de momentos nulos, as funções são simétricas no eixo y-y e tem um suporte compacto.

Tabela 4.1- Funções wavelet mãe utilizadas.

FUNÇÕES WAVELET MÃE	
TDW	TCW
rbio2.6	db5
bior6.8	coif4
sym6	-
db5	-

O algoritmo utilizado para a TDW no programa MATLAB foi o seguinte:

```

s = y4(1:length(y4));
l_s = length(s);
[ca1,cD1] = dwt(s,'db3');
D1 = upcoef('d',cD1,'db3',1,l_s);
figure(4);
plot(D1);
axis([0 100 -8 8]);
hold on
set(gca,'Xtick',0:5:100)
title('DISCRETE WAVELET TRANSFORM (DWT)', 'fontsize', tamanho_rotulos_ejes)
xlabel('NODES', 'fontsize', tamanho_rotulos_ejes)
ylabel('WAVELET COEFFICIENT (DWT) - db3', 'fontsize', tamanho_rotulos_ejes)
set(gca, 'FontSize', tamanho_letra_ejes);

```

Algoritmo 4.3 - Transformada Discreta de Wavelet- MATLAB.

9) Localização visual do dano nos gráficos da TDW.

Os resultados da metodologia para identificação de danos em uma viga de 6 m de comprimento ($L = 6$ m) com o dano localizado no meio do vão ($L/2$) são plotados no gráfico Coeficientes Wavelet vs. Número do Elemento como mostrado na Figura 4.8.

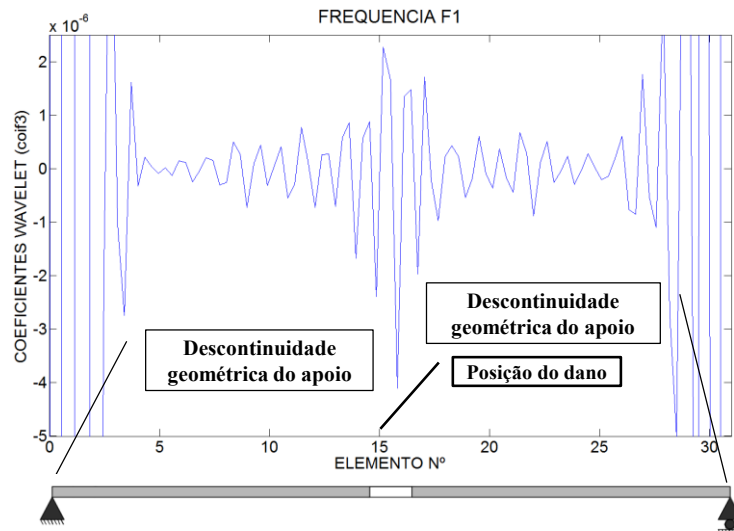


Figura 4.8 - Gráfico Coeficiente Wavelet vs. Número do Elemento.

Neste exemplo apresentado, o dano gerou uma perturbação local ao redor do elemento 15, correspondente ao elemento danificado, localizado na metade do vão ($x = 3m$) para a viga de 6m de comprimento.

As wavelet mãe escolhidas são capazes de detectar o dano através de elevados picos na região danificada, além das perturbações geradas pelo dano, têm-se as perturbações nas extremidades, devido às descontinuidades geométricas nos apoios (Figura 4.8). Vale ressaltar que o método baseado em wavelets utilizado nesta pesquisa, enquadra-se no método de detecção de danos de nível II, segundo a classificação proposta por Rytter (2003), a qual define se a estrutura está danificada e determina a localização do dano.

4.2 – Fluxograma metodologia.

Nos fluxogramas apresentados nas Figura 4.9 e Figura 4.10 são apresentados a estrutura geral da tese e o roteiro seguido para a validação do método de identificação de danos proposto:

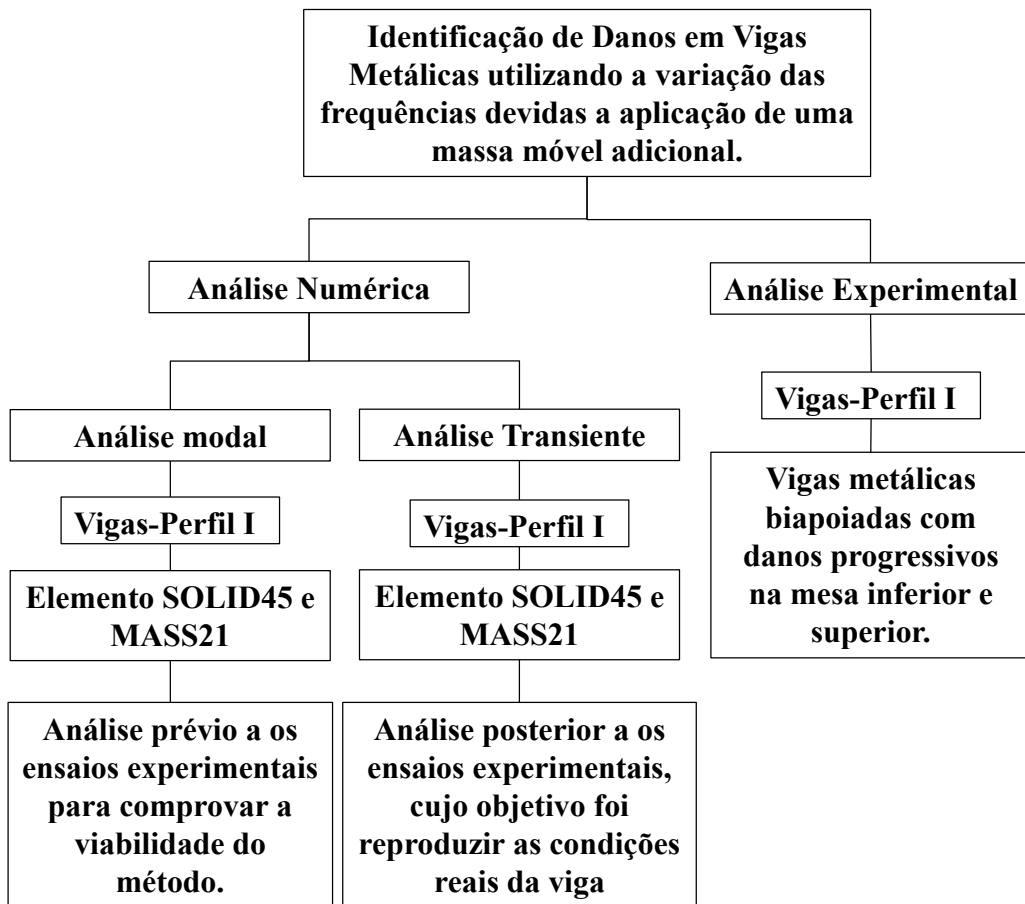


Figura 4.9 - Estrutura geral da tese.

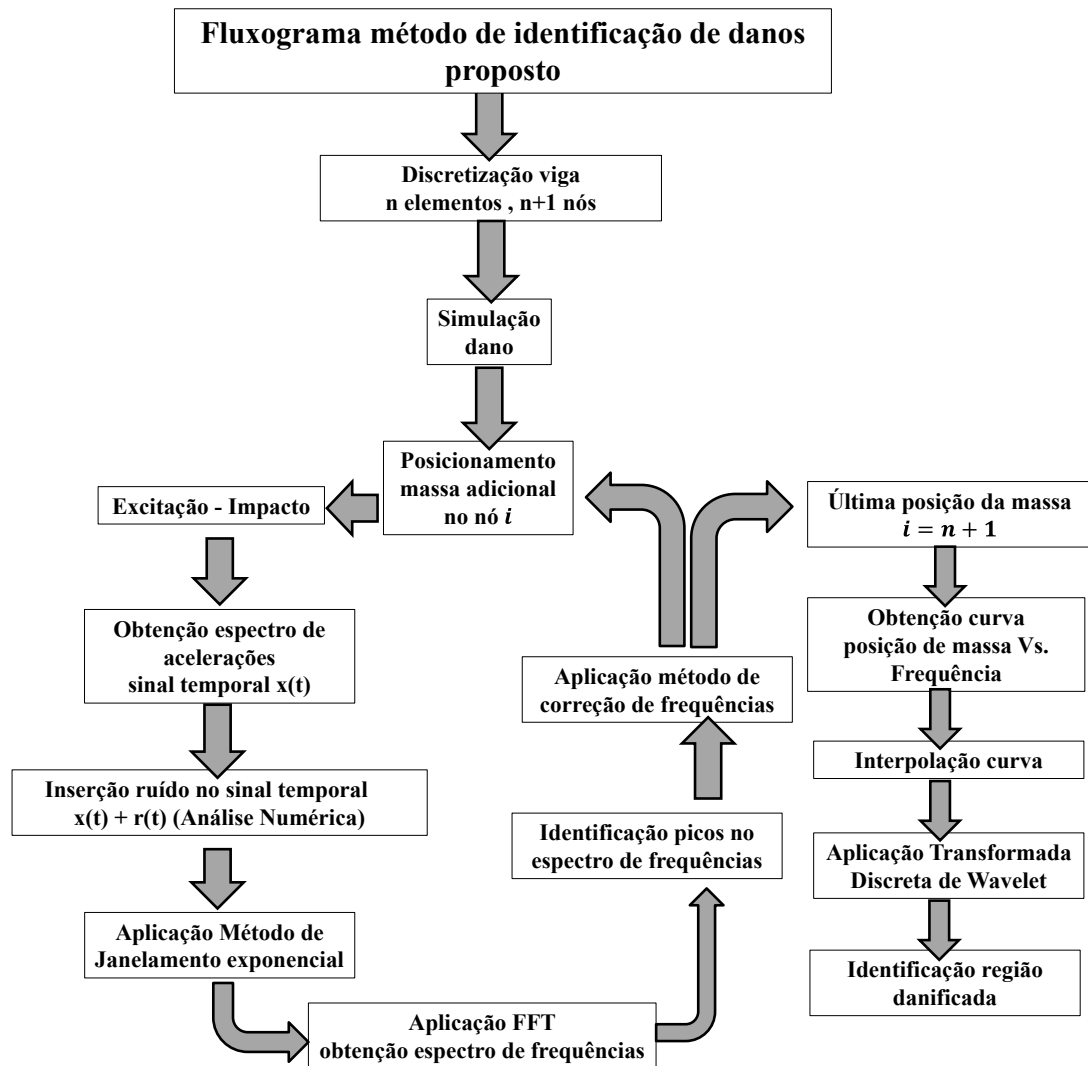


Figura 4.10 - Metodologia para a identificação de danos.

4.3 – Propriedades geométricas e do material das vigas ensaiadas.

Foram utilizadas nos ensaios vigas metálicas (perfis I) de aço MR-250 com comprimentos de 5 m e 6 m. As características geométricas e do material das vigas ensaiadas são mostradas na Tabela 4.2. Cabe ressaltar que os valores, principalmente da tensão de escoamento (f_y) e coeficiente de Poisson (ν) foram escolhidos do catálogo fornecido pelo fabricante. O módulo de elasticidade (E), área da seção transversal (A), densidade (ρ) e momento de inércia (I_x), foram obtidos experimentalmente.

Os ensaios dinâmicos nas vigas metálicas foram desenvolvidos no laboratório de sistemas e vibrações do Programa de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília.

Tabela 4.2 - Características nominais da viga (Pfeil (2009))

Perfil I - Aço 102 X 11,4	
h(cm)	10,16
h₀(cm)	8,68
t_f(cm)	0,74
t₀(cm)	0,483
c(cm)	1,59
b(cm)	6,76
Area (cm²)	14,5
I_x (cm⁴)	252
W_x (cm³)	49,7
i_x (cm)	4,17
I_y (cm⁴)	31,7
W_y (cm³)	9,37
i_y (cm)	1,48
Z_x(cm³)	56,220
Z_y (cm³)	17,414
f_y(KN/cm²)	25
E (KN/cm²)	20000
Comprimento (m)	5 e 6
Vão livre (m)	5 e 6

4.4 – Cálculo da área da seção transversal (A)

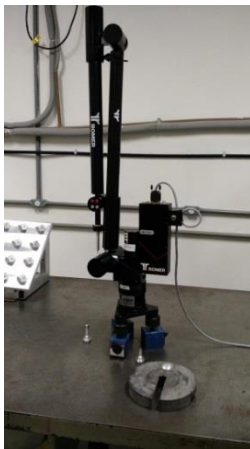
Visando obter um modelo numérico mais preciso e para se ter um melhor critério de comparação de parâmetros, foi determinada a área da seção transversal das duas vigas ensaiadas. Segundo o fabricante as vigas tem um comprimento de 6,00 m, mas na realidade as vigas tem uma variação adicional de 5 a 6 cm, com isto foi necessário cortar 5 cm de cada uma das vigas, e este pedaço da viga foi utilizado para determinar a área da seção transversal de cada uma delas (Figura 4.11).



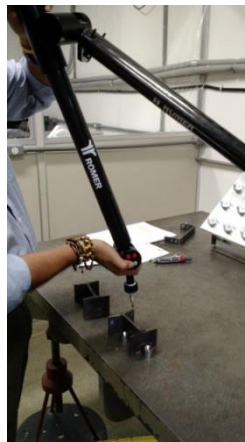
Figura 4.11 - Amostras da viga Perfil-I Viga V1 e V2.

Para este fim, foi utilizada a máquina de medição tridimensional portátil de braço articulado, do laboratório de metrologia da Universidade de Brasília. Esta máquina tem as seguintes características (Figura 4.12):

- Modelo Arm100
- Volume de medição X=2500 Y=2500 e Z=2500
- Incerteza do braço=0.070mm



(a) Braço articulado.



(b) Processo medição área.



(c) Medição área seção transversal.

Figura 4.12- Medição área da seção transversal do perfil I.

O braço articulado armazena as coordenadas (x,y,z) de cada ponto, assim a amostra é percorrida na totalidade do seu perímetro com o braço, adquirindo uma nuvem de pontos que depois são exportados para o AutoCAD (Figura 4.13).

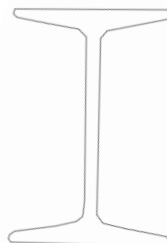


Figura 4.13 - Seção transversal do perfil - AutoCAD.

Na Tabela 4.3 são apresentadas as áreas da seção transversal das duas vigas ensaiadas e a diferença desta área em relação ao valor apresentado no catálogo fornecido pelo fabricante.

Tabela 4.3- Área seção transversal viga metálica.

	VIGA 1		VIGA 2	
	Área (m ²)	% erro	Área (m ²)	% erro
NOMINAL	1,45000E-03	-	1,45000E-03	-
EXPERIMENTAL	1,43156E-03	0,926	1,42273E-03	1,881

4.5 Cálculo do momento de Inércia (I_x)

Aproveitando os pontos obtidos na determinação da área de forma experimental, foram calculados os momentos de inércia I_x da viga, utilizando o programa AutoCAD 2015 (Figura 4.14). Os resultados são apresentados na Tabela 4.4.

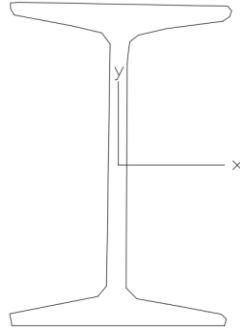


Figura 4.14- Cálculo momento de inércia I_x (AutoCAD 2015).

Tabela 4.4- Momento de Inércia I_x .

	VIGA 1		VIGA 2	
	$I_x(m^4)$	% erro	$I_x(m^4)$	% erro
NOMINAL	2.5200E-06	-	2.5200E-06	-
EXPERIMENTAL	2.4513E-06	2.726	2.4136E-06	4.222

4.6 Cálculo da densidade (ρ)

Para a determinação da densidade (ρ) de forma experimental, foram aproveitadas as duas amostras utilizadas para a medição da área da seção transversal. Os dois corpos de prova foram pesados (Figura 4.15), e logo após foram submersos em água e pesados de novo (peso submerso). Na Tabela 4.5 são apresentados os dados obtidos no laboratório. Os equipamentos utilizados pertencem ao laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.



a) Peso de cada amostra.



b) Peso amostra submersa.



c) Peso amostra submersa.

Figura 4.15- Medição densidade.

Tabela 4.5 - Determinação da densidade das vigas.

	VIGA 1		VIGA 2	
	% erro		% erro	
Peso amostra(g)	554.00	-	564.30	-
Peso submersa(kg)	483.50		492.40	
diferença(kg)	0.0705		0.0719	
$\rho_{exp}(kg/m^3)$	7858.156		7848.40	
$\rho_{nominal}(kg/m^3)$	7800.00	0.75	7800.00	0.62

A porcentagem de erro da densidade em comparação com a densidade apresentada nos catálogos do fabricante varia entre 0,6% e 0,8%. Os valores de densidade obtidos nesta etapa são utilizados no cálculo analítico e a modelagem numérica para a determinação das frequências da viga.

4.7 - Estimativa Módulo de Elasticidade (E)

Foi necessário determinar de maneira indireta o Módulo de Elasticidade (E) do material a partir das medições das frequências naturais nos ensaios experimentais da viga intacta nas condições Livre-Livre (LL) e Apoiada-Apoiada (AA). Nesses ensaios as frequências naturais da estrutura são relacionadas como o módulo de elasticidade do material por meio da formulação correspondente às frequências naturais em Hz (Equação (4.1)), resultado do desenvolvimento analítico da viga de Euler Bernoulli, que é apresentada no Apêndice A.

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

Sendo λ o parâmetro adimensional, que depende do modo que deseja ser calculado, E o módulo de elasticidade, I o momento de inércia, L o comprimento da viga e m a massa por unidade de comprimento. O valor de λ para os primeiros n modos de vibração de uma viga biapoiada é igual a $n\pi$ (Tabela 4.7), e de uma viga Livre-Livre são apresentados na (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 - Valores de λ para viga Livre- Livre.

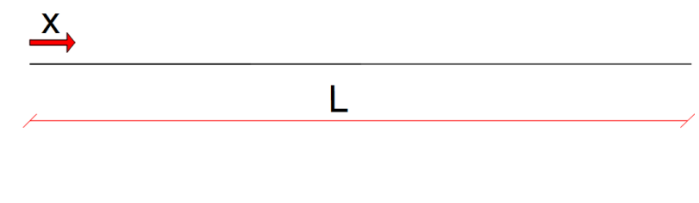
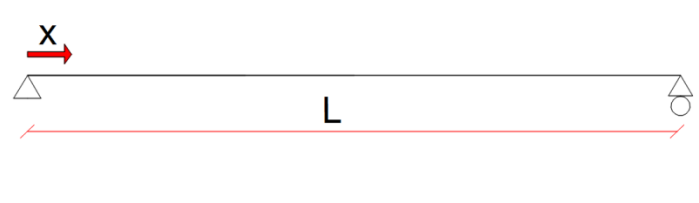
i	λ_i	
1	4.7300407	
2	7.8532046	
3	10.9956078	
4	14.1371655	
5	17.2787597	

Tabela 4.7- Valores de λ para viga Apoiada-Apoiada.

i	λ_i	
1	3.1415927	
2	6.2831853	
3	9.4247780	
4	12.5663706	
5	15.7079633	

Isolando o módulo de elasticidade (E) da equação (4.1), resulta a equação (4.2).

$$E = \frac{4f^2\pi L^4\bar{m}}{\lambda_i^4 I_x} \quad (4.2)$$

O módulo de elasticidade está em função da frequência (f) comprimento (L), massa por unidade de comprimento (\bar{m}) e do momento de inércia ao redor do eixo x (I_x). Todos estes valores mencionados anteriormente serão substituídos pelos valores experimentais, portanto a frequência f será o valor encontrado nos ensaios experimentais, o comprimento L será o valor medido no laboratório, a massa por unidade de comprimento será substituída pelo valor encontrado multiplicando a área da seção transversal (medida) pela densidade ρ encontrada.

Os resultados do cálculo do módulo de elasticidade de forma indireta através da análise experimental são apresentados nas Tabela 4.8 e Tabela 4.9.

Tabela 4.8 - Estimativa módulo de elasticidade frequências viga L-L.

LIVRE-LIVRE						
f(Hz)	ENSAIO 1	E(GPa)	ENSAIO 2	E(GPa)	ENSAIO 3	E(GPa)
1	20.823	203.390	20.823	203.390	20.823	203.390
2	57.264	202.426	57.264	202.426	57.264	202.426
3	111.404	199.352	111.404	199.352	111.404	199.352
4	182.203	195.145	182.203	195.145	182.203	195.145
5	267.578	188.602	267.578	188.602	267.578	188.602

Tabela 4.9 - Estimativa módulo de elasticidade frequências viga A-A.

APOIADA-APOIADA						
f(Hz)	ENSAIO 4	E(GPa)	ENSAIO 5	E(GPa)	ENSAIO 6	E(GPa)
1	9.370	211.648	9.370	211.648	9.370	211.648
2	37.482	211.648	36.441	200.053	36.441	200.053
3	83.293	206.455	76.005	171.906	76.005	171.906
4	149.927	211.648	143.680	194.379	144.721	197.206
5	284.237	311.584	242.590	226.967	242.590	226.967

Dados os 24 valores do módulo de elasticidade encontrados para cada frequência natural, e segundo John e Taylor (2012): se $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, são os resultados de N medições de uma mesma grandeza x , então nossa melhor estimativa x_{melhor} para a grandeza x é a média \bar{x} desses valores. No entanto a resposta x que melhor represente o conjunto de dados está representada pela equação (4.3).

$$(valor\ de\ x) = x_{melhor} \pm \delta x \quad (4.3)$$

Onde $x_{melhor} = \bar{x}$, e δx é o desvio padrão da média representado como:

$$\delta x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \quad (4.4)$$

O desvio padrão é dado pela seguinte equação:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.5)$$

Na Tabela 4.10 e Tabela 4.11 são apresentados os cálculos do desvio padrão σ_x a média \bar{x} , e a média do desvio padrão δx , para todos os ensaios realizados nas vigas em condições Livre-Livre (L-L) e Apoiado-Apoiado (A-A).

Tabela 4.10 - Cálculo desvio padrão.

		f(Hz)-X	E(Gpa)-Y	$d_i = x_i - \bar{x}$	d_i^2
ENSAIO 1	1	20.823	203.390	3.390	11.492
	2	57.264	202.426	2.426	5.888
	3	111.404	199.352	-0.648	0.420
	4	182.203	195.145	-4.855	23.576
ENSAIO 2	1	20.823	203.390	3.390	11.492
	2	57.264	202.426	2.426	5.888
	3	111.404	199.352	-0.648	0.420
	4	182.203	195.145	-4.855	23.576
ENSAIO 3	1	20.823	203.390	3.390	11.492
	2	57.264	202.426	2.426	5.888
	3	111.404	199.352	-0.648	0.420
	4	182.203	195.145	-4.855	23.576
ENSAIO 4	1	9.370	211.648	11.648	135.686
	2	37.482	211.648	11.648	135.687
	3	83.293	206.455	6.455	41.664
	4	149.927	211.648	11.648	135.683
ENSAIO 5	1	9.370	211.648	11.648	135.686
	2	36.441	200.053	0.053	0.003
	3	76.005	171.906	-28.094	789.280
	4	143.680	194.379	-5.621	31.601
ENSAIO 6	1	9.370	211.648	11.648	135.686
	2	36.441	200.053	0.053	0.003
	3	76.005	171.906	-28.094	789.280
	4	144.721	197.206	-2.794	7.808
Σ		1927.186	4801.137	1.137	2462.195

Tabela 4.11 - Melhor estimativa de E.

\bar{x}	200.0474
σ_x	10.1287
$\sigma_{\bar{x}} = \delta x$	2.0675

De acordo com John e Taylor (2012) a melhor estimativa para o módulo de elasticidade E da viga é:

$$E = 200.0474 \pm 2.0675$$

4.8 – Análise modal prévia.

Antes de realizar os ensaios experimentais foram executados modelos numéricos no software ANSYS com o objetivo de determinar a viabilidade e efetividade da metodologia

proposta. O tipo de análise desenvolvido foi do tipo modal, extraindo as frequências diretamente das saídas do programa.

Foi aplicada a metodologia em vigas com as mesmas propriedades mencionadas anteriormente e de comprimento igual a 6 m.

O elemento SOLID45 foi usado para modelagem da estrutura. Este elemento é definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó (Figura 4.16).

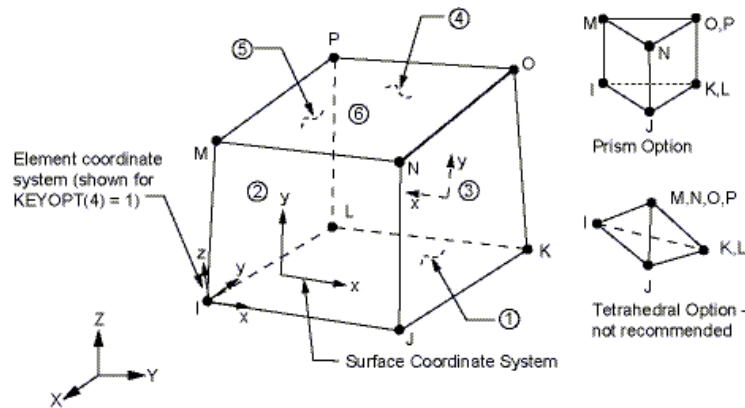


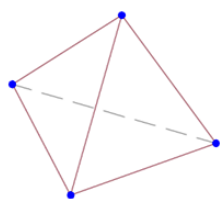
Figura 4.16 - Elemento SOLID45, da Biblioteca (ANSYS, 2007).

A geometria, as localizações dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento são mostrados na Figura 4.16. O elemento é definido por oito nós, cada um dos nós tem três graus de liberdade, correspondente a três direções de deslocamento. O elemento básico tem forma de hexaedro, mas pode ser utilizado como um prisma.

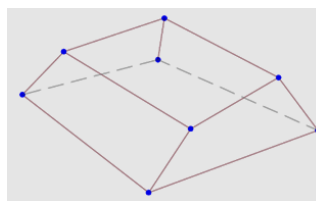
A Figura 4.16 identifica as faces do elemento e representa o sistema de coordenadas. As propriedades do material são ortotrópicas (quando suas propriedades mecânicas são únicas e independem das direções de três eixos mutuamente perpendiculares).

O método dos elementos finitos é um dos métodos mais práticos para a análise de estruturas e modelos tridimensionais. A análise de modelos 3-D, necessita de maior uso de recursos computacionais e utiliza mais tempo do que uma análise bidimensional. Por isso, é importante simplificar ao máximo a análise.

As formas básicas dos elementos para a modelagem 3-D são o tetraedro e o hexaedro, como é mostrado na Figura 4.17. O tetraedro não é muito utilizado devido a maior quantidade de elementos requeridos para lograr uma boa malha, o que implica num maior tempo de resolução da análise. Além disso, a visualização do modelo em tetraedros (pirâmides) não é tão fácil de visualizar como a divisão de hexaedros (blocos).



(a) Tetraedro.



(b) Hexaedro.

Figura 4.17 - Modelagem 3-D com o elemento SOLID45, da Biblioteca (ANSYS, 2007).

As cargas são definidas como sendo de dois tipos: cargas nodais e cargas do elemento. As cargas nodais são definidas nos nós e não estão diretamente relacionadas aos elementos. Estas cargas nodais estão associadas aos graus de liberdade no nó e, normalmente, são inseridos como restrições de deslocamento, forças e cargas nodais. As cargas do elemento são: cargas de superfície, que carregam o peso próprio do corpo, e cargas de inércia. As características do elemento SOLID45 são resumidas na Tabela 4.12.

Tabela 4.12- Características elemento SOLID45.

CARACTERISTICAS DO ELEMENTO SOLID45	
Nodes	I,J,K,L,M,N,O,P
Graus de liberdade	UX, UY,UZ
Propriedades do Material	EX, EY, EZ, PRXY, PRYZ, PRXZ (ou NUXY, NUYZ, NUXZ), ALPX, ALPY, ALPZ (ou CTEX, CTEY, CTEZ ou THSX, THSY, THSZ), DENS, GXY, GYZ, GXZ, DAMP
Cargas Superficiais- pressão	Face 1 (J-I-L-K), face 2 (I-J-N-M), face 3 (J-K-O-N), face 4 (K-L-P-O), face 5 (L-I-M-P), face 6 (M-N-O-P)

Para o elemento SOLID45 também foi feita a convergência do número de elementos necessários para gerar um resultado confiável. Na Tabela 4.13 estão os resultados da primeira frequência para diferentes casos de discretização da malha.

Tabela 4.13 - Convergência malhado elemento SOLID45.

Comprimento do elemento (cm)	Primeira Frequência F1 (Hz)	Nº elementos
50	9.8000	456
20	9.7600	1140
10	9.7000	2280
5	9.6919	4560
2.5	9.6919	9120
0.5	9.6917	45600

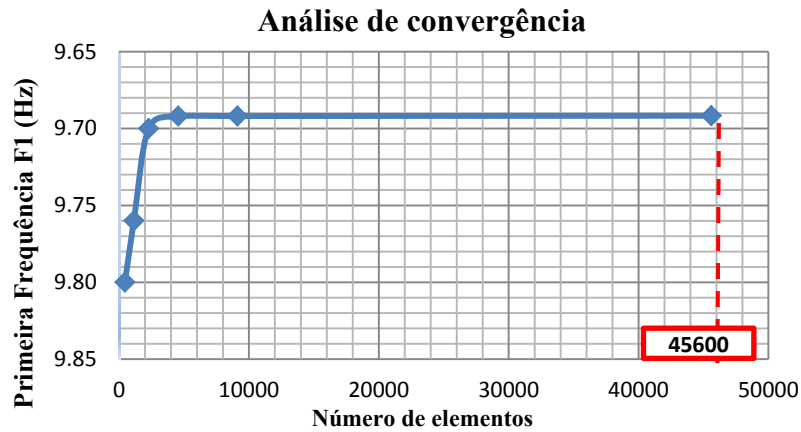
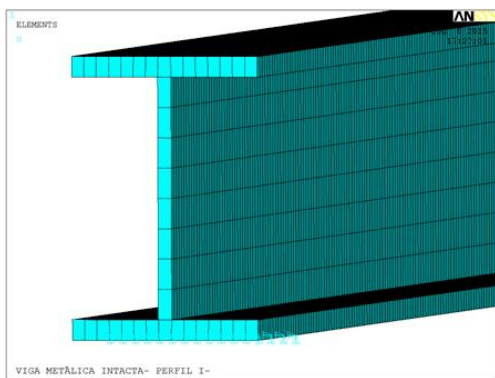
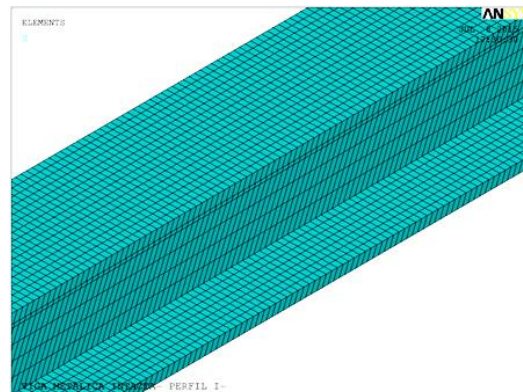


Figura 4.18 - Gráfico da convergência para o elemento SOLID45.

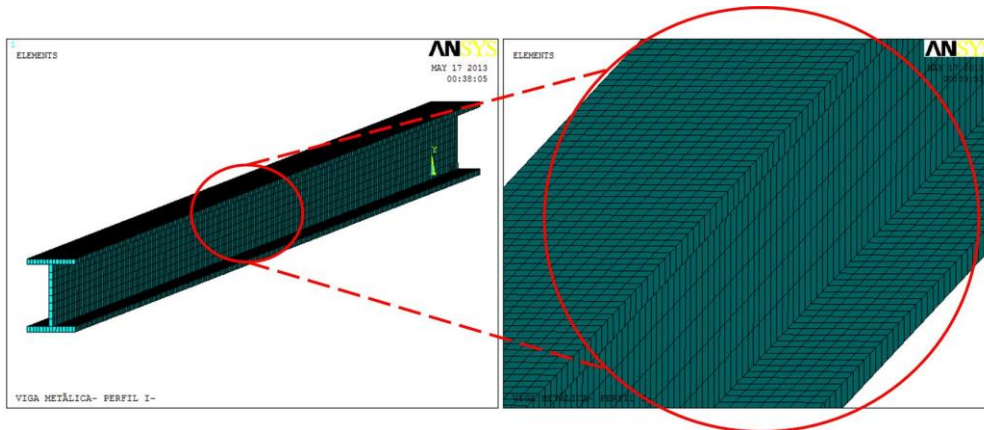
Na Figura 4.18 é mostrado que a convergência do elemento SOLID45 é estável para o número de elementos maior a 10.000 aproximadamente. Para nosso caso, foi escolhida a malha com 45.600 elementos, que gera elementos de 0,5 cm de comprimento, isto pela facilidade para simulação do dano e pelo baixo custo computacional que a análise modal envolve.



(a) Malha regularizada (seção transversal).



(b) Malha regularizada (vista longitudinal).

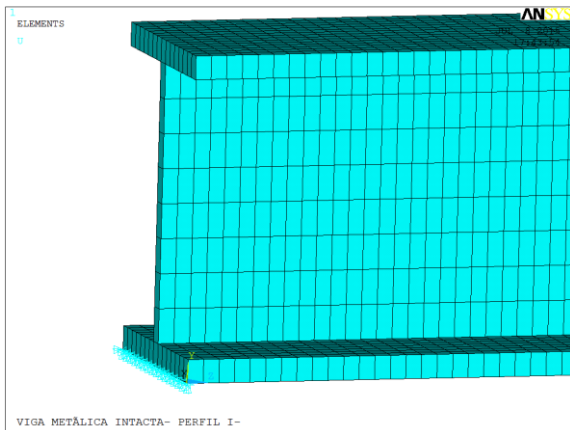


(c) Malha gerada pelo ANSYS

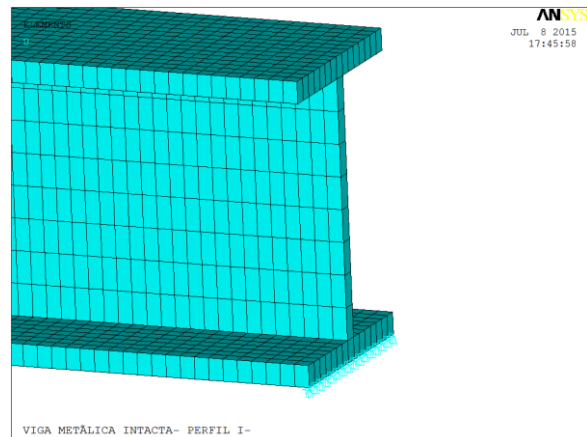
Figura 4.19 - Malha gerada no ANSYS - elemento SOLID45 (ANSYS, 2007).

Na Figura 4.19, é mostrada a malha gerada pelo programa ANSYS, foi feita de forma regular para se manter o mesmo comprimento em todos os elementos.

As características das condições de contorno para a viga são: o apoio de primeiro gênero (Figura 4.20 (b)), e o apoio de segundo gênero (Figura 4.20 (a)). Para simular o apoio do primeiro gênero, os deslocamentos foram restritos na direção x e y , para a fila de nós localizados no extremo da parte inferior da viga. Para o apoio de segundo gênero, foi restrito o deslocamento na direção y , z e x para a fila de nós localizados no extremo oposto.



(a) Apoio de segundo gênero.



(b) Apoio de primeiro gênero.

Figura 4.20 - Condições de contorno - elemento SOLID45 (ANSYS, 2007).

Para esta análise prévia foram propostos oito casos de danos apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Elementos eliminados para cada caso.

Caso	Posição do dano (m) (dano1/dano2)	Nº elementos Eliminados (dano1/dano2)	Área (cm ²) (dano1/dano2)	Inércia Ix (cm ⁴) (dano1/dano2)
Intacta	--	--	14,20	249
1	3	4	13,20	226,49
2	3	8	12,20	204,25
3	3	16	10,20	159,76
4	2	4	13,20	226,49
5	2	8	12,20	204,25
6	2	16	10,20	159,76
7	2/4	16 / 8	10,20 / 12,20	159,76 / 204,25
8	2/4	16 / 16	10,20 / 10,20	159,76 / 159,76

A simulação do dano foi feita eliminando elementos da malha (Figura 4.21). O número de elementos eliminados na seção transversal varia de acordo com a Tabela 4.14.

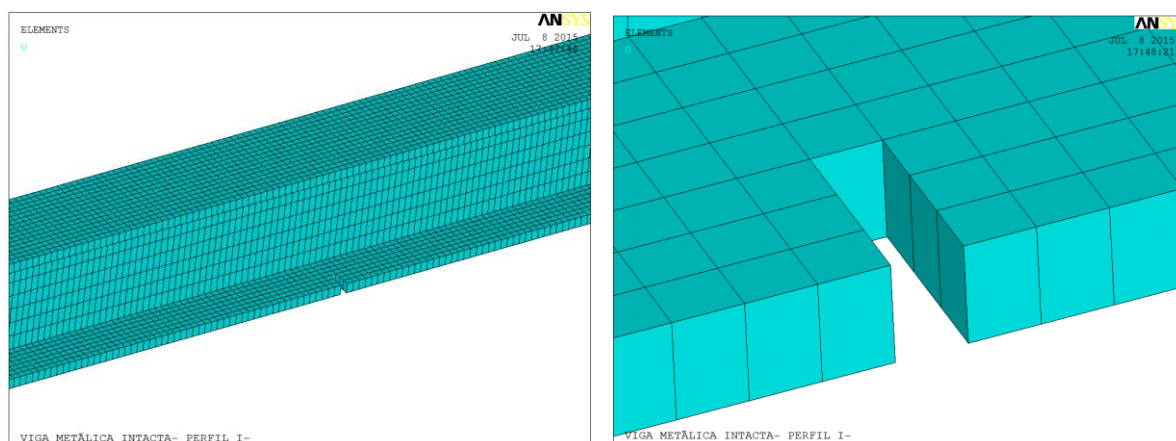


Figura 4.21 - Simulação do dano - elemento SOLID45 (ANSYS, 2007).

4.8.1.1 Elemento MASS21

Este elemento foi utilizado para simular a massa adicional colocada na parte superior da viga, neste caso foram testadas massas de 2, 5, 10 e 15 kg, e foram aplicadas diretamente no nó como mostrado na Figura 4.22.

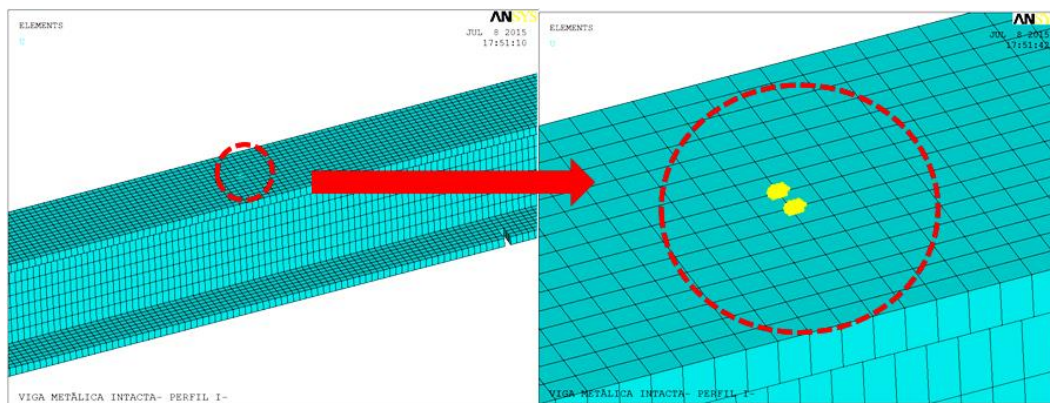


Figura 4.22 - Elemento mass21 na modelagem 3D.

4.8.2 Aplicação e resultados da metodologia proposta.

4.8.2.1 Viga intacta

Para a metodologia proposta neste trabalho o conhecimento do comportamento da viga intacta não é necessário, foi realizado para ter um parâmetro de referência da estrutura intacta. Na Tabela 4.15 são apresentadas as primeiras 5 frequências naturais da viga biapoiada, comparadas com o valor das frequências naturais analíticas obtidas com a Equação do Movimento da viga de Euler Bernoulli (Apêndice A).

Tabela 4.15 - Frequências modelagem numérica elemento SOLID45.

f(Hz)	SOLID45	Analítica	Diferença (%)
1	9.6918	9.110	6.386
2	38.410	36.440	5.406
3	85.058	81.990	3.742
4	146.924	145.760	0.798
5	237.517	227.750	4.288

A Tabela 4.15 mostra a diferença entre as frequências analítica e numérica da viga intacta. Esta análise mostra que a diferença entre a modelagem numérica e a primeira frequência analítica foi de 6,386%.

A Figura 4.23 e Figura 4.24 mostram os modos de vibração da viga obtidos na modelagem numérica. A Tabela 4.15 apresenta os dados correspondentes aos modos de vibração da viga.

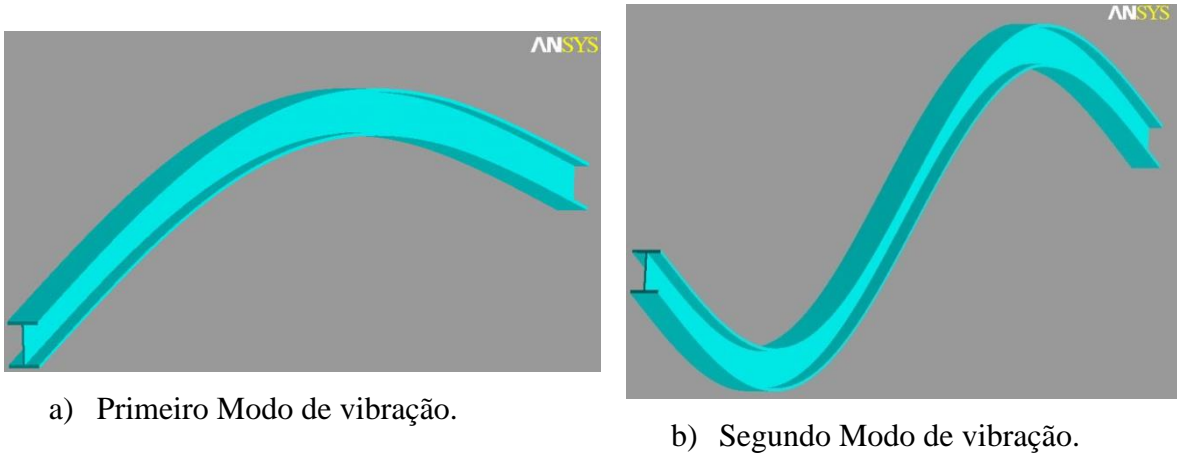


Figura 4.23-Primeiro e Segundo modo de vibração.

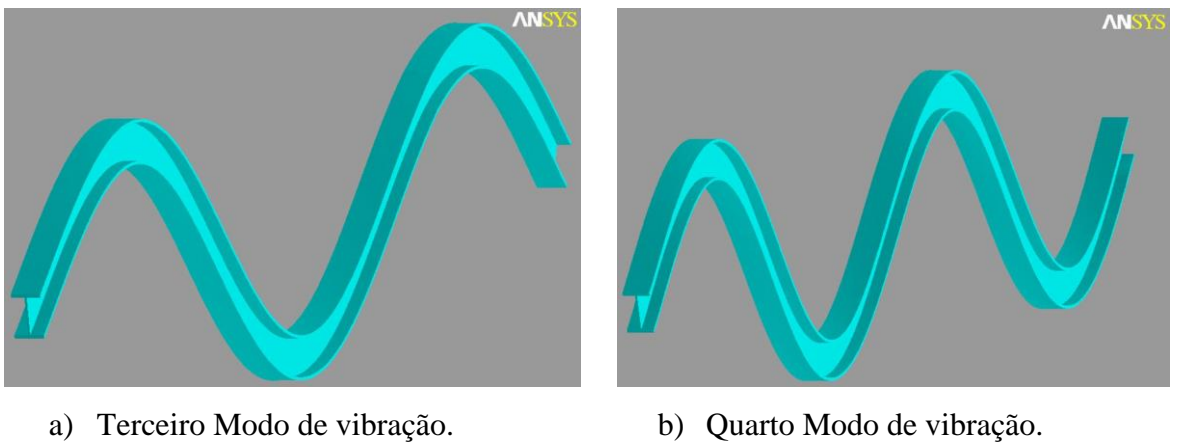


Figura 4.24 -Terceiro e Quarto Modo de vibração.

Tabela 4.16- Modos de Vibração Modelagem Numérica Beam3.

NÓ	MODO1	MODO2	MODO3	MODO4
1	-0.0070	0.0139	0.0206	0.0281
2	0.0123	-0.0246	-0.0373	-0.0505
3	0.0309	-0.0611	-0.0897	-0.1139
4	0.0493	-0.0946	-0.1321	-0.1530
5	0.0670	-0.1238	-0.1605	-0.1622
6	0.0840	-0.1472	-0.1722	-0.1408
7	0.1000	-0.1638	-0.1659	-0.0932
8	0.1149	-0.1729	-0.1426	-0.0283
9	0.1284	-0.1740	-0.1045	0.0422
10	0.1405	-0.1671	-0.0556	0.1055
11	0.1509	-0.1525	-0.0010	0.1504
12	0.1596	-0.1309	0.0538	0.1686
13	0.1665	-0.1033	0.1032	0.1571

Continua..

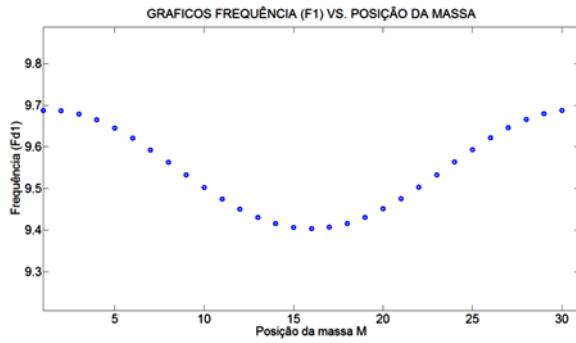
14	0.1714	-0.0710	0.1420	0.1176
15	0.1744	-0.0354	0.1664	0.0574
16	0.1753	0.0019	0.1738	-0.0131
17	0.1743	0.0390	0.1635	-0.0811
18	0.1712	0.0744	0.1365	-0.1348
19	0.1661	0.1064	0.0955	-0.1644
20	0.1592	0.1335	0.0449	-0.1649
21	0.1504	0.1545	-0.0104	-0.1360
22	0.1399	0.1684	-0.0646	-0.0829
23	0.1277	0.1746	-0.1122	-0.0151
24	0.1141	0.1728	-0.1483	0.0554
25	0.0992	0.1631	-0.1693	0.1161
26	0.0831	0.1459	-0.1730	0.1561
27	0.0661	0.1221	-0.1591	0.1684
28	0.0483	0.0926	-0.1289	0.1508
29	0.0300	0.0589	-0.0856	0.1064
30	0.0113	0.0225	-0.0336	0.0432
31	-0.0066	0.0129	0.0192	0.0262

A seguir são apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta nesta pesquisa. A modelagem numérica da viga feita com o elemento SOLID45 da biblioteca do ANSYS.

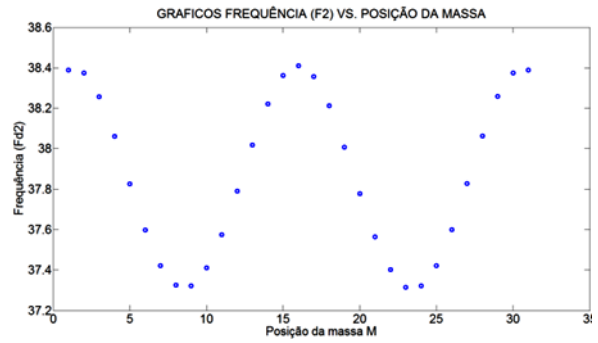
4.8.2.2 - Caso 1

O caso 1 é correspondente ao dano localizado a 3m (metade do vão), com um entalhe na mesa inferior causando uma diminuição da rigidez à flexão da viga de 9%, aproximadamente na região do dano.

Nas Figura 4.25 e Figura 4.26 são apresentados os gráficos dos dados correspondentes as primeiras 4 frequências da viga vs. posição da massa ao longo dos 31 nós da viga. A massa utilizada foi de 2 kg.

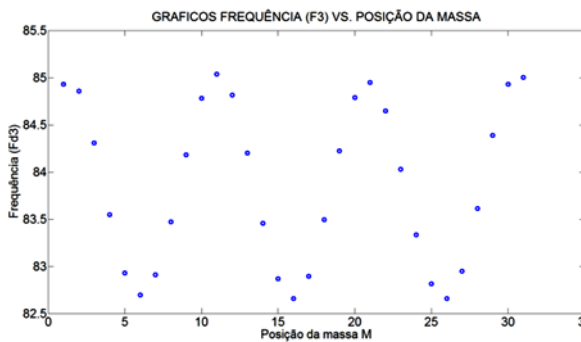


a) Frequência (F1) vs. Posição de massa

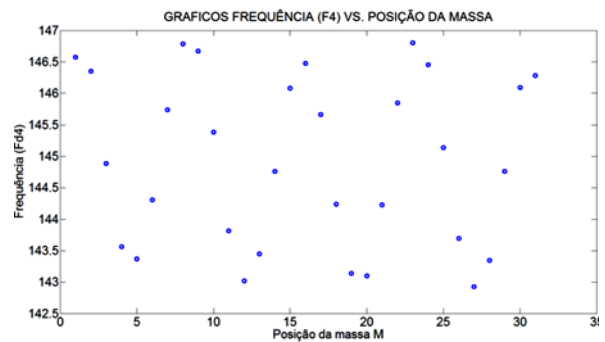


b) Frequência (F2) vs. Posição de massa

Figura 4.25 - Gráficos Frequências vs. Posição de massa.



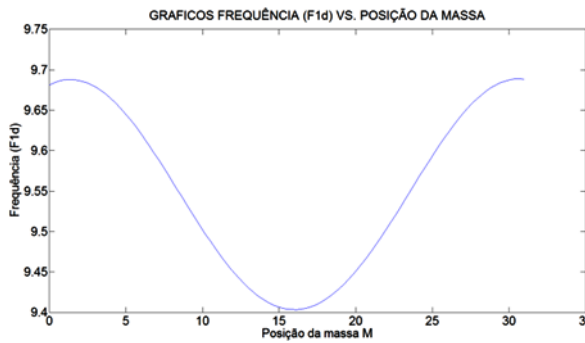
a) Frequência (F3) vs. Posição de massa



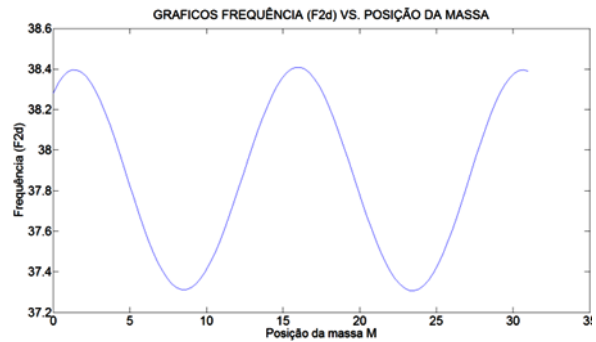
b) Frequência (F4) vs. Posição de massa

Figura 4.26- Gráficos Frequências vs. Posição de massa.

Os gráficos anteriores representam funções discretas, pelo que é necessário aplicar métodos de interpolação, para incrementar o número de dados analisados, e conseguir plotar uma curva contínua que descreva a variação da frequência em função da posição da massa. Neste caso foi aplicado o método de interpolação Cubic Spline. De acordo com Palechor (2013), este método de interpolação deu os melhores resultados na análise de identificação de danos. Nas Figura 4.27 e Figura 4.28 são apresentados os gráficos Frequência vs. Posição da massa, para os dados obtidos anteriormente.

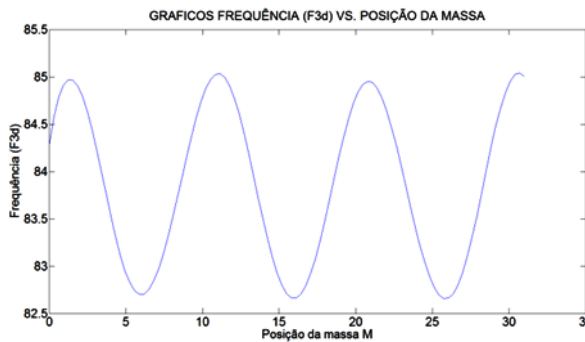


a) Interpolação Frequência F1

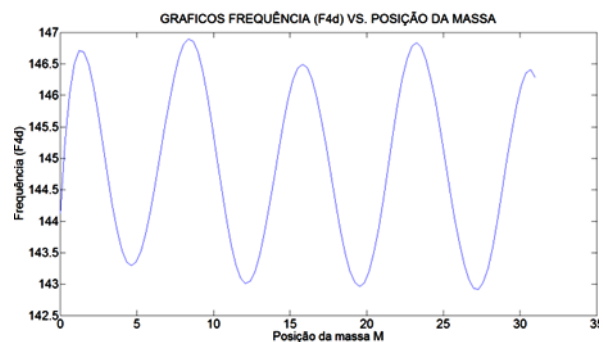


b) Interpolação Frequência F2

Figura 4.27 - Interpolação Cubic Spline.



a) Interpolação Frequência F3

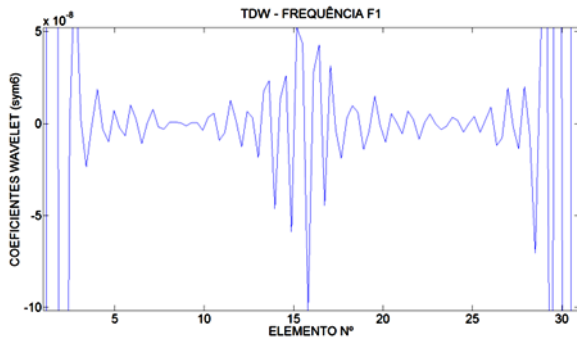


b) Interpolação Frequência F4

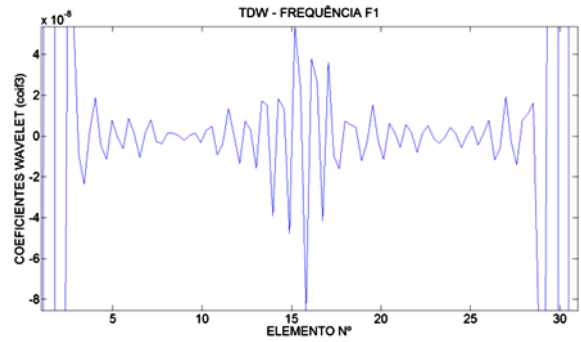
Figura 4.28 - Interpolação Cubic Spline.

O método para identificação de danos proposto foi aplicado na curva Figura 4.27a (Primeira frequência). Esses dados foram interpolados para 100 pontos, após isso, foi aplicada a TDW utilizando 5 funções wavelet mãe que são: rbio2.6, bior6.8, db5, sym6, que segundo Palechor (2013), apresentaram os melhores resultados na localização do dano.

Nas Figura 4.29 a Figura 4.31 são apresentados os resultados obtidos. Nos 5 gráficos é claramente visível a perturbação gerada pela presença do dano na região próxima ao nó 15 (metade do vão). Esses gráficos apresentam perturbações nos extremos, isto devido à descontinuidade geométrica e a presença do apoio.

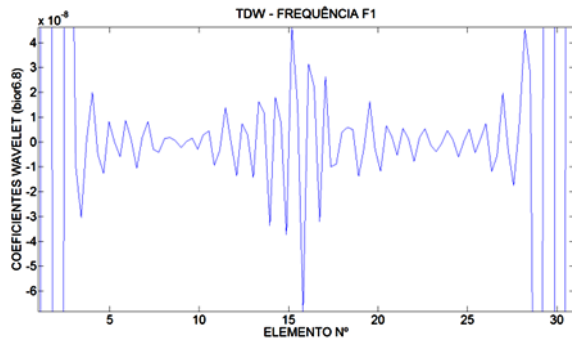


a) TDW (sym6) – Caso1.

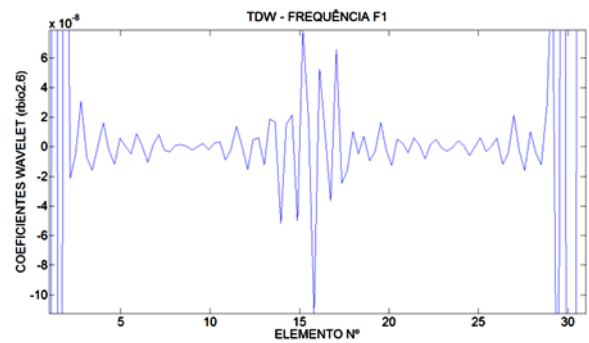


b) TDW (coif3) – Caso1.

Figura 4.29- TDW Caso1.



a) TDW (bior6.8) – Caso1.



b) TDW (rbio2.6) – Caso1.

Figura 4.30- TDW Caso1.

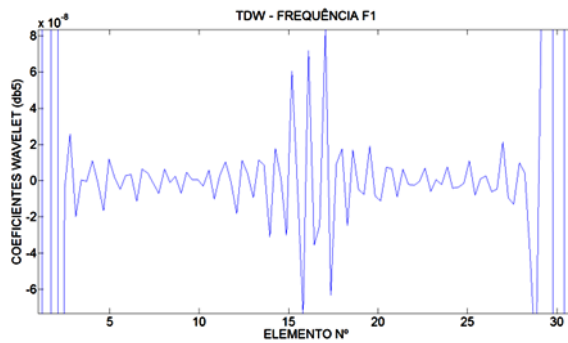


Figura 4.31 - TDW (db5) – Caso1.

4.8.2.3 Caso 2

O caso 2 é o correspondente ao dano localizado a 3 m (metade do vão), com um entalhe na mesa inferior causando uma diminuição da rigidez a flexão da viga de 17,97%, aproximadamente na região do dano.

Nas Figura 4.32 e Figura 4.33 são apresentados os gráficos dos dados correspondentes as primeiras 4 frequências da viga vs. posição da massa ao longo dos 31 nós da viga. A massa utilizada foi de 2 kg, posicionada sobre cada nó.

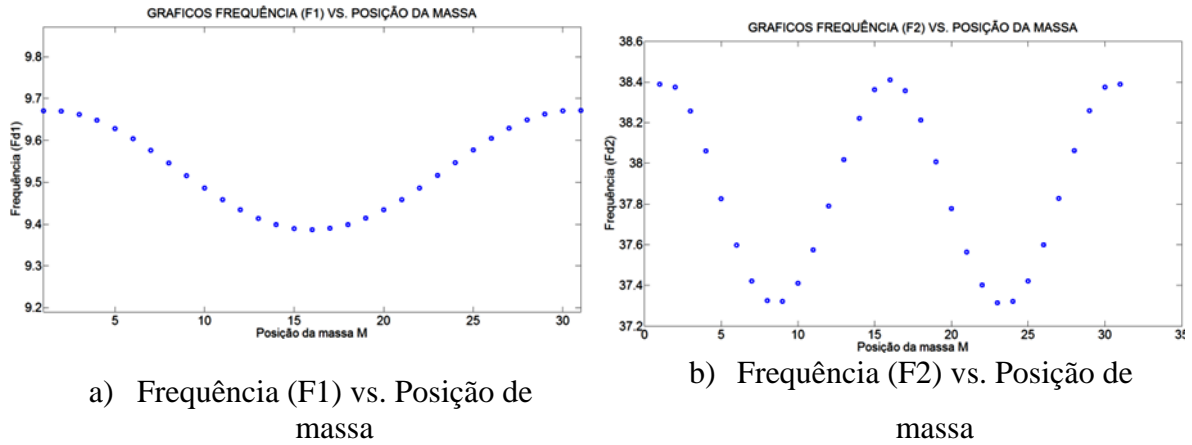


Figura 4.32 - Gráficos Frequências vs. Posição de massa.

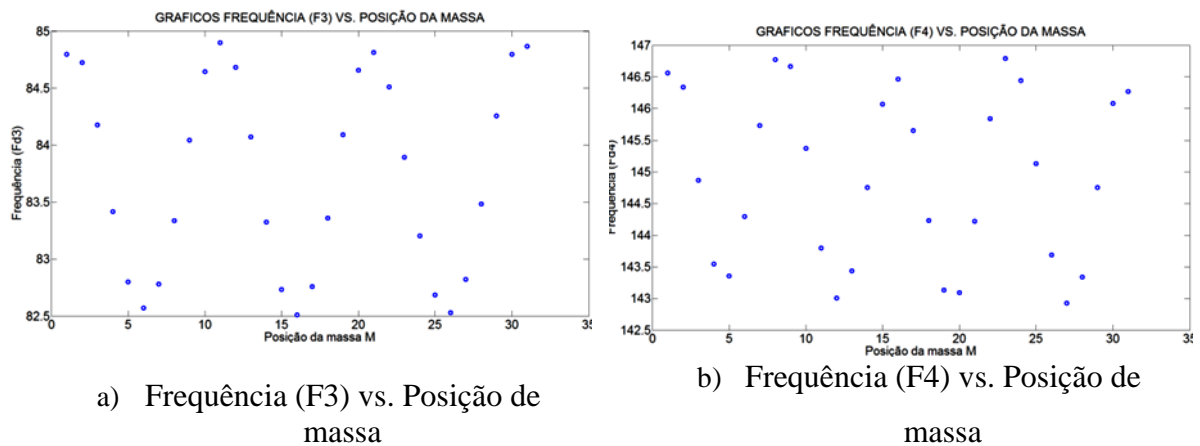


Figura 4.33 - Gráficos Frequências vs. Posição de massa.

Os gráficos anteriores representam funções discretas, pelo que é necessário aplicar métodos de interpolação, para incrementar o número de dados analisados, e conseguir plotar uma curva contínua que descreva a variação da frequência em função a posição da massa. Nas Figura 4.34 e Figura 4.35 são apresentados os gráficos Frequência vs. Posição da massa, para os dados obtidos anteriormente.

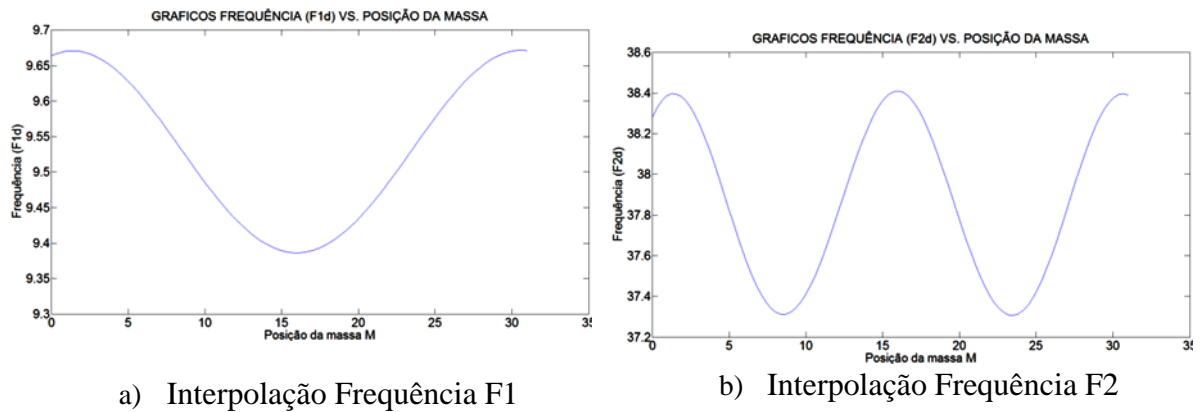


Figura 4.34 - Interpolação Cubic Spline..

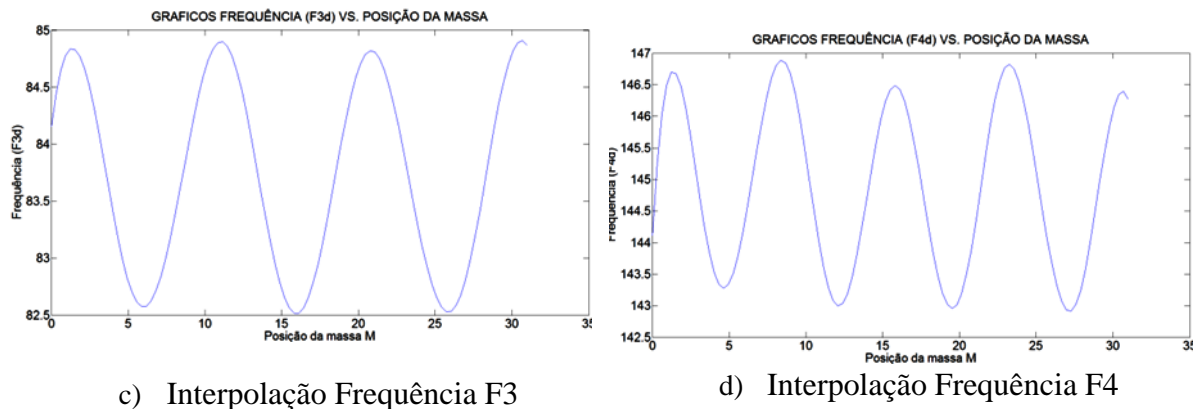


Figura 4.35 - Interpolação Cubic Spline.

O método para identificação de danos proposto foi aplicado na curva Figura 4.34a (Primeira frequência). O vetor de dados interpolados, nesse caso foram obtidas 31 frequências de cada nó. Esses dados foram interpolados para 100 pontos, após foi aplicada a TDW, utilizando 5 funções wavelet mãe que são: rbio2.6, bior6.8, db5, sym6, que segundo Palechor (2013), apresentaram os melhores resultados na localização do dano.

Nas Figura 4.36 e na Figura 4.38 são apresentados os resultados obtidos. Nos 5 gráficos é claramente visível a perturbação gerada pela presença do dano na região próxima ao nó 15 (metade do vão). Esses gráficos apresentam perturbações nos extremos, isto devido a descontinuidade geométrica e a presença do apoio.

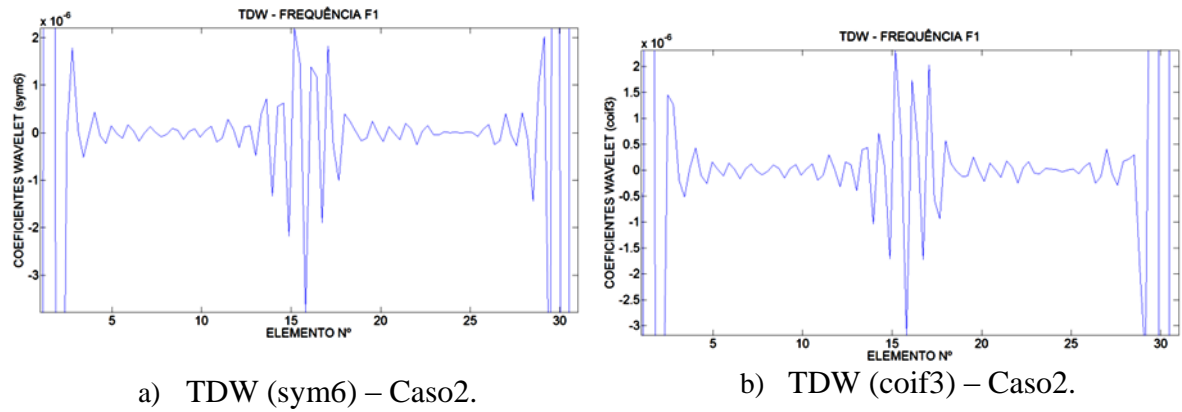


Figura 4.36- TDW Caso2.

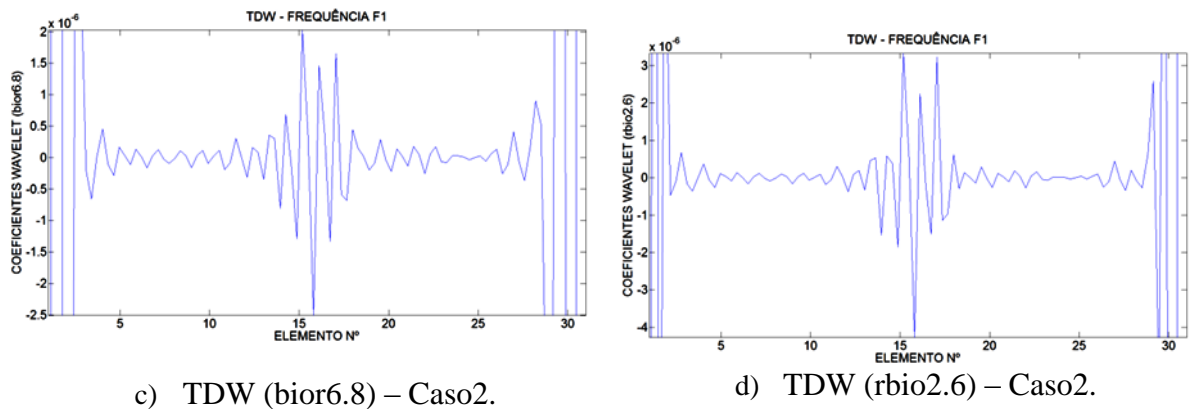


Figura 4.37 - TDW Caso2.

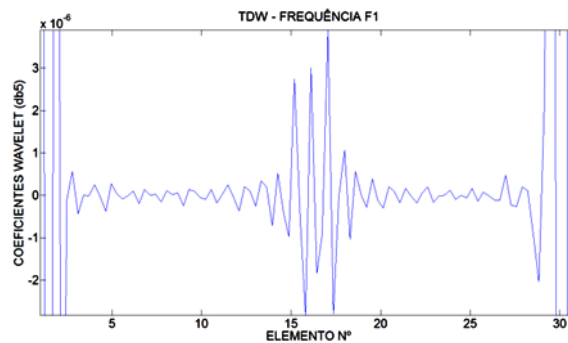


Figura 4.38- TDW (db5) – Caso2.

Os resultados dos casos de dano 3 a 8 são apresentados no APÊNDICE B.

4.9 -Casos de dano analisados análise experimental.

De acordo com os resultados obtidos anteriormente na análise modal prévia, foram propostos dezoito casos com danos progressivos para testar a efetividade do método em vigas com comprimentos diferentes em diferentes posições. Na primeira viga de comprimento 5 m foram realizados entalhes progressivos localizados a 1,5 m e 4,5 m, isto

para definir as configurações e parâmetros dos equipamentos, além de estabelecer a eficácia do método sob a presença de danos grandes.

Após a análise dos resultados do primeiro ensaio, foram feitos testes considerando dano progressivo nas mesmas posições anteriormente descritas. Também foram planejados ensaios em vigas de 6 m de comprimento para testar o método sob a presença de danos nas proximidades dos apoios (10% de L) e no meio do vão (50% de L) em vigas de um comprimento maior que 5 m. Os casos de dano são apresentados nas Figura 4.39 a Figura 4.56:

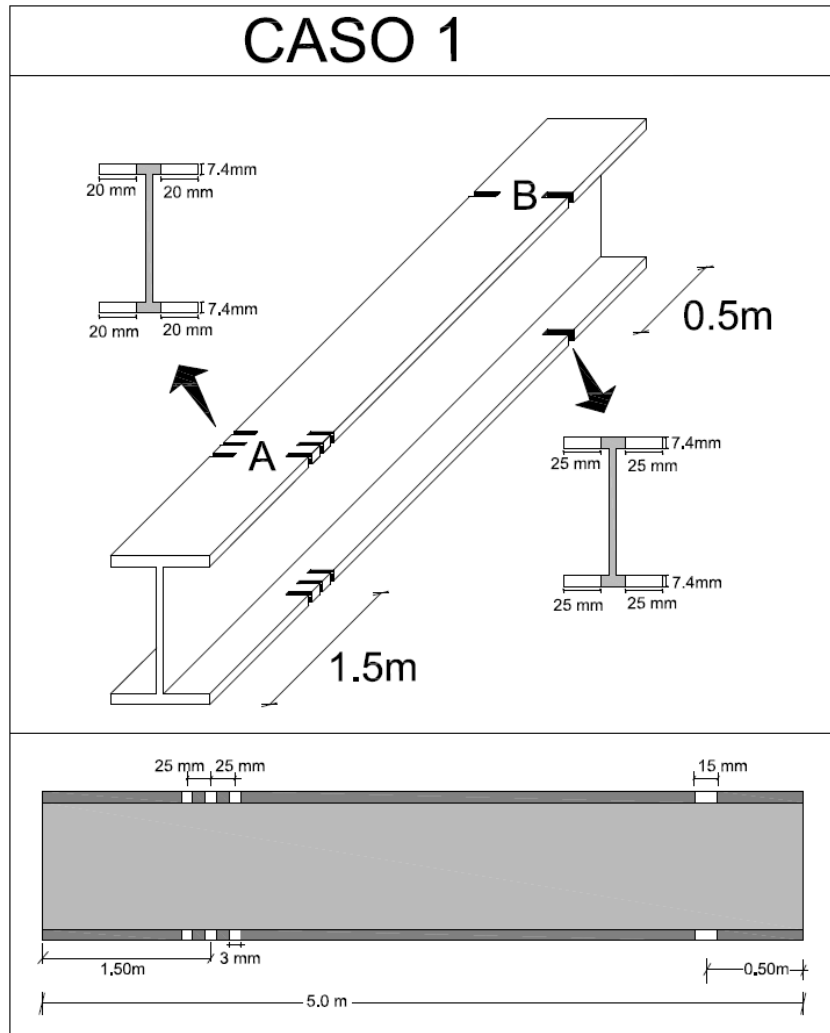


Figura 4.39 - Caso 1.

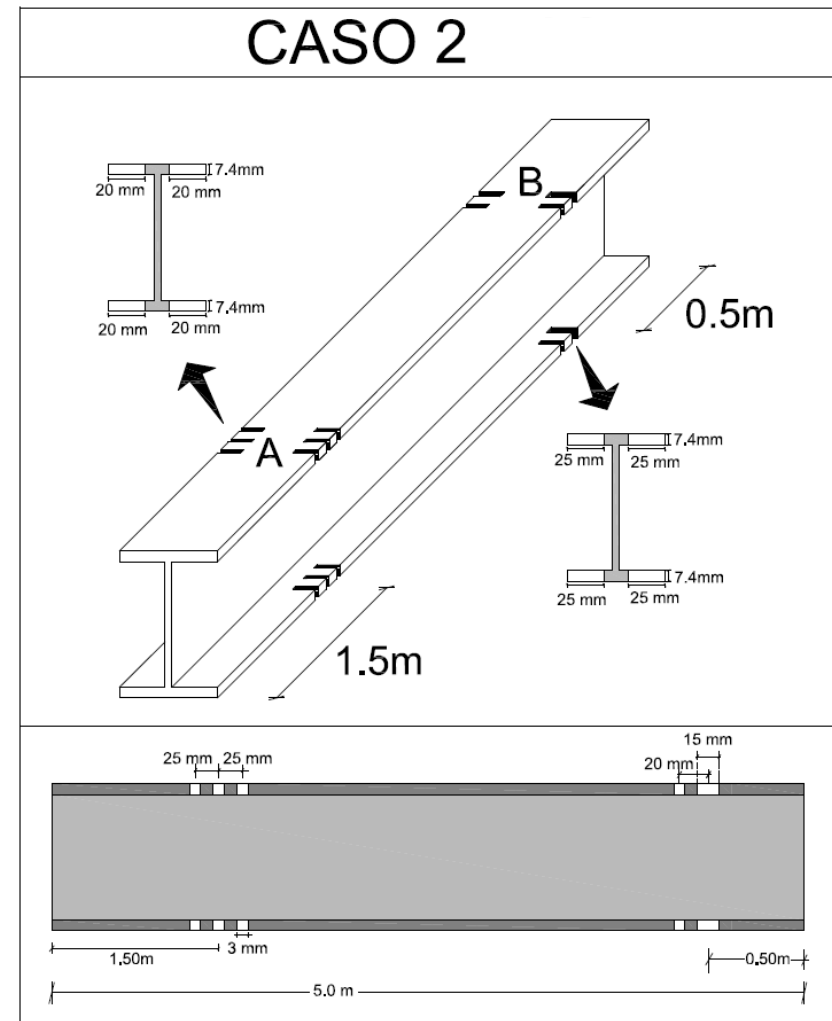


Figura 4.40 - Caso 2.

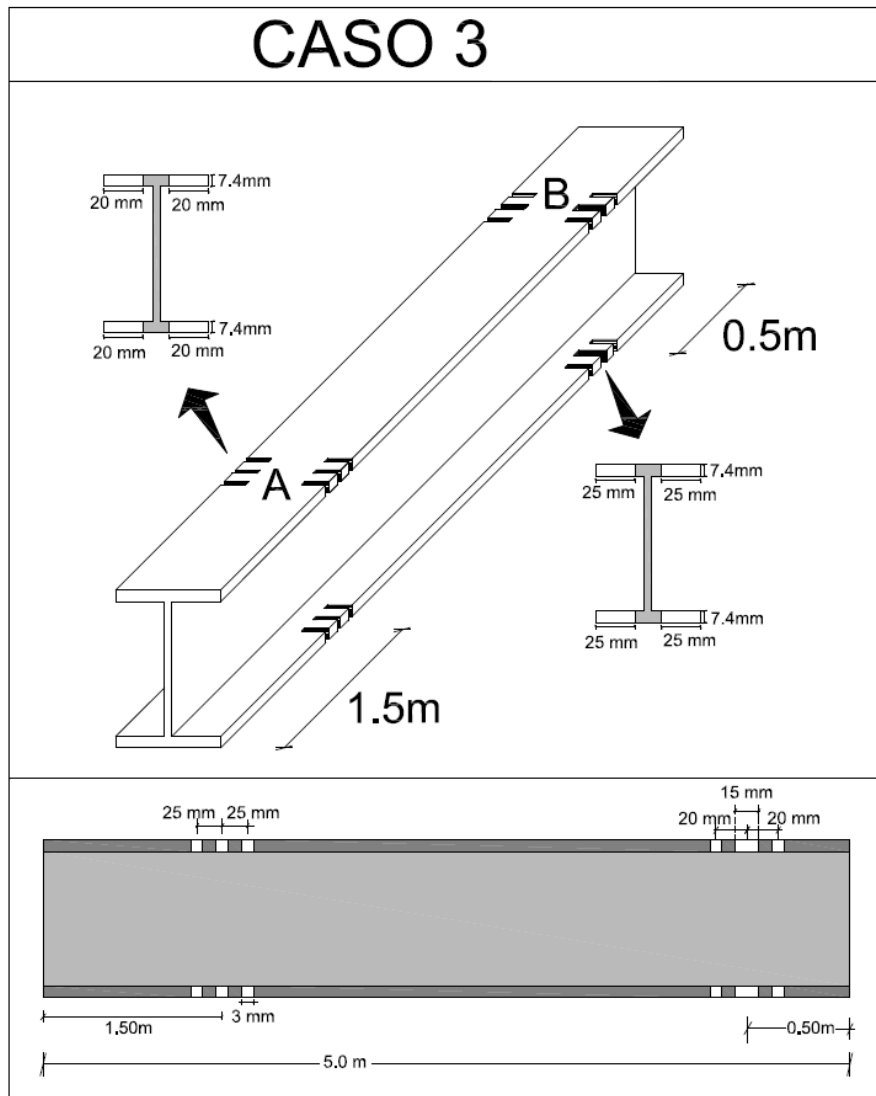


Figura 4.41 - Caso 3.

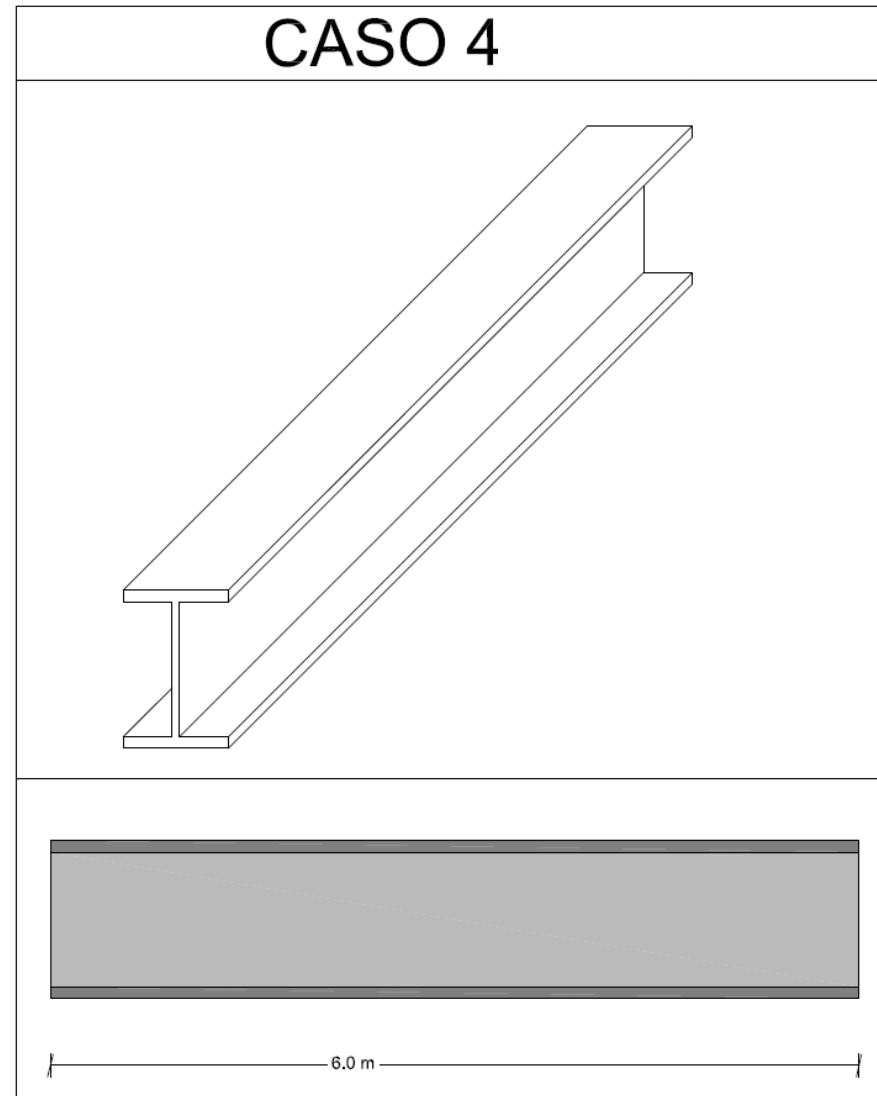


Figura 4.42 - Caso 4 –viga intacta.

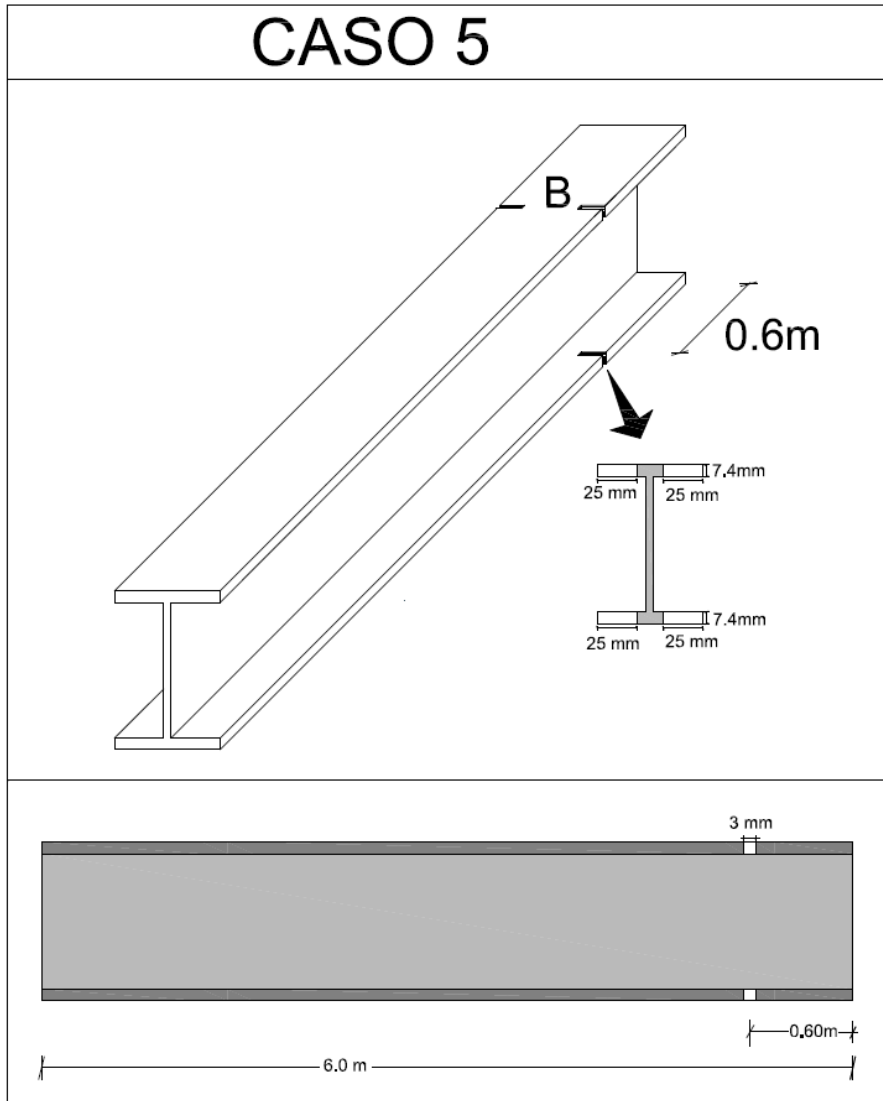


Figura 4.43- Caso 5.

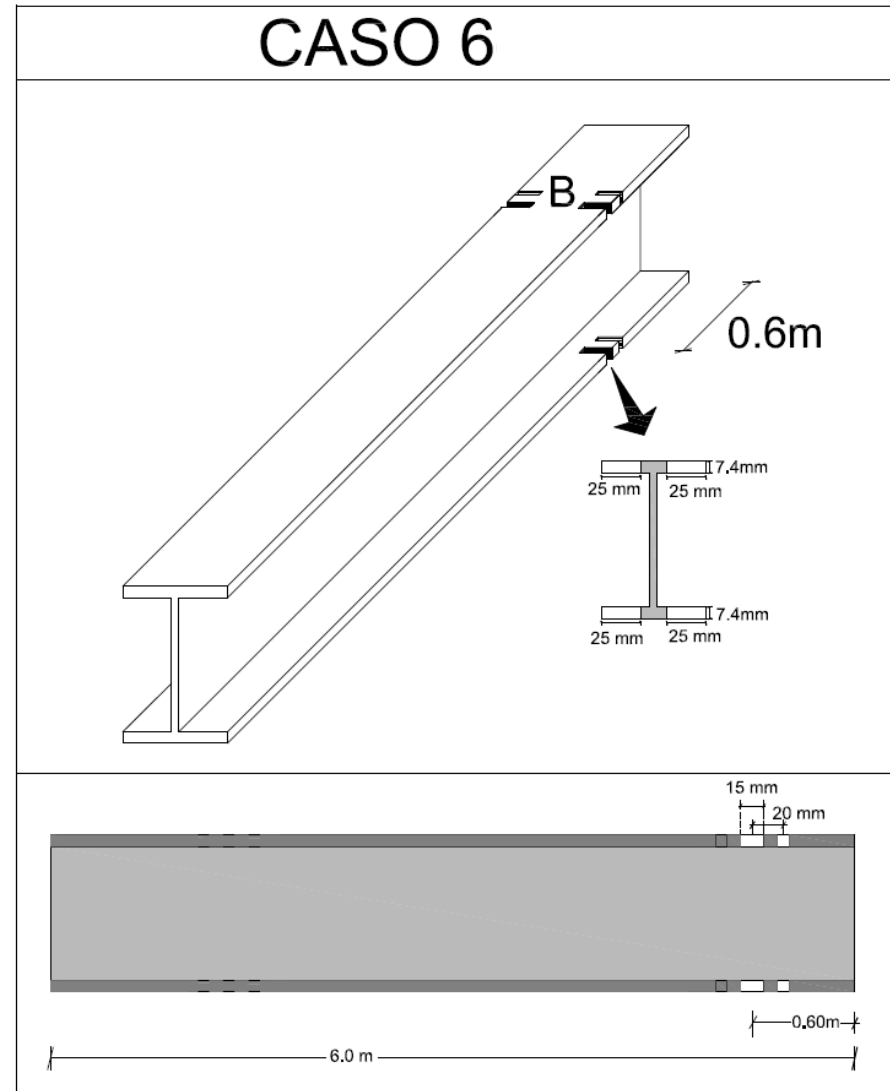


Figura 4.44- Caso 6.

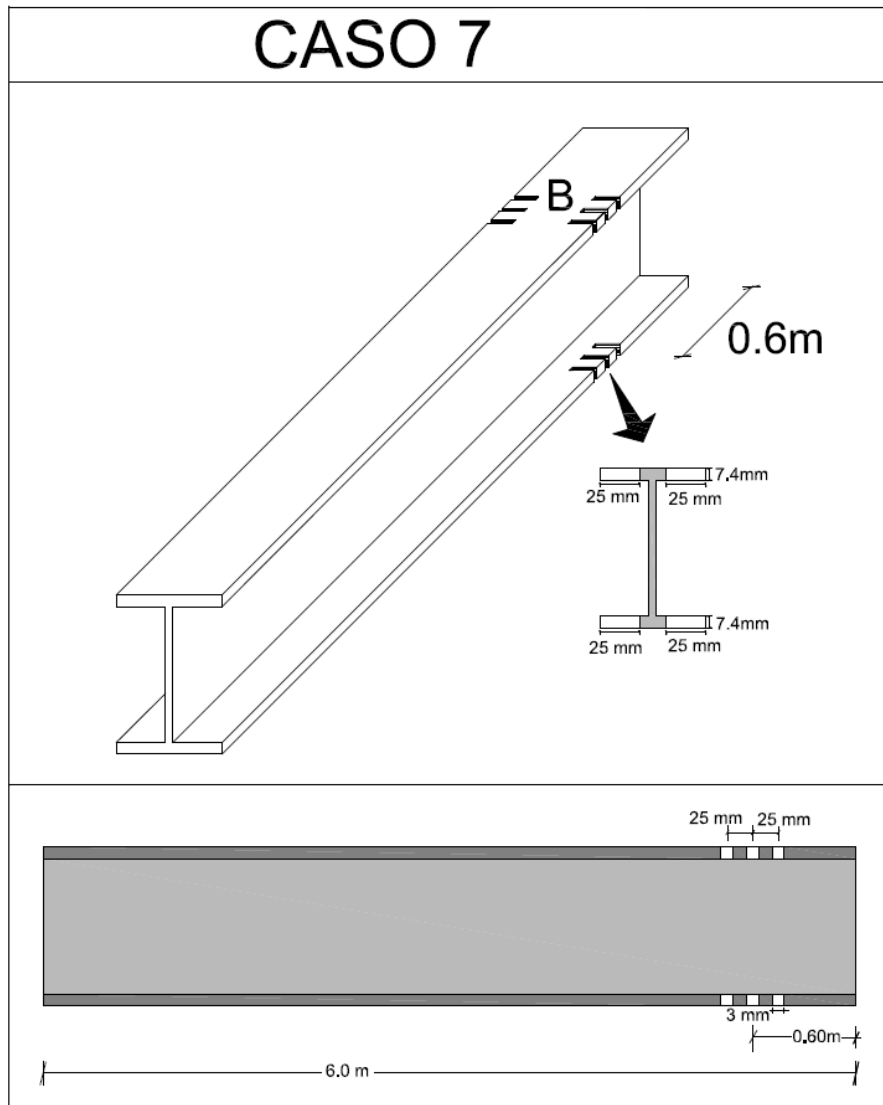


Figura 4.45- Caso 7.

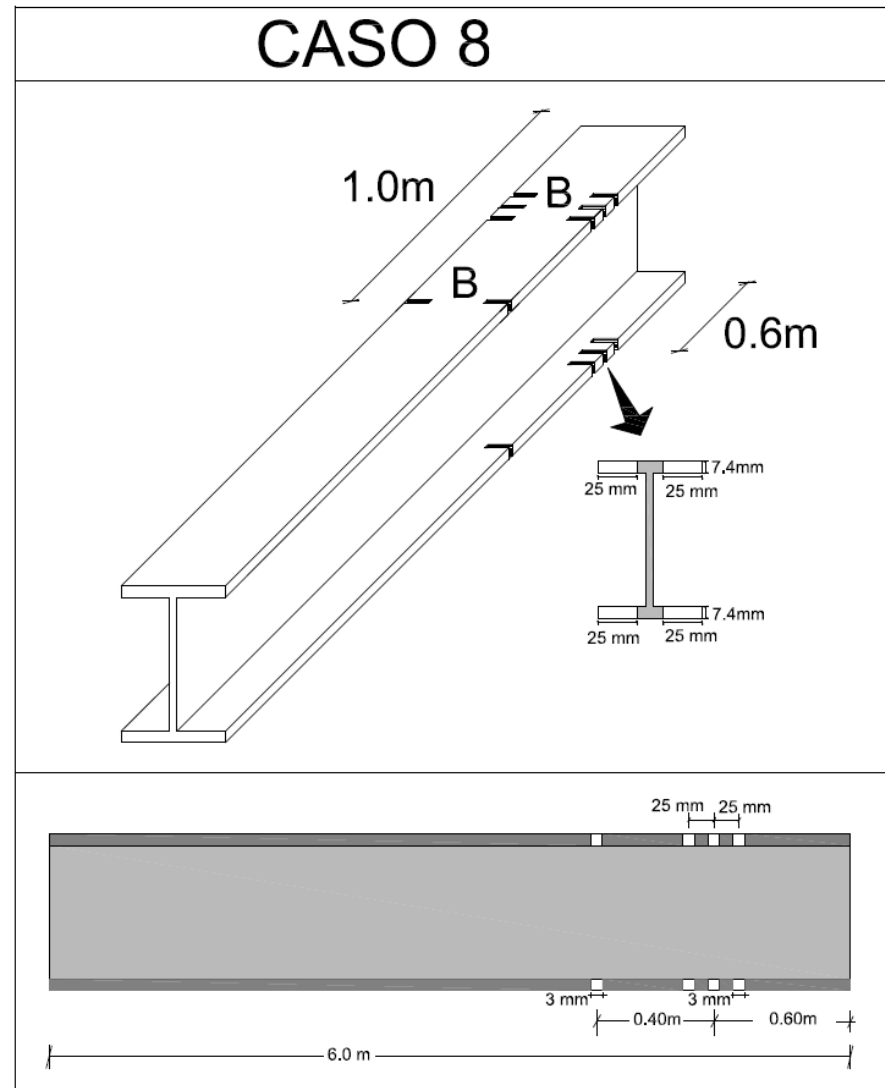


Figura 4.46- Caso 8.

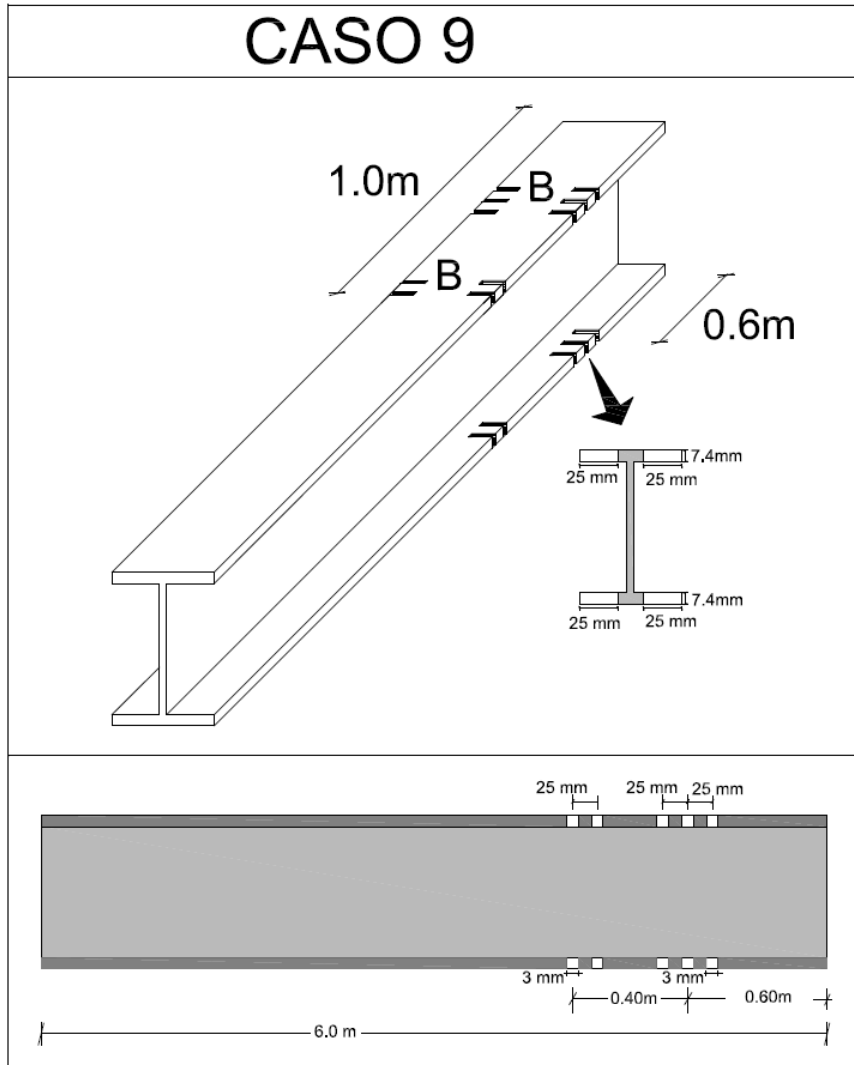


Figura 4.47- Caso 9.

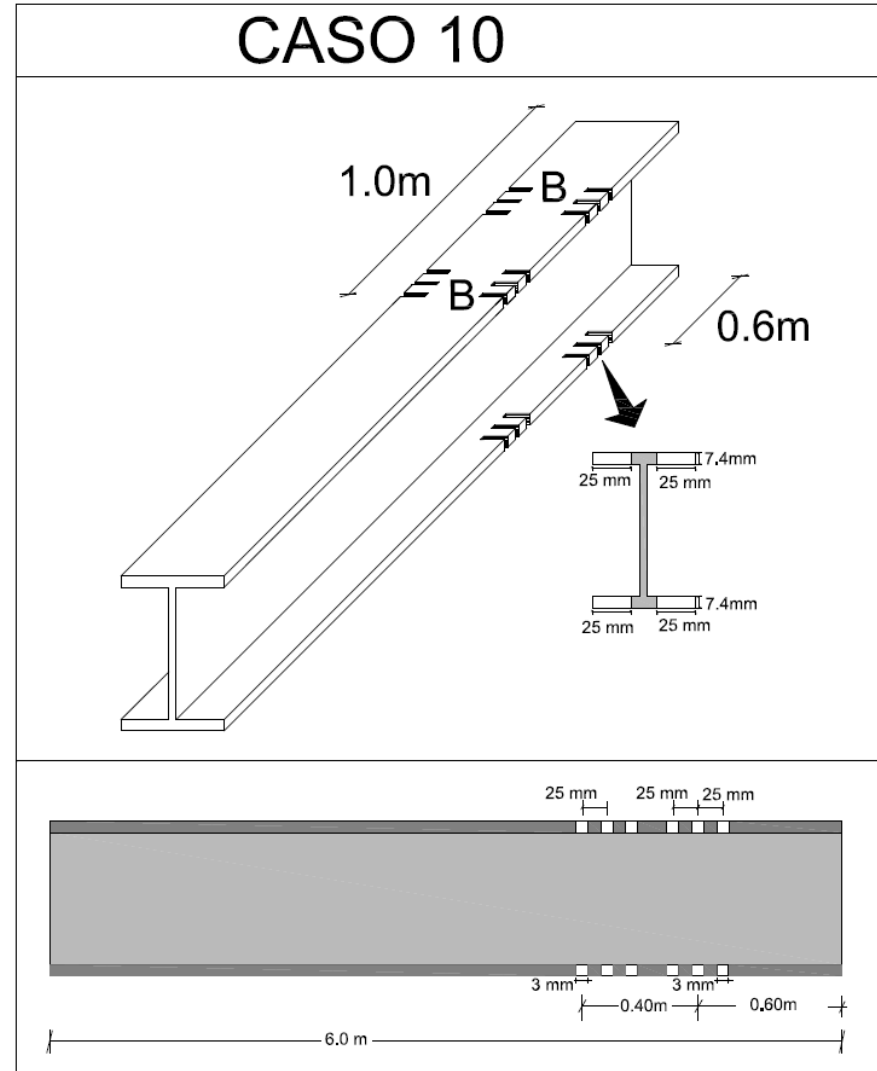


Figura 4.48- Caso 10.

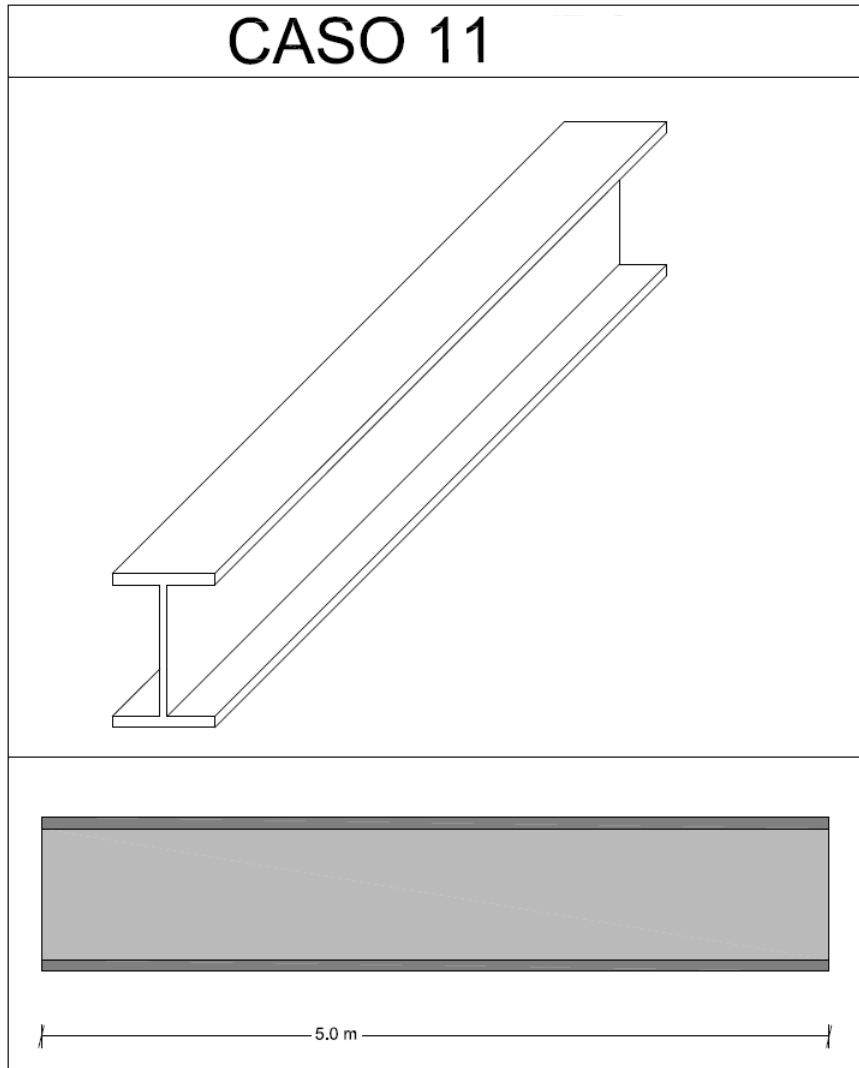


Figura 4.49- Caso 11- viga intacta.

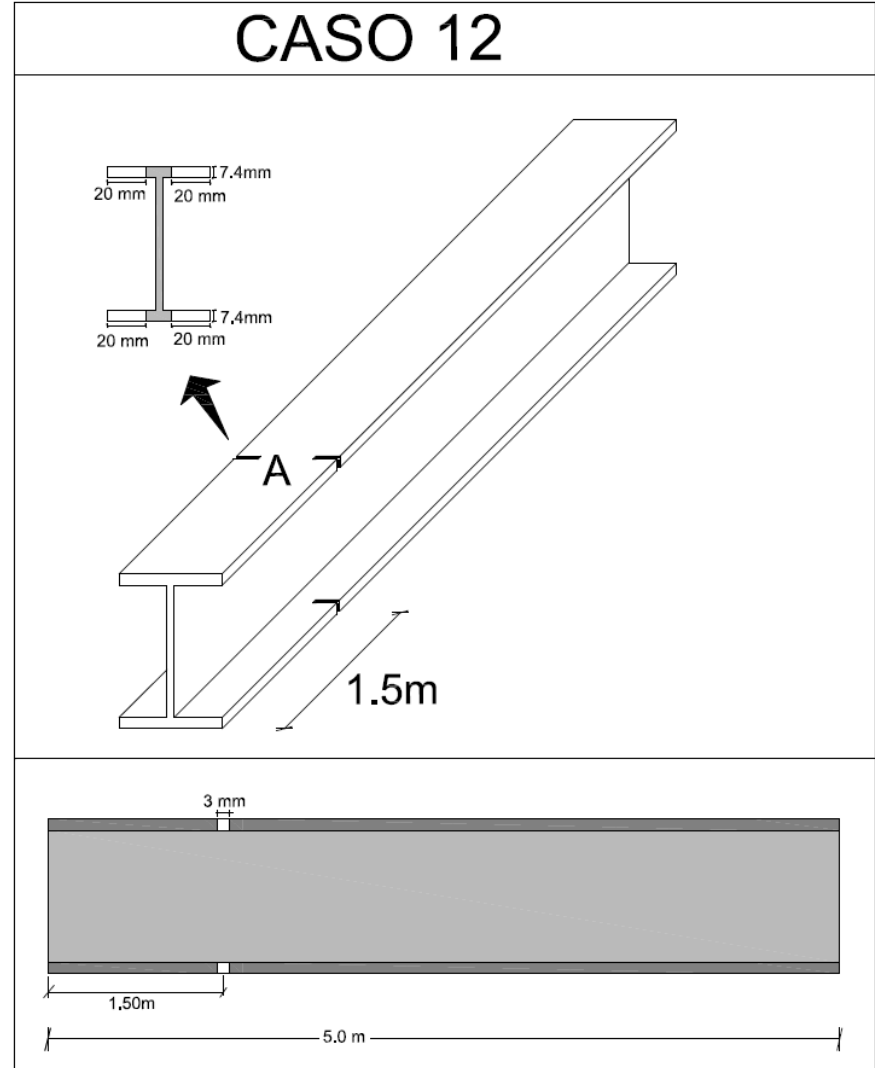


Figura 4.50- Caso 12.

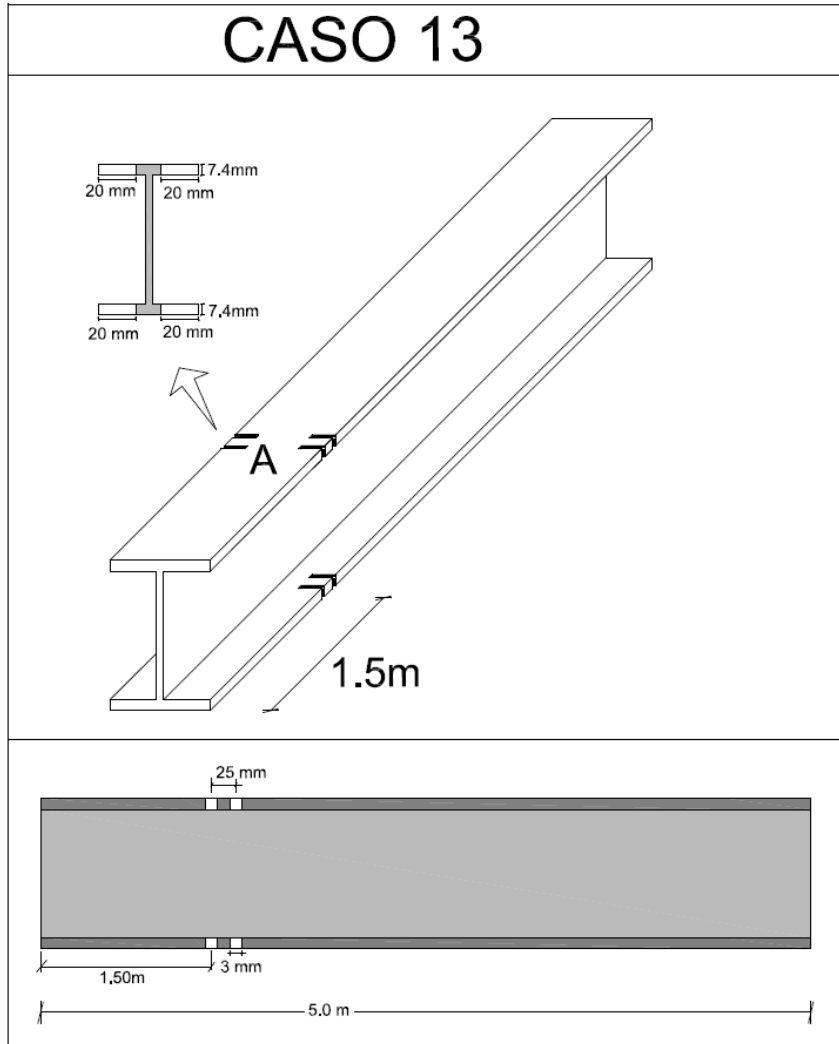


Figura 4.51- Caso 13.

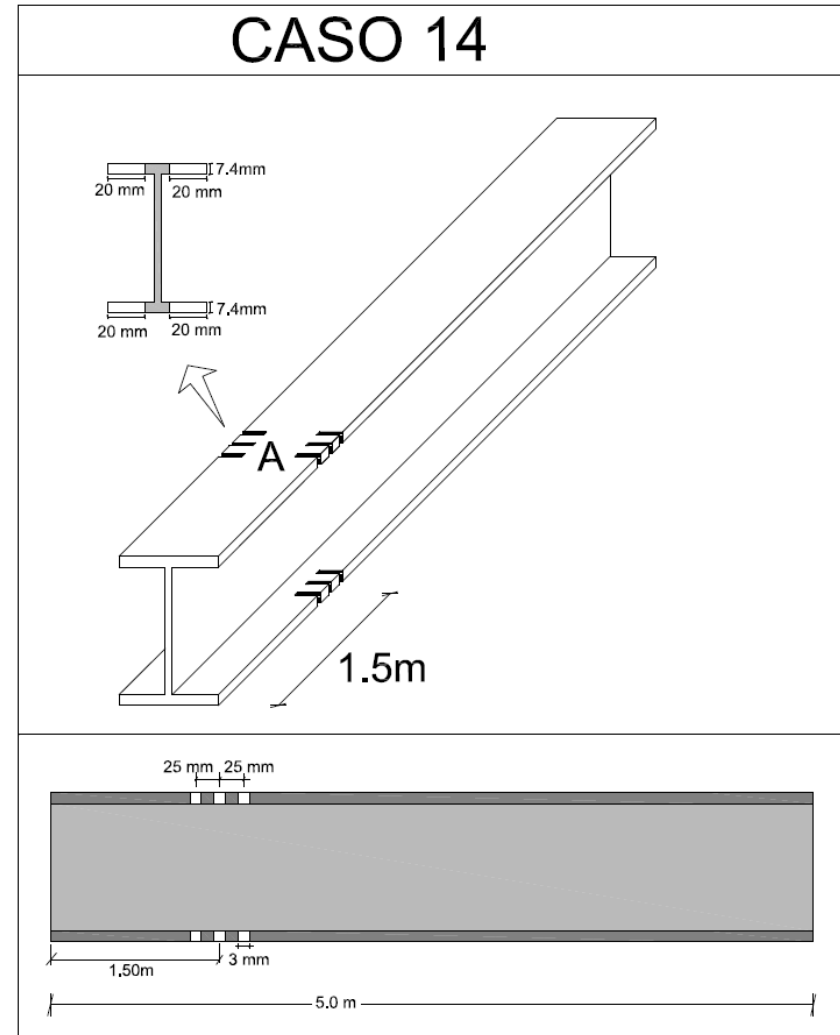


Figura 4.52- Caso 14.

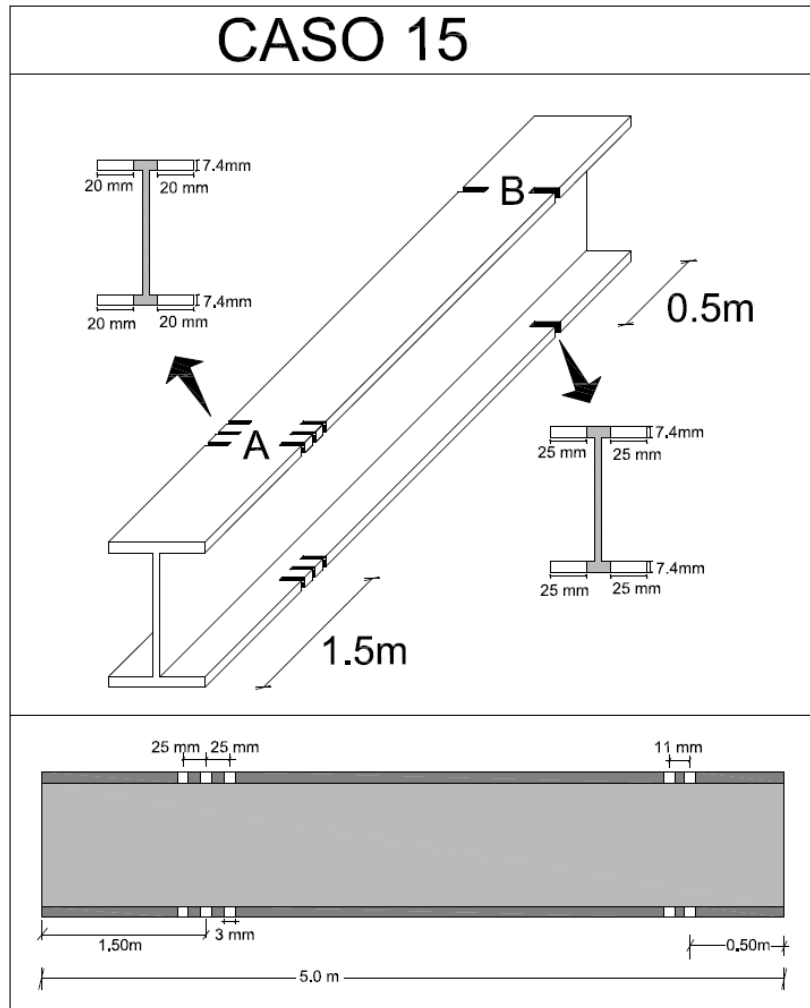


Figura 4.53- Caso 15.

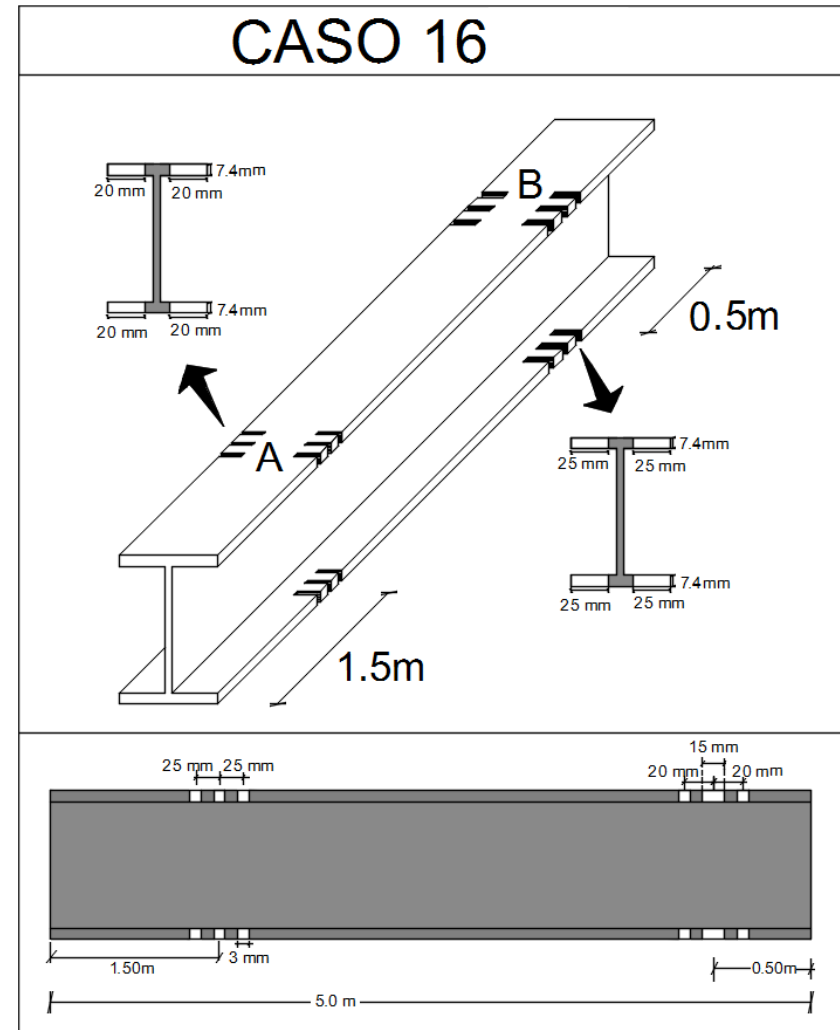


Figura 4.54- Caso 16.

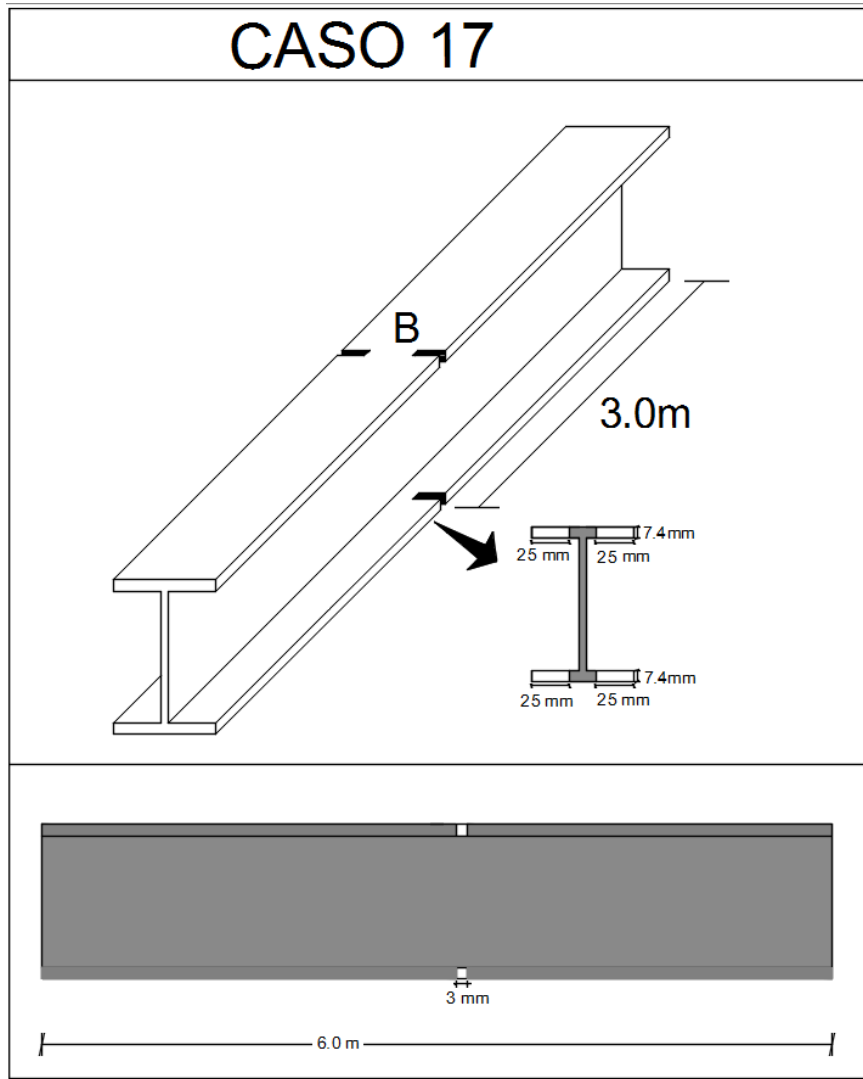


Figura 4.55- Caso 17.

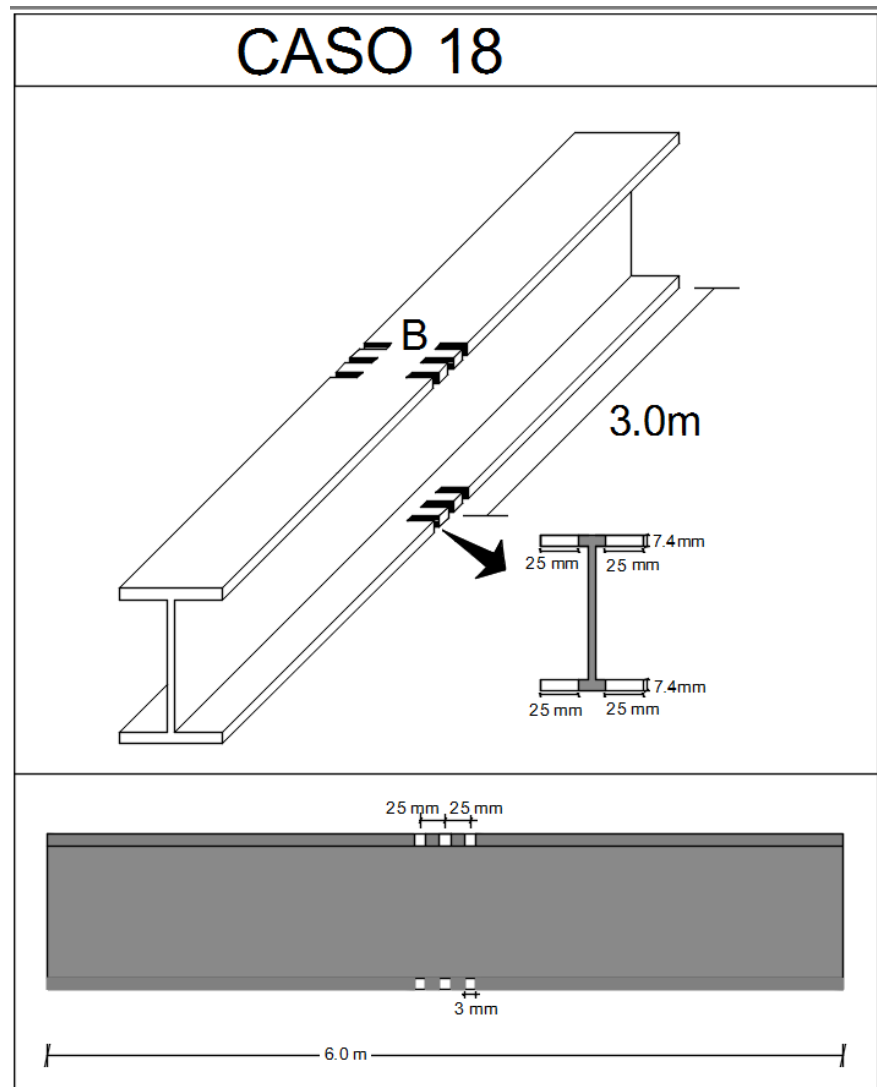


Figura 4.56- Caso 18.

4.10 Resumo casos de dano.

O resumo dos casos de dano e as características são apresentados na Tabela 4.17.

Caso de dano	Comprimento Viga (m)	Posição do	Número de entalhes dano1/dano2	Espaçamento entalhes (cm) dano1/dano2	Área seção	Inércia Ix (cm ⁴) dano1/dano2
		dano (m) dano1/dano2			transversal danificada (cm ²) dano1/dano2	
1	5,00	1,50/4,50	3/1	2,50/--	8,2772/6,7972	117,1264/84,2264
2	5,00	1,50/4,50	3/2	2,5/2,0	8,2772/6,7972	117,1264/84,2264
3	5,00	1,50/4,50	3/3	2,5/2,0	8,2772/6,7972	117,1264/84,2264
4	6,00	intacta	--	--	14,3156	245,13145
5	6,00	5,40/--	--/1	--/--	--/6,7972	--/84,2264
6	6,00	5,40/--	--/2	--/2,50	--/6,7972	--/84,2264
7	6,00	5,40/--	--/3	--/2,50	--/6,7972	--/84,2264
8	6,00	5,00/5,40	1/3	--/2,50	6,7972/6,7972	84,2264/84,2264
9	6,00	5,00/5,40	2/3	2,50/2,50	6,7972/6,7972	84,2264/84,2264
10	6,00	5,00/5,40	3/3	2,50/2,50	6,7972/6,7972	84,2264/84,2264
11	5,00	--/--	intacta	--/--	14,3156	245,13145
12	5,00	1,50/--	1/--	2,50/--	8,2772/--	117,1264/--
13	5,00	1,50/--	2/--	2,50/--	8,2772/--	117,1264/--
14	5,00	1,50/--	3/--	2,50/--	8,2772/--	117,1264/--
15	5,00	1,50/4,50	3/1	2,50/--	8,2772/6,7972	117,1264/84,2264
16	5,00	1,50/4,50	3/3	2,50/--	8,2772/6,7972	117,1264/84,2264
17	6,00	3,00/--	1/--	--/--	8,2772/--	117,1264/--
18	6,00	3,00/--	3/--	--/--	8,2772/--	117,1264/--

Tabela 4.17- Resumo Casos de dano.

5. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste trabalho o programa experimental teve por objetivo validar a metodologia proposta utilizando a variação das primeiras três frequências naturais de vigas metálicas (perfil-I) provocada pelo deslocamento de uma massa adicional ao longo de toda a estrutura. Esta variação de frequência sofre uma perturbação grande no local danificado, fato que é utilizado para determinar a posição do dano.

A análise experimental foi desenvolvida baseada nos resultados da análise modal prévia como foi explicado na seção 4.8. Após os ensaios experimentais, foi feita uma nova modelagem numérica utilizando todos os parâmetros escolhidos na análise experimental.

A curva correspondente à Frequência natural (F) vs. Posição da massa adicional é interpolada e após aplicada a Transformada Discreta de Wavelet (TDW).

5.1 - Simulação do dano

Os danos induzidos nas vigas simularam o efeito de deterioração por fadiga, foram realizados com uma serra circular (Figura 5.1) de 3 mm de espessura. A profundidade e espessura dos cortes foram feitas de acordo com os casos de danos progressivos estabelecidos na Tabela 4.17.



a) Serra circular.



b) Dano com 1 entalhe.



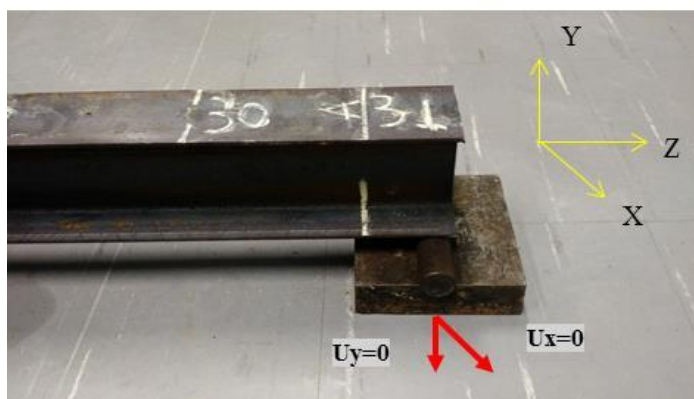
c) Dano com 3 entalhes.

Figura 5.1 - Simulação do dano.

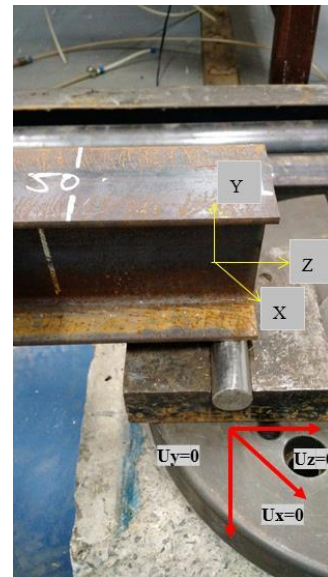
5.2 - Apoios

As vigas ensaiadas foram em condição biapoiada, e para garantir as restrições dos apoios utilizaram-se dois roletes de aço apoiados sobre chapas de aço (Figura 5.2).

Para garantir o apoio do primeiro gênero foi utilizado um rolete apoiado sobre uma chapa lisa (Figura 5.2a), restringindo os deslocamentos nas direções X e Y. No apoio do segundo gênero foi utilizado o mesmo rolete com uma chapa de aço com entalhe, para evitar o deslocamento ao longo do eixo Z (Figura 5.2b), restringindo os deslocamentos da viga nas três direções (X, Y e Z).



(a) Apoio primeiro gênero.



b) Apoio Segundo gênero.

Figura 5.2 - Sistema de apoios da viga.

É importante ressaltar que os apoios constituem uma parte fundamental da estrutura, restringindo os graus de liberdade necessários para a estabilidade da mesma, assim, nesta pesquisa os apoios foram parte fundamental no processo de identificação de danos, devido à alta influência do ruído (define-se ruído como qualquer degradação do sinal original, o que resulta em diferenças consideráveis em relação aos resultados esperados) gerado nos apoios por causa do atrito entre o rolete e a viga.

Foram testadas diferentes configurações de apoios, como mostrado na Figura 5.3, não apresentando bons resultados, devido terem uma maior área de contato, o atrito gerado pela vibração da viga diminui a perturbação das frequências nas regiões danificadas da estrutura, dificultando a identificação e localização.



a) Apoio primeiro gênero com chapas e rolete.

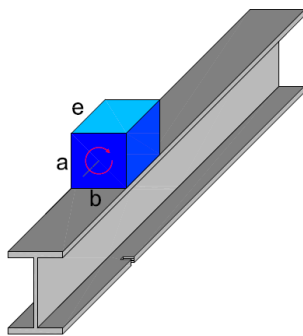


b) Apoio primeiro gênero com chapas e rolete.

Figura 5.3 - Sistema de apoios da viga.

5.3 - Massa adicional

A massa adicional colocada nas vigas foram chapas de aço fixadas com parafusos e a montagem desta é mostrado na Figura 5.4.



a) Massa adicional.



b) Montagem massa adicional



c) Chapas utilizadas.

Figura 5.4 - Massa adicional.

O sistema de massa adicional permite a fixação de um peso maior ou menor dependendo do número de chapas utilizadas. Cada chapa de aço tem um peso aproximado de 2,5 kg. A massa adicional foi posicionada adequadamente nos nós definidos na discretização, evitando a movimentação da viga na passagem de um nó para outro.

Foram testados outras montagens para aplicação de massa adicional, as quais não apresentaram resultados satisfatórios, devido a interferência do ruído gerado pela trepidação entre a massa adicional e a superfície da viga e também devido ao aumento da inércia rotacional, cujo efeito foi desconsiderado nesta análise (Figura 5.5).



a) Disco metálico.



b) Cilindro metálico.



c) Cilindro metálico.

Figura 5.5 - Montagens massa adicional testados.

Para ter uma ideia da relação da massa aplicada e a carga máxima que a viga pode suportar, foi realizado o cálculo da carga máxima da viga, apresentado no APÊNDICE C.

5.4 - Instrumentação

Para a realização dos ensaios dinâmicos são utilizados os seguintes equipamentos:

- Condicionador de sinal Ni Compact DAQ modelo NI cDaQ-91;
- Acelerômetro modelo 352C34 da PCB com sensibilidade 99,7 mV/g (Figura 5.6b);
- Acelerômetro modelo 352C33 da PCB com sensibilidade 100,5 mV/g (Figura 5.6a);
- Martelo instrumentado PCB modelo 086C0 com capacidade para desenvolver uma força máxima de 100 lbf = 444,82 N aproximadamente, com ponteira metálica (
- Figura 5.7).
- Computador com o software Lab-View para aquisição de dados.

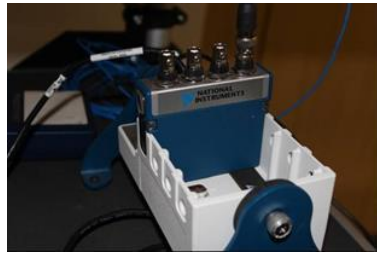


(a) Acelerômetro C33.



(b) Acelerômetro C34.

Figura 5.6 - Instrumentação do ensaio: acelerômetros.



(a) Condicionador de sinal.



(b) Martelo.

Figura 5.7 - Instrumentação do ensaio: (a) condicionador de sinal; (b) martelo.

A Figura 5.8 apresenta o esquema de ensaio montado no Laboratório de Vibração e Dinâmica de Sistemas da Universidade de Brasília, para as vigas metálicas.



a) Viga Biapoiada.



b) Sistema de aquisição montado.

Figura 5.8 – Sistema de ensaio completo.

Para a realização dos ensaios, foram utilizados dois acelerômetros para capturar as acelerações correspondentes às três primeiras frequências naturais. Um dos acelerômetros foi localizado na metade do vão ($L/2$), para capturar a leitura de acelerações da primeira (F1) e terceira (F3) frequências. O segundo acelerômetro foi localizado em $L/4$, para capturar as acelerações correspondentes à segunda frequência. Isto é devido aos modos de vibração terem pontos de deslocamento nulos que impossibilitam a identificação das frequências naquelas posições (Figura 5.9).

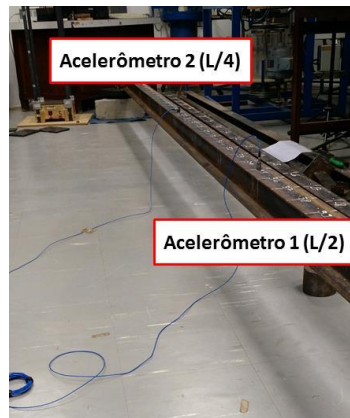
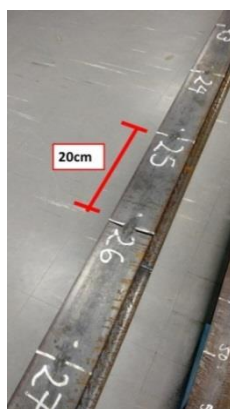


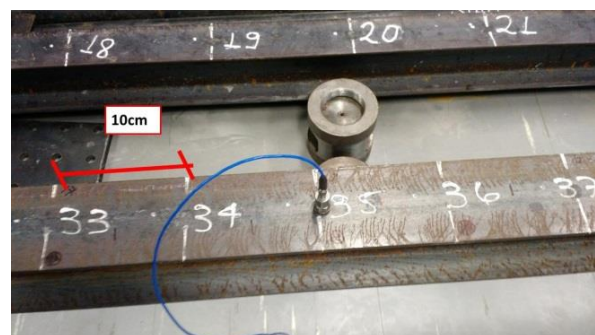
Figura 5.9 – Posicionamento acelerômetros.

5.5 – Discretização da viga

Durante o processo de escolha dos melhores parâmetros e configurações necessárias para aplicar o método proposto nesta pesquisa, foram ensaiadas várias configurações de comprimento do elemento (discretização longitudinal da viga) para aplicação da massa adicional nas vigas de 5 e 6 m, dentre elas foram testadas comprimentos de 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm e 50 cm (Figura 5.10).



a) Discretização a cada 20 cm.



b) Discretização a cada 10 cm.

Figura 5.10 – Discretização da viga – Ensaios experimentais.

Os melhores resultados das configurações de discretização testadas, foram obtidos com o tamanho do elemento de 10 e 20 cm nas vigas de 5 m, e de 20 cm nas vigas de 6 m, já na discretização de 30 cm até 50 cm o método não apresentou bons resultados, devido aos dados obtidos (frequências naturais), para cada posição de massa, não apresentarem perturbação nenhuma pela presença do dano. Isto, pelo fato do espaçamento ser muito maior e gerar uma perda de informação entre os nós da estrutura.

Foram testadas duas formas de discretização, na primeira configuração os danos estão localizados entre dois nós, já na segunda configuração os danos coincidem com os nós. Isto para determinar se o método seria capaz de localizar a posição do dano, sem a necessidade de coincidir com os nós feitos na discretização.

5.6 – Identificação modal da Viga Intacta

Antes de começar os ensaios com a viga danificada, foi realizada uma identificação modal da viga em duas condições: Apoiada-Apoiada (A-A) e Livre-Livre (L-L). Dados que foram utilizados para o cálculo indireto do módulo de elasticidade E da viga, como foi explicado anteriormente nas seções 4.3 a 4.7.

Os ensaios foram feitos utilizando 2 acelerômetros (1 fixo e 1 móvel) e os dados foram filtrados e organizados no MATLAB. Para o processamento dos dados e identificação modal (frequências e modos de vibração) foi utilizado o programa ARTeMIS.

A seguir são apresentadas as características de cada ensaio realizado e os resultados obtidos.

5.6.1.1 Ensaio Viga Livre-Livre

Foram realizados três ensaios na viga, na condição Livre-Livre. A viga foi pendurada em dois pontos localizados a $1/3$ de L medido desde os extremos. Foram utilizados dois suportes de aço, pesos e cordas para segurar a viga, esta foi colocada deitada como mostrado na Figura 5.11.



a) Suportes utilizados.



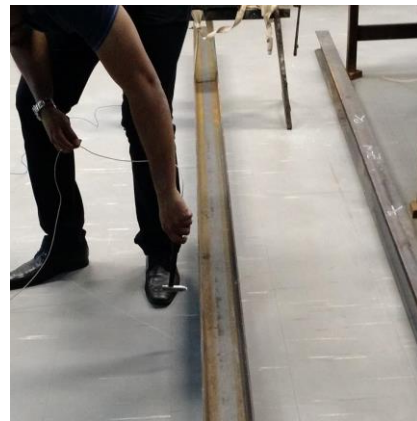
b) Viga pendurada.

Figura 5.11 – Ensaio viga Livre-livre.

A viga foi discretizada em 30 elementos (31 nós), espaçados a cada 20 cm. os acelerômetros foram localizados sobre a mesa superior de forma tal que as acelerações capturadas são acelerações transversais como mostrado na Figura 5.12a. a excitação transversal da viga foi feita com o martelo de impacto (Figura 5.12b) .



a) Acelerômetro de referência.



b) Excitação transversal na viga.

Figura 5.12 – Discretização da viga.

O acelerômetro fixo foi posicionado no nó 31, considerando que os modos naquele nó, não sejam um ponto de inflexão (Figura 5.12a). O acelerômetro móvel foi posicionado sobre os 30 nós restantes.

A configuração dos ensaios utilizada para todos os casos está apresentada a seguir (Figura 5.13):

- ✓ Tempo de aquisição 1.516s
- ✓ Frequência de amostragem: 1650,95Hz
- ✓ Frequência de Nyquist:825,4755Hz

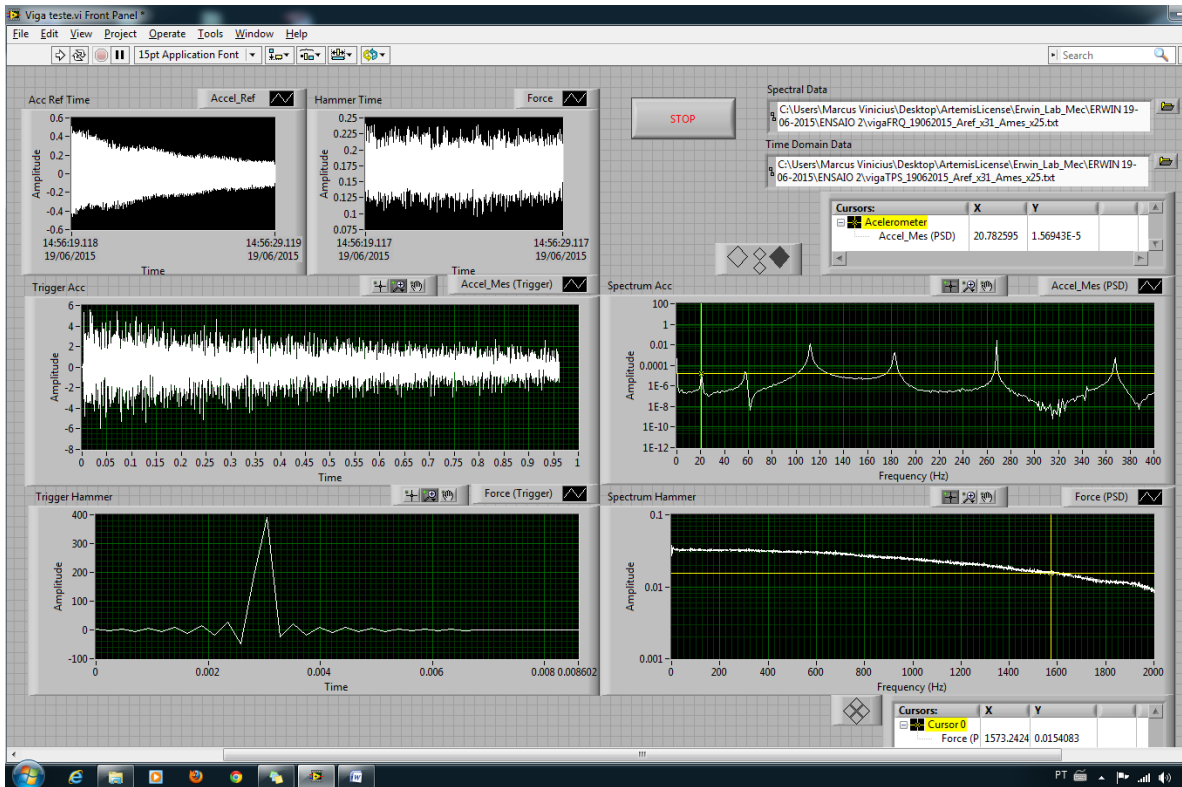


Figura 5.13 – Software LabView.

São coletados 31 arquivos correspondentes aos espectros do acelerômetro móvel e o acelerômetro de referência (Figura 5.14Figura 4.13). Esses arquivos são filtrados e organizados utilizando o programa MATLAB (Figura 5.15).

```

vigaTPS_19062015_Aref_x31_Ames_x01 - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
LabVIEW Measurement
Writer_Version 2
Reader_Version 2
Separator Tab
Decimal_Separator .
Multi_Headings No
X_Columns One
Time_Pref Absolute
Operator Marcus Vinicius
Date 2015/06/19
Time 14:26:41.7625639249998488445
Channels 3
Samples 4106
Date 2015/06/19
Time 14:26:41.7625639249998488445
Y_Unit_Label g
X_Dimension Time
X0 0.000000000000000E+0
Delta 0.000234
***End_of_Header***
X_Value Accel_Ref (Trigger) Accel_Mes (Trigger) Force (Trigger) Comment
0.000000 -0.045082 -0.073526 3.478535
0.000234 0.048087 0.090948 -3.882996
0.000469 -0.062526 -0.107005 5.046138
0.000703 0.071470 0.133333 -5.650241
0.000937 -0.088967 -0.155472 7.191265
0.001172 0.101372 0.190403 -8.423546
0.001406 -0.125603 -0.225170 10.743903
0.001641 0.142058 0.271682 -12.924006
0.001875 -0.174876 -0.323940 16.269115
0.002109 0.202291 0.393818 -4.971406
0.002344 -0.245978 -0.476828 551.321564
0.002578 0.292341 0.597003 259.484895
0.002812 -0.367845 -0.762061 -45.367458
0.003047 0.466478 0.966371 26.832761
0.003281 -0.641280 -1.717096 -20.621162
0.003516 1.004840 7.172278 12.380040
0.003750 -3.847653 -13.695736 -10.831972
0.003984 12.258872 -2.384805 9.723485
0.004219 -8.549684 10.564754 -6.730795
0.004453 -11.139260 4.252674 5.077019
0.004687 2.975954 3.381338 -5.897286
0.004922 3.220594 -1.991283 3.260203
0.005156 4.897405 1.938885 -3.058968

```

Figura 5.14 – Arquivo txt, gerado pelo Software LabView.

Acelerômetro
de referencia.

Acelerômetro
móvel.

```

no1 - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
-6.7584000e-02 3.3766000e-02
6.4937000e-02 3.9492000e-02
-9.1695000e-02 -5.4507000e-02
9.6332000e-02 5.9736000e-02
-1.2399500e-01 -7.5096000e-02
1.4203300e-01 9.7981000e-02
-1.7122500e-01 -1.0456800e-01
2.0602200e-01 1.3932900e-01
-2.5606400e-01 -1.5567800e-01
3.2180900e-01 2.0064900e-01
-4.2703900e-01 -2.3073000e-01
5.9507900e-01 2.8646300e-01
-9.6523500e-01 -3.3840000e-01
2.5091840e+00 4.1716600e-01
-1.0671000e-01 -5.2203200e-01
-6.9421950e+00 7.0223000e-01
1.6298690e+00 -8.2179900e-01
-6.2939000e-01 1.0911260e+00
1.3272540e+00 -3.2783630e+00
-5.4118100e-01 9.4819810e+00
1.0159470e+00 -8.1051620e+00
-5.6945600e-01 -5.7186600e+00
1.2494850e+00 2.6704910e+00
-1.3196190e+00 3.3474950e+00
4.1526000e-01 5.9462330e+00

```

Figura 5.15 – Arquivo txt, filtrado.

O algoritmo no MATLAB utilizado para filtrar os dados gerados pelo programa LabView é a rotina apresentada na Tabela 5.1.

```

%-----LEITURA ARQUIVOS .TXT-----
% faz a leitura de arquivos .txt armazenados na pasta DADOS,
clear all
clc
%-----LEITURA DOS ARQUIVOS TXT (OUTPUT-LABVIEW)-----
A1 = readData('Dados/vigaTPS_20062015_Aref_x13_Ames_x01.txt');
A2 = readData('Dados/vigaTPS_20062015_Aref_x13_Ames_x02.txt');
.
A30= readData('Dados/vigaTPS_20062015_Aref_x13_Ames_x30.txt');
A31= readData('Dados/vigaTPS_20062015_Aref_x13_Ames_x31.txt');
%-----SELEÇÃO COLUNAS 3 E 4-----
-acel1=2; % acel referência
-acel2=3; % acel movel
A1=[A1(:,acel1),A1(:,acel2)];
A2=[A2(:,acel1),A2(:,acel2)];
.
A30=[A30(:,acel1),A30(:,acel2)];
A31=[A31(:,acel1),A31(:,acel2)];
%-----EXPORTAR ARQUIVOS-----
save no1.asc A1 -ascii
save no2.asc A2 -ascii
.
save no30.asc A30 -ascii
save no31.asc A31 -ascii
%
%//Funcao de leitura de arquivo de dados
function [A] = readData(filename)
    d = lvm_import(filename);
    A(:,1) = d.Segment1.data(:,1);
    A(:,2) = d.Segment1.data(:,2);
    A(:,3) = d.Segment1.data(:,3);
    A(:,4) = d.Segment1.data(:,4);
end
%-----FIM-----

```

Tabela 5.1 - Algoritmo MATLAB para filtrar dados.

Após filtrar os dados, estes são alimentados no software ARTEMIS para determinar as frequências e os modos de vibração da estrutura (Figura 5.16).

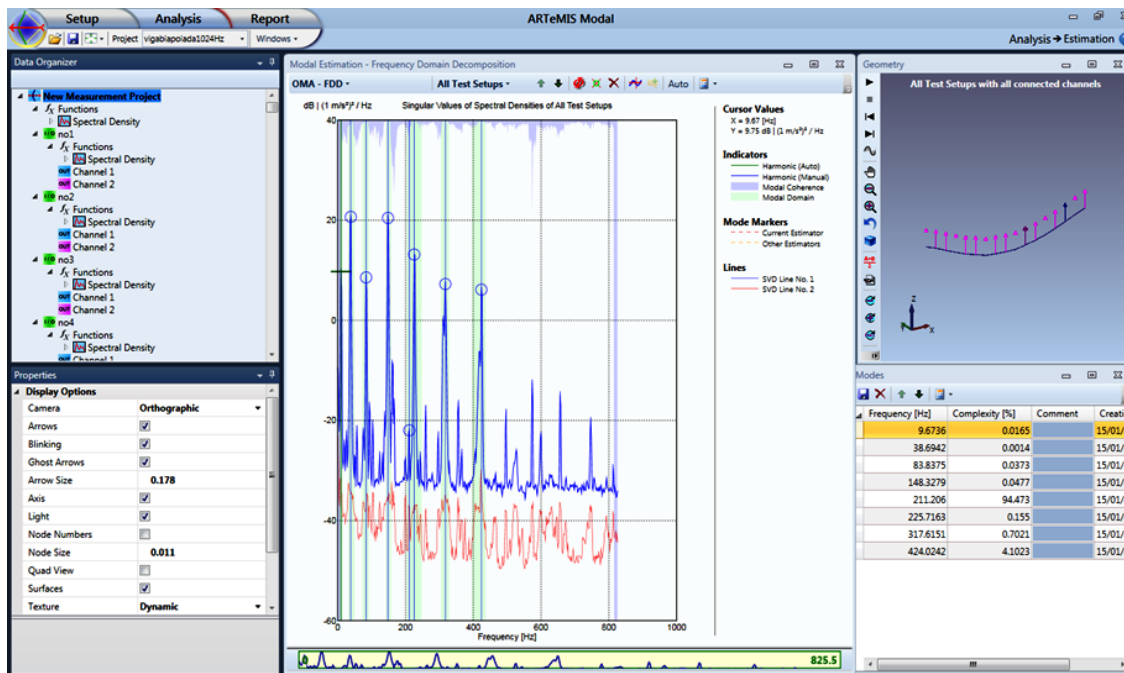


Figura 5.16 – Interface gráfica – Software ARTEMIS.

Foram executados 3 ensaios, para poder realizar uma análise estatística dos dados. Os resultados das primeiras 5 frequências não apresentaram variações e são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2- Frequências experimentais L-L.

LIVRE-LIVRE			
f(Hz)	ENSAIO 1	ENSAIO 2	ENSAIO 3
1	20.823	20.823	20.823
2	57.264	57.264	57.264
3	111.404	111.404	111.404
4	182.203	182.203	182.203
5	267.578	267.578	267.578

Os gráficos correspondentes aos modos de vibração do primeiro ensaio (ENSAIO1) estão apresentados nas Figura 5.17 e Figura 5.18.

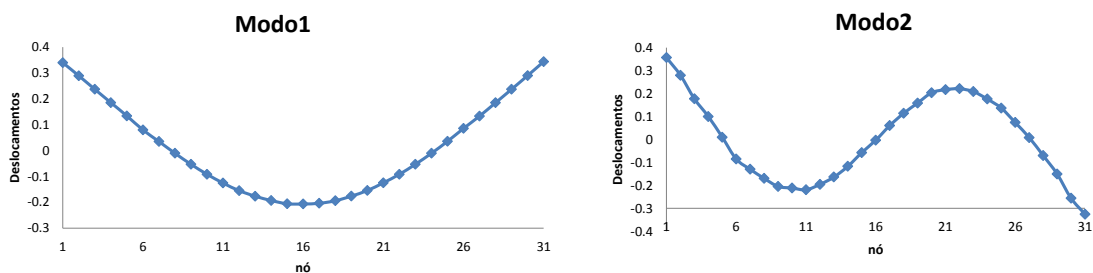


Figura 5.17 – Modos de vibração 1 e 2 viga L-L.

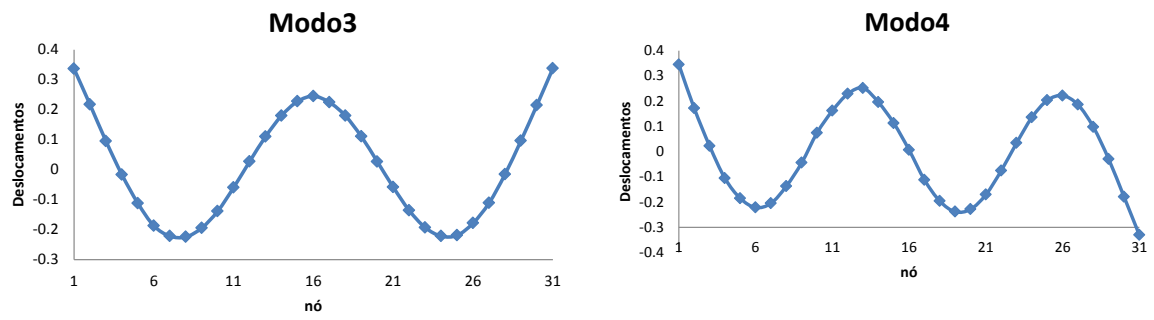


Figura 5.18 – Modos de vibração 3 e 4 viga L-L.

Os vetores dos modos de vibração estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3- Modos de vibração viga L-L.

LIVRE - LIVRE															
NÓ	ENSAIO 1					ENSAIO 2					ENSAIO 3				
	MODO1	MODO2	MODO3	MODO4	MODO5	MODO1	MODO2	MODO3	MODO4	MODO5	MODO1	MODO2	MODO3	MODO4	MODO5
1	0.340064	0.356959	0.336228	0.345	0.324885	0.338257	-0.33507	0.333796	-0.32464	0.323149	0.337	-0.33322	0.332933	-0.32567	0.32348
2	0.289425	0.279894	0.217004	0.171907	0.143296	0.290904	-0.23464	0.220413	-0.18078	0.147377	0.288	-0.23865	0.219213	-0.1789	0.145855
3	0.237052	0.177645	0.095051	0.022583	-0.0327	0.236476	-0.17326	0.094969	-0.02832	-0.03264	0.237	-0.158	0.098197	-0.03055	-0.02942
4	0.185527	0.100119	-0.01687	-0.10538	-0.16529	0.184686	-0.08812	-0.01711	0.099021	-0.16535	0.185	-0.08052	-0.01534	0.098118	-0.16317
5	0.134206	0.009909	-0.11215	-0.18498	-0.2248	0.134519	-0.00229	-0.11304	0.188211	-0.22489	0.133997	0.005164	-0.11103	0.187883	-0.22469
6	0.080092	-0.08523	-0.18732	-0.22114	-0.19669	0.082787	0.084074	-0.18463	0.226122	-0.20098	0.082897	0.079186	-0.18287	0.225903	-0.20167
7	0.035207	-0.1298	-0.22158	-0.20458	-0.10821	0.036662	0.141488	-0.22287	0.206552	-0.10738	0.035199	0.140235	-0.22236	0.206478	-0.10783
8	-0.01028	-0.16955	-0.22452	-0.13672	0.024969	-0.00983	0.19592	-0.22673	0.138527	0.025074	-0.0101	0.163944	-0.2259	0.136413	0.026269
9	-0.05291	-0.20437	-0.19451	-0.04404	0.153441	-0.05469	0.21339	-0.1951	0.035267	0.153813	-0.0546	0.216044	-0.19459	0.03482	0.15408
10	-0.09149	-0.21158	-0.13869	0.074428	0.232479	-0.09264	0.242397	-0.13686	-0.07633	0.232233	-0.09189	0.229357	-0.13631	-0.07666	0.232191
11	-0.12539	-0.21888	-0.05969	0.162075	0.236562	-0.12775	0.220406	-0.05914	-0.17272	0.236946	-0.126	0.221893	-0.05995	-0.17205	0.23637
12	-0.15475	-0.19578	0.026944	0.22883	0.165111	-0.15377	0.203892	0.026725	-0.23228	0.165871	-0.153	0.202949	0.025618	-0.23113	0.166447
13	-0.17618	-0.16368	0.110169	0.251972	0.041464	-0.17737	0.15935	0.109683	-0.24159	0.042925	-0.178	0.161682	0.109709	-0.24026	0.043025
14	-0.1929	-0.11704	0.179837	0.195705	-0.09529	-0.19309	0.122363	0.18101	-0.19841	-0.09545	-0.195	0.136231	0.180302	-0.1988	-0.09537
15	-0.20546	-0.05697	0.2274	0.112981	-0.2024	-0.20452	0.063928	0.226618	-0.1134	-0.20179	-0.204	0.066704	0.228929	-0.11282	-0.20277
16	-0.20637	-0.00309	0.24475	0.006535	-0.24351	-0.20825	0.001301	0.243742	-0.00309	-0.24285	-0.208	0.000707	0.243493	-0.00362	-0.24225
17	-0.20359	0.060539	0.224569	-0.11186	-0.20146	-0.20496	-0.061	0.225257	0.113578	-0.20172	-0.20499	-0.06872	0.226744	0.114388	-0.20071
18	-0.19392	0.114187	0.179435	-0.19601	-0.0954	-0.1956	-0.11797	0.180008	0.198261	-0.09625	-0.196	-0.11992	0.180543	0.199738	-0.09582
19	-0.17592	0.158796	0.110423	-0.23805	0.040881	-0.17792	-0.15846	0.110452	0.241098	0.040793	-0.179	-0.16765	0.11105	0.241544	0.040341
20	-0.15421	0.203574	0.026675	-0.22826	0.164641	-0.1565	-0.1955	0.02671	0.231174	0.164909	-0.156	-0.19847	0.026678	0.231247	0.1649
21	-0.12432	0.217234	-0.05869	-0.17008	0.235716	-0.12645	-0.22484	-0.05937	0.171749	0.235692	-0.12499	-0.22148	-0.05853	0.172236	0.235684
22	-0.09135	0.221298	-0.13613	-0.07522	0.231312	-0.09159	-0.22515	-0.13738	0.076041	0.231141	-0.0917	-0.22766	-0.13587	0.07667	0.232451
23	-0.05264	0.208614	-0.19307	0.034368	0.153595	-0.05439	-0.21452	-0.194	-0.03489	0.15362	-0.05479	-0.21311	-0.19234	-0.03545	0.153951

Continua...

24	-0.01015	0.176161	-0.22172	0.135878	0.026486	-0.01172	-0.18146	-0.22335	-0.13677	0.027229	-0.01029	-0.18583	-0.22098	-0.13851	0.026623
25	0.035944	0.136703	-0.21928	0.203379	-0.10651	0.035413	-0.13071	-0.21872	-0.20651	-0.10766	0.035299	-0.13693	-0.21857	-0.20661	-0.10669
26	0.085897	0.073887	-0.17838	0.222011	-0.20285	0.084881	-0.07291	-0.17739	-0.22492	-0.20365	0.0862	-0.07159	-0.17724	-0.22551	-0.20499
27	0.133603	0.008414	-0.11147	0.186054	-0.2229	0.132774	-7.9E-05	-0.11165	-0.18826	-0.2227	0.134	-0.0025	-0.11123	-0.18833	-0.22365
28	0.185305	-0.06983	-0.01586	0.097566	-0.16224	0.184587	0.077151	-0.01673	-0.0977	-0.16269	0.182999	0.073773	-0.0164	-0.09816	-0.16252
29	0.237374	-0.15025	0.096263	-0.02939	-0.02955	0.235799	0.159964	0.095585	0.031575	-0.02861	0.235	0.159454	0.094478	0.030482	-0.03005
30	0.290257	-0.2559	0.21479	-0.17891	0.146532	0.285995	0.234454	0.211593	0.181677	0.147337	0.287995	0.243899	0.214139	0.181113	0.146596
31	0.344093	-0.32558	0.337626	-0.33059	0.330791	0.342943	0.346873	0.33799	0.332014	0.32655	0.345	0.354648	0.341559	0.332456	0.326525

5.6.1.2 Ensaio Viga Apoiada-Apoiada (A-A)

Da mesma forma que no ensaio da viga L-L, foram realizados 3 ensaios para a viga A-A (Figura 5.19). Os apoios da viga foram: do lado esquerdo o apoio do segundo gênero restringindo os deslocamentos em todas as direções (x, y, z), mas permitindo a rotação ao redor do apoio (Figura 5.20a), e no outro extremo foi utilizado um apoio do primeiro gênero permitindo os deslocamentos no sentido longitudinal da viga e as rotações ao redor do apoio (Figura 5.20b). Estes apoios foram garantidos utilizando chapas e roletes de aço A-36. Para estes ensaios a viga foi colocada em pé, que significa com a mesa inferior e superior paralelas a horizontal.



c) Viga biapoiada A-A.



d) Viga biapoiada A-A.

Figura 5.19 – Ensaio viga Apoiada – Apoiada (A-A).



a) Apoio primeiro gênero.



b) Apoio segundo gênero.

Figura 5.20 – Apoios (viga A-A)

A viga foi discretizada em 30 elementos (31 nós), espaçados a cada 20 cm. Os acelerômetros foram localizados sobre a mesa superior de forma tal que as acelerações capturadas são acelerações verticais como mostrado na Figura 5.21. A excitação vertical da viga foi feita com o martelo de impacto na região do vão central.



a) Acelerômetro de referência (nó 13).



b) Acelerômetro móvel.

Figura 5.21 – Posição dos acelerômetros ensaio viga A-A.

O acelerômetro fixo foi posicionado no nó 13 (Figura 5.21a), considerando que, os modos naquele nó não coincidam com pontos de inflexão. O acelerômetro móvel foi posicionado sobre todos os 31 nós (Figura 5.21b). A configuração dos ensaios utilizada para todos os casos é a mesma configuração utilizada nos ensaios da viga L-L.

Foram coletados 31 arquivos correspondentes aos espectros do acelerômetro móvel e o acelerômetro de referência. Esses arquivos foram filtrados e organizados utilizando-se o programa MATLAB e as mesmas rotinas do ensaio da viga L-L.

Foram realizados 3 ensaios para fazer uma análise estatística dos dados. Os resultados das primeiras 5 frequências estão apresentadas na Tabela 5.4

Tabela 5.4 - Frequências experimentais A-A.

APOIADA-APOIADA			
f(Hz)	ENSAIO 4	ENSAIO 5	ENSAIO 6
1	9.370	9.370	9.370
2	37.482	36.441	36.441
3	83.293	76.005	76.005
4	149.927	143.680	144.721
5	284.237	242.590	242.590

Os gráficos correspondentes modos de vibração do primeiro ensaio (ENSAIO1) estão apresentados nas Figura 5.22 e Figura 5.23.

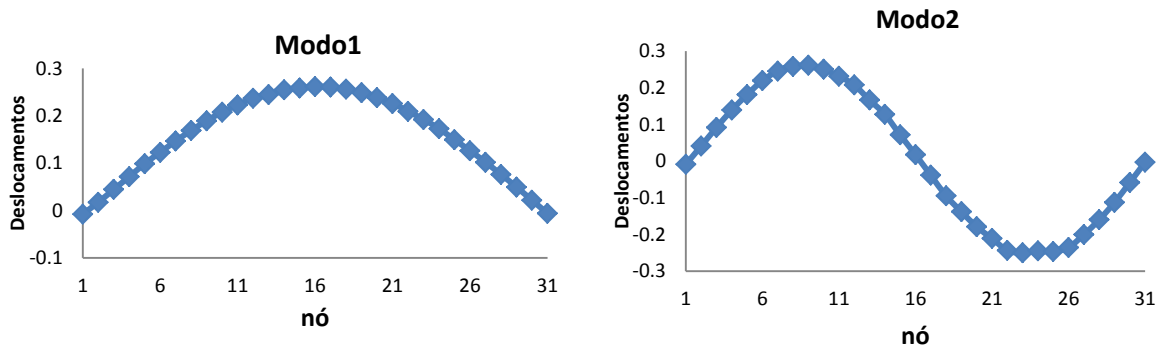


Figura 5.22 – Modos de vibração 1 e 2 viga A-A.

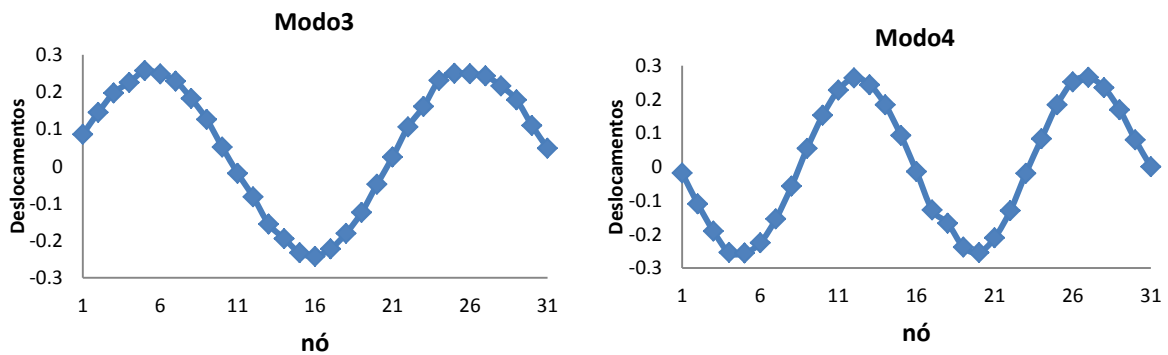


Figura 5.23 – Modos de vibração 3 e 4 viga A-A.

Os modos de vibração estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Modos de vibração viga A-A.

NÓ	APOIADA – APOIADA														
	ENSAIO 4					ENSAIO 5					ENSAIO 6				
	MODO1	MODO2	MODO3	MODO4	MODO5	MODO1	MODO2	MODO3	MODO4	MODO5	MODO1	MODO2	MODO3	MODO4	MODO5
1	-0.00743	-0.00885	0.086058	-0.01825	-0.25761	0.001544	-0.00339	0.074646	0.009439	0.127689	0.000145	0.002149	0.072709	-0.0048	-0.11047
2	0.01759	0.041015	0.145035	-0.10977	-0.26258	0.028425	-0.05014	0.138823	-0.08832	-0.0161	0.025951	-0.04809	0.145703	-0.09386	0.019253
3	0.044731	0.091641	0.197415	-0.1907	-0.22875	0.051329	-0.0962	0.191002	-0.17798	-0.16763	0.052173	-0.09877	0.190992	-0.17374	0.179553
4	0.071626	0.139151	0.225707	-0.25367	-0.17821	0.079693	-0.13814	0.225117	-0.228	-0.26522	0.078177	-0.1431	0.238126	-0.232	0.290643
5	0.099101	0.181138	0.257468	-0.25547	-0.06878	0.105307	-0.18197	0.25169	-0.2556	-0.26128	0.103733	-0.18127	0.249106	-0.24966	0.272516
6	0.123016	0.219605	0.248332	-0.22521	0.040453	0.127902	-0.21002	0.241462	-0.22837	-0.1685	0.127625	-0.21337	0.246038	-0.22679	0.167324
7	0.146887	0.245269	0.229026	-0.15422	0.151813	0.150927	-0.23829	0.226663	-0.16073	-0.02602	0.150546	-0.23623	0.232289	-0.16086	0.037037
8	0.169194	0.257704	0.182457	-0.05727	0.21003	0.172378	-0.24895	0.198161	-0.06568	0.110471	0.171882	-0.25296	0.199008	-0.05976	-0.0974
9	0.189575	0.261124	0.126131	0.054999	0.206247	0.191111	-0.25031	0.142432	0.037667	0.216755	0.190774	-0.2554	0.140476	0.044757	-0.20627
10	0.207839	0.250612	0.0516	0.152975	0.132623	0.209955	-0.24339	0.074603	0.14001	0.234233	0.20864	-0.2418	0.071776	0.139198	-0.25895
11	0.222955	0.231405	-0.01884	0.227603	-0.01148	0.223152	-0.22538	0.008481	0.212022	0.205543	0.2231	-0.22269	0.000145	0.215648	-0.22213
12	0.237242	0.207491	-0.0822	0.263861	-0.1526	0.236584	-0.19866	-0.06423	0.250054	0.129892	0.234669	-0.19547	-0.0713	0.253178	-0.1305
13	0.245023	0.166611	-0.15532	0.2436	-0.20969	0.242783	-0.15399	-0.13958	0.24593	-0.01177	0.243004	-0.151	-0.13772	0.247799	0.015549
14	0.254888	0.127471	-0.1946	0.183836	-0.2062	0.25176	-0.06694	-0.183	0.195654	-0.15994	0.252866	-0.11898	-0.19182	0.195603	0.131295
15	0.258699	0.071418	-0.23234	0.093141	-0.11748	0.255539	-0.06067	-0.22464	0.119284	-0.20878	0.257671	-0.06645	-0.22865	0.118587	0.247303
16	0.261627	0.017527	-0.24227	-0.01414	-0.00617	0.25738	-0.02441	-0.24031	0.015701	-0.19656	0.257581	-0.01338	-0.244	0.012777	0.24788
17	0.260633	-0.03835	-0.22197	-0.12778	0.114304	0.257294	0.065674	-0.23678	-0.10018	-0.19368	0.25704	0.04503	-0.23764	-0.10027	0.214565
18	0.256531	-0.09476	-0.18036	-0.1674	0.189194	0.251936	0.088589	-0.20514	-0.17843	-0.08992	0.253655	0.094183	-0.21353	-0.18426	0.112498
19	0.248924	-0.13796	-0.1241	-0.23778	0.194353	0.245207	0.136873	-0.16858	-0.2356	0.031161	0.245674	0.144614	-0.16808	-0.23963	-0.03142
20	0.238294	-0.17878	-0.04831	-0.25392	0.155044	0.23661	0.182329	-0.09962	-0.2531	0.152866	0.236195	0.184551	-0.10158	-0.25441	-0.17387
21	0.225999	-0.21079	0.024977	-0.21028	0.082095	0.22369	0.22112	-0.03335	-0.22052	0.298979	0.223904	0.218832	-0.03329	-0.22509	-0.26677
22	0.209568	-0.24345	0.105947	-0.12987	-0.07364	0.209524	0.235607	0.039409	-0.15437	0.295221	0.210042	0.238388	0.037599	-0.15261	-0.25502
23	0.192255	-0.25002	0.16099	-0.01893	-0.17195	0.191789	0.254356	0.113287	-0.06208	0.204444	0.192332	0.250688	0.105245	-0.05921	-0.18302

Continua...

24	0.172824	-0.24463	0.231048	0.083533	-0.21638	0.174659	0.256784	0.176432	0.043593	0.079044	0.174453	0.259862	0.172844	0.047311	-0.06332
25	0.149488	-0.24668	0.250271	0.184204	-0.16808	0.152079	0.250169	0.218467	0.143561	-0.06819	0.152277	0.249955	0.214834	0.149552	0.062613
26	0.126381	-0.2355	0.248731	0.25216	-0.05917	0.131271	0.238934	0.249259	0.21929	-0.17451	0.130248	0.234235	0.241009	0.224307	0.185698
27	0.102044	-0.20013	0.243221	0.265542	0.066237	0.106177	0.209977	0.25214	0.266978	-0.22352	0.107945	0.205405	0.249557	0.264355	0.216405
28	0.076248	-0.1599	0.215999	0.234854	0.187383	0.083177	0.17907	0.242562	0.262625	-0.22282	0.081174	0.172206	0.226134	0.252083	0.236238
29	0.0497	-0.11268	0.178769	0.169372	0.270096	0.057734	0.131868	0.196395	0.214925	-0.15537	0.05632	0.134381	0.194524	0.207158	0.133046
30	0.021836	-0.05835	0.109616	0.080094	0.293869	0.032984	0.104229	0.15529	0.14192	0.042868	0.030285	0.078473	0.133886	0.141221	-0.00476
31	-0.0058	-0.00292	0.048852	0.000476	0.302653	0.004691	0.041289	0.077626	0.064016	0.159694	0.003205	0.034861	0.090179	0.056441	-0.13764

5.6.2 - Ensaio preliminar viga AA com uma massa adicional de 10 kg

Foi realizado um ensaio preliminar para conhecer o comportamento da viga quando é adicionada uma massa concentrada na estrutura. O teste foi realizado na vigade 6 m em condição biapoiada (A-A), a discretização e o equipamento foram os mesmos utilizados nos ensaios de identificação modal da viga intacta.

Nesta vez o teste foi realizado com 1 acelerômetro somente, localizado na metade do vão, pois o objetivo é determinar a frequência fundamental da viga. Foram colocadas 4 chapas de aço cujo peso é aproximadamente 10 kg (Figura 5.24).



a) Massa adicional.



b) Montagem ensaio experimental.

Figura 5.24 - Ensaio viga intacta + massa adicional (10 kg).

Foram obtidos 31 arquivos correspondentes aos 31 espectros de acelerações considerando a massa adicional posicionada em cada nó.

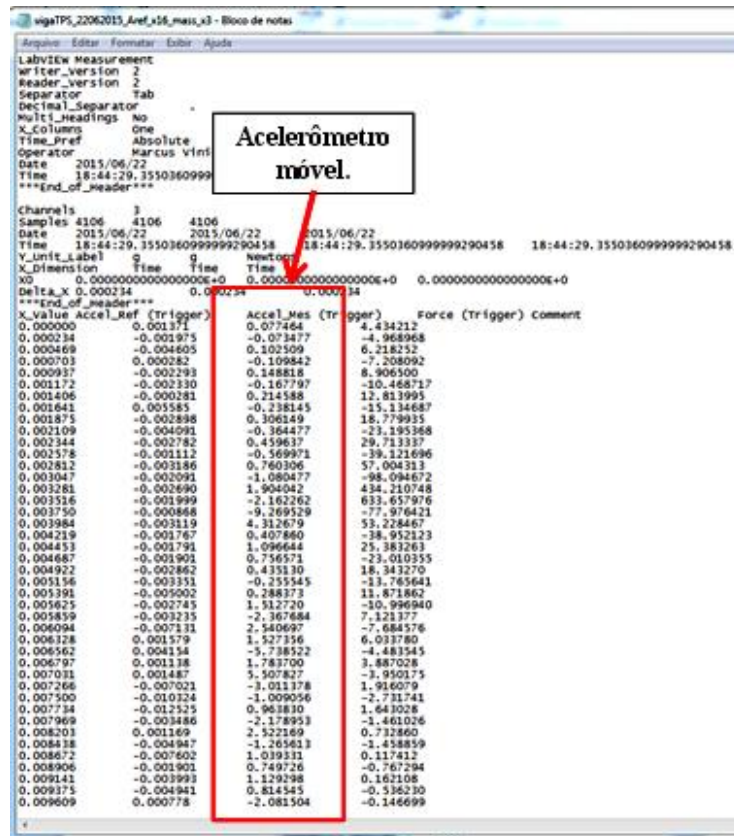


Figura 5.25 - Arquivo correspondente ao espectro de acelerações.

Os arquivos foram processados no programa MATLAB, utilizando a rotina apresentada na Tabela 5.6. Nesta rotina os arquivos (Figura 5.25), correspondentes aos espectros de acelerações foram manipulados. Primeiramente foi aplicada uma técnica chamada de janelas que consiste em multiplicar o registro do tempo (espectro de acelerações) por uma janela de comprimento finito, com uma amplitude que varia suavemente e progressivamente até zero nas bordas. Isso faz com que os pontos de extremidade adotem a forma da janela, resultando numa forma de onda contínua sem transições acentuadas (Figura 5.26 e Figura 5.27).

Foram testadas várias janelas para comprovar a efetividade e a vantagem de cada uma delas, inicialmente foi usada a janela de Hanning.

Este método de Janelamento foi aplicado para minimizar o vazamento espectral apresentado quando o número de períodos na aquisição não é um número inteiro, portanto os pontos finais são descontínuos. Estas discontinuidades aparecem na FFT (Fast Fourier Transform) como componentes de alta frequência que não fazem parte do sinal original (National Instruments (2009)).

```

% APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT), DA JANELA DE HANNING
% -----NOS ESPECTROS DE ACELERAÇÕES, DOS ENSAIOS% EXPERIMENTAIS-----
% -----ERWIN ULISES LOPEZ PALECHOR-----
% -----ANÁLISE EXPERIMENTAL-----
clear all
clc
Pontos=31; % número de pontos de aquisição de dados no ensaio
Tf=30; %Tamanho da fonte
for i=1:Pontos
    danol=readData(['ENSAIO8/vigaTPS_22062015_Aref_x16_mass_x',num2str(i),'.txt']);
    acel(:,i)=danol(:,3);
    Tempo=danol(:,1);
    dt=Tempo(2,1)-Tempo(1,1);
    Y=acel(:,i);
    L = length (Y); % Window Length of FFT
    y_HannWnd = Y.*hanning(L);
    X0=((abs(fftn(y_HannWnd))))';
    f0=(0:length(X0)-1)/length(X0)*(1/dt); % Vector frequência (abscissa)
    PSD=(fft(y_HannWnd)).*conj(fft(y_HannWnd));

    fftmag(:,i)=X0;

    figure(i)
    plot(f0, (fftmag(:,i)), 'b')
    axis([0 150 min((fftmag(:,i))) max((fftmag(:,i)))])
    title('ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS','fontsize',Tf)
    ylabel('Amplitude','fontsize',Tf-1)
    xlabel('Frequência (Hz)','fontsize',Tf-1)
    set(gca, 'FontSize',Tf-1)
    set(gcf, 'Color',[1,1,1]) % tira a cor cinza do fundo

    figure(i+Pontos)
    hold on
    plot(Tempo,y_HannWnd, 'b')
    axis([0 150 min((fftmag(:,i))) max((fftmag(:,i)))])
    title('ESPECTRO DE ACELERAÇÕES','fontsize',Tf)
    ylabel('Amplitude','fontsize',Tf-1)
    xlabel('Tempo (s)','fontsize',Tf-1)
    set(gca, 'FontSize',Tf-1)
    set(gcf, 'Color',[1,1,1]) % tira a cor cinza do fundo

    %---escolher os primeiros dados do espectro de frequências-----
    fftmag2(:,i)=fftmag(3:10,i);
    fila=find( fftmag2(:,i)==max( fftmag2(:,i)))
    F1(i)=f0(fila+2);
end
x=[1:1:31];
figure(32)
hold on
plot(x,F1, 'g', 'linewidth',3)
plot(x,F1, 'o', 'markersize',8, 'linewidth',3);
title('GRAFICOS FREQUÊNCIA (F1) VS. POSIÇÃO DA MASSA','fontsize',Tf)
ylabel('Primeira Frequência (F1)','fontsize',Tf-1)
xlabel('Posição da massa M','fontsize',Tf-1)
axis([1 Pontos min(F1)-0.2 max(F1)+0.2]);
set(gca, 'FontSize',Tf-1)
set(gcf, 'Color',[1,1,1]) % tira a cor cinza do fundo

```

Tabela 5.6 - Algoritmo utilizado para processamento de sinais.

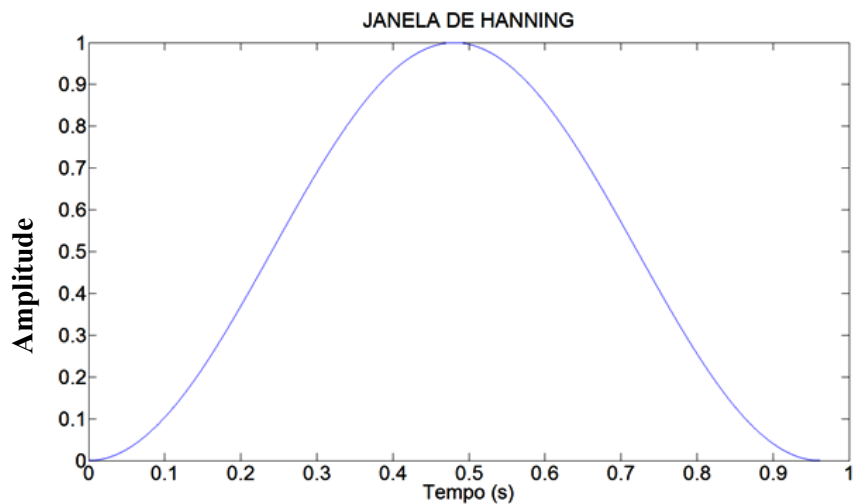


Figura 5.26- Janela de Hanning.

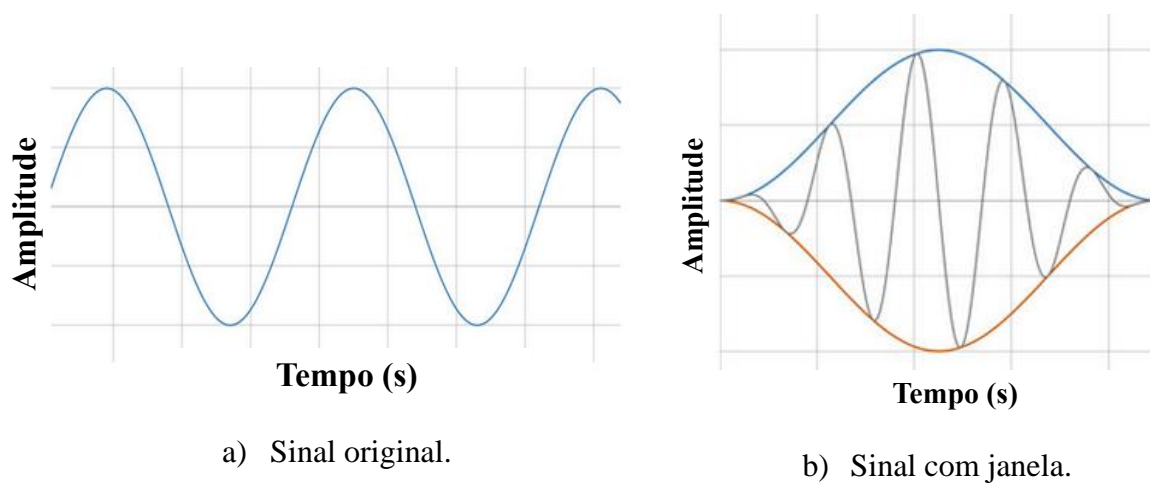


Figura 5.27 - Aplicação janela Hanning (National Instruments (2009)).

Na Figura 5.28 e Figura 5.29 são apresentados respectivamente, o espectro de acelerações e o resultado da aplicação da janela de Hanning no sinal, quando a massa adicional está localizada no nó 14.

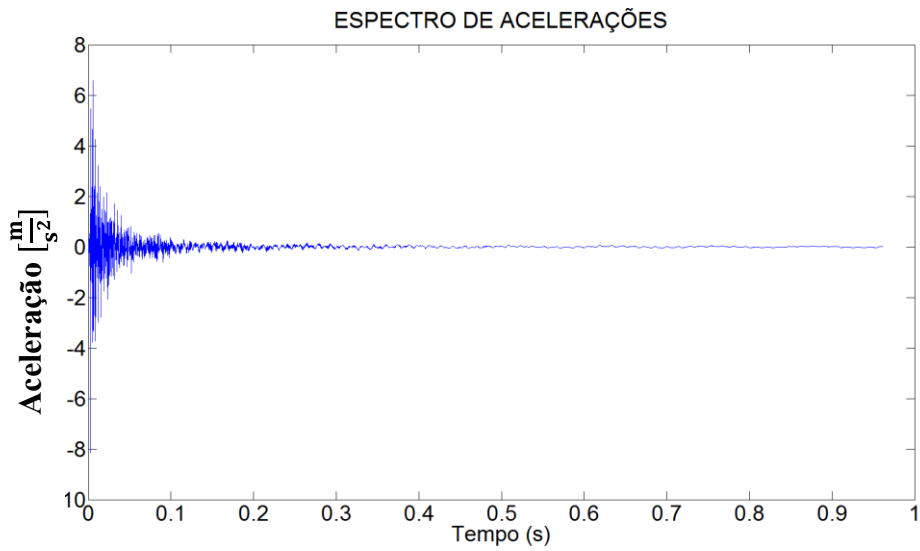


Figura 5.28 - Espectro de acelerações nó (posição da massa nó 14).

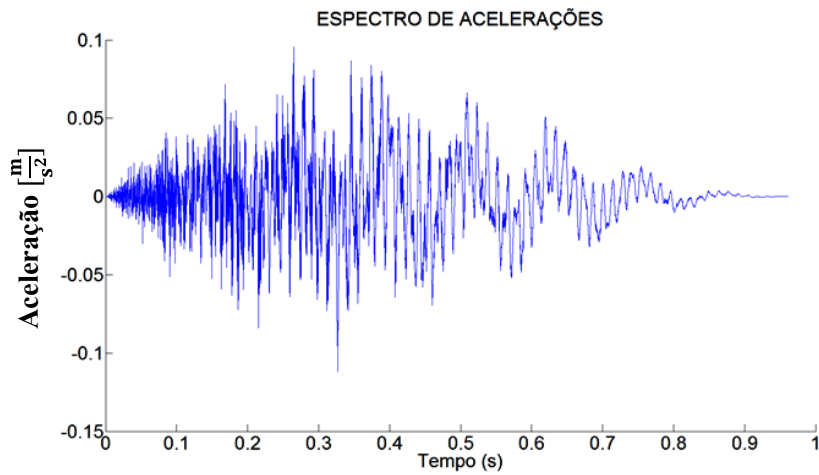


Figura 5.29 - Espectro de acelerações – janela de Hanning.

Na figura Figura 5.30 é apresentado o espectro de frequências, resultado da aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) no sinal, correspondente ao espectro de acelerações da viga quando a posição da massa coincide com o nó 14.

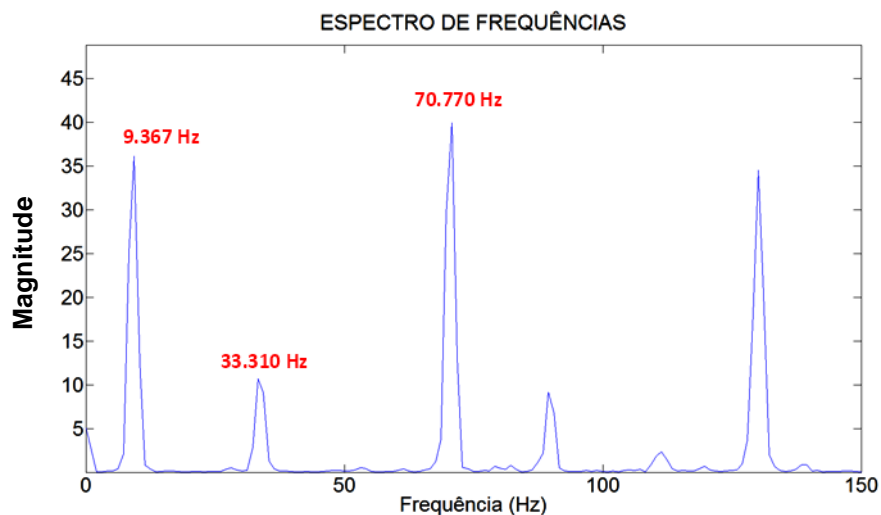


Figura 5.30 - Espectro de Frequências (FFT).

Da mesma forma como foram apresentados os dados para o espectro de acelerações correspondente a posição de massa no nó 14, todos os 31 espectros foram processados e foram aplicados os mesmos procedimentos acima amostrados. O resultado foram 31 espectros de frequências dos quais foram escolhidos os picos correspondentes à primeira frequência (frequência fundamental) da viga, estes dados foram armazenados num vetor e depois foram plotados. Os resultados são apresentados na Figura 5.31.

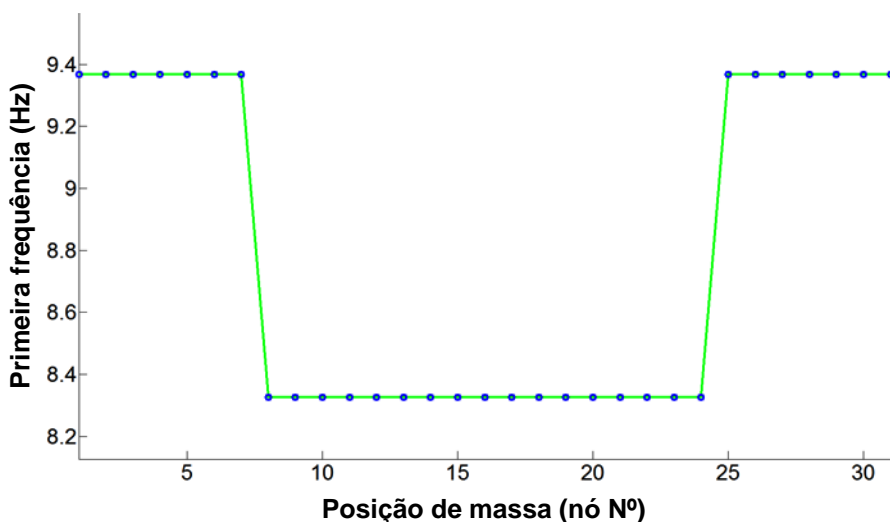


Figura 5.31 - Frequência vs. Posição de massa ($m = 10$ kg)

Os resultados obtidos não foram os esperados, pois no método para a obtenção da primeira frequência existe uma baixa sensibilidade ao uso de massas adicionais na estrutura. A Figura 5.31 mostra 3 faixas de frequência ao invés de uma curva suave que indica a variação gradual da primeira frequência a medida que a massa adicional vai se

deslocando. Por isto é necessário aplicar métodos de correção dos picos do espectro de Frequências que serão explicados em capítulos posteriores.

5.7 - Frequência de amostragem (Fs), número de dados (N) e tempo aquisição do sinal temporal (t)

A resolução da frequência é muito importante considerando que a variação que acontece por causa da massa adicional apresenta pequenas perturbações nas frequências naturais. Assim, nesta pesquisa foram testadas várias configurações de Tempo de aquisição ou análise depois da excitação (t), número de dados analisados (N) e a frequência de amostragem (Fs).

As configurações analisadas são apresentadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Configurações equipamento

Configuração	Frequência de amostragem (Fs) Hz	Período T (Δt [seg])	Número de dados analisados (N)	Tempo total de análise t (seg)
1	4274	0,000234	8192	2
2	4274	0,000234	16384	4
3	2049	0,000488	8192	4
4	2049	0,000488	16384	8
5	1653	0,000605	16384	10
6	1653	0,000605	32768	20

A configuração que apresentou melhores resultados foi a número 10, como um frequência de amostragem $F_s = 1653$ Hz, $\Delta t = 0,000605$ seg e número de dados analisados $N = 16384$ (2^{14} em escala diádica). Estes parâmetros foram adotados em todos os casos da dano.

5.8 - Interpolação sinal temporal

Foi utilizada uma técnica para interpolar o sinal no domínio da frequência que consiste em aumentar o sinal temporal $x(t)$ com um vetor de zeros o que gerou uma diminuição do intervalo (Δf) no espectro de frequências. Para realizar esta interpolação devem ser considerado o tamanho do vetor como uma potência de 2 (2^n). Neste caso o vetor de acelerações obtido do LabView tinha um tamanho de 2^{14} elementos, foram adicionados zeros no final do vetor, aumentando o tamanho para 2^{19} .

O aumento do número de dados (N) na FFT gera um intervalo de frequências (Δf) mais próximo, portanto um maior número de linhas espectrais dentro do lóbulo, facilitando assim, uma maior aproximação da frequência real da viga (Figura 5.32 e Figura 5.33).

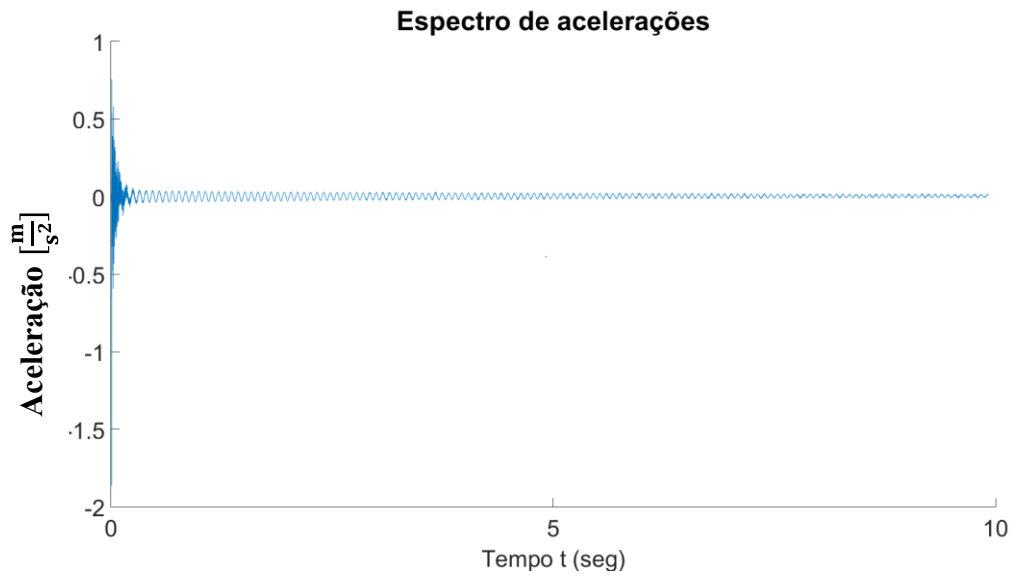


Figura 5.32 - Espectro de acelerações

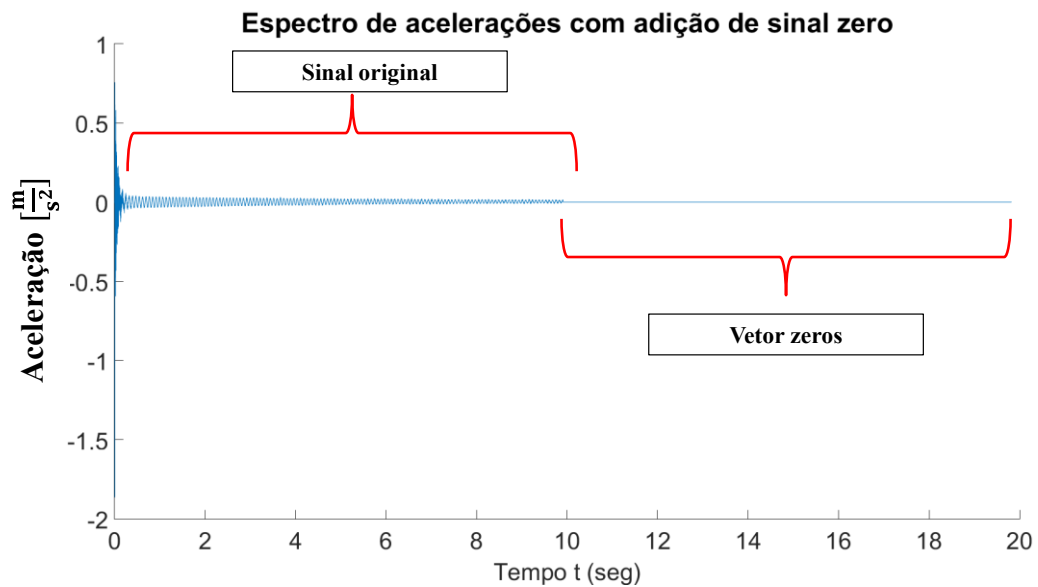


Figura 5.33 - Espectro de acelerações com incremento do vetor zeros.

Esta técnica de interpolação do sinal no domínio da frequência resulta muito efetiva e prática, devido a não adicionar ruído no sinal, gerando com isto uma diminuição nos intervalos de frequência e uma aproximação maior da frequência real da estrutura.

5.9 - Janelamento sinal temporal

Como foi explicado no capítulo 5.6.2, o janelamento de sinais é uma técnica simples que pode melhorar as características do sinal e diminuir efeitos como o ruído inerente dos

equipamentos eletrônicos ou o efeito de vazamento espectral (National Instruments (2009)).

Existem vários tipos de funções de janela que podem ser aplicadas, dependendo do sinal. Cada função de janela tem suas próprias características para diferentes aplicações.

Nesta pesquisa foram testadas várias funções de janela, inicialmente a janela de Hanning, utilizada para sinais estacionários, mas devido ao sinal gerado no teste de impacto ser não estacionário, optou-se por utilizar a janela exponencial, resultando em melhores resultados. Devido ao sinal temporal tratado ser um sinal não permanente (transiente) com um decaimento por causa do amortecimento estrutural.

O software matlab foi utilizado como ferramenta de processamento, nele foram multiplicados os sinais temporais ($x(t)$) pela função janela, como apresenta o algoritmo seguinte (Figura 5.34).

```
%-----JANELA EXPONENCIAL-MATLAB-----  
Y          %sinal de entrada - sinal temporal  
f=1e-6;    % f é o decaimento da função exponencial  
exponencial=exp(n*log(f)/(N-1)); % função exponencial  
Y_exp=Y' .*exponencial; % Y_exp é o sinal temporal janelado  
%-----
```

Figura 5.34 - Algoritmo matlab para aplicação da janela exponencial.

Nas pesquisas realizadas por outros autores neste campo de estudo, foram feitas análises sob sinais permanentes e portanto foram utilizadas janelas com decaimento nos extremos e valores máximos no lóbulo (curva por volta da frequência natural no espectro de frequências) central, como no caso da janela de Hanning.

Nesta pesquisa especificamente foram testadas as janelas de Hanning e Hammimg, mas não apresentaram bons resultados, devido a influência dos valores nulos no começo e no final do sinal após o Janelamento no sinal não estacionário (sinais que não possuem características periódicas). Nossa análise concluiu que a janela exponencial com um decaimento de $f = 10^{-6}$, é a janela que melhor se adequa à nossa metodologia, acompanhando o decaimento devido ao amortecimento da estrutura (Figura 5.35).

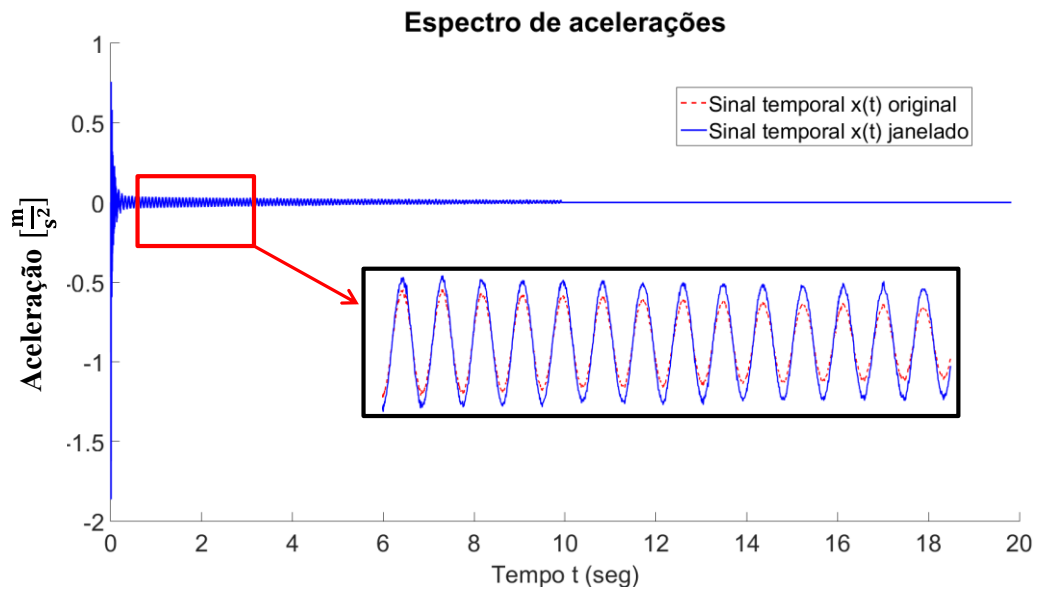


Figura 5.35 - Sinal temporal $x(t)$ janelado.

5.10 - Aplicação FFT e correção de Frequências

Após a aplicação da janela exponencial no sinal temporal $x(t)$, é calculada a Transformada Rápida de Fourier (FFT). No domínio da frequência são identificados os picos correspondentes às frequências naturais da estrutura. Nesta pesquisa foram consideradas as três primeiras frequências naturais da estrutura.

A FFT foi aplicada utilizando o algoritmo apresentado na Figura 5.36, desenvolvido no programa matlab.

```

%-----TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER-----
N= número de dados analisados
dt= intervalo de tempo definido nas configurações do equipamento
f=(0:N-1)'/N*(1/dt); % Vector frequência (abscissa)
X=(((abs(fft(Y,N)))))/N; % Transformada Rápida de Fourier aplicada ao
sinal temporal Y

```

Figura 5.36 - Algoritmo FFT matlab.

Na Figura 5.37 e na Figura 5.38 é apresentado o espectro de Frequências comparado janelado com o espectro de frequências calculado através do sinal temporal sem a aplicação da janela exponencial. Nelas é claramente visível a diminuição de ruído e a estabilização do sinal, devido à utilização da janela exponencial (Figura 5.38).

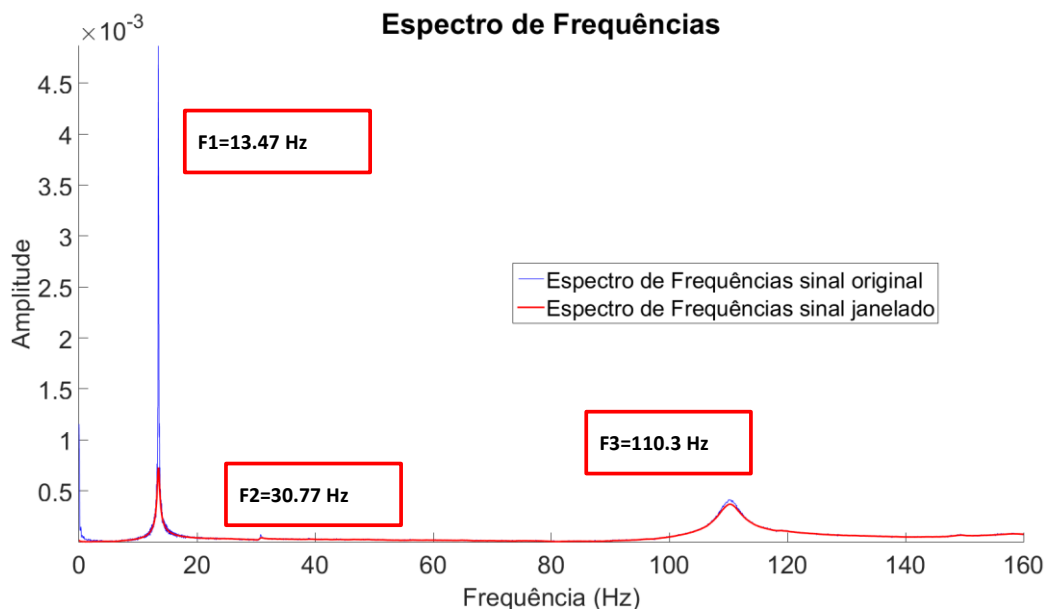


Figura 5.37 - Algoritmo FFT matlab.

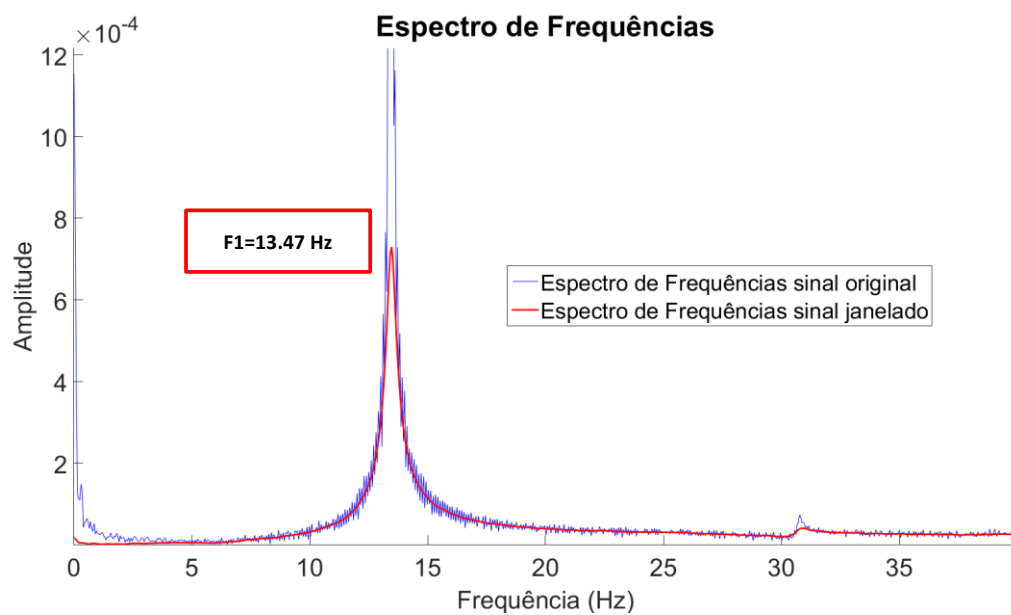


Figura 5.38 - FFT matlab primeira frequência.

Após a identificação dos primeiros três picos de frequências, foram aplicados diferentes métodos para correção de cada uma das três frequências. Estes métodos basicamente se baseiam nos dados das linhas espectrais que se encontram por volta do pico de frequência e realizam uma aproximação mais detalhada do valor máximo que aquele lóbulo atinge, resultando assim em uma maior aproximação da frequência verdadeira da estrutura, fato que é muito importante nesta pesquisa, pela pequena variação em frequência gerada pela massa adicional e pela diminuição da rigidez nos locais danificados.

Na análise do espectro de frequências as linhas espectrais são obtidas a partir da aplicação da FFT (dados discretos), neste espectro os intervalos de frequências, ou espaçamento entre linhas espectrais fica definido como: f_s/N , sendo N é o número de dados que estão sendo analisados (considerando que N deve ser potência de 2 “ 2^n ”), e f_s é a frequência de amostragem. Quando o pico do sinal no domínio da frequência coincide com uma linha espectral, a frequência obtida representa a frequência real e precisa da estrutura. O mais comum é ter o valor máximo do lóbulo no domínio da frequência entre duas linhas espectrais (Figura 5.39), sendo necessário aplicar métodos para interpolar e chegar no valor da frequência real, fazendo uso das linhas espectrais adjacentes (Ming; Kang (1996)).

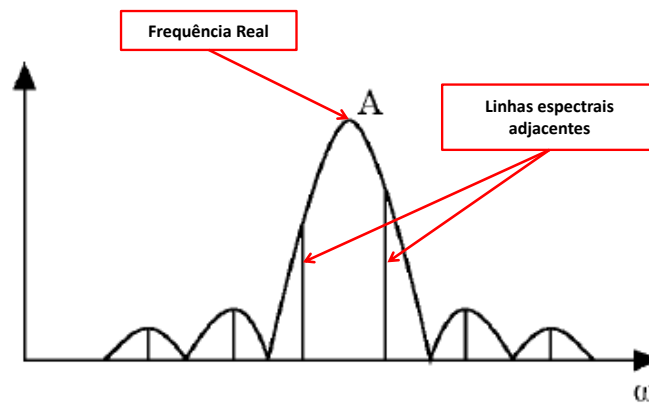


Figura 5.39 - Linhas espectrais.

Foram aplicados vários métodos para correção de frequências, eles são:

- Correção da frequência da janela retangular;
- Correção da frequência da janela Hanning;
- Estimação da frequência com uma média ponderada.
- Spectre Centre Correction Method (SCCM)

As características e considerações de cada um dos métodos expostos anteriormente serão explicadas a seguir:

5.10.1 Correção da frequência da janela retangular

Esta correção de frequência esta baseada na aplicação da janela retangular, o que basicamente representa não aplicar nenhuma janela no sinal temporal, já que a função janela retangular está definida como:

$$W(n) = 1 \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (5.1)$$

Onde:

f representa a frequência

f_s a frequência de amostragem do sinal

N representa o número de dados analisados (2^n)

Onde:

f representa a frequência

f_s a frequência de amostragem do sinal

N representa o número de dados analisados (2^n)

Onde:

f representa a frequência

f_s a frequência de amostragem do sinal

N representa o número de dados analisados ($2n$)

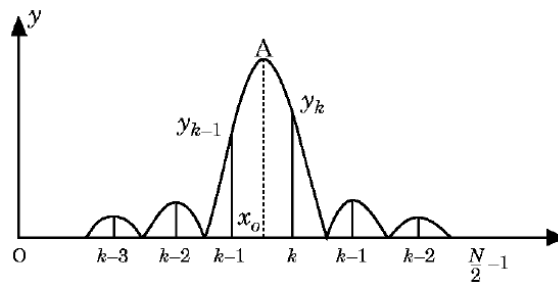


Figura 5.40 está representado o lóbulo correspondente à frequência, nele são apresentados os valores K , que representam as linhas espectrais. Como pode ser observado na figura, o valor máximo do lóbulo central está localizado entre as linha espectrais $K - 1$ e K .

A frequência correspondente para a linha espectral K é:

$$f = K \frac{f_s}{N} \quad (5.2)$$

Onde:

f representa a frequência

f_s a frequência de amostragem do sinal

N representa o número de dados analisados (2^n)

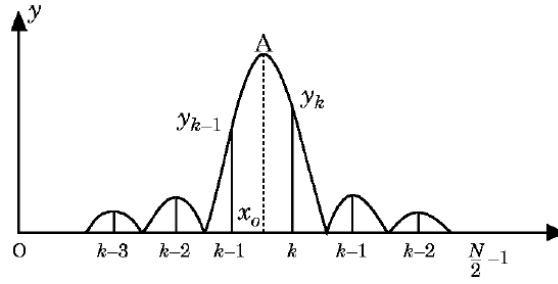


Figura 5.40 - Correção pela janela retangular (Ming; Kang (1996)).

De acordo com a Figura 5.40 a abscissa X_0 , correspondente ao valor real da frequência (valor máximo do lóbulo central), pode ser expresso em termos das coordenadas Y das linhas espectrais adjacentes:

$$X_0 = K + \frac{Y_{k+1}}{Y_k + Y_{k+1}} \quad (5.3)$$

Portanto a correção da frequência em relação ao valor K inicial é :

$$\Delta K = \begin{cases} \frac{Y_{k+1}}{Y_k + Y_{k+1}} & (Y_{k+1} \geq Y_{k-1}) & 0 \leq \Delta K \leq 1 \\ \frac{-Y_{k+1}}{Y_k + Y_{k+1}} & (Y_{k+1} \leq Y_{k-1}) & -1 \leq \Delta K \leq 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

O valor da frequência real corrigida está representado por:

$$f = (K + \Delta K) \frac{f_s}{N} \quad (5.5)$$

5.10.2 Correção da frequência pela janela Hanning.

Este método de correção de frequências está baseado na janela de Hanning definida por :

$$W(n) = a - (1 - a)\cos(2\pi n/N) \quad n = 0,1,2, \dots, N - 1 \quad (5.6)$$

Portanto o espectro de frequências é:

$$W(w) = \left\{ aD(w) + \frac{1}{2}(1 - a) \left[D\left(w - \frac{2\pi}{N}\right) + D\left(w + \frac{2\pi}{N}\right) \right] \right\} e^{-jnw/2} \quad (5.7)$$

De maneira similar a correção com a janela retangular, a janela de Hanning usa duas linhas espectrais Y_{k-1} e Y_k , obtidas após aplicação da TRF do sinal original multiplicado pela função janela de Hanning.

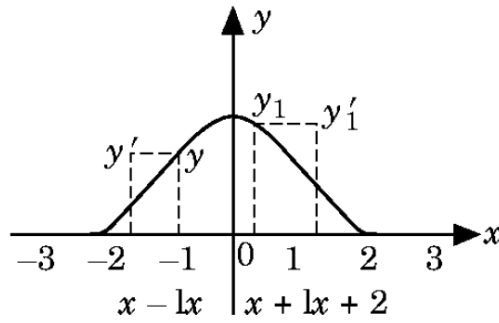


Figura 5.41 - Correção janela Hanning (Ming; Kang (1996)).

O valor de frequência a ser corrigido ΔK é definido como:

$$\Delta K = \begin{cases} \frac{2Y_{k+1} - Y_k}{Y_k + Y_{k+1}} & (Y_{k+1} \geq Y_{k-1}) \\ \frac{Y_k - 2Y_{k-1}}{Y_k + Y_{k-1}} & (Y_{k+1} < Y_{k-1}) \end{cases} \quad (5.8)$$

A frequência real corrigida é calculada como:

$$f = (K + \Delta K) \frac{f_s}{N} \quad (5.9)$$

5.10.3 Estimação frequência utilizando a média ponderada.

Os exemplos das janelas anteriores demonstraram que se tiver um componente de frequência, aparece entre linhas espectrais adjacentes com amplitude menor do que a amplitude do pico maior, desta forma o valor da frequência discreta pode ser determinado para uma resolução maior do que a dada pela FFT, realizando uma média ponderada das frequências em torno de um pico detectado no espectro de frequências (Equação (5.10)) (National Instruments (2009)).

$$\text{Frequência Estimada} = \frac{\sum_{i=j-m}^{j+m} \text{Power}(i) i \Delta f}{\sum_{i=j-m}^{j+m} \text{Power}(i)} \quad \Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (5.10)$$

Onde:

j é o índice do pico aparente da frequência.

Power (i) representa o valor da amplitude da linha espectral após a aplicação da TRF.

5.10.4 Spectre Centre Correction Method (SCCM)

Existem vários métodos para a correção de picos no domínio da frequência, um deles é o Método da Correção Centrada Espectral, mais conhecido como Spectral Centre Correction Method (SCCM), ou também chamado de Energy Centrobaric Correction Method (ECCM) proposto por Ding et al. Este método propõe uma alternativa para uma obtenção mais precisa das frequências produto da FFT (erro = 0,4% da frequência analítica), porque o espectro de frequências pode ser calculado com apenas um número

limitado de dados o que gera o efeito de vazamento espectral, dificultando a obtenção precisa das frequências. O método está baseado na energia do espectro da janela de Hanning (Zhong et al., 2008).

Para N dados correspondentes ao espectro de acelerações (domínio do tempo), a janela de Hanning é definida como:

$$W(n) = 0.5 - 0.5\cos(2\pi n/N) \quad (5.11)$$

Onde $n=0,1,2,\dots,N-1$ e $W(n)$ é a amplitude da janela de Hanning para o n -ésimo dado. O espectro da função da janela de Hanning é:

$$W(w_n) = \left\{ aD(w_n) + \frac{1-a}{2} \left[D\left(w_n - \frac{2\pi}{N}\right) + D\left(w_n + \frac{2\pi}{N}\right) \right] \right\} e^{-i(Nw_n/2)} \quad (5.12)$$

$$D(w_n) = \text{sen}\left(N\frac{w_n}{2}\right) / \text{sen}\left(\frac{w_n}{2}\right) e^{-i(Nw_n/2)} \quad (5.13)$$

$$w_n = k\Delta w_n \quad (5.14)$$

$$\Delta w_n = \frac{2\pi}{N} \quad (5.15)$$

$$a = 0.5 \quad (5.16)$$

Δw_n é a frequência normalizada, k é o número da linha espectral, a é uma constante de correção.

Geralmente $N \gg 1$ sendo que $1/N$ tende a zero,

$$\text{sen}\left(\frac{w_n}{2}\right) = \text{sen}(k\pi/N) \approx k\pi/N \quad (5.17)$$

Na equação (5.12) os três termos em parênteses tem uma diferença de fase de $2\pi/N$. Desconsiderando a diferença de fase ($N \gg 1$) (equação (5.17)), a função que descreve o lóbulo principal (módulo da função) M_f da janela de Hanning, é igual a soma do módulo dos três termos.

$$M_f = a \frac{\text{sen}(\pi k)}{\pi k} + \frac{1-a}{2} \left[\frac{\text{sen}\pi(k-1)}{\pi(k-1)} + \frac{\text{sen}\pi(k+1)}{\pi(k+1)} \right] = \frac{\text{sen}(\pi k)a + (1-2a)k^2}{\pi k(1-k^2)} \quad (5.18)$$

Se $k = 0$ M_f tende ao valor de a , se k tende a ± 1 de acordo com a regra de L'Hospital temos a seguinte expressão:

$$\lim_{k \rightarrow \pm 1} \frac{\text{sen}(\pi k) a + (1 - 2a)k^2}{\pi k(1 - k^2)} = \lim_{k \rightarrow \pm 1} \frac{\text{sen}(\pi k) [a + (1 - 2a)k^2]'}{[\pi k(1 - k^2)]'} = \frac{1 - a}{2} \quad (5.19)$$

Se k tende a ± 1 , M_f tende a $(1 - a)/2$, quando $k = \pm 2, \pm 4, \dots$, $M_f = 0$.

Na função da janela e hanning, se $a = 0.5$, a função do lóbulo principal M_f é representada pela seguinte expressão:

$$M_f = \frac{\text{sen}(\pi k)}{2\pi k(1 - k^2)} \quad (5.20)$$

A função da janela de Hanning do lóbulo principal é mostrada na Figura 5.42 equação (5.20). A Figura 5.42 mostra que a largura do lóbulo principal é igual ao intervalo de frequência entre quatro linhas espectrais. Isto é, porque existem 4 linhas espectrais dentro do lóbulo principal.

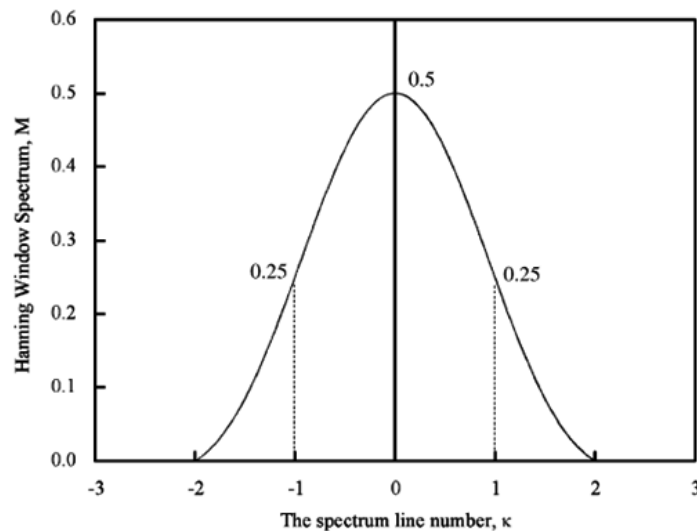


Figura 5.42 - Espectro de frequência – Janela de Hanning (Zhong et al. (2008)).

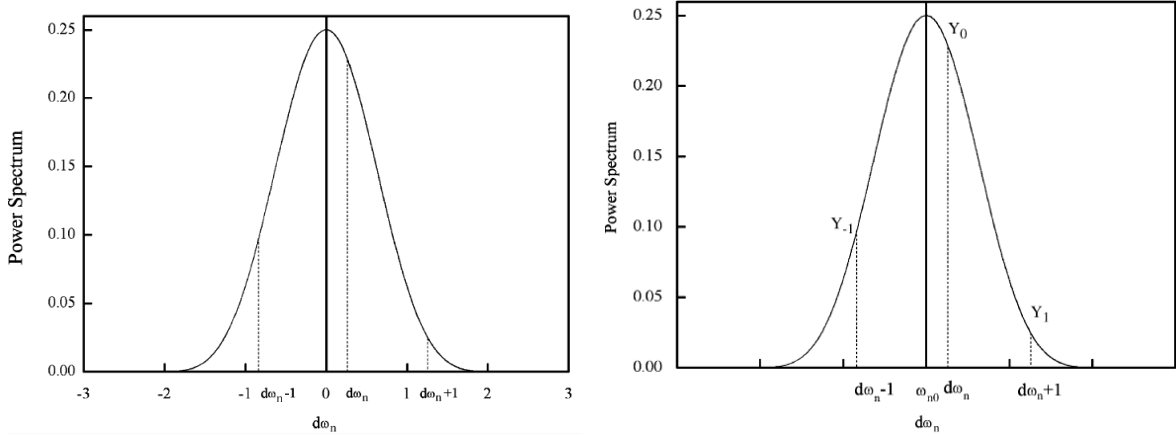
De fato, quando $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, o centro do lóbulo principal coincide com uma linha espectral, mas quando a linha espectral não se sobrepõe na linha central do lóbulo aparecem erros na estimação da frequência.

A importância do SCCM é no cálculo da frequência, correspondente à linha espectral central do lóbulo principal, resultado da aplicação da FFT no espectro de acelerações. Isso permite uma precisa de frequência, amplitude e ângulo de fase do sinal.

Para os casos nos que nenhuma linha espectral coincide com a linha central do lóbulo principal, k é substituído por dw_n , então a equação (5.20) pode ser expressa como:

$$M_f = \frac{\text{sen}(\pi dw_n)}{2\pi dw_n(1-dw_n^2)} \quad (5.21)$$

Onde dw_n é a correção da frequência normalizada (Figura 5.43a).



a) Correção frequência.

b) Espectro de potências.

Figura 5.43- Espectro de frequência – janela de Hanning .

De fato,

$$w_{na} = w_n + dw_n \quad (5.22)$$

Onde, w_{na} é a aproximação da frequência normalizada do sinal.

Da equação (5.21) o espectro de potências da janela de Hanning pode se obter da seguinte forma:

$$G_{wp}(dw_n) = \frac{\text{sen}^2(\pi dw_n)}{4\pi dw_n^2(1-dw_n^2)^2} \quad (5.23)$$

Da Figura 5.43b e da equação (5.23), o espectro de potências da janela de Hanning, para um dado valor dw_n e $n = 0,1,2, \dots, \infty$, pode ser obtido como:

$$\sum_{i=-n}^n G_{wp}(dw_n + i)(dw_n + i) = \sum_{i=-n}^n \frac{\text{sen}^2(\pi(dw_n+i))}{4\pi(dw_n+i)^2(1-(dw_n+i)^2)^2} (w + i) = \quad (5.24)$$

$$= \frac{-\text{sen}^2(\pi dw_n)}{16\pi^2(n+dw_n)^2(n+dw_n+1)^2} + \frac{\text{sen}^2(\pi dw_n)}{16\pi^2(n-dw_n)^2(n-dw_n+1)^2} \quad (5.25)$$

Portanto:

$$\sum_{i=-n}^n G_{wp}(dw_n + i)(dw_n + i) = 0 \quad (5.26)$$

Quando $n = \infty$.

Se o centro do lóbulo principal está deslocado em w_{n0} , e o espectro de potências é multiplicado pela amplitude A , o espectro de potências pode ser apresentado como:

$$Y(w) = A \frac{\text{sen}^2(\pi(dw_n - w_{n0}))}{4\pi^2(dw_n - w_{n0})^2(1 - (dw_n - w_{n0})^2)^2} \quad (5.27)$$

Onde, w_{n0} e A , são, a frequência normalizada e a amplitude do sinal respectivamente.

Das equações (5.26) e (5.27), a seguinte equação pode ser obtida:

$$\sum_{i=-n}^n Y_i(dw_n - w_{n0} + i) = 0 \quad (5.28)$$

Onde Y_0 , é o pico correspondente ao centro do lóbulo principal, e Y_i é o valor do pico das linhas espectrais. Agora a coordenada w_{n0} pode ser expressa como:

$$w_{n0} = \frac{\sum_{i=-n}^n Y_i(dw_n + i)}{\sum_{i=-n}^n Y_i} \quad (5.29)$$

A equação (5.29) é a estimação da frequência para um sinal senoidal quando a janela de Hanning é utilizada.

Se fs é a frequências de amostragem, N é o número de pontos da FFT, m é o número da linha espectral, a melhor estimação da frequência w_0 do sinal, pode ser obtida como:

$$w_0 = \frac{\sum_{i=-n}^n Y_i(m+i)}{\sum_{i=-n}^n Y_i} fs/N \quad (5.30)$$

Onde a correção do valor da frequência pode ser expresso como:

$$\Delta w = (w_0 - mfs/N) / \left(\frac{fs}{N}\right) \quad (5.31)$$

Portanto, a correção da fase está dada por:

$$\Delta\phi = -\Delta w\pi \quad (5.32)$$

5.11 - Tratamento Ruído ensaios experimentais.

Nos acelerômetros piezoelétricos (observe-se na seção 5.3) podem surgir problemas, com sinais de ruído induzidos no cabo de conexão. Esses distúrbios podem resultar de correntes de terra, ruídos triboelétricos ou ruído eletromagnético (Bruel & Kjaer (1982)).

O ruído tribo-elétrico é frequentemente induzido no acelerômetro pelo movimento mecânico do próprio cabo. Origem da capacidade local e das mudanças de carga devido a flexão dinâmica, compressão e tensão das camadas que compõem o cabo. Este problema foi evitado usando-se um cabo grafitado ou colando-o o mais próximo possível do acelerômetro.

Os níveis de ruído presentes nas máquinas normalmente não são suficientemente altos para causar qualquer erro significativo nas medidas de vibração. Normalmente, a vibração acústica ou vibrações externas do solo induzida na estrutura em que o acelerômetro é montado são muito maiores do que a excitação utilizada na análise. Assim para este tipo de interferência os ensaios foram planejados em horário noturno evitando assim as influências que poderiam causar equipamentos, trânsito de carros e outras atividades desenvolvidas em volta do laboratório.

Os acelerômetros piezoelétricos são sensíveis às vibrações que atuam em direções diferentes a direção analisada, para evitar isso, os acelerômetros foram posicionados de forma adequada na direção correta para minimizar o efeito dessa interferência nos resultados.

Além dos cuidados anteriores para diminuir o ruído presente no sinal, foram feitos testes com diferentes configurações nos apoios das vigas (Figura 5.44). Isto porque nos pontos de apoio é gerado um ruído por causa do atrito entre a viga e a estrutura (chapa ou rolete metálico). Para evitar isto, foram configurados de tal forma que não existisse a possibilidade da viga trepidar em cima e minimizar a área de contato viga-suporte (Figura 5.44a).



a) Apoio com rolete



b) Apoio com chapa e rolete

Figura 5.44 - Configurações de apoios testadas.

5.12 – Resultados

Neste parágrafo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais de vigas metálicas biapoiadas sob diferentes condições de dano como mostradas no capítulo 4.8.

A ordem de execução dos ensaios das vigas foi planejada de tal forma que foram aproveitados todos os estágios de danos progressivos nas vigas de 6 m e 5 m. A primeira viga ensaiada foi a viga de 5 m de comprimento danificada em duas posições, isto foi devido a necessidade de calibrar os diferentes parâmetros que foram explicados anteriormente com o propósito de se obter os melhores resultados na identificação do dano. Tais parâmetros considerados foram:

- Frequência de amostragem (F_s)
- Tempo de análise do sinal (t)
- Número de danos analisados (N)
- Discretização da viga (tamanho do elemento)
- Massa adicional (M)
- Posições dos acelerômetros
- Configuração dos apoios
- Peso do martelo.
- Ponteira utilizada no martelo.

Após serem configurados estes parâmetros, foi estabelecido um plano de ensaios com danos progressivos, realizados com entalhes simétricos nas mesas superior e inferior, resultando em 18 casos de danos apresentados no paragrafo 4.9. Os resultados da aplicação da metodologia proposta serão apresentados a seguir:

5.12.1 - Caso 1 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 1 entalhe)

O caso 1 corresponde a viga com duas posições de dano, os danos são entalhes simétricos na mesa superior e inferior localizados a 1,5 m (entre os nós 8 e 9) do apoio esquerdo espaçados a cada 2,5 cm e a segunda posição de dano por um entalhe localizado em 4,5 m (entre os nós 23 e 24) em relação ao mesmo apoio (Figura 5.45 e Figura 5.46). As duas posições de dano geraram uma diminuição do momento de inércia da seção transversal (I_x) de 52,2% e 65,6% respectivamente.

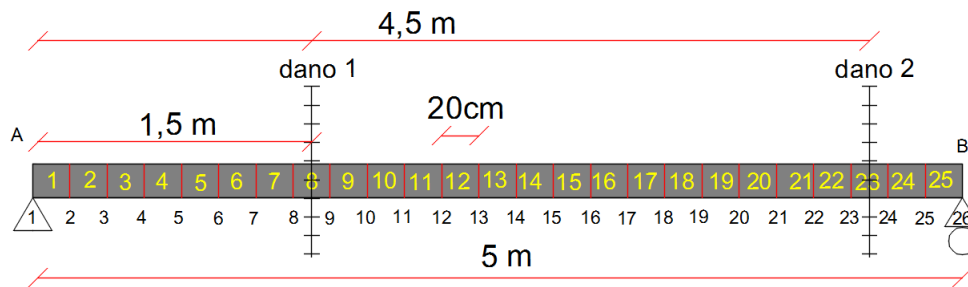
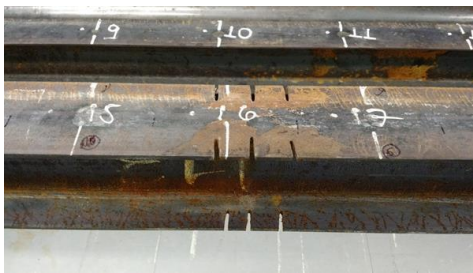


Figura 5.45 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.



a) Dano 1



b) Dano 2

Figura 5.46 - Descrição danos Caso 1

Com o objetivo de escolher a massa adicional (M) que apresentasse melhores resultados na aplicação da metodologia proposta, foram testadas as seguintes configurações para a massa adicional:

- 1,168 kg;
- 3,366 kg;
- 5,526 kg;
- 10,320 kg.

Os resultados são apresentados a seguir:

A massa M de 1,168 kg com tamanho do elemento de 10 cm, não apresentou bons resultados, devido a variação das frequências estarem em uma faixa muito menor do que a variação obtida com valores de massa superior (Figura 5.47 a Figura 5.49 e Figura 5.86).

A seguir são apresentados os três gráficos correspondentes as três primeiras frequências naturais utilizando uma massa de 1,168 kg.

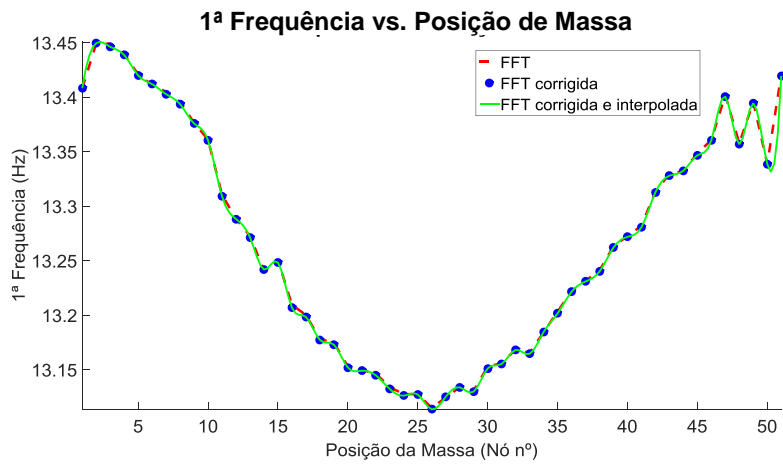


Figura 5.47 - Posição de Massa (M=1,168 kg) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.

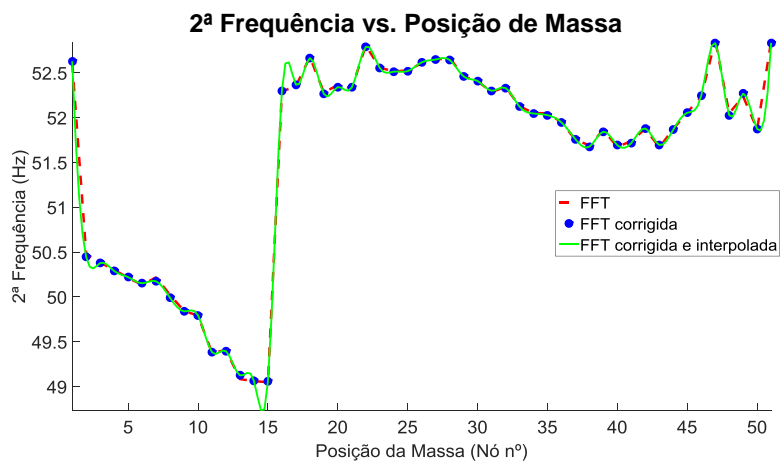


Figura 5.48 - Posição de Massa (M= 1,168 kg) vs. Segunda Frequência (F1) - Caso 1.

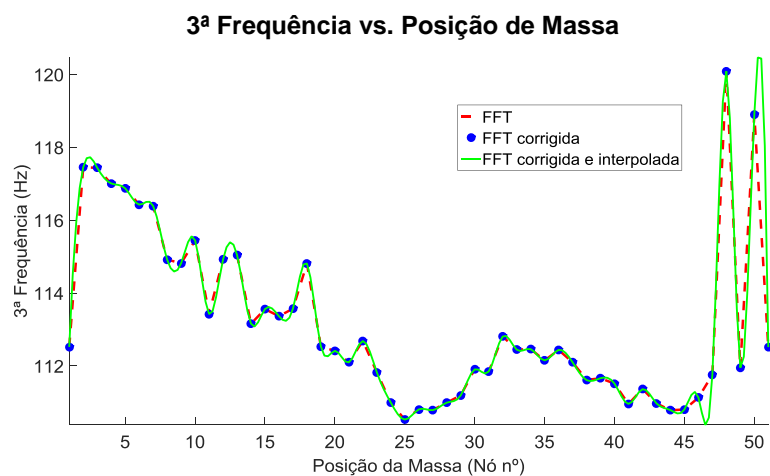


Figura 5.49 - Posição de Massa (M = 1,168kg) vs. Terceira Frequência (F1) - Caso 1.

Para o mesmo valor de massa adicional M de 1,168 kg foi realizado um ensaio com a discretização a cada 20 cm, o que resultou em uma melhora das curvas Frequência vs. Posição de massa, mas continua sendo impossível a aplicação da metodologia sobre estas curvas, devido a presença de perturbações ao longo do sinal (Figura 5.50 a Figura 5.52).

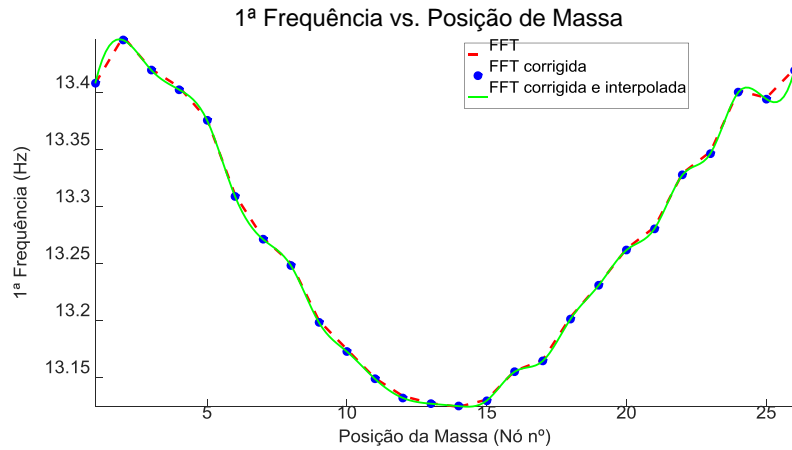


Figura 5.50 - Posição de Massa ($M = 1,168$ kg) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.

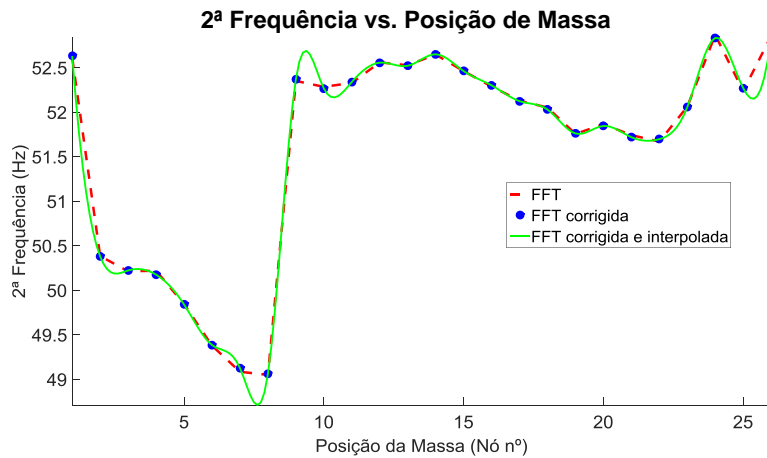


Figura 5.51 - Posição de Massa ($M = 1,168$ kg) vs. Segunda Frequência (F1) - Caso 1.

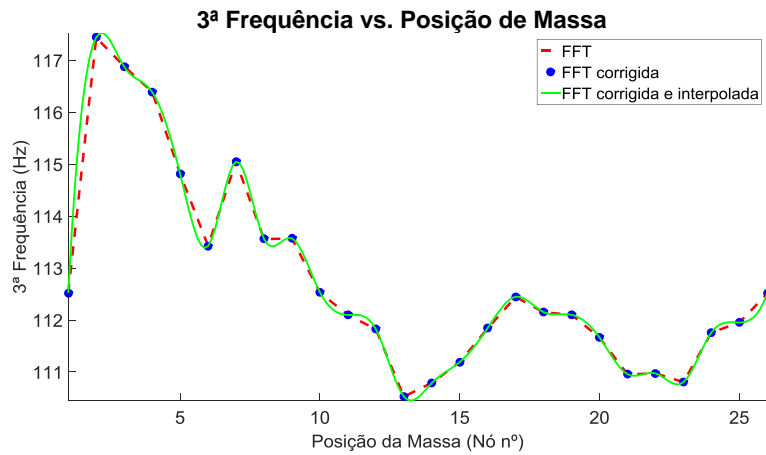


Figura 5.52 - Posição de Massa ($M = 1,168 \text{ kg}$) vs. Terceira Frequência (F1) - Caso 1.

Continuando com o mesmo valor de massa adicional ($M=1,168\text{kg}$), mas aumentando o tamanho do elemento para 40cm, os resultados melhoraram, mas continua sendo impossível a identificação do dano (Figura 5.53 a Figura 5.55).

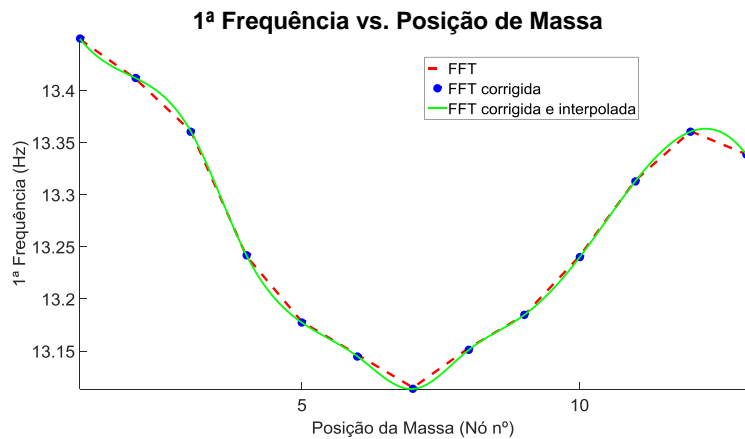


Figura 5.53 - Posição de Massa ($M = 1,168 \text{ kg}$) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.

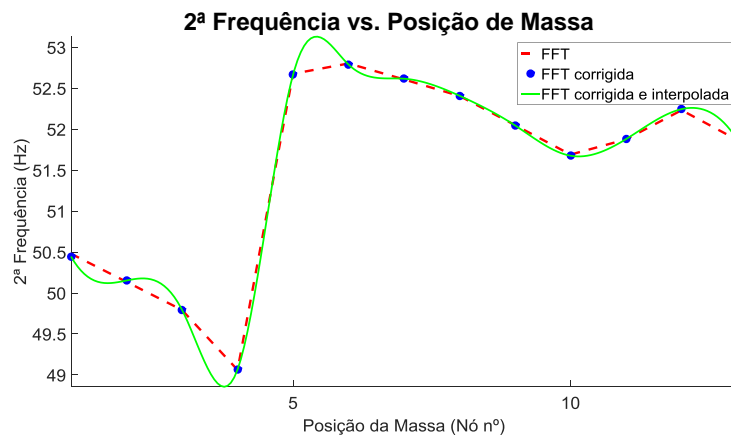


Figura 5.54 - Posição de Massa ($M = 1,168 \text{ kg}$) vs. Segunda Frequência (F1) - Caso 1.

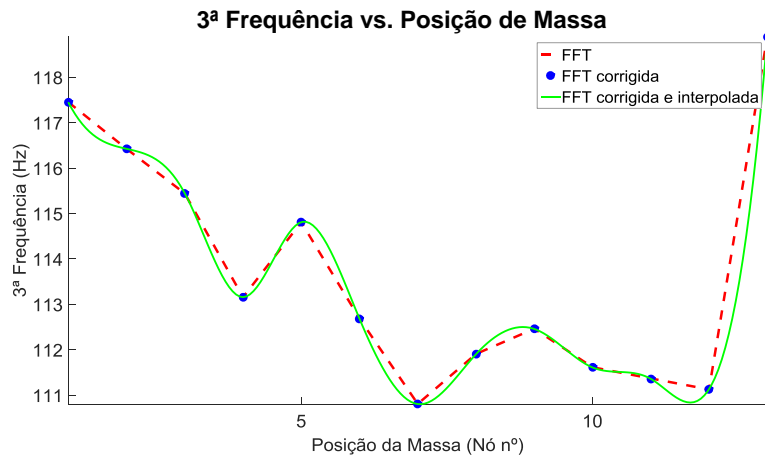


Figura 5.55 - Posição de Massa ($M = 1,168 \text{ kg}$) vs. Terceira Frequência ($F1$) - Caso 1.

A seguir são apresentados os resultados para uma massa adicional M de $3,266 \text{ kg}$.

5.12.1.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência ($F1$) $M = 3,266 \text{ kg}$

Na Figura 5.56 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20cm). A massa utilizada foi de $3,266 \text{ kg}$, posicionada sobre cada nó.

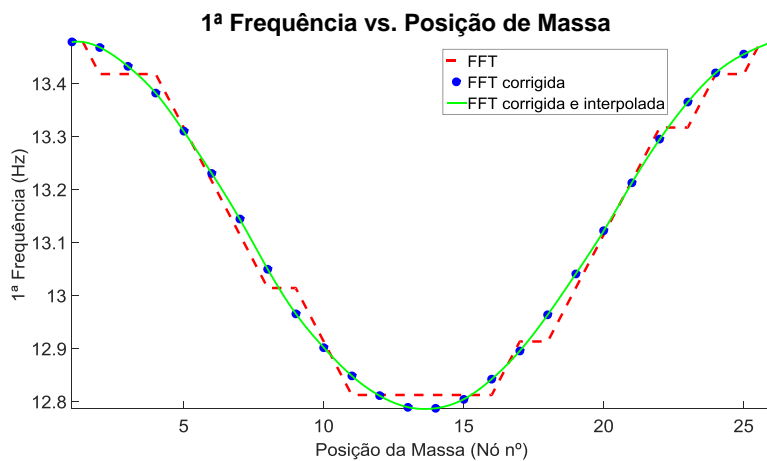


Figura 5.56 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência ($F1$) - Caso1.

Na Figura 5.56 podem ser observadas três curvas, a primeira (linha tracejada) representa as frequências dos picos da FFT, a segunda (asterisco) representa a frequência corrigida utilizando as linhas espectrais da FFT ao redor do pico como uma média ponderada para calcular a frequência real. A terceira curva (linha contínua) representa a

interpolação dos dados das frequências corrigidas (asterisco) pelo método de interpolação cubic spline de terceiro grau que, de acordo com Palechor (2013), é o método que melhor se adequa nos sinais utilizados para localização de danos em vigas metálicas.

Na Figura 5.57, observa-se que, a correção das frequências utilizando as linhas espectrais como uma média ponderada deu bons resultados, melhorando e suavizando a curva.

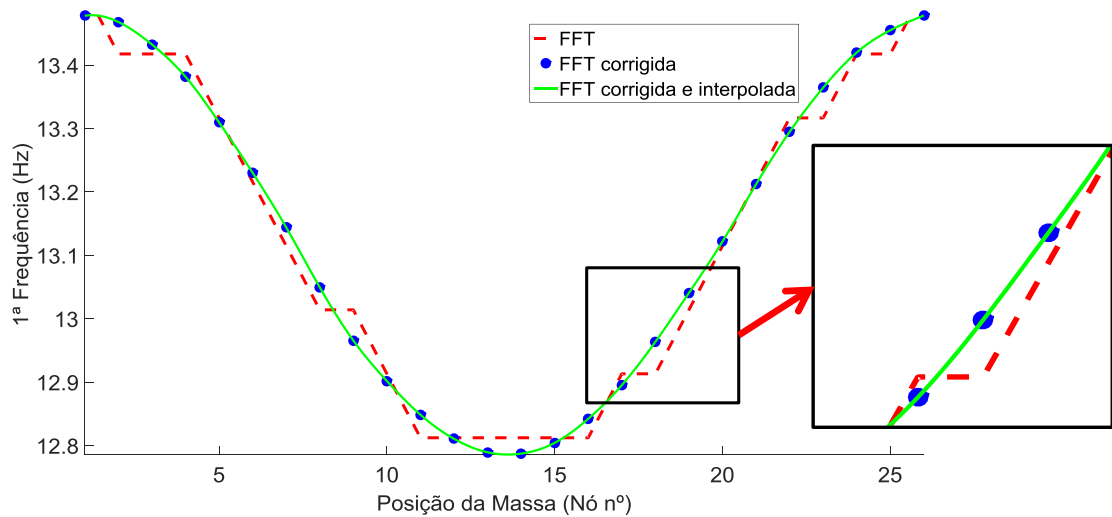
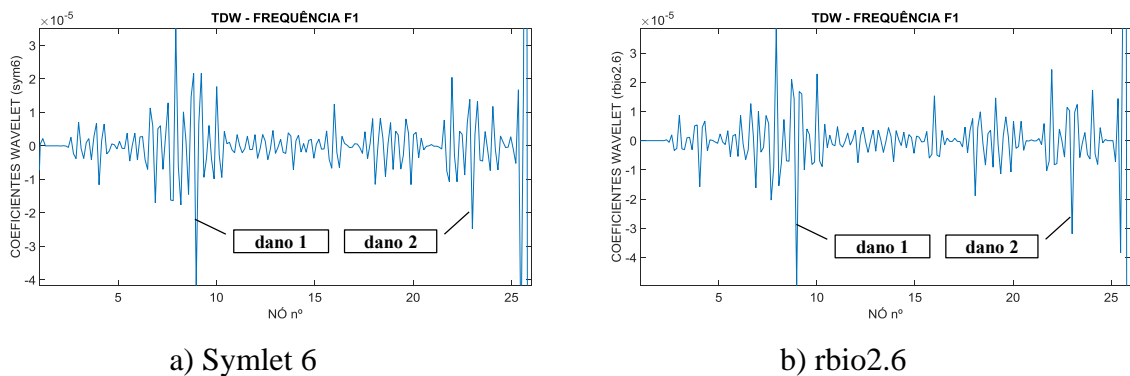


Figura 5.57- Resultado do método de correção de frequências.

As Figura 5.58 e Figura 5.59 apresentam os gráficos correspondentes a TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 5.58- Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1) .

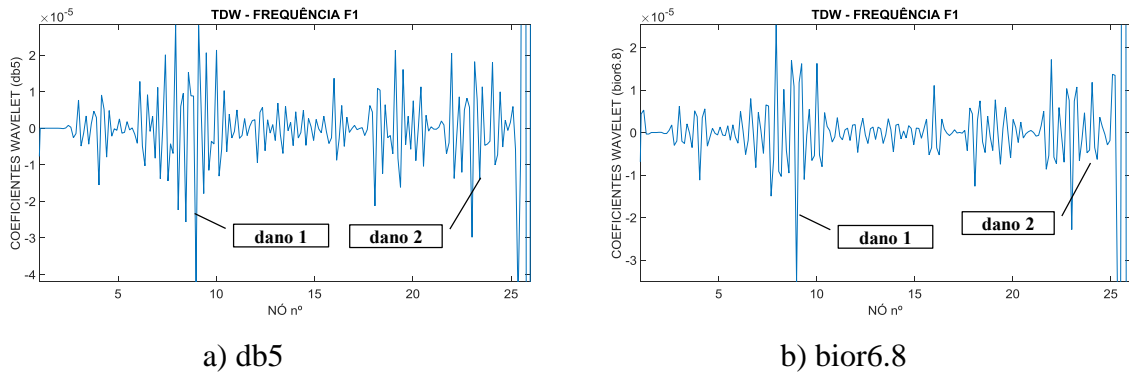


Figura 5.59 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 5.58 e Figura 5.59), pode-se observar que a maior perturbação foi gerada entre os nós 8 e 9, coincidindo com o dano localizado em 1,5m. O gráfico apresenta também uma perturbação menor do que a anterior entre os nós 23 e 24 (posição do segundo dano), mas que continua sendo maior do que os outros picos onde não existe nenhum tipo de dano.

As Figura 5.58 e Figura 5.59 também apresentam grandes perturbações no extremo direito devido a descontinuidade geométrica e também devido ao deslocamento horizontal no apoio do primerio gênero (rolete metálico), fato que gera um maior atrito entre as peças e portanto um aumento significativo de ruído no sinal.

5.12.1.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) M = 3,266 kg

Na Figura 5.60 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg, posicionada sobre cada nó.

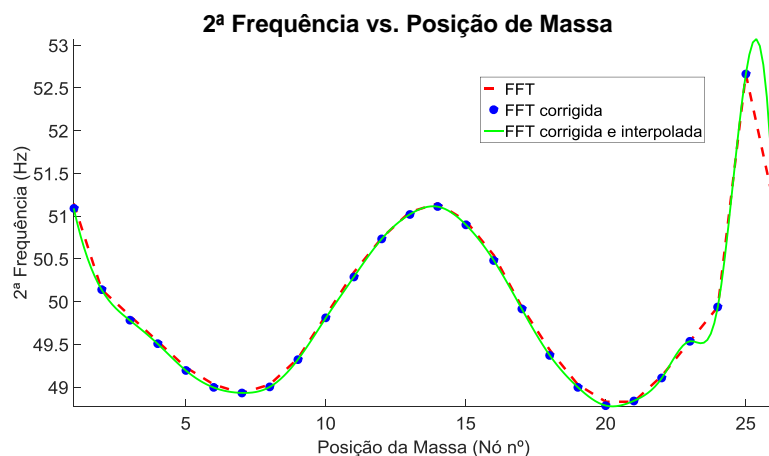
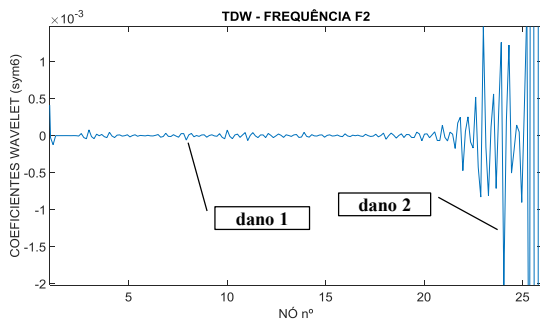


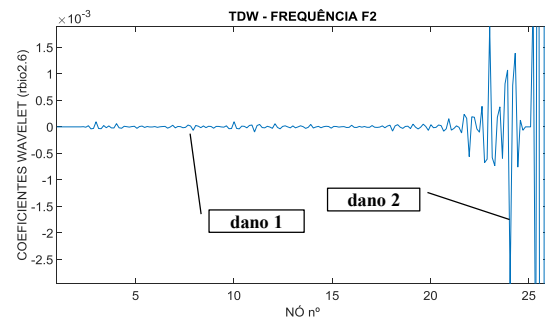
Figura 5.60 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso1 .

Na Figura 5.60 podem ser observadas três curvas, a primeira (linha tracejada) representa as frequências dos picos da TRF, a segunda (asterisco) representa a frequência corrigida utilizando as linhas espectrais da TRF ao redor do pico como uma média ponderada para calcular a frequência real. A terceira curva (linha contínua) representa a interpolação dos dados das frequências corrigidas (asterisco) pelo método de interpolação cubic spline.

As Figura 5.61 e Figura 5.62 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

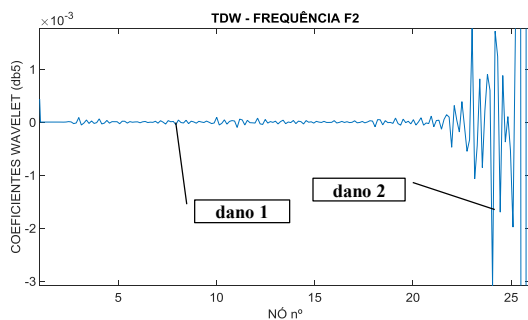


a) Symlet 6

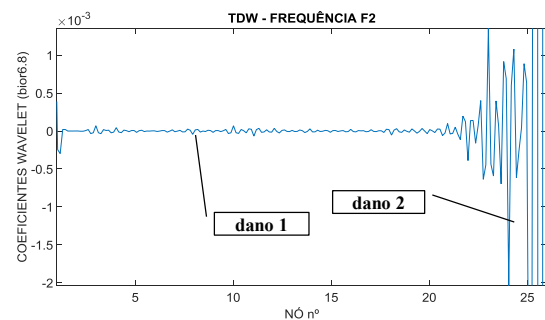


b) rbio2.6

Figura 5.61 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.62 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 5.61 e Figura 5.62), pode-se observar que, a maior perturbação foi gerada entre os nós 23 e 24, coincidindo com o dano localizado em 4,5 m. O gráfico apresenta perturbações em outros locais, mas não é possível identificar o primeiro dano localizado em 1,5m (entre os nós 8 e 9).

Da Figura 5.60 é possível concluir que o dano gerou uma perturbação muito grande no dano 2 (entre os nós 23 e 24), provocando um amortecimento da segunda frequência naquele ponto devido a presença do dano e a influência da massa adicional.

5.12.1.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) M = 3,266 kg

Na Figura 5.63 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg, posicionada sobre cada nó.

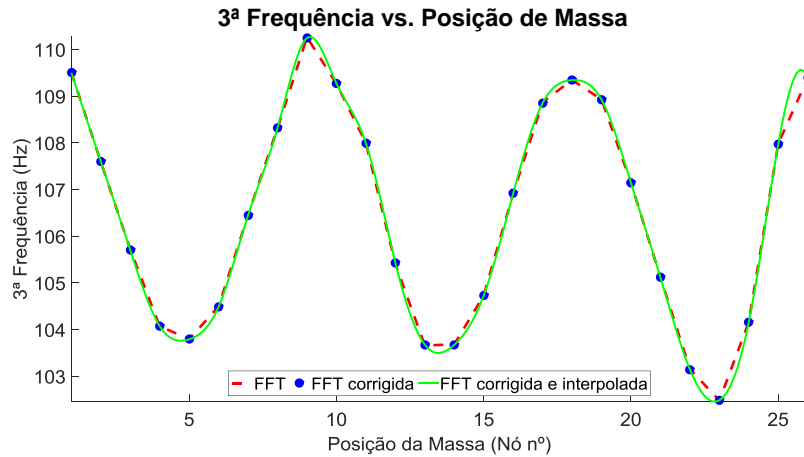
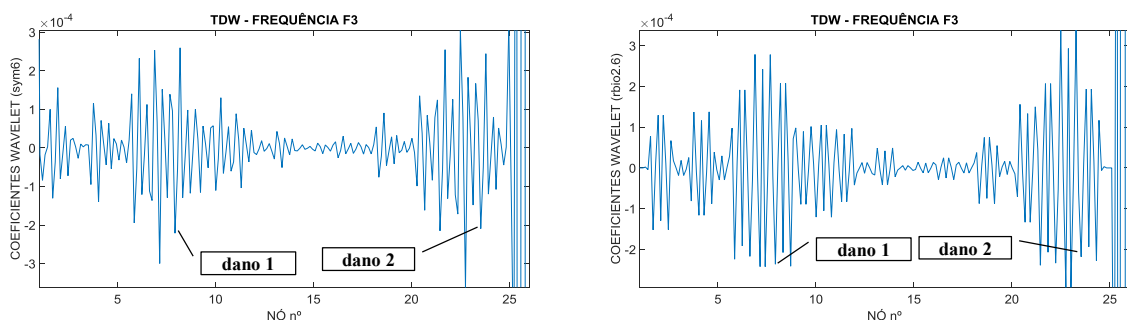


Figura 5.63 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso1.

Na Figura 5.63 podem ser observadas três curvas, a primeira (linha tracejada) representa as frequências dos picos da TRF, a segunda (asterisco) representa a frequência corrigida utilizando as linhas espectrais da TRF ao redor do pico como uma média ponderada para calcular a frequência real. A terceira curva (linha contínua) representa a interpolação dos dados das frequências corrigidas (asterisco) pelo método de interpolação cubic spline.

As Figura 5.64 e Figura 5.65 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 5.64 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

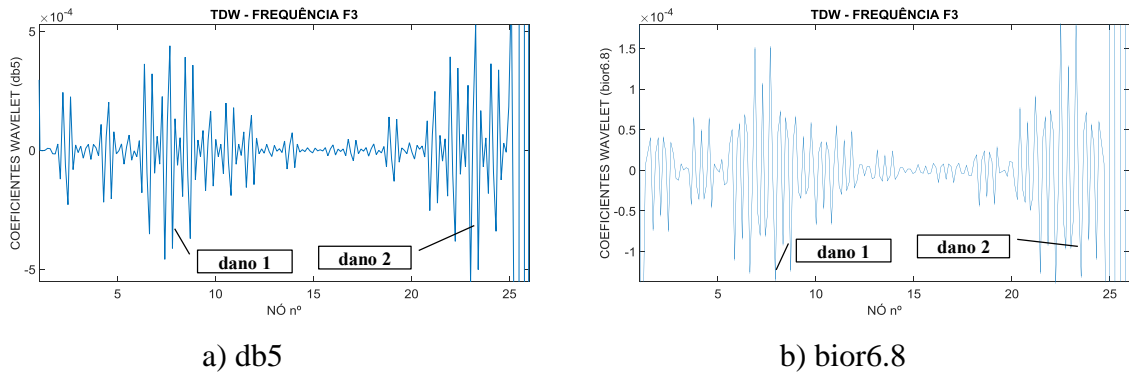


Figura 5.65 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 5.64 e Figura 5.65), podem-se observar que, os dois picos maiores estão localizados na região danificada (dano1 – entre os nós 8 e 9 e dano 2 – entre os nós 23 e 24).

Para o caso 1 também foi testada uma massa de 5,226 kg, com uma discretização a cada 20cm (26 pontos), os resultados são apresentados a seguir:

5.12.1.4 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) M = 5,526 kg.

Na Figura 5.66 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

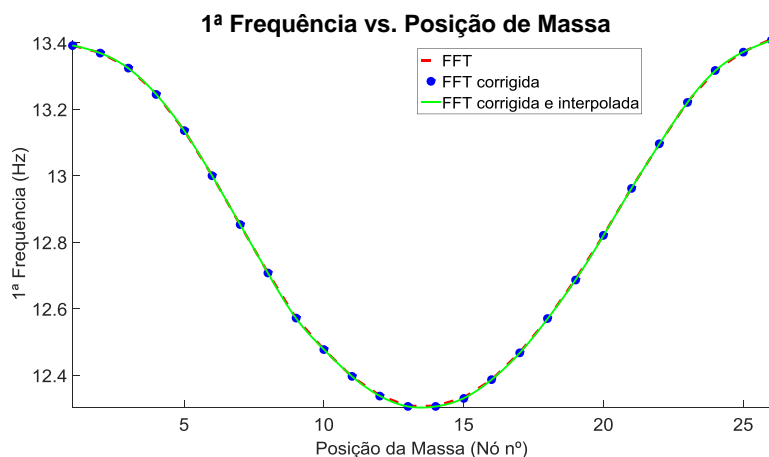
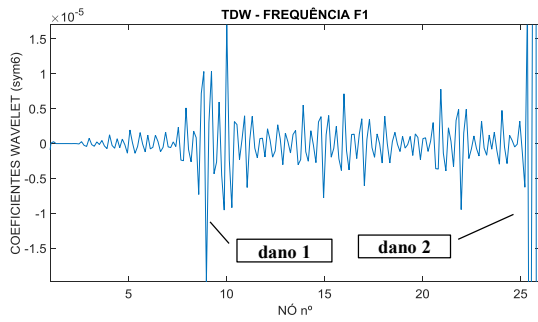
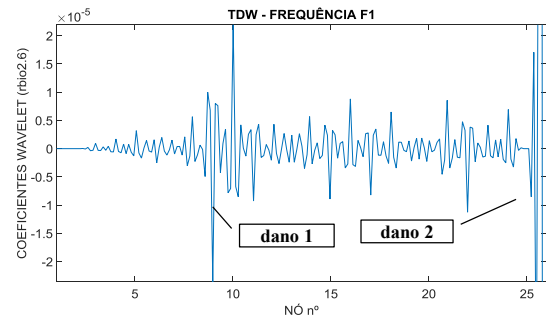


Figura 5.66 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso1.

As Figura 5.67 e Figura 5.68 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

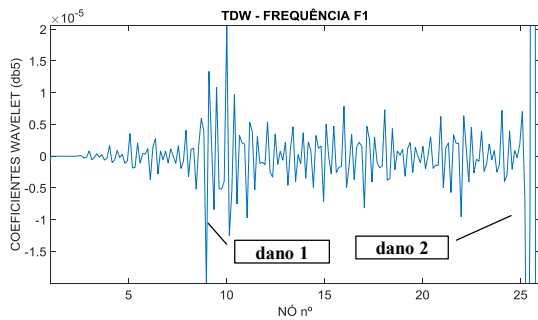


a) Symlet 6

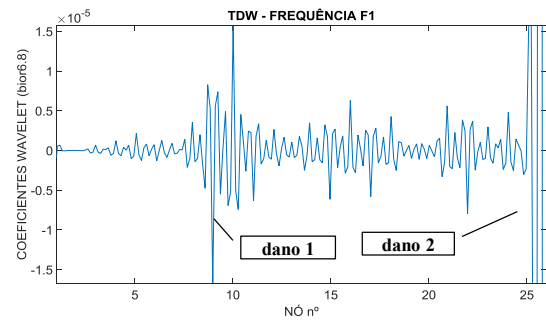


b) rbio2.6

Figura 5.67 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.68 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 5.67 e Figura 5.68), pode-se observar que, a maior perturbação foi gerada entre os nós 8 e 9, coincidindo com o dano localizado em 1,5 m. O gráfico apresenta também uma perturbação menor do que a anterior entre os nós 23 e 24 (posição do segundo dano), mas que continua sendo maior do que os outros picos onde não existem nenhum tipo de dano.

Os resultados obtidos com uma massa M de 5,526 kg são apresentados a seguir:

5.12.1.5 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) $M = 5,526$ kg.

Na Figura 5.69 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

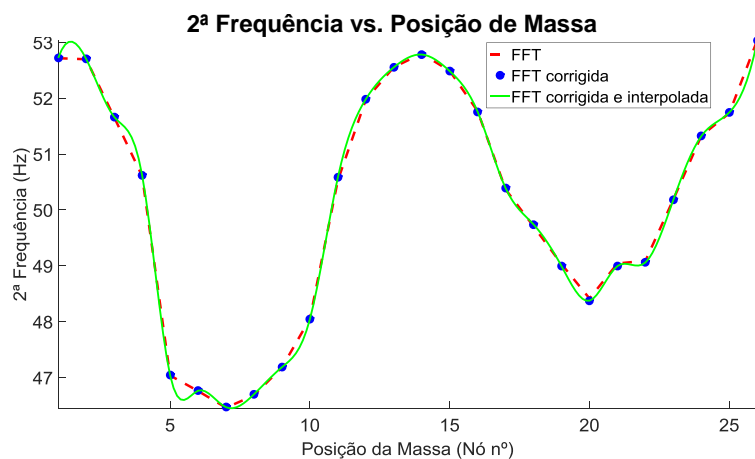
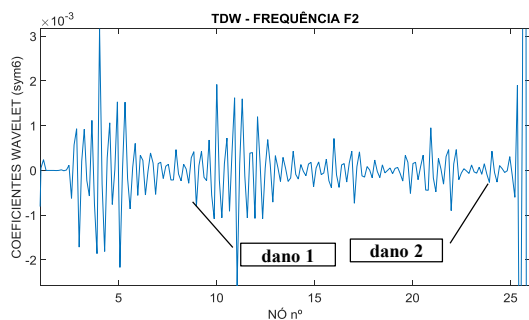
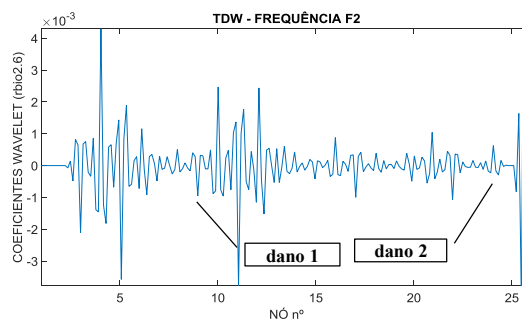


Figura 5.69 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso1.

As Figura 5.70 e Figura 5.71 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

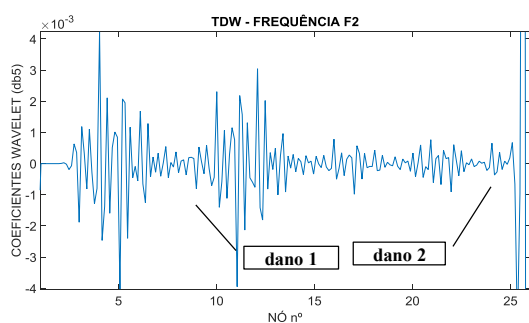


a) Symlet 6

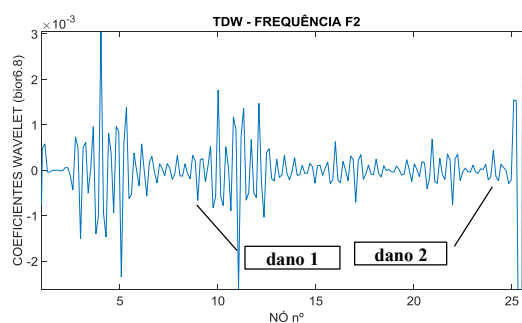


b) rbio2.6

Figura 5.70 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.71- Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 5.70 e Figura 5.71), pode-se observar que existe uma perturbação perto do nó 10 (proximi do dano 1 –nó 8 e e), mas além dessa perturbação os gráficos apresentam picos de igual magnitude no nó 5 indicando um falso dano.

5.12.1.6 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) $M = 5,526$ kg.

Na Figura 5.72 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

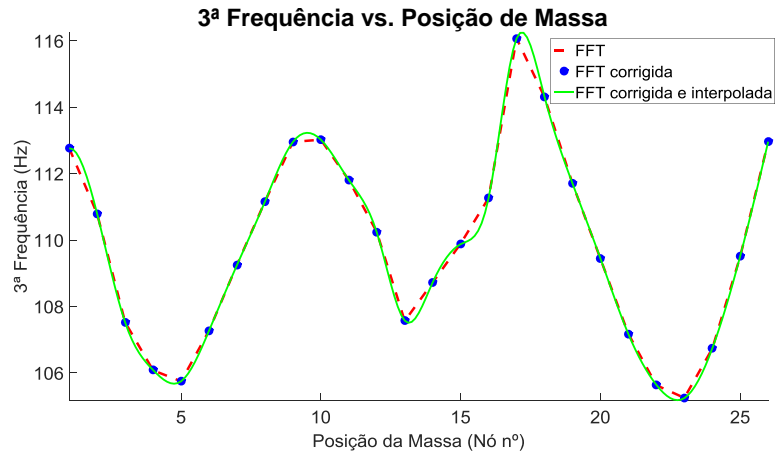
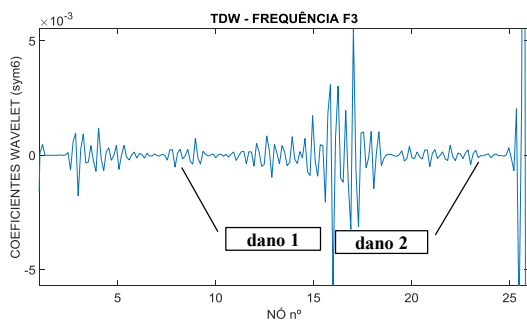
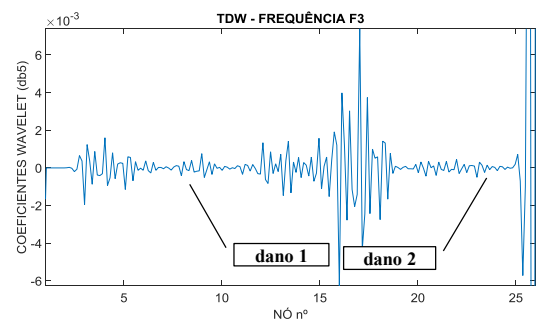


Figura 5.72 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso1.

As Figura 5.73 e Figura 5.74 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

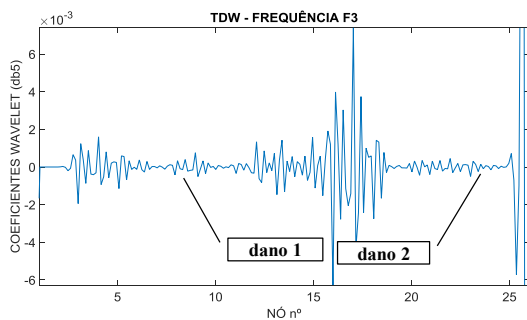


a) Symlet 6

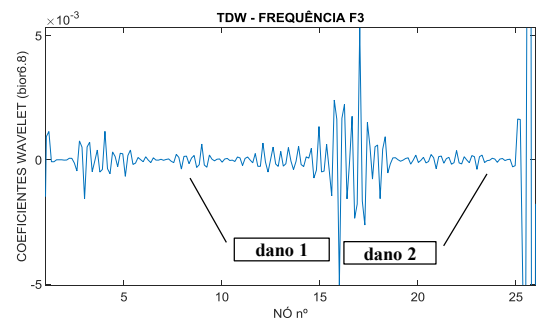


b) rbio2.6

Figura 5.73 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.74 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 5.73 e Figura 5.74) não é possível a identificação do dano, devido a perturbação do sinal ao longo do comprimento total da viga.

Também foi testada uma massa de 10,320 kg, como uma discretização a cada 20 cm (26 pontos), os resultados são apresentados na seção a seguir.

5.12.1.7 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) M = 10,320 kg.

Na Figura 5.75 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

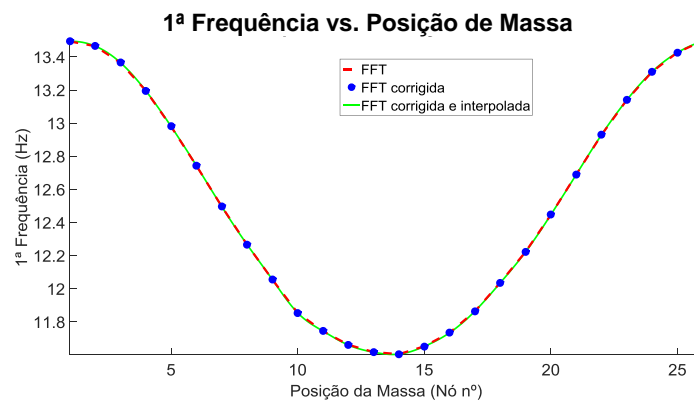
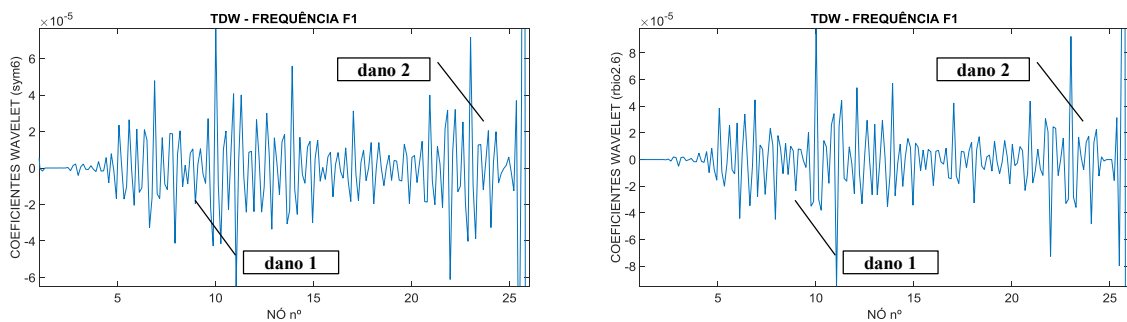


Figura 5.75 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso1.

As Figura 5.76 e Figura 5.77 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 5.76 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

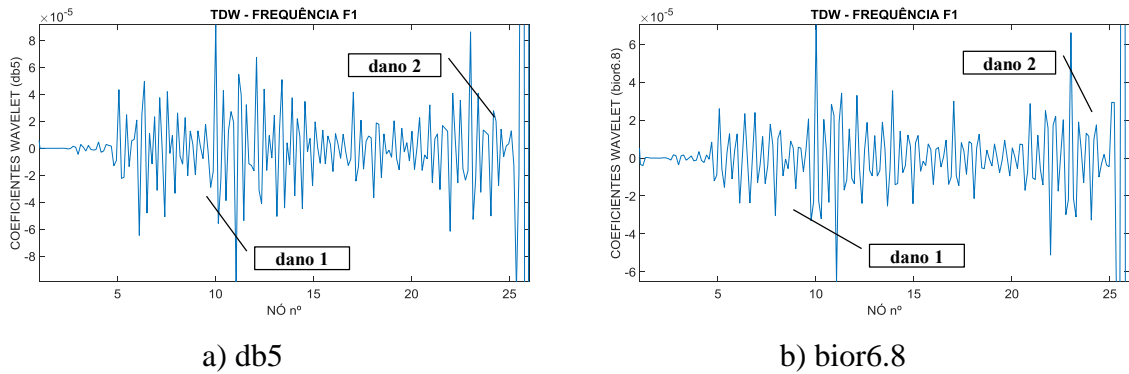


Figura 5.77 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 5.76 e Figura 5.77), pode-se observar que: os dois picos maiores estão localizados próximos das regiões danificadas (dano1 entre os nós 8 e 9 e o dano 2 entre os nós 23 e 24).

5.12.1.8 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) M = 10,320 kg.

Na Figura 5.78 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

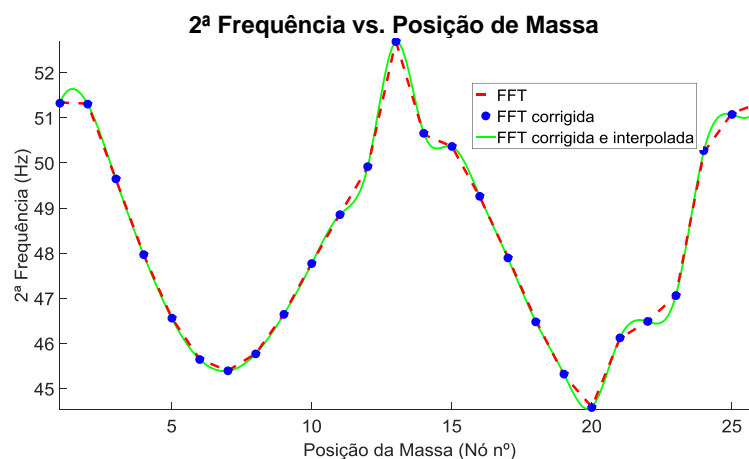
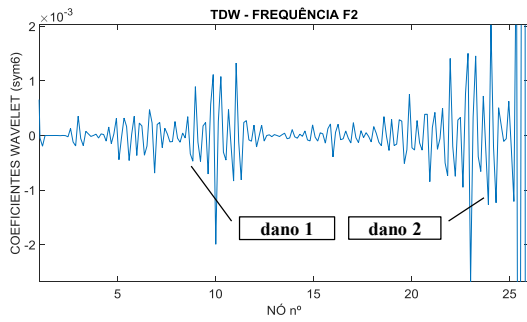
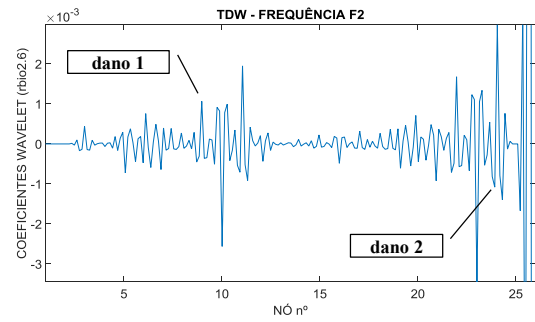


Figura 5.78 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso1.

As Figura 5.79 e Figura 5.80 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

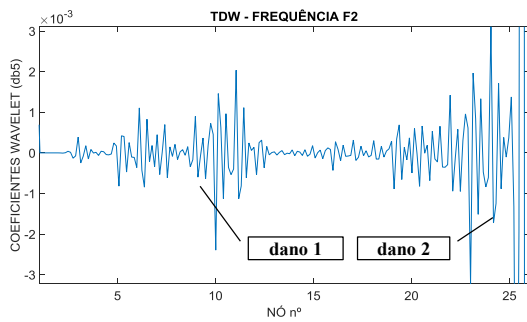


a) Symlet 6

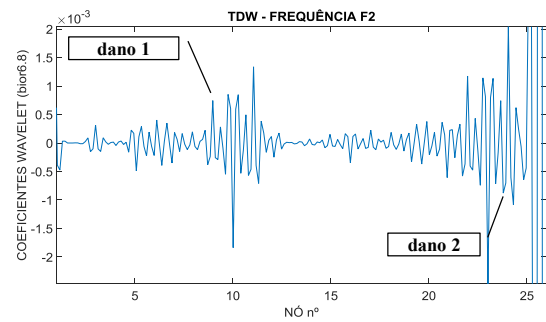


b) rbio2.6

Figura 5.79 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.80 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 5.79 e Figura 5.80), pode-se observar que: os dois picos maiores estão localizados próximos das regiões danificadas, mas não constitui uma prova da existência de danos naqueles locais, pela perturbação gerada na curva de frequências.

5.12.1.9 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) $M = 10,320 \text{ kg}$.

Na Figura 5.81 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

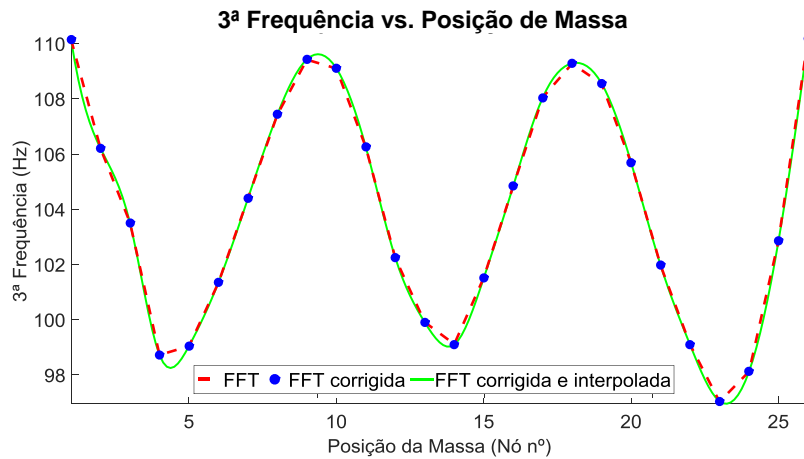
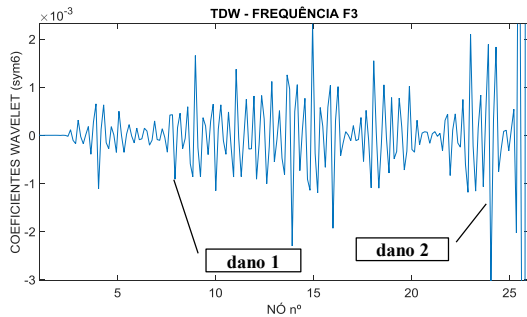
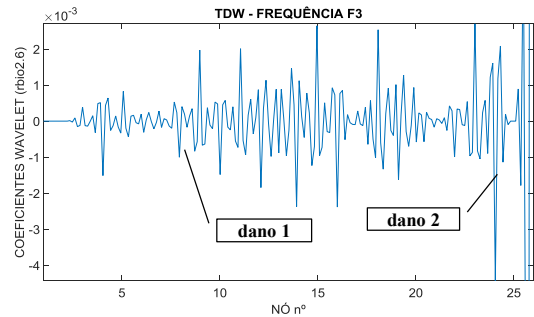


Figura 5.81 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso1.

As Figura 5.82 e Figura 5.83 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

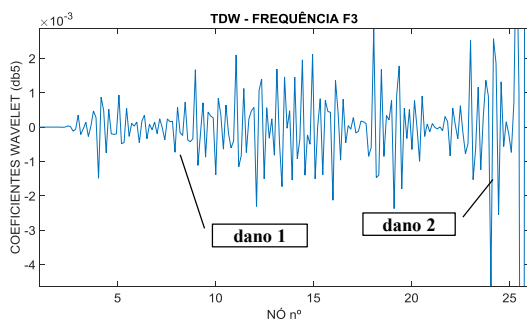


a) Symlet 6

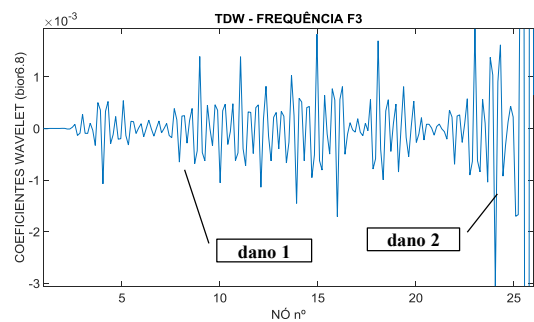


b) rbio2.6

Figura 5.82 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.83 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 5.82 a Figura 5.83) pode-se observar que: é possível identificar os dois locais danificados (dano1 e 2), localizando os maiores picos perto destas regiões, mas as outras duas frequências não apresentaram bons resultados.

Assim, de acordo com os resultados obtidos anteriormente, foi estabelecida a massa $M = 3,266 \text{ kg}$ como a mais adequada para desenvolver a metodologia, devido as perturbações geradas pelo dano nas três frequências.

Desta forma será adotada a massa de $3,266 \text{ kg}$ como parâmetro para identificação de nos seguintes casos de dano.

5.12.2 –Caso 2 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes)

Para evitar a perturbação gerada pela descontinuidade dos apoios nos extremos da viga, a discretização começou com o primeiro nó localizado a 10 cm do apoio e o último nó 25 localizado 10 cm antes do apoio. Em total foram considerados 25 pontos com 24 elementos de 20 cm de comprimento (Figura 5.84).

O caso 2 corresponde a duas posições de dano, a primeira representada por entalhes simétricos na mesa superior e inferior localizados a 1,5 m (nó 8) do apoio esquerdo, espaçados a cada 2,5 cm, e a segunda posição de dano por dois entalhes localizado em 4,5 m (nó 23) em relação ao mesmo apoio. As duas posições de dano geraram uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2% e 65,6%, respetivamente.

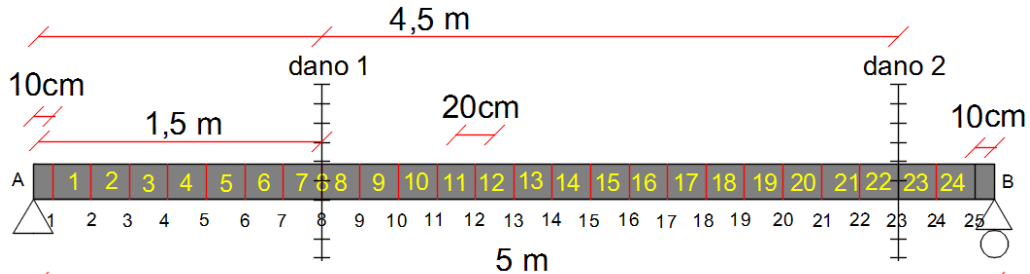


Figura 5.84 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 2.

5.12.2.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.85 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de $3,266 \text{ kg}$.

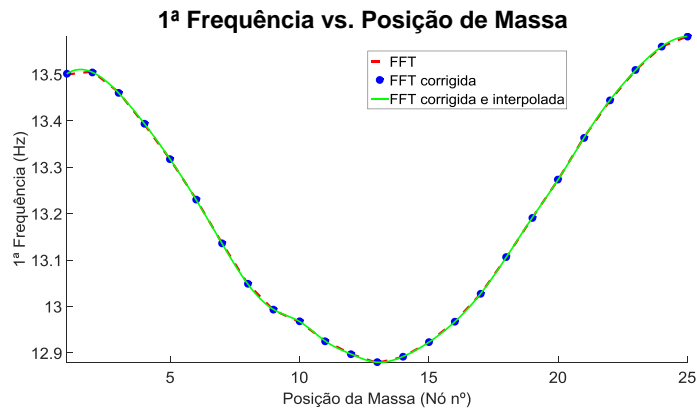
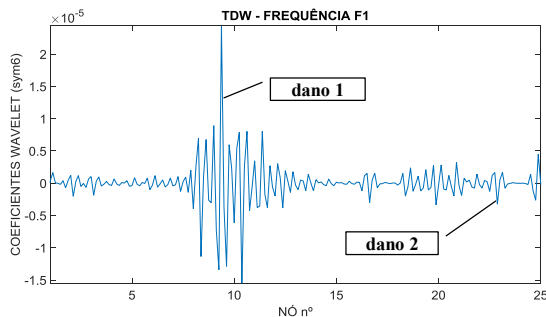


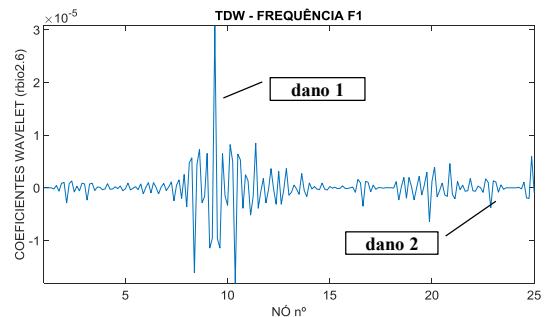
Figura 5.85 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 2.

Na Figura 5.85 podem ser observadas três curvas, a primeira (linha tracejada) representa as frequências dos picos da TRF, a segunda (asterisco) representa a frequência corrigida utilizando as linhas espectrais da TRF ao redor do pico como uma média ponderada para calcular a frequência real. A terceira curva (linha contínua) representa a interpolação dos dados das frequências corrigidas (asterisco) pelo método de interpolação cubic spline de terceiro grau.

As Figura 5.86 e Figura 5.87 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

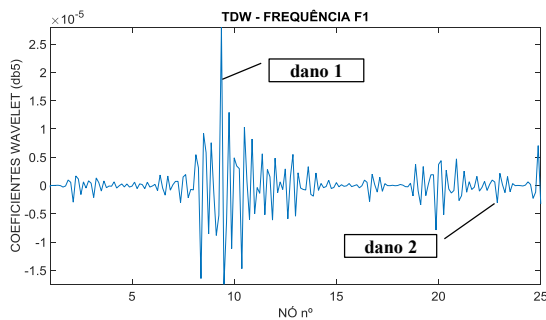


a) Symlet 6

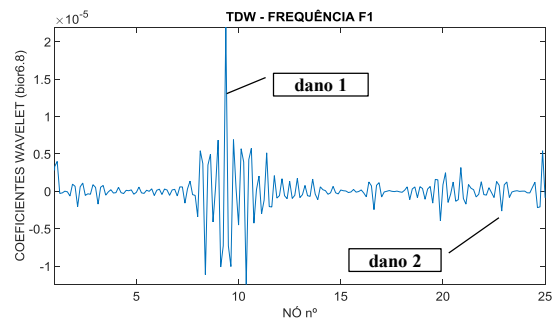


b) rbio2.6

Figura 5.86 - Caso 2 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.87 - Caso 2 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 5.86 e Figura 5.87), pode-se observar que, foram geradas duas perturbações coincidindo com o nó 8, correspondentes à posição de dano 1 (1,5 m). O gráfico também apresenta pequenas perturbações por volta do nó 20 que seriam geradas pelo ruído presente no sinal. O dano 2 localizado 50 cm antes do apoio não foi possível identificá-lo pelo ruído presente nos apoios (Palechor et al. (2015)) que, mesmo diminuindo ao máximo a trepidação existe um atrito intrínseco da estrutura com os apoios que podem atrapalhar a identificação do dano.

5.12.2.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.88 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg, posicionada sobre cada nó.

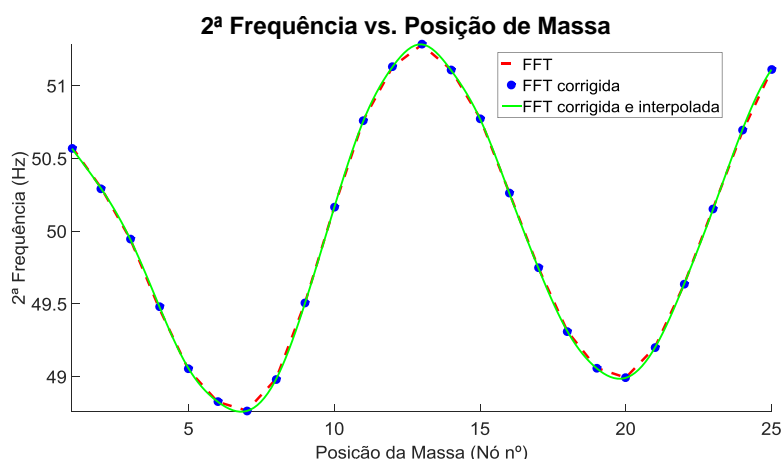
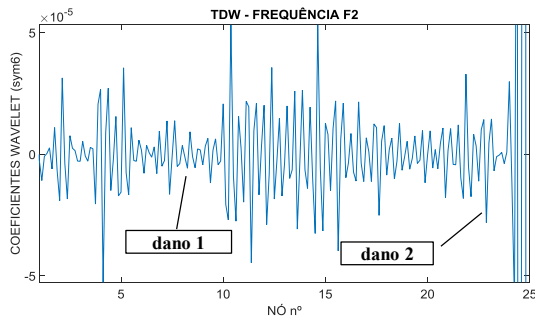


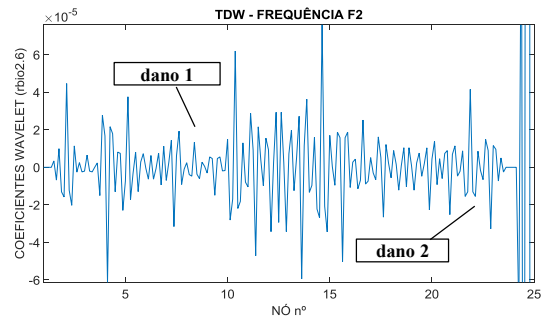
Figura 5.88 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 2.

Da mesma forma como na primeira frequência, na Figura 5.88 podem ser observadas três curvas, a primeira (linha tracejada) representa as frequências dos picos da TRF, a segunda (asterisco) representa a frequência corrigida utilizando as linhas espectrais da TRF ao redor do pico como uma média ponderada para calcular a frequência real. A terceira curva (linha contínua) representa a interpolação dos dados das frequências corrigidas (asterisco) pelo método de interpolação cubic spline.

As Figura 5.89 e Figura 5.90 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

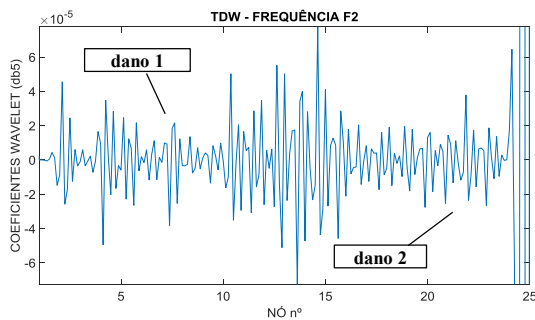


a) Symlet 6

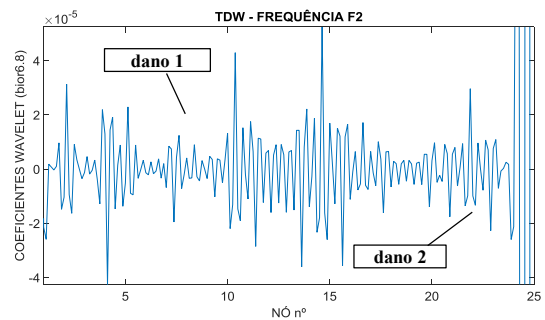


b) rbio2.6

Figura 5.89 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.90 - Caso 2 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 5.89 e Figura 5.90) não foi possível identificar as regiões danificadas, devido ao ruído presente no sinal.

5.12.2.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.91 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

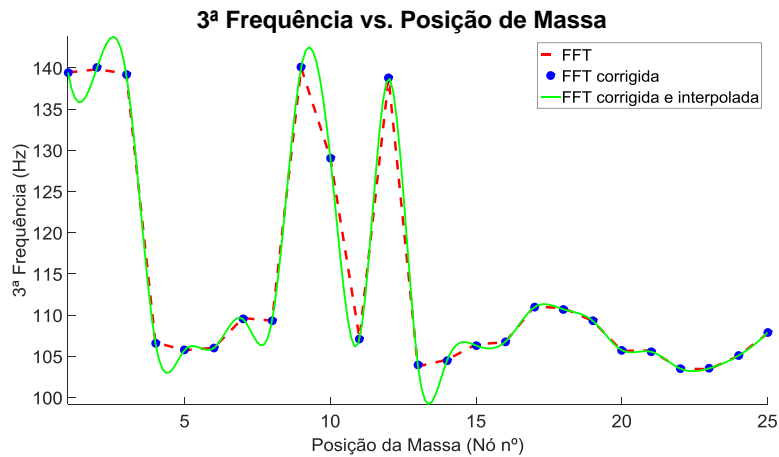
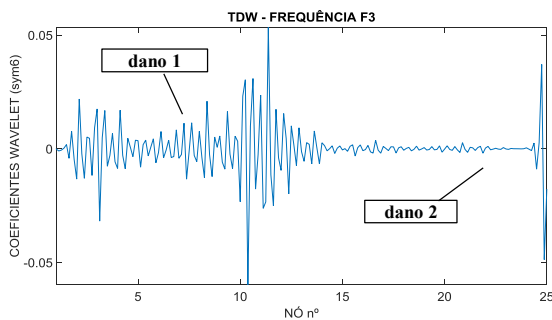


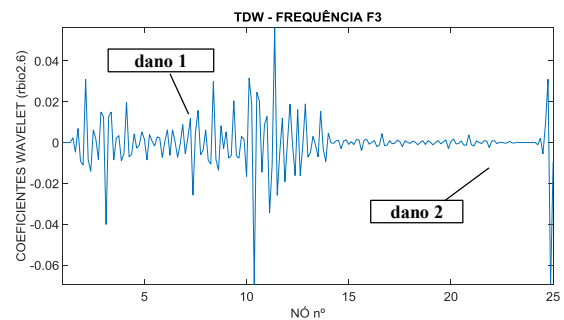
Figura 5.91 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 2.

Na Figura 5.91 podem ser observadas três curvas, a primeira (linha tracejada) representa as frequências dos picos da TRF, a segunda (asterisco) representa a frequência corrigida utilizando as linhas espectrais da TRF ao redor do pico como uma média ponderada para calcular a frequência real. A terceira curva (linha contínua) representa a interpolação dos dados das frequências corrigidas (asterisco) pelo método de interpolação cubic spline. O gráfico apresenta uma perturbação por volta do nó 10 (dano 1), isto devido à terceira frequência da viga quando a massa adicional está posicionada sobre o dano, é amortecida por causa deste.

As Figura 5.92 e Figura 5.93 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6



b) rbio2.6

Figura 5.92 - Caso 2 – TDW – Terceira Frequência (F3).

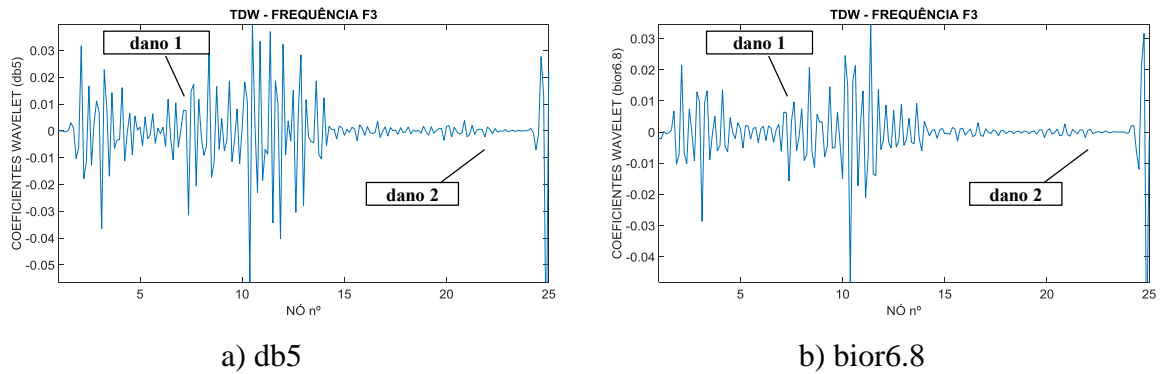


Figura 5.93 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 5.92 e Figura 5.93), pode-se observar a perturbação gerada no dano 1 (nó 8).

5.12.3 – Caso 3 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes)

O caso 3 corresponde a mesmas duas posições de dano do caso 2, mas agora será considerado um incremento do dano 2, com um entalhe a mais (Figura 5.94).

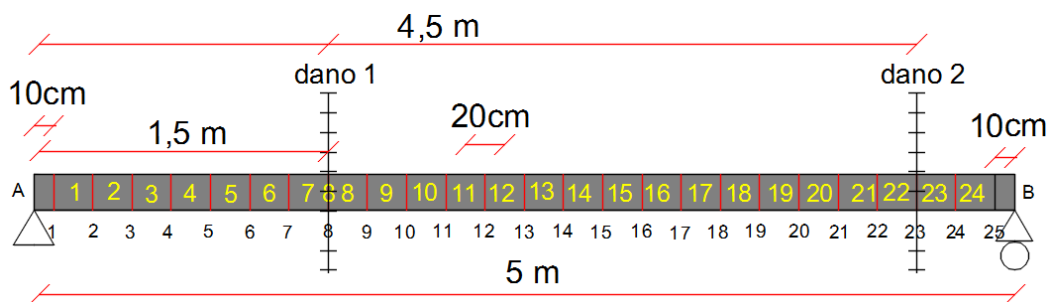


Figura 5.94 - Discretização da viga – Caso 3.

5.12.3.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.95 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

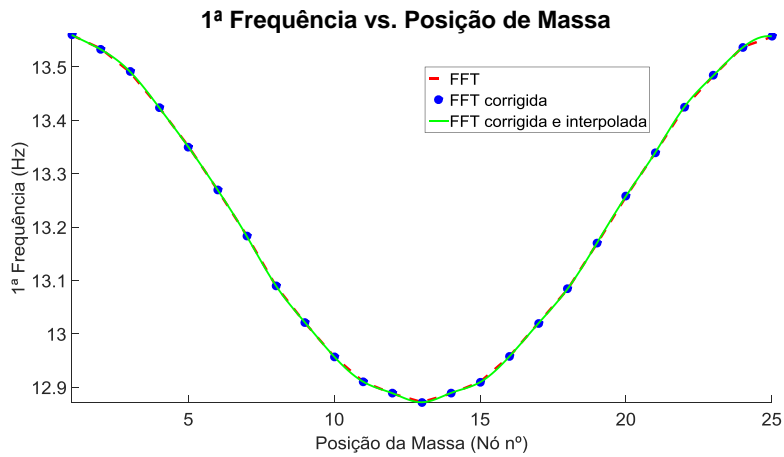
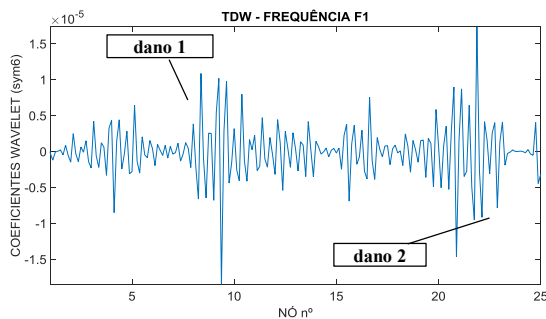
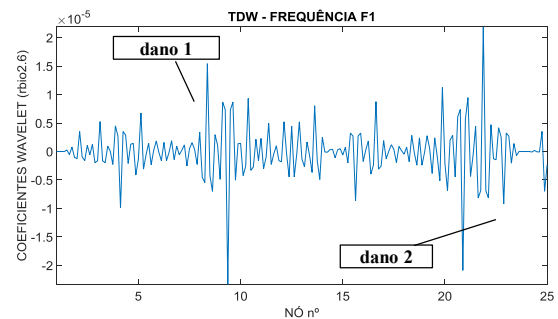


Figura 5.95 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 3.

As Figura 5.96 e Figura 5.97 apresentam os gráficos correspondentes à TDW.

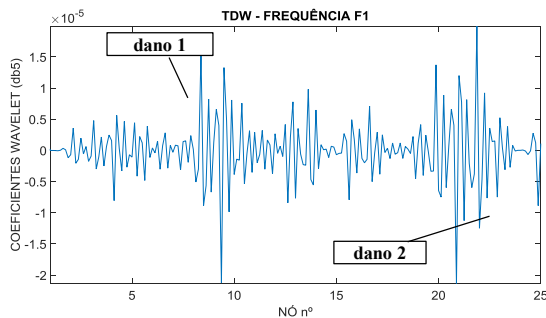


a) Symlet 6

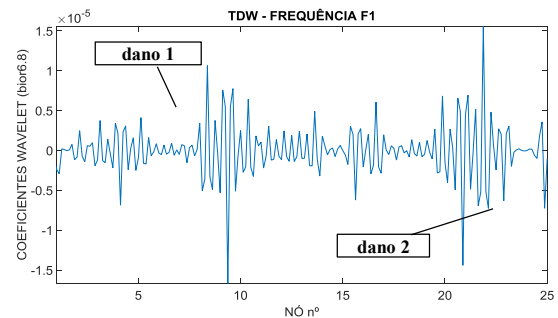


b) rbio2.6

Figura 5.96 - Caso 3 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.97 - Caso 3 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 5.96 e Figura 5.97), pode-se observar que o gráfico apresenta a maior perturbação foram geradas duas perturbações coincidindo com os nós 8 e 23, correspondentes às duas posições de danos (1,5 m e 4,5 m). O gráfico também apresenta perturbações menores ao longo da viga, devidas principalmente ao ruído presente no sinal. Considerando que em relação ao Caso 2, o Caso 3 teve um aumento no dano 2 o

qual fica representado pelo aparecimento de uma perturbação por volta do nó 23 (dano 2 - 4,5 m).

5.12.3.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.98 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

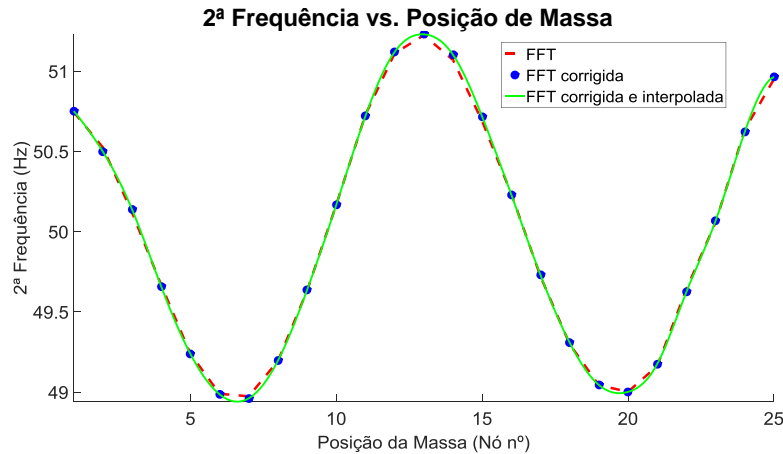
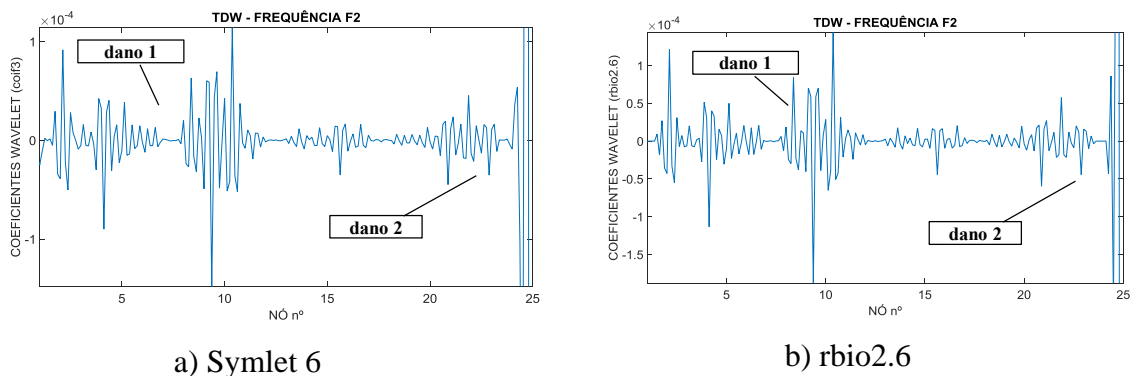


Figura 5.98 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso1.

Na Figura 5.98 podem ser observadas três curvas, a primeira (linha tracejada) representa as frequências dos picos da TRF, a segunda (asterisco) representa a frequência corrigida utilizando as linhas espectrais da TRF ao redor do pico como uma média ponderada para calcular a frequência real. A terceira curva (linha contínua) representa a interpolação dos dados das frequências corrigidas (asterisco) pelo método de interpolação cubic spline de terceiro grau.

A Figura 5.99 e a Figura 5.100 apresentam os gráficos correspondentes à TDW.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 5.99 - Caso 2 – TDW – Segunda Frequência (F2).

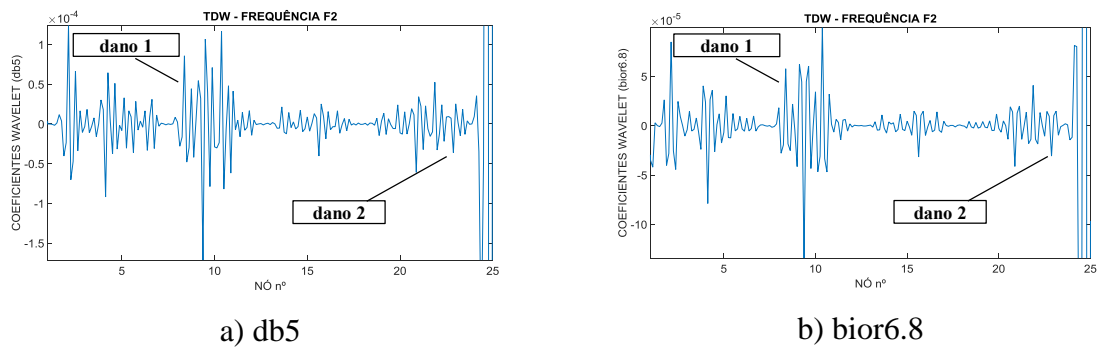


Figura 5.100 - Caso 2 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 5.99 e Figura 5.100), pode-se observar que, a maior perturbação foi gerada entre por volta do nó 8, coincidindo com o dano localizado em 1,5 m. O gráfico também apresenta um perturbação menor do que a anterior, mas que ainda é maior do que as outras geradas ao longo da viga por causa do ruído.

5.12.3.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.101 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

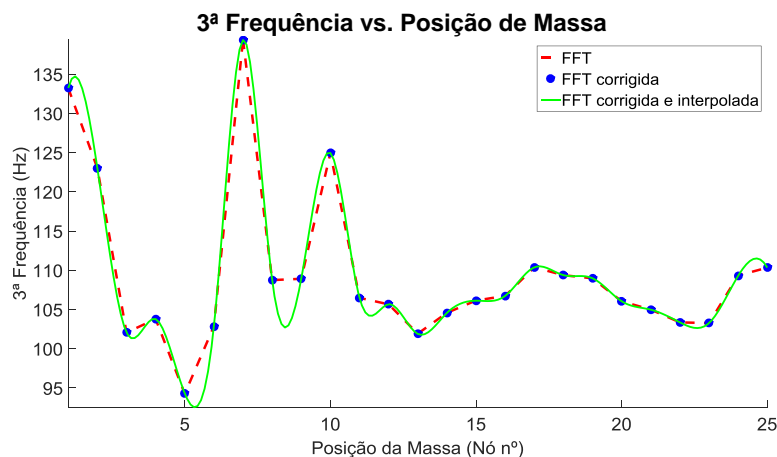


Figura 5.101 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso3.

Na Figura 5.101 podem ser observadas três curvas, a primeira (linha tracejada) representa as frequências dos picos da TRF, a segunda (asterisco) representa a frequência corrigida utilizando as linhas espectrais da TRF ao redor do pico como uma média ponderada para calcular a frequência real. A terceira curva (linha contínua) representa a interpolação dos dados das frequências corrigidas (asterisco) pelo método de interpolação

cubic spline de terceiro grau. Neste gráfico foram gerados amortecimentos dos picos da terceira frequência nos nós localizados ao redor do dano o que gerou uma perturbação muito grande e não foi possível obter o formato da curva esperado.

Mesmo considerando a perturbação gerada no gráfico anterior, foram aplicadas as TDW em cima da curva, e os resultados são apresentados nas Figura 5.102 e Figura 5.103.

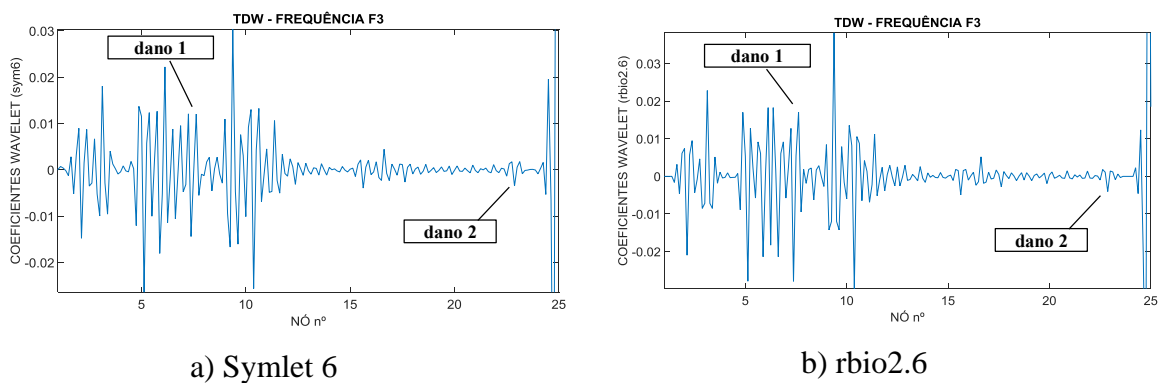


Figura 5.102 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

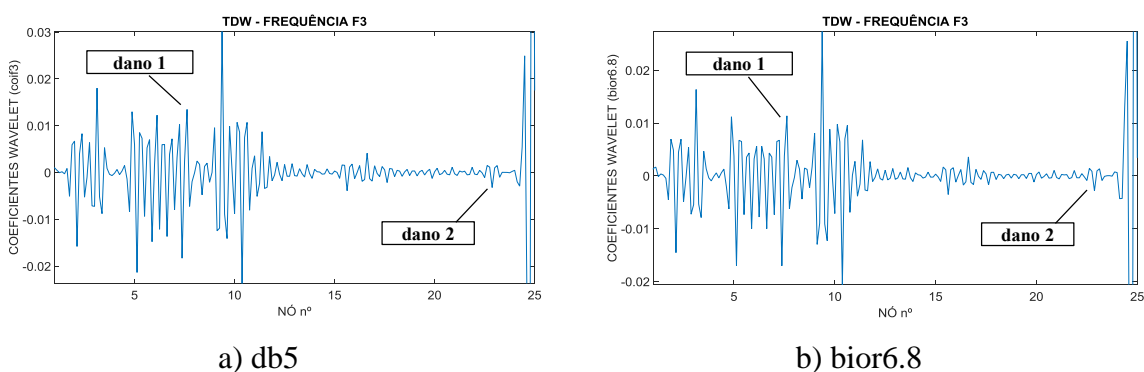


Figura 5.103 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 5.102 e Figura 5.103), pode-se observar que, a maior perturbação foi gerada entre os nós 5 e 10, coincidindo com o dano localizado em 1,5 m.

Por volta do nó 23 (dano 2 a 4,5 m) pode-se observar também uma ligeira perturbação, mas que por causa das grandes amplitudes geradas no nó 8, não é possível estabelecer a presença de um dano naquele local.

5.12.4 – Caso 4 (Viga intacta L = 6,0 m)

O caso 4 corresponde à viga intacta de 6 m de comprimento (Figura 5.104), discretizada em 30 elementos (31 nós) e submetida a uma massa de 3,266 kg.

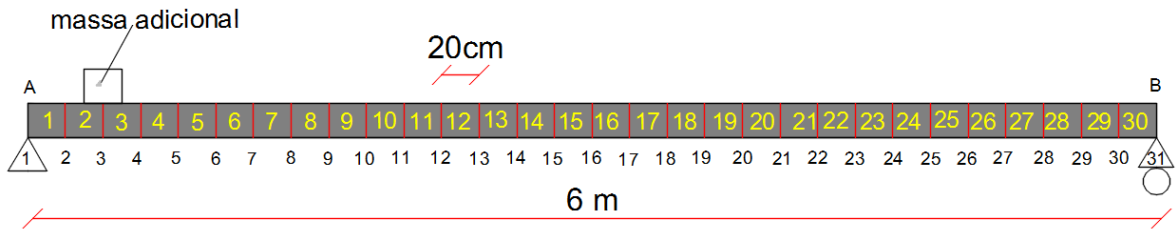


Figura 5.104 - Discretização da viga – Caso 4.

5.12.4.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.105 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

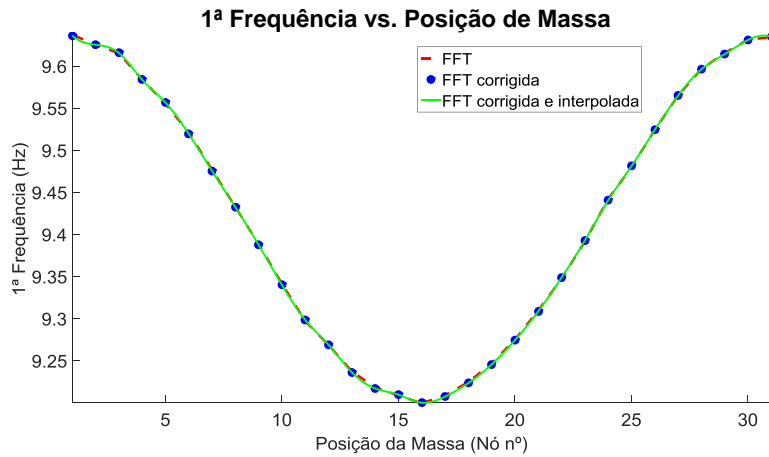
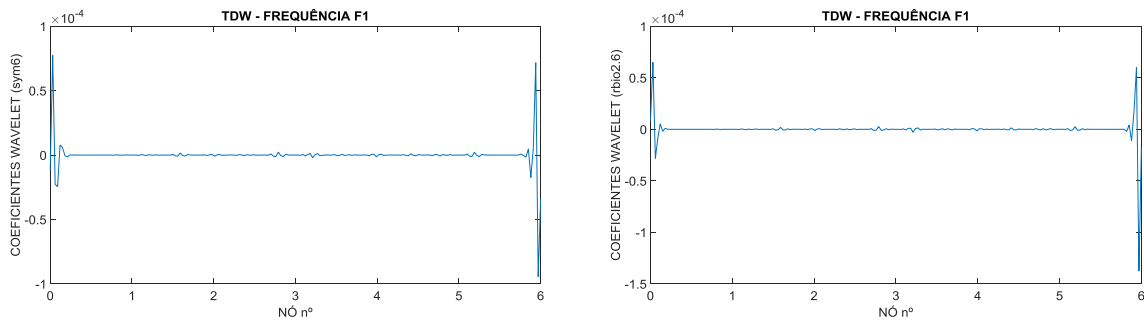


Figura 5.105 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 4.

As Figura 5.106 e Figura 5.107 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 5.106 - Caso 4 – TDW – Primeira Frequência (F1).

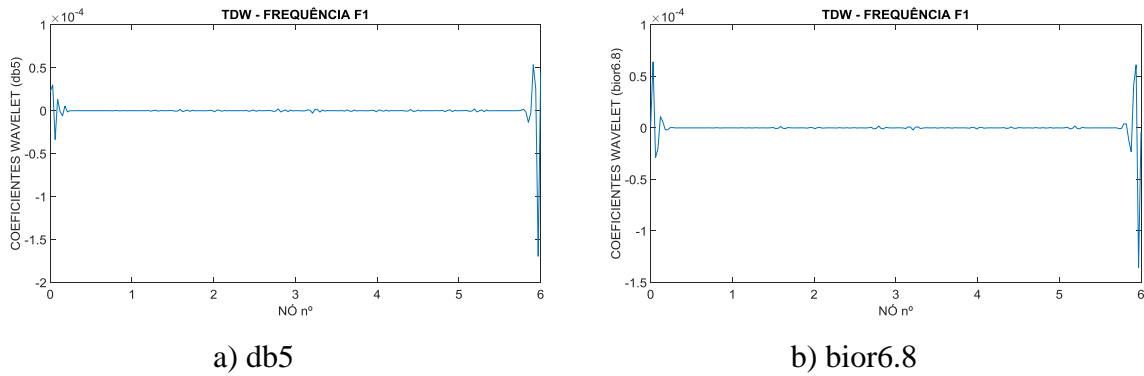


Figura 5.107 - Caso 4 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas Figura 5.106 e Figura 5.107, observa-se a amplitude das perturbações geradas nos gráficos dos coeficiente Waveletes são significativamente menores em relação aos coeficientes Waveletes gerados nas vigas danificadas.

5.12.4.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.108 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

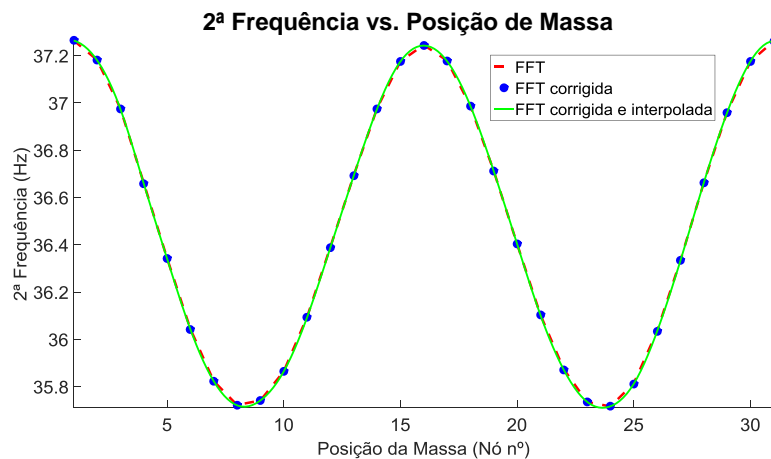
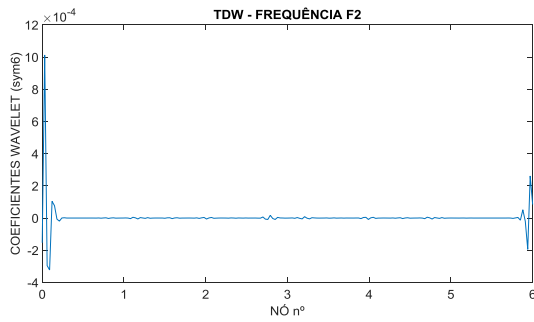
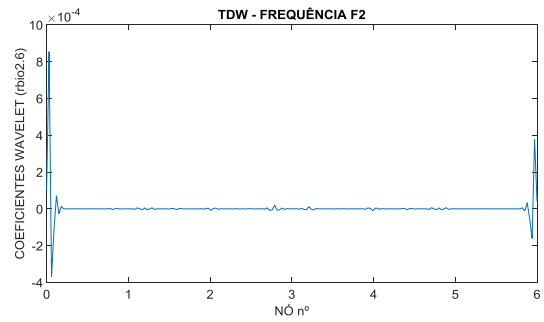


Figura 5.108 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 4.

As Figura 5.109 e Figura 5.110 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

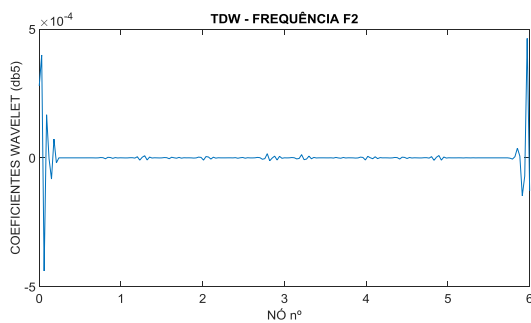


a) Symlet 6

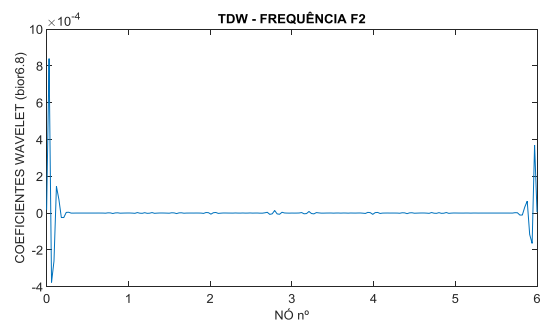


b) rbio2.6

Figura 5.109 - Caso 4 – TDW – segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.110 - Caso 4 – TDW – segunda Frequência (F2).

5.12.4.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.111 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

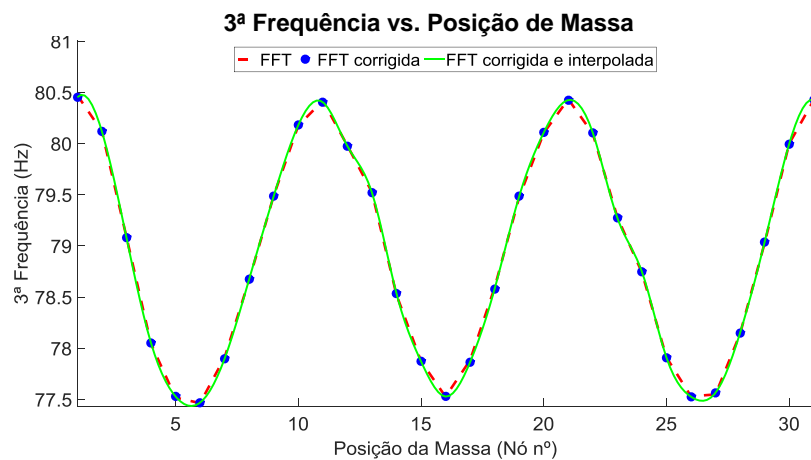
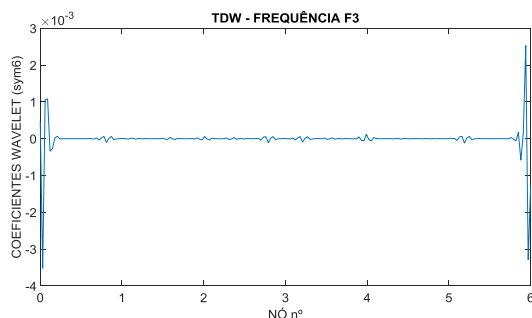
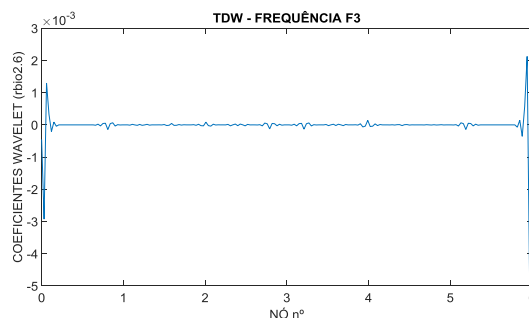


Figura 5.111 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 4.

As Figura 5.112 e Figura 5.113 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

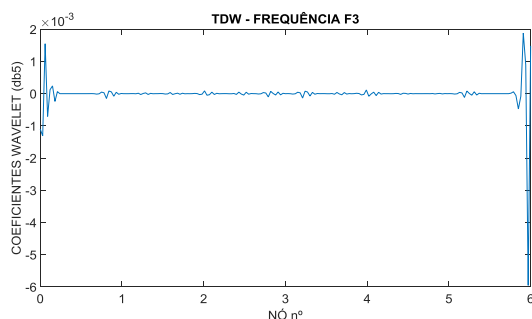


a) Symlet 6

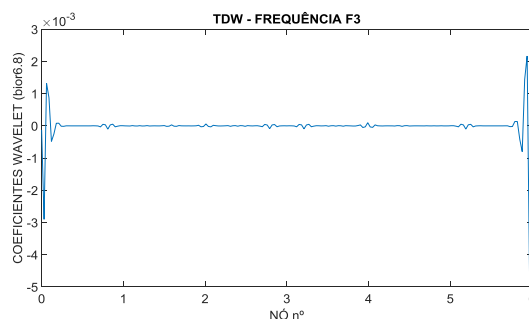


b) rbio2.6

Figura 5.112 - Caso 4 – TDW – terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.113 - Caso 4 – TDW – terceira Frequência (F3).

Nas Figura 5.108 a Figura 5.113, observa-se a amplitude das perturbações geradas nos gráficos dos coeficiente waveletes são significativamente menores em relação aos coeficientes waveletes gerados nas vigas danificadas.

5.12.5 –Caso 5 (dano 2 a 5,6 m com 1 entalhe)

O caso 5 é o correspondente ao primeiro caso de dano da viga de 6 m de comprimento, e com o objetivo de analisar a influência da proximidade dos danos nos apoios da estrutura, foi estabelecido para este ensaio que o primeiro dano (1 entalhe na mesa superior e inferior - Figura 5.114), estivesse localizado a uma distancia de 60 cm do apoio ou nó 28 (Figura 5.115), o que equivale a 10% de $L = 6$ m (comprimento), desta forma o dano fica proporcional em relação ao dano 2 dos casos de dano 1 a 3 (viga de 5 m), localizado a 50 cm do apoio (10 % de $L = 5$ m).



a) Montagem ensaio – Caso 5.



b) Dano – Caso 5.

Figura 5.114 - Dano Caso 5.

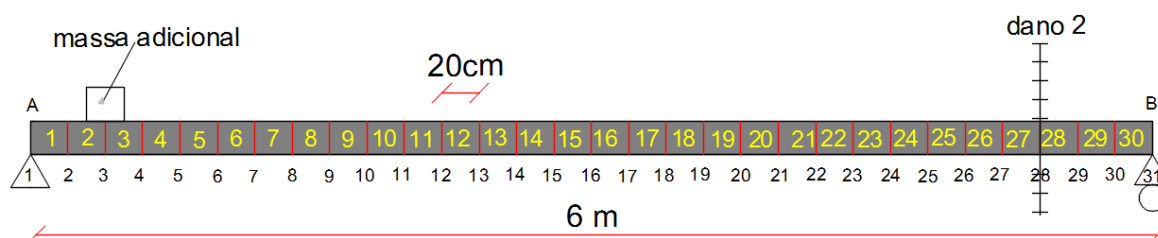


Figura 5.115 - Discretização da viga - Caso 5.

A seguir são apresentados os resultados da viga Caso 5 sob a ação de uma massa adicional de 3,266 kg.

5.12.5.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.116 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

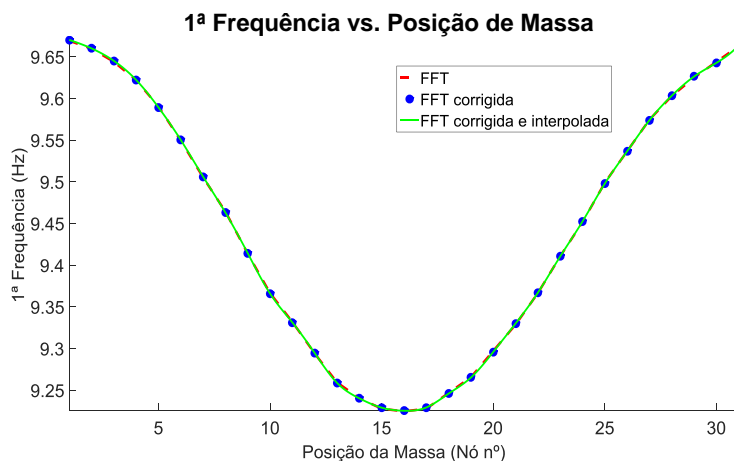


Figura 5.116 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 5.

As Figura 5.117 e Figura 5.118 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

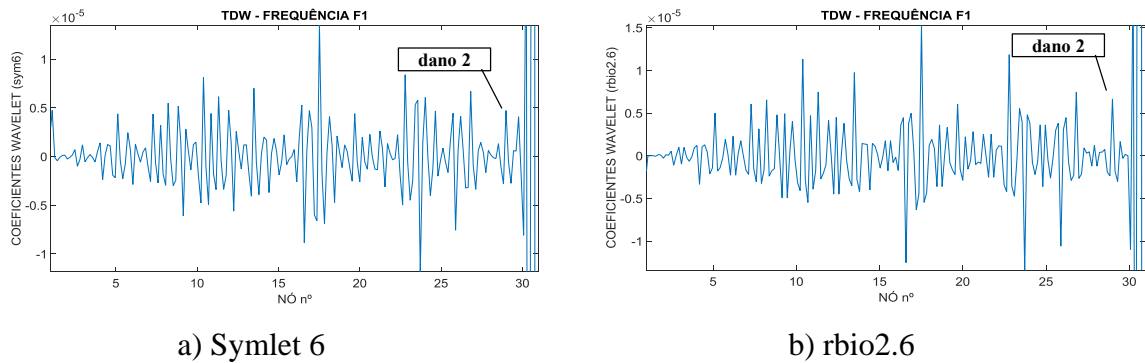


Figura 5.117 - Caso 5 – TDW – Primeira Frequência (F1).

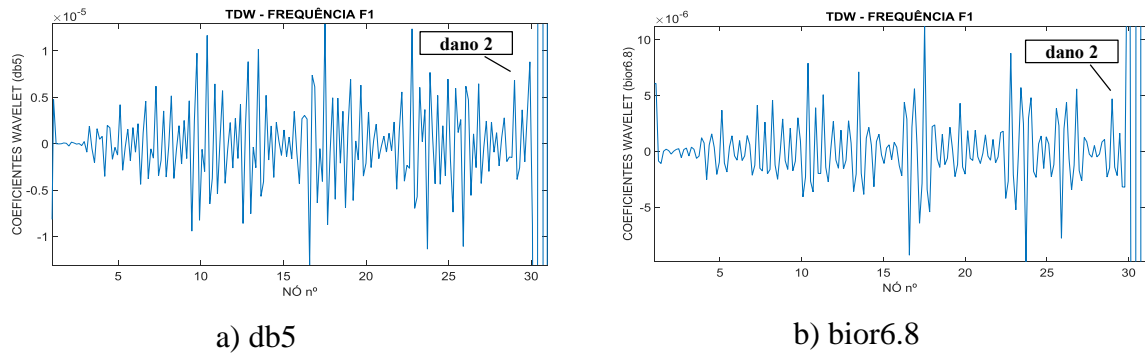


Figura 5.118 - Caso 5 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 5.117 e Figura 5.118) são geradas perturbações ao em diferentes posições, geradas pelo ruído presente no sinal, sem obter um perturbação clara no local do dano.

5.12.5.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.119 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

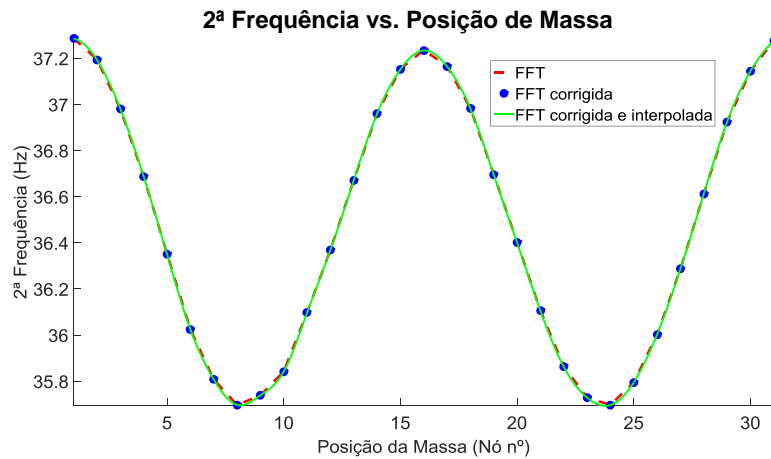
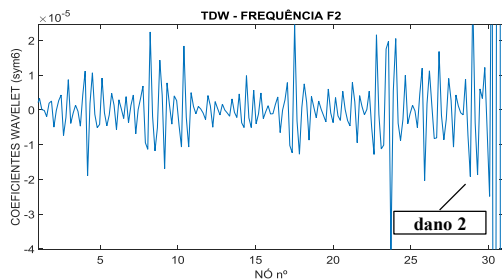
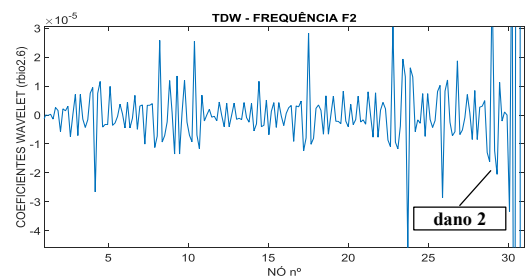


Figura 5.119 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 5.

A Figura 5.120 e a Figura 5.121 apresentam os gráficos correspondentes à TDW.

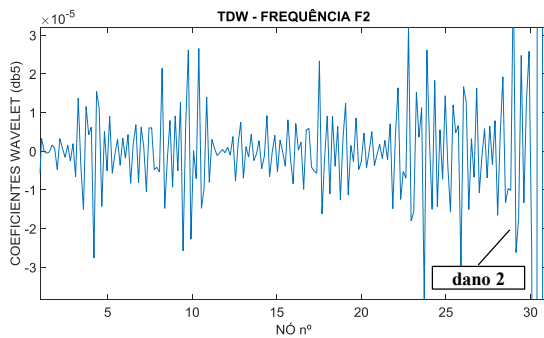


a) Symlet 6

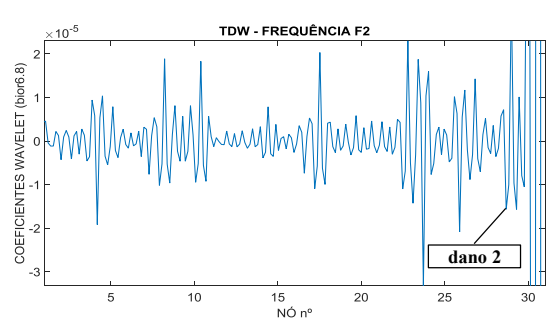


b) rbio2.6

Figura 5.120 - Caso 5 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.121 - Caso 5 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 5.120 e Figura 5.121) são geradas também perturbações perto da região danificada, mas que ficam confusas frente as perturbações geradas ao longo da viga pelo ruído presente no sinal.

5.12.5.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.122 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

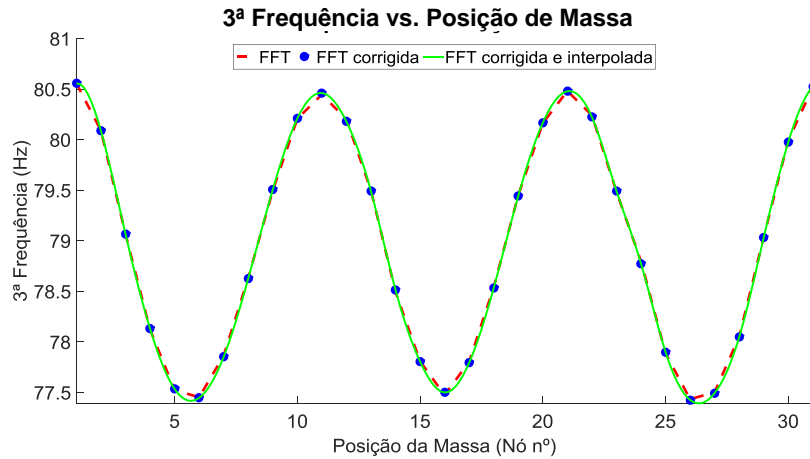


Figura 5.122 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3)-Caso 5.

Os resultados da aplicação das TDW são apresentados nas Figura 5.123 e Figura 5.124.

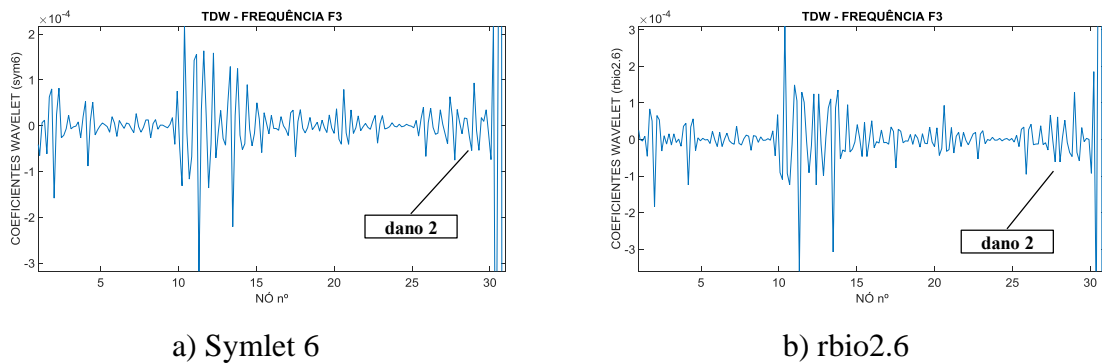


Figura 5.123 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 5.

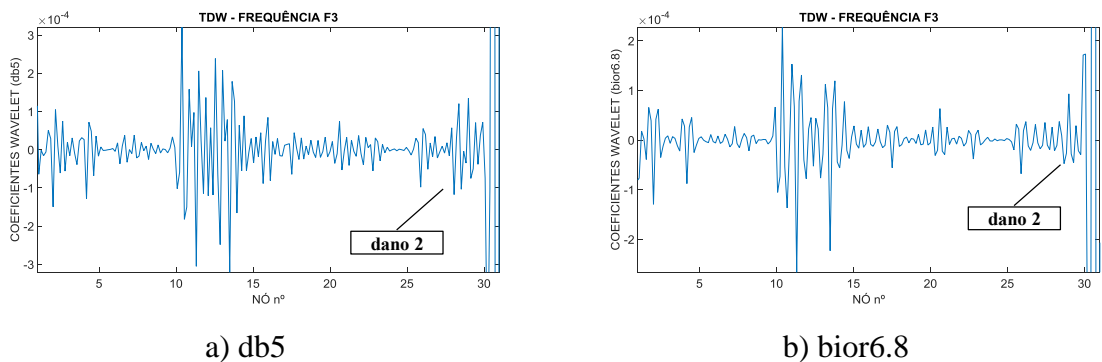


Figura 5.124 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 5.

Nas Figura 5.123 e Figura 5.124 é gerada uma perturbação perto do nó 13 o que representa um falso dano, já que o dano está localizado no nó 28, onde são identificadas pequenas perturbações, mas que não representam uma perturbação importante para conseguir estabelecer se existe um dano ou não.

5.12.6 – Caso 6 (dano 2 a 5,6 m com 2 entalhes)

O caso 6, é a continuação do caso 5, considerando mais um entalhe do lado esquerdo a 2,5 cm do entalhe anterior (Figura 5.125).



Figura 5.125 - Dano Caso 6.

5.12.6.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.126 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

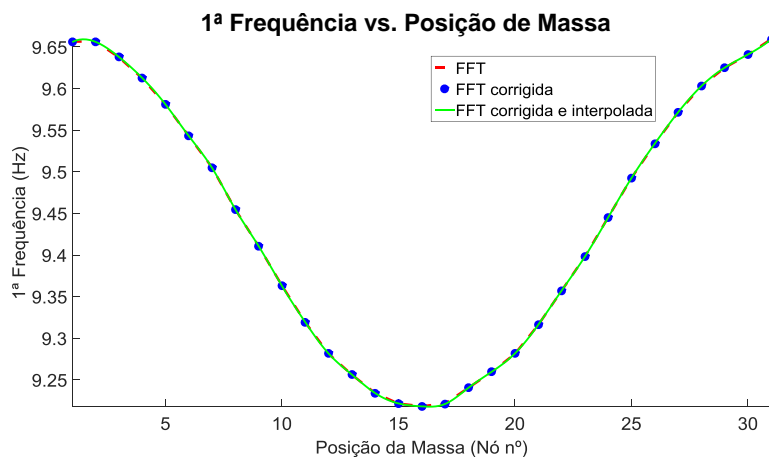
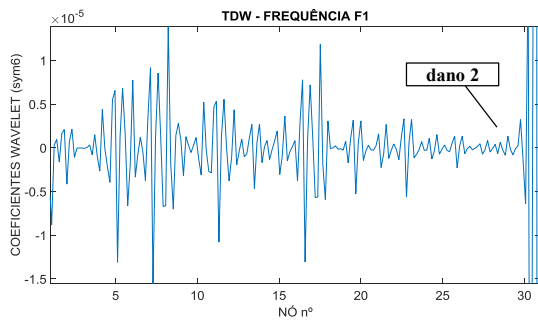
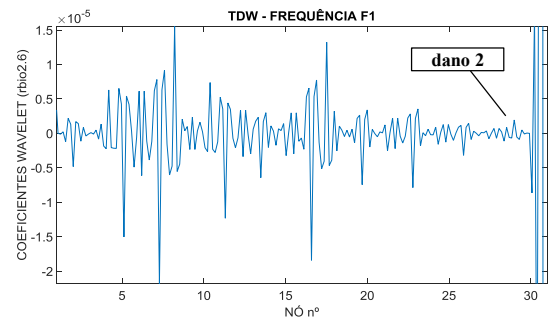


Figura 5.126 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 6.

As Figura 5.127 e Figura 5.128 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

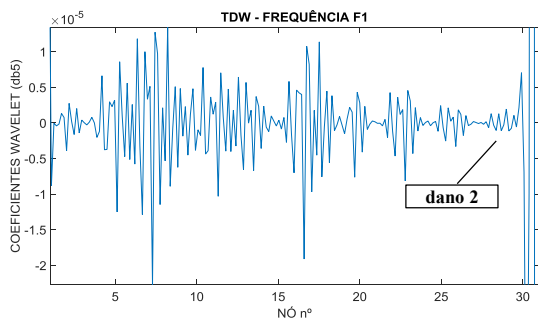


a) Symlet 6

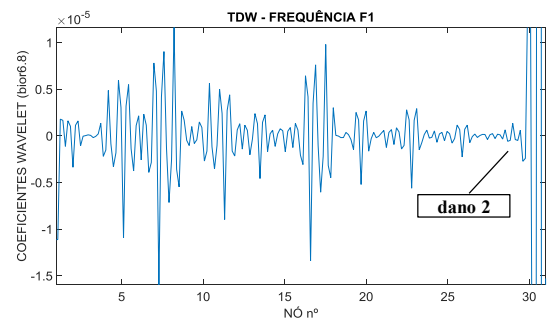


b) rbio2.6

Figura 5.127 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.128 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).

O resultado da metodologia proposta nesta pesquisa não deram bons resultados. O sinal apresentou perturbação ao longo da viga, sem identificar claramente a posição do dano (nó 28).

5.12.6.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.129 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

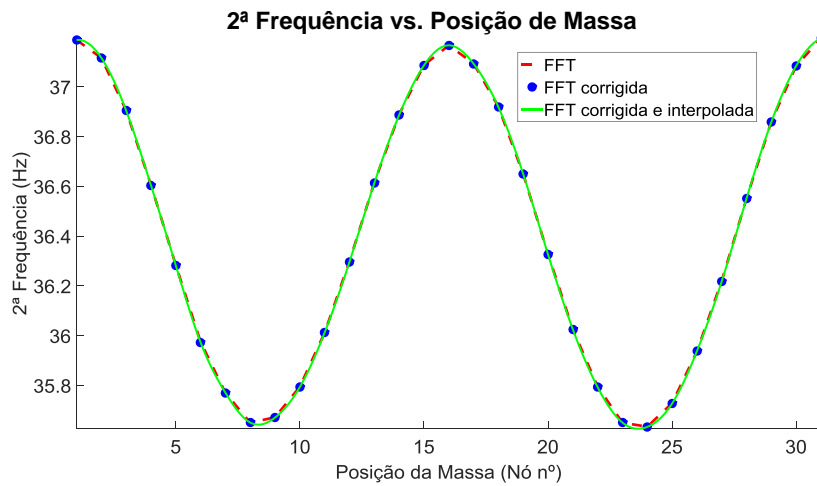
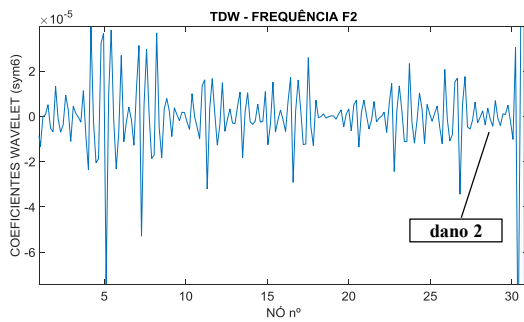
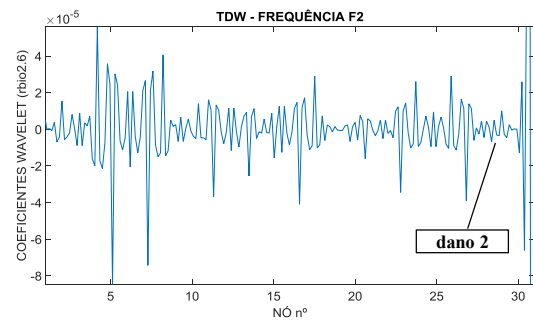


Figura 5.129 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 6.

As Figura 5.130 e Figura 5.131 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

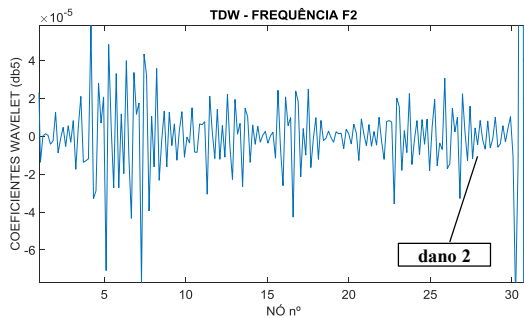


a) Symlet 6

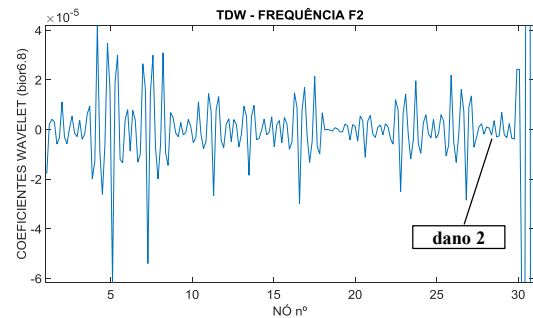


b) rbio2.6

Figura 5.130 - Caso 6 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.131 - Caso 6 – TDW – Segunda Frequência (F2).

5.12.6.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.132 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

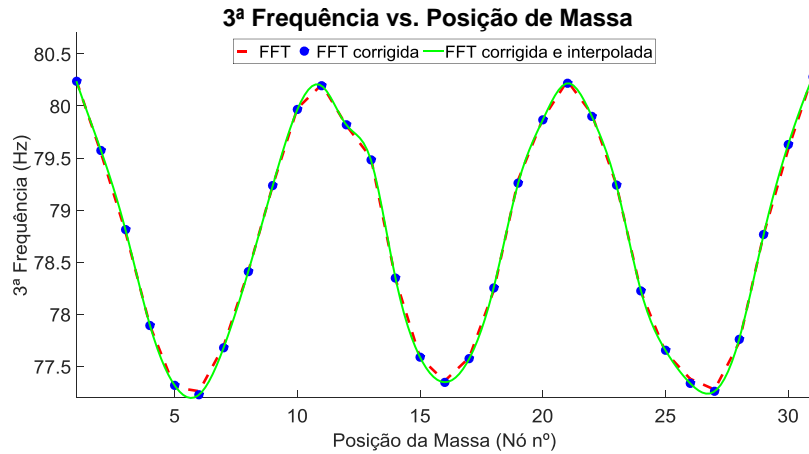
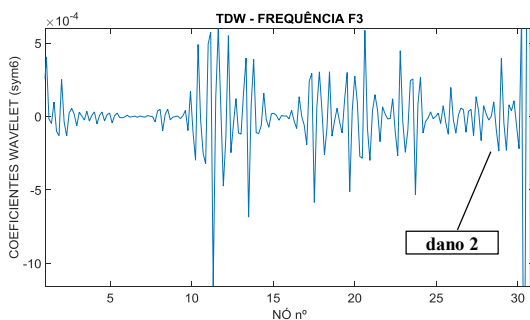
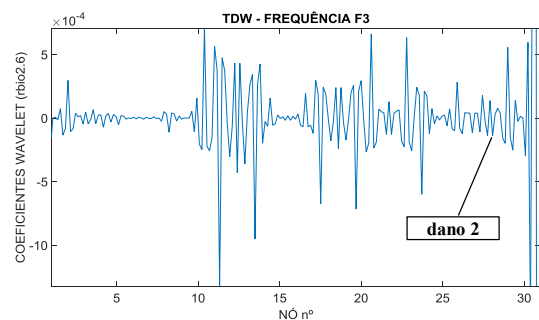


Figura 5.132 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 5.

Os resultados da aplicação das TDW são apresentados nas Figura 5.133 e Figura 5.134

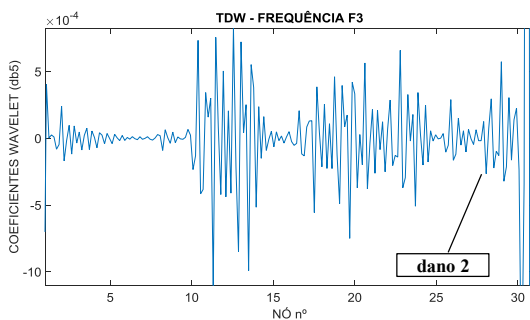


a) Symlet 6

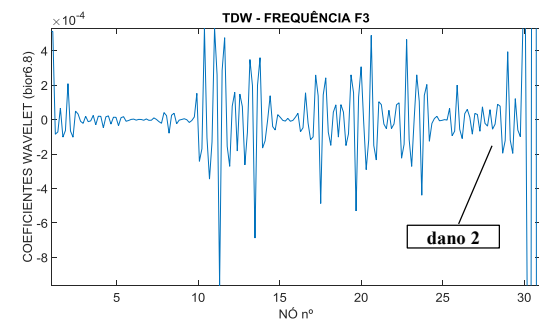


b) rbio2.6

Figura 5.133 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.134 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Na Figura 5.133 e a Figura 5.134, são geradas perturbações em lugares diferente dos locais danificados. Neste caso a metodologia proposta não apresentou os resultados esperados.

5.12.7 –Caso 7 (dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

Neste caso de dano (Caso 7), foi realizado mais um entalhe na viga do lado esquerdo a 2,5 cm (Figura 5.135).

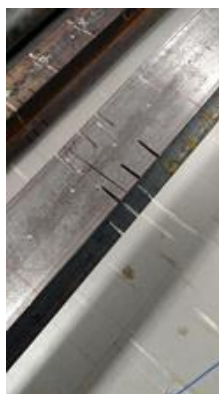


Figura 5.135 - Dano Caso 7.

5.12.7.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.136 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

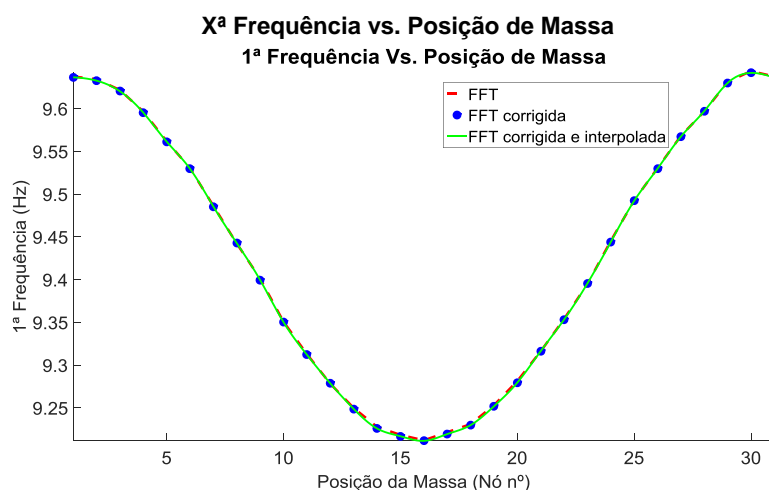
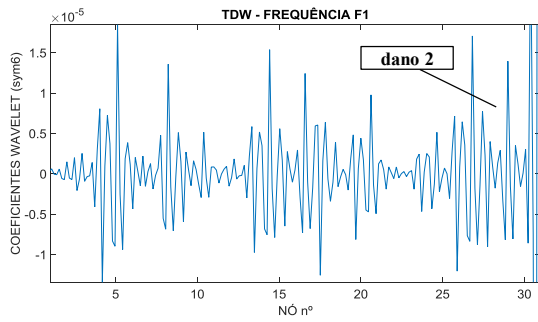
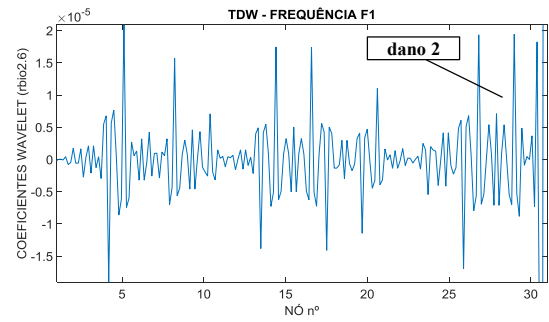


Figura 5.136 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 7.

As Figura 5.137 e Figura 5.138 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

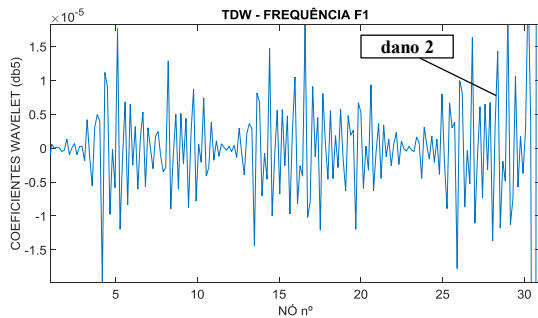


a) Symlet 6

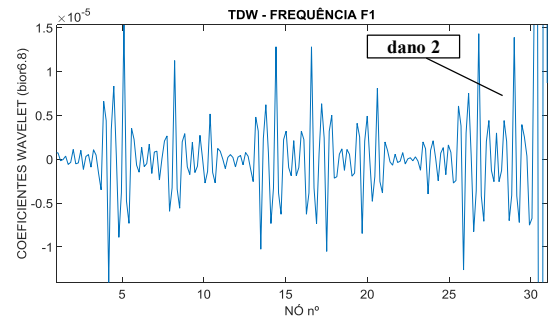


b) rbio2.6

Figura 5.137 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.138 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).

O resultado da metodologia proposta nesta pesquisa não deram bons resultados. O sinal apresentou perturbação ao longo da viga, sem identificar claramente a posição do dano (nó 28).

5.12.7.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.139 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

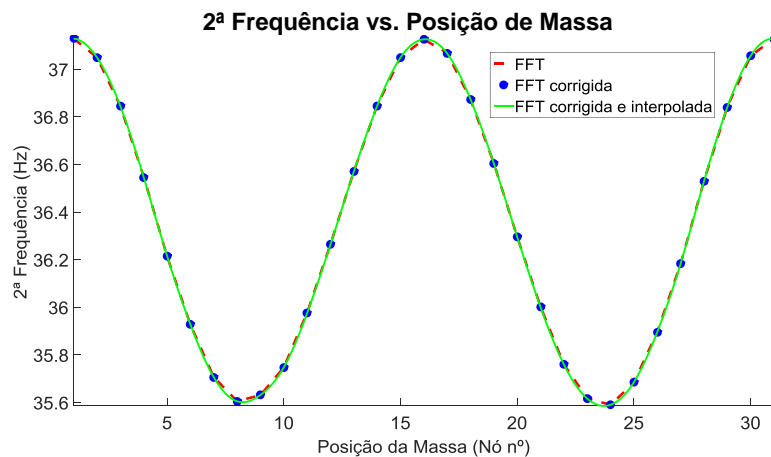
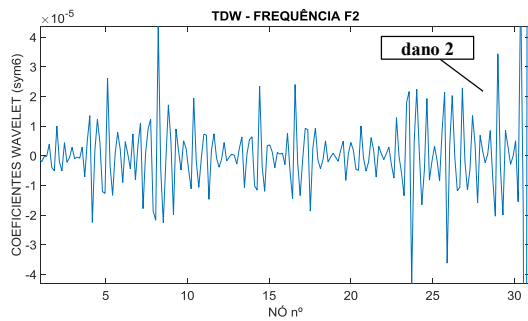
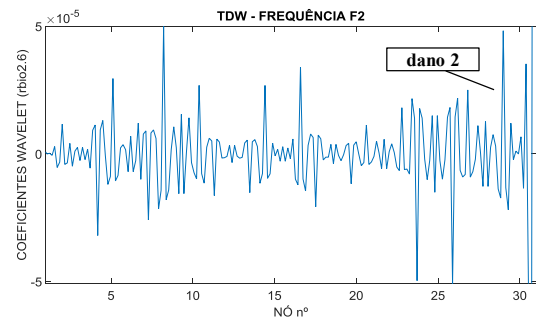


Figura 5.139 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 7.

As Figura 5.140 e Figura 5.141 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

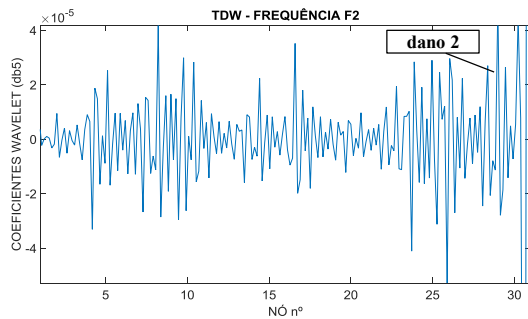


a) Symlet 6

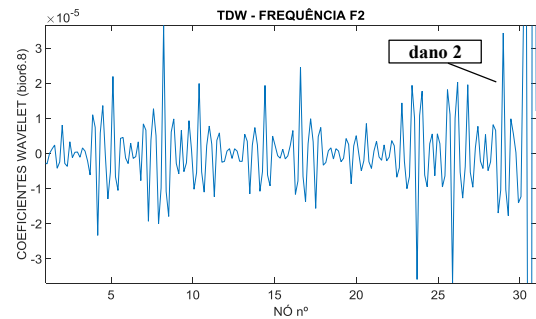


b) rbio2.6

Figura 5.140 - Caso 7 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.141 - Caso 7 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas Figura 5.140 e Figura 5.141 são geradas perturbações em lugares diferente dos locais danificados. Neste caso a metodologia proposta não deu os resultados esperados.

5.12.7.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.142 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

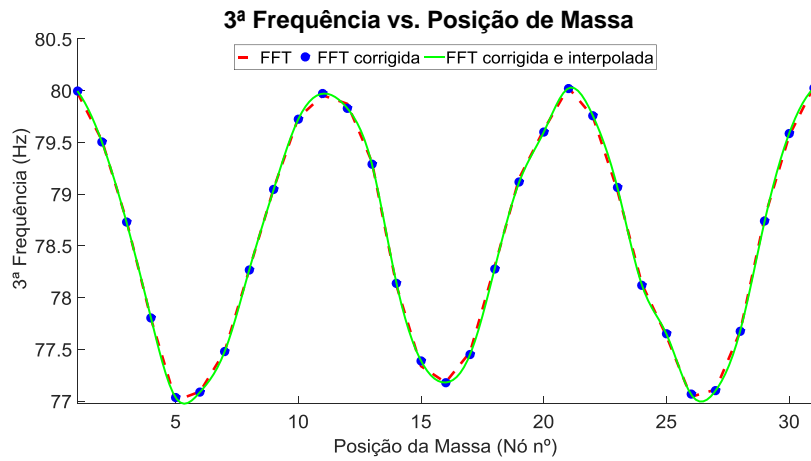
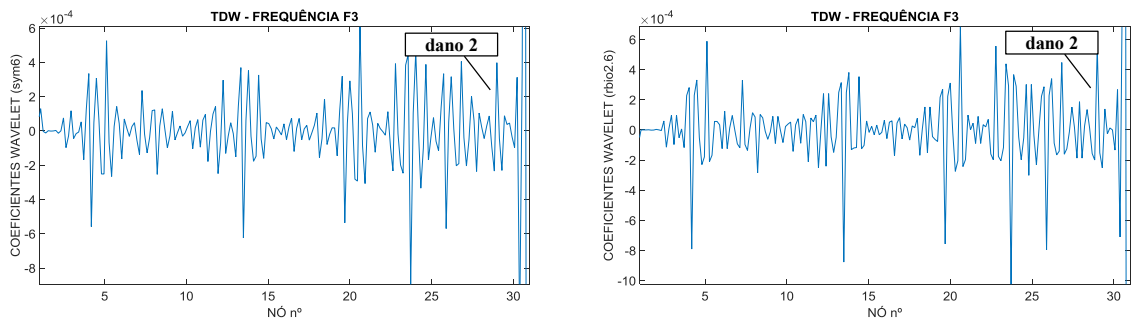


Figura 5.142 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 5.

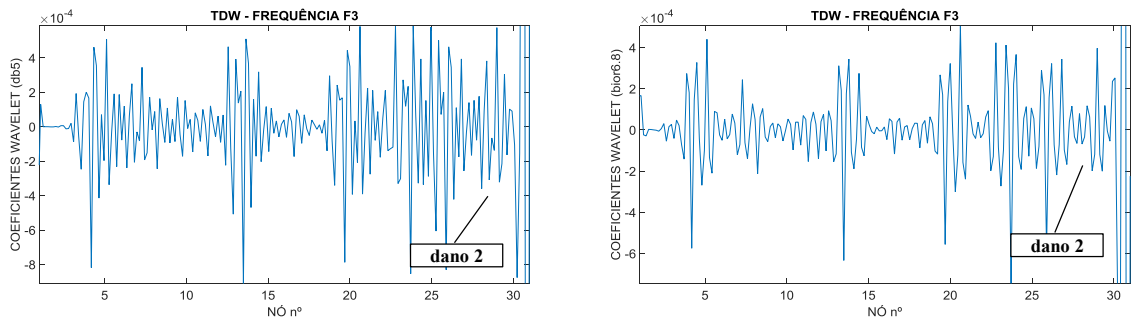
Os resultados da aplicação das TDW são apresentados nas Figura 5.143 e Figura 5.144.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 5.143 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5

b) bior6.8

Figura 5.144 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Figura 5.143 e Figura 5.144 são geradas perturbações em lugares diferente dos locais danificados. Neste caso a metodologia proposta não deu os resultados esperados.

5.12.8 – Caso 8 (dano 1 a 5,0 m com 1 entalhe e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

Neste caso de dano (Caso 8), foi realizado mais um dano na viga no nó 28 e um entalhe localizado a 1m do apoio (nó 26). Esta vez foi tirado uma porção de massa considerável da mesa superior e inferior da viga, na mesma região danificada do Caso 7 (Figura 5.145 e Figura 5.146).

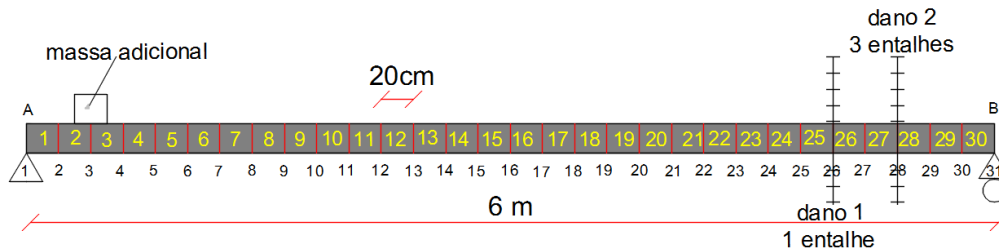


Figura 5.145 - Discretização Caso 8.



a) Dano 1 - nó 26.



b) Dano 2 - nó 28.

Figura 5.146 - Dano Caso 8.

5.12.8.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.147 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

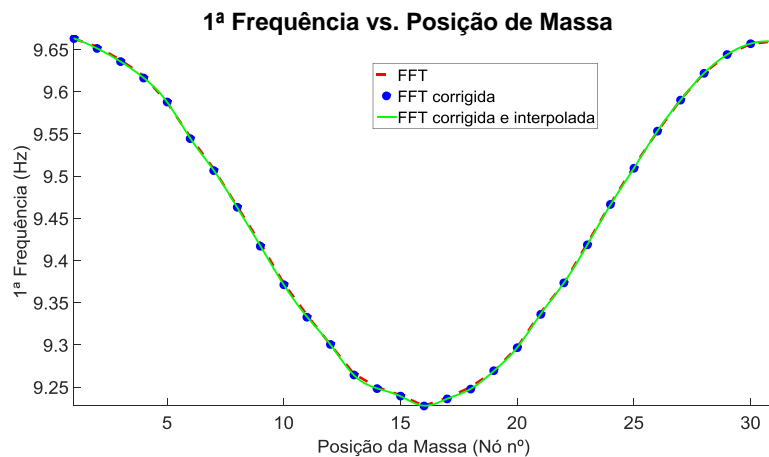
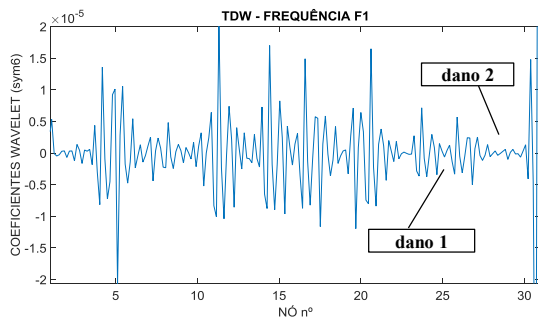
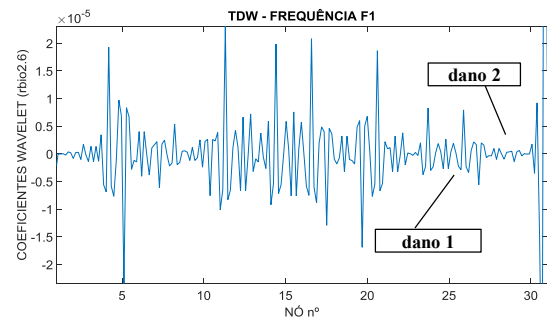


Figura 5.147 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 8.

As Figura 5.148 e Figura 5.149 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

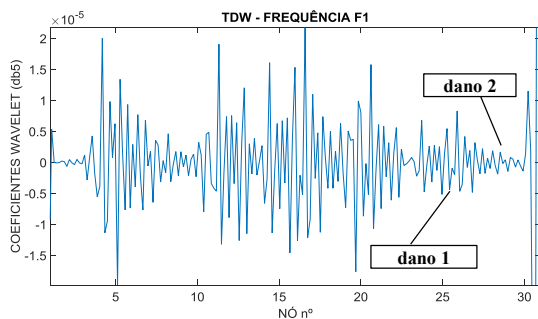


a) Symlet 6

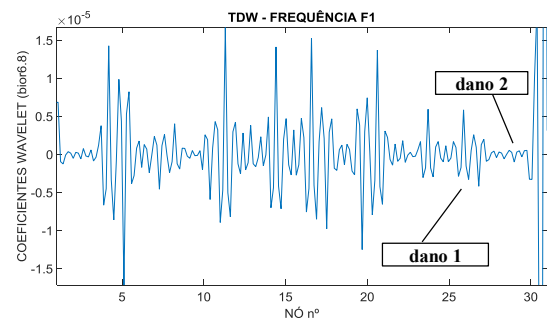


b) rbio2.6

Figura 5.148 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.149 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).

O resultado da metodologia proposta nesta pesquisa não deram bons resultados. O sinal apresentou perturbação ao longo da viga, sem identificar claramente a posição do dano (nó 28).

5.12.8.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.150 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

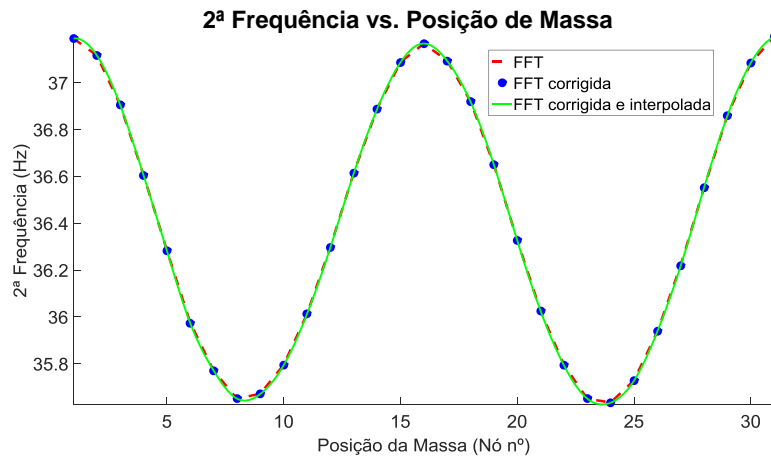
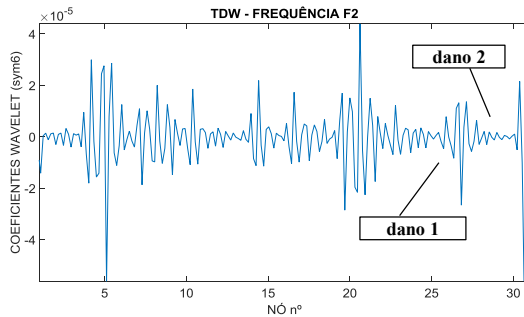
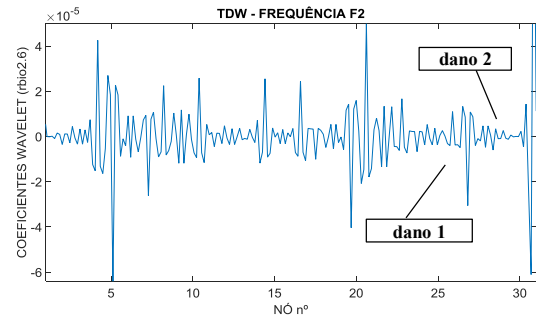


Figura 5.150 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 8.

As Figura 5.151 e Figura 5.152 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

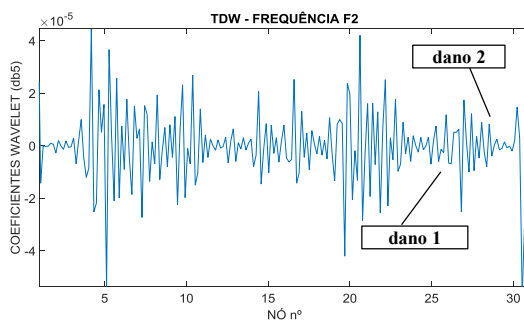


a) Symlet 6

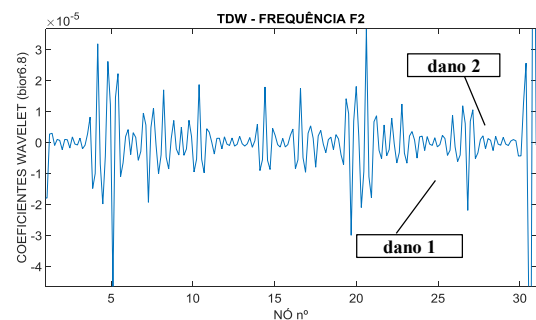


b) rbio2.6

Figura 5.151 - Caso 8 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.152 - Caso 8 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas Figura 5.151 e Figura 5.152 são geradas perturbações em lugares diferente dos locais danificados. Neste caso a metodologia proposta não deu os resultados esperados.

5.12.8.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.153 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

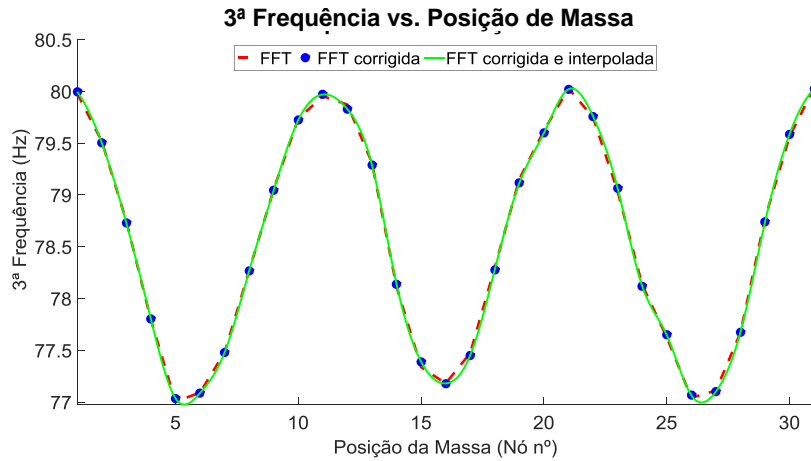
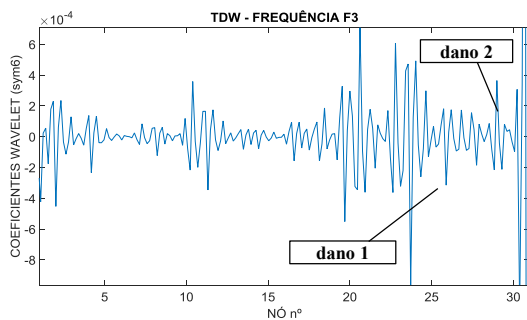
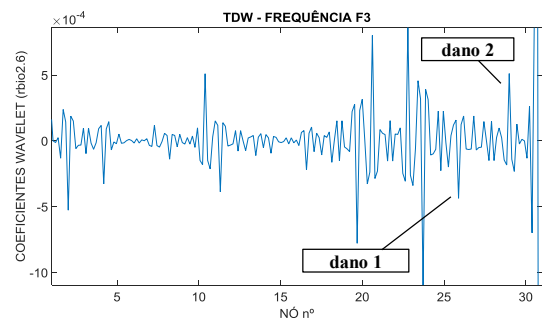


Figura 5.153 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 8.

Os resultados da aplicação das TDW são apresentados nas Figura 5.154 e Figura 5.155.

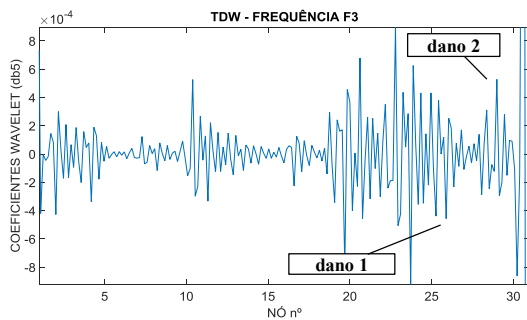


a) Symlet 6

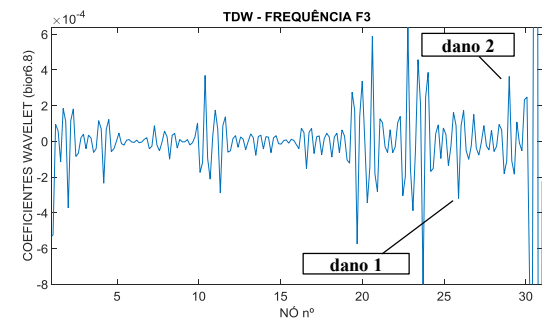


b) rbio2.6

Figura 5.154 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.155 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas Figura 5.154 e Figura 5.155 são geradas perturbações perto do nó 25, localizado a 20 cm do dano 1 (nó 26).

5.12.9 –Caso 9 (dano 1 a 5,0 m com 2 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

Neste caso de dano (Caso 9), foi realizado mais um entalhe no nó 26 (Figura 5.156).



a) Dano 1 – nó 26



b) Dano 2 – nó 28

Figura 5.156 - Dano Caso 9.

5.12.9.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.157 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

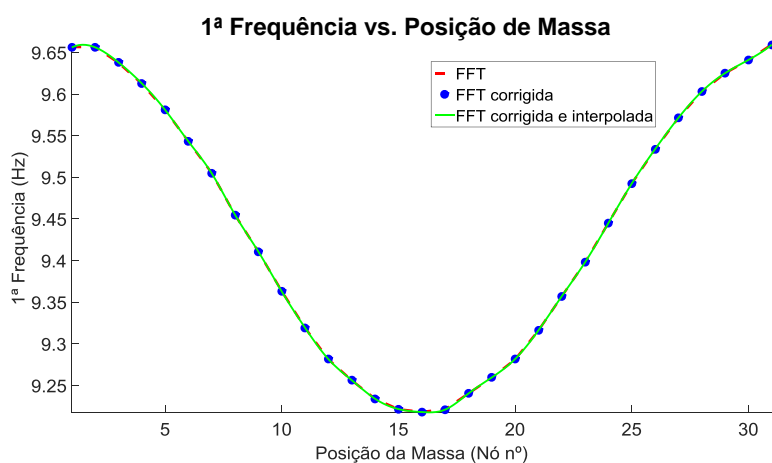
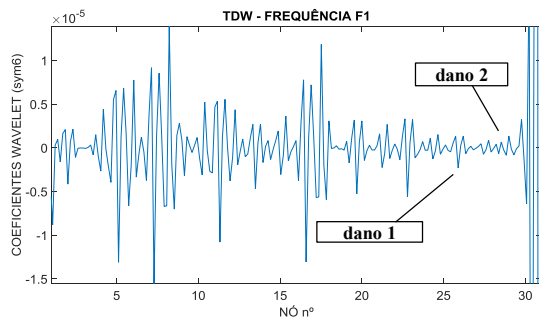
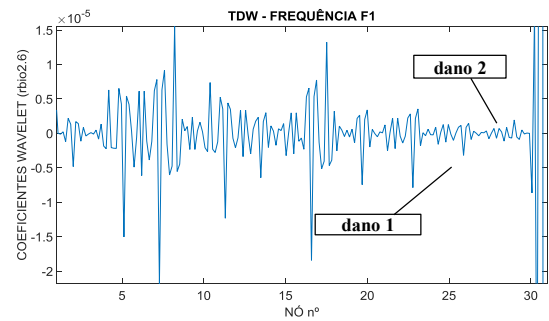


Figura 5.157 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 9.

As Figura 5.158 e Figura 5.159 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

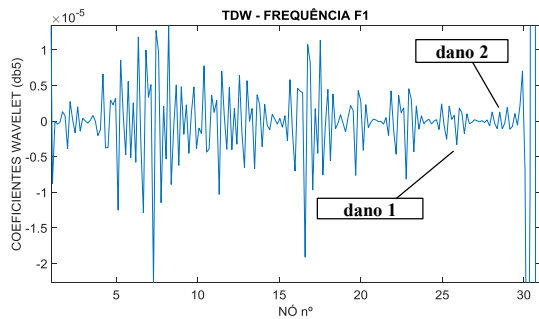


a) Symlet 6

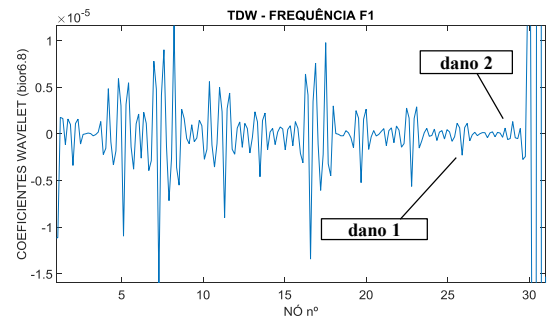


b) rbio2.6

Figura 5.158 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.159 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).

O resultado da metodologia proposta nesta pesquisa não deram bons resultados. O sinal apresentou perturbação ao longo da viga, sem identificar claramente a posição do dano (nós 26 e 28).

5.12.9.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.160 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à Segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

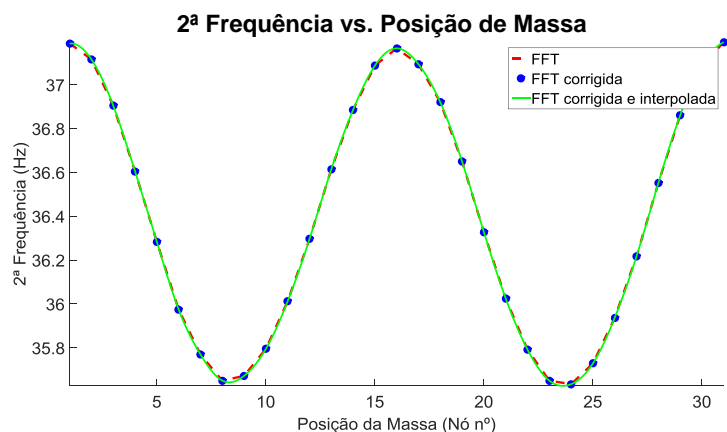
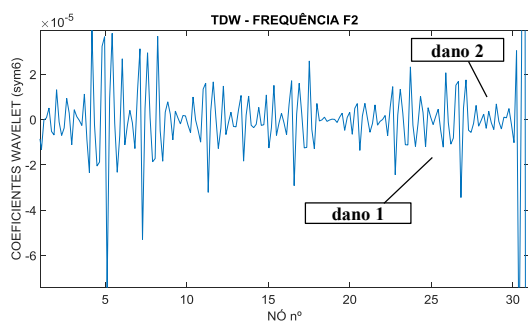
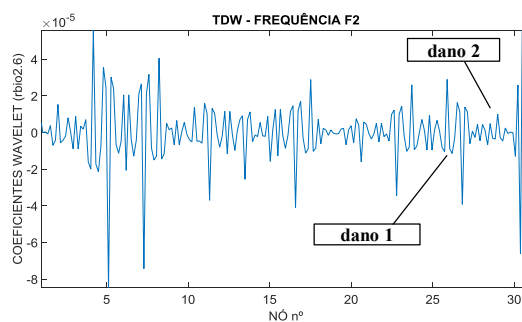


Figura 5.160 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 9.

A Figura 5.161 e a Figura 5.162, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

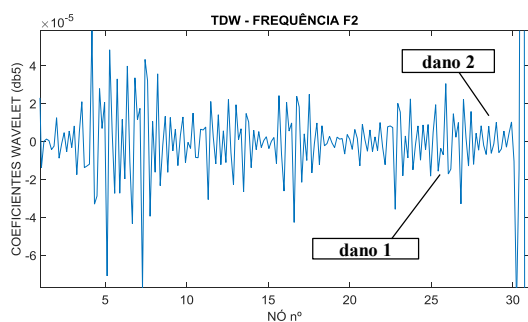


a) Symlet 6

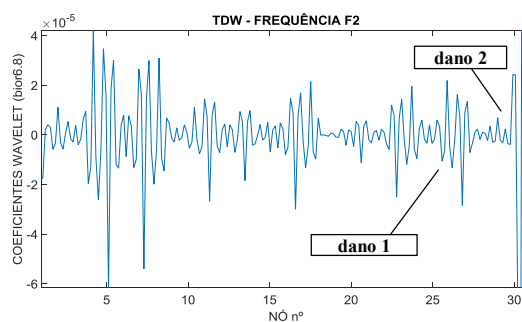


b) rbio2.6

Figura 5.161 - Caso 9 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.162 - Caso 9 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas Figura 5.161 e Figura 5.162 são geradas perturbações em lugares diferente dos locais danificados. Neste caso a metodologia proposta não proporcionou os resultados esperados.

5.12.9.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.163 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à Terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

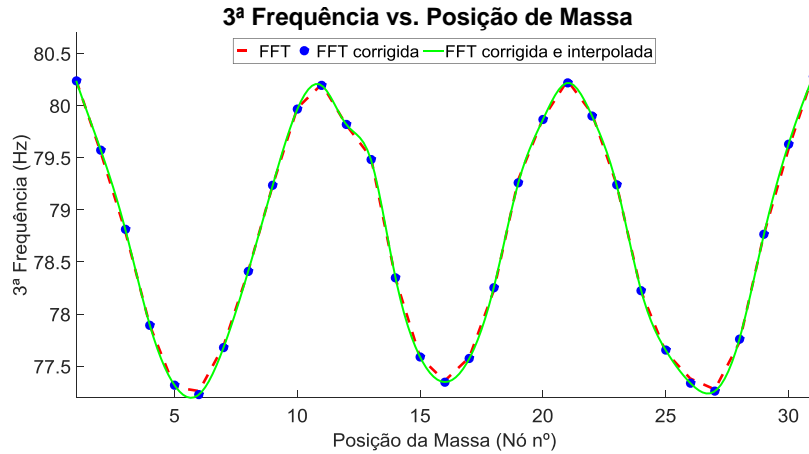
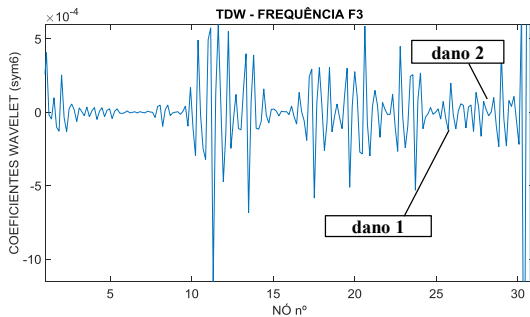
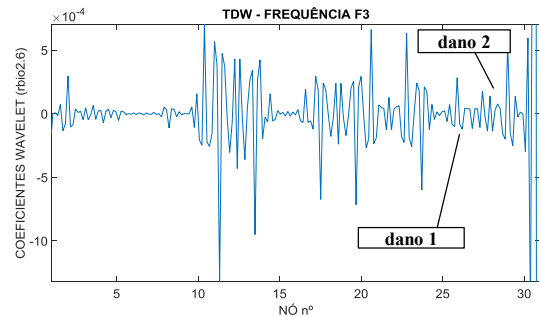


Figura 5.163 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 5.

Os resultados da aplicação das TDW são apresentados nas Figura 5.164 e Figura 5.165.

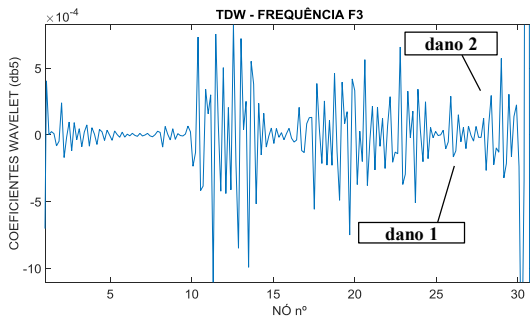


a) Symlet 6

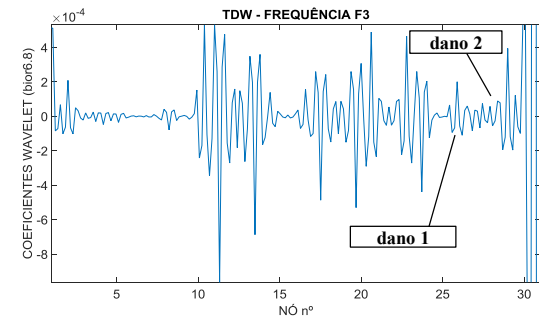


b) rbio2.6

Figura 5.164 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



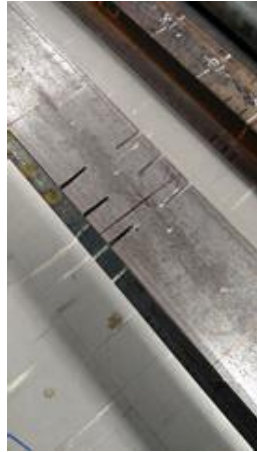
b) bior6.8

Figura 5.165 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas Figura 5.164 e Figura 5.165 são geradas perturbações em lugares diferente dos locais danificados.

5.12.10 –Caso 10 (dano 1 a 5,0 m com 3 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

Neste caso de dano (Caso 10), foi realizado mais um entalhe no nó 26 (Figura 5.166).



c) Dano 1 – nó 26



d) Dano 2 – nó 28

Figura 5.166 - Dano Caso 10.

5.12.10.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) M=3,266kg

Na Figura 5.167 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

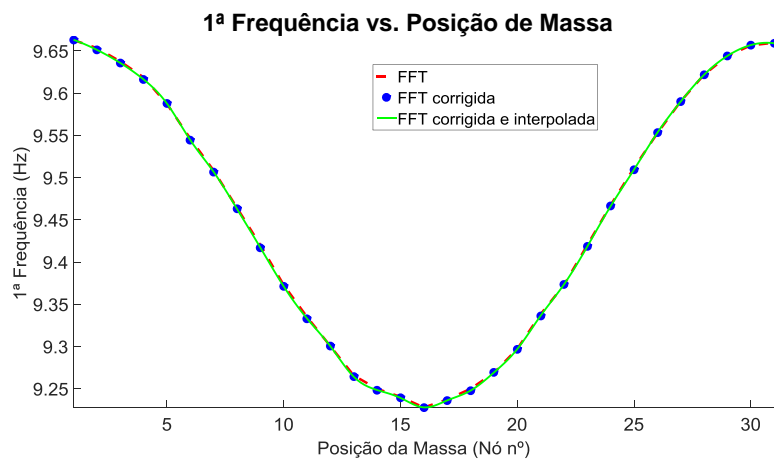
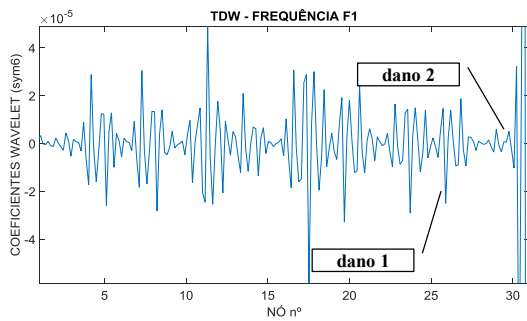
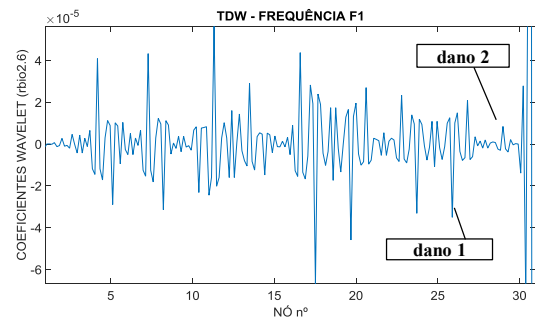


Figura 5.167 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

As Figura 5.168 e Figura 5.169 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

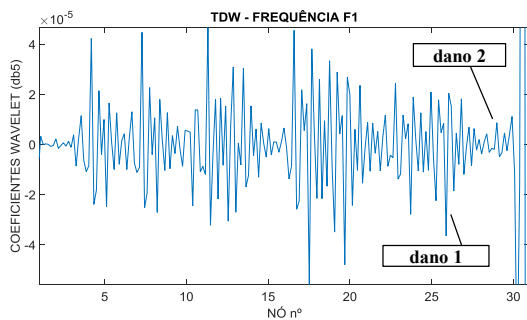


a) Symlet 6

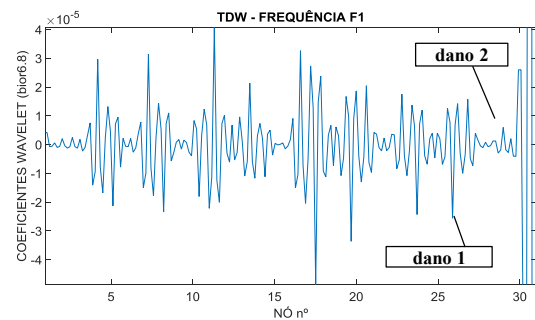


b) rbio2.6

Figura 5.168 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.169 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

O resultado da metodologia proposta nesta pesquisa não deram bons resultados. O sinal apresentou perturbação ao longo da viga, sem identificar claramente a posição do dano (nós 26 e 28).

5.12.10.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) M = 3,266 kg

Na Figura 5.170 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

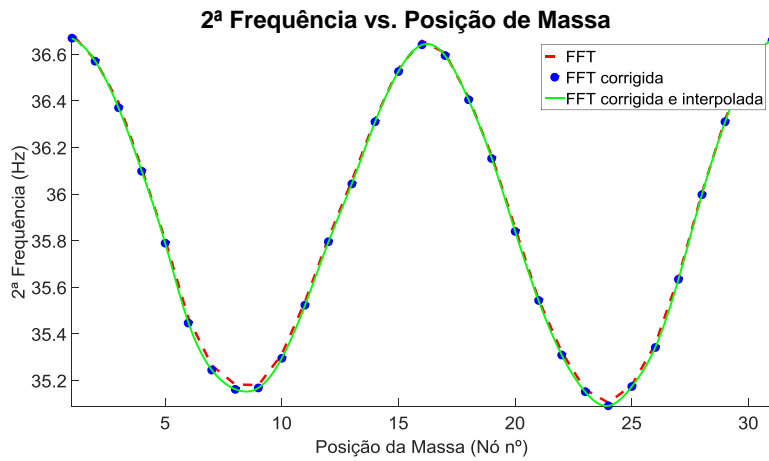
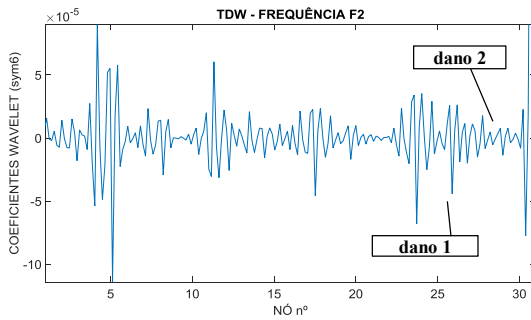
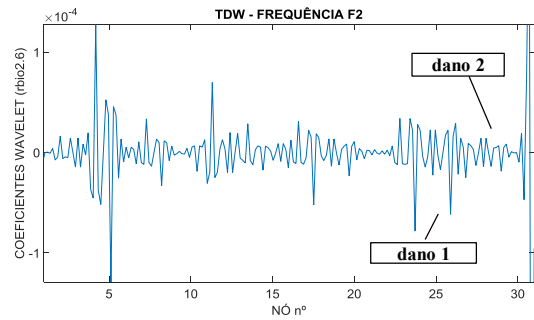


Figura 5.170 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

A Figura 5.171 e a Figura 5.172, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

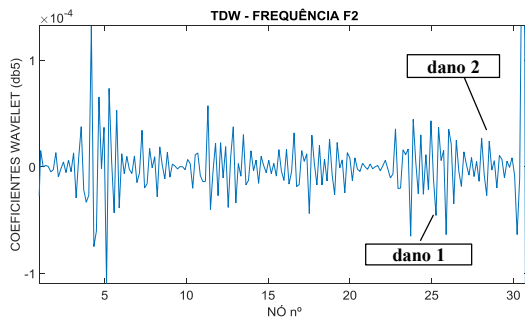


a) Symlet 6

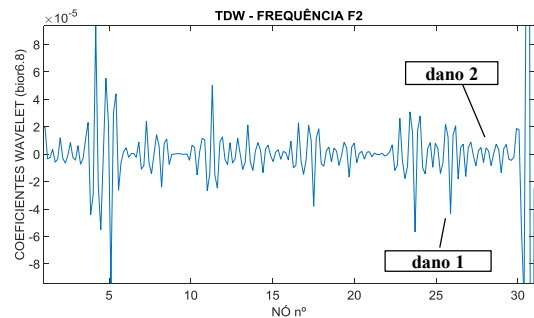


b) rbio2.6

Figura 5.171 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.172 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas Figura 5.171 e Figura 5.172 são geradas perturbações em lugares diferente dos locais danificados.

5.12.10.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) M = 3,266 kg

Na Figura 5.173 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

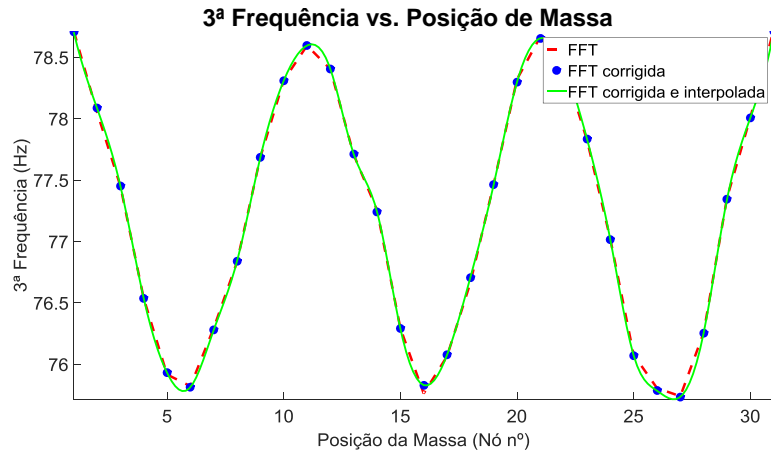


Figura 5.173 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

Os resultados da aplicação das TDW são apresentados nas Figura 5.174 e Figura 5.175.

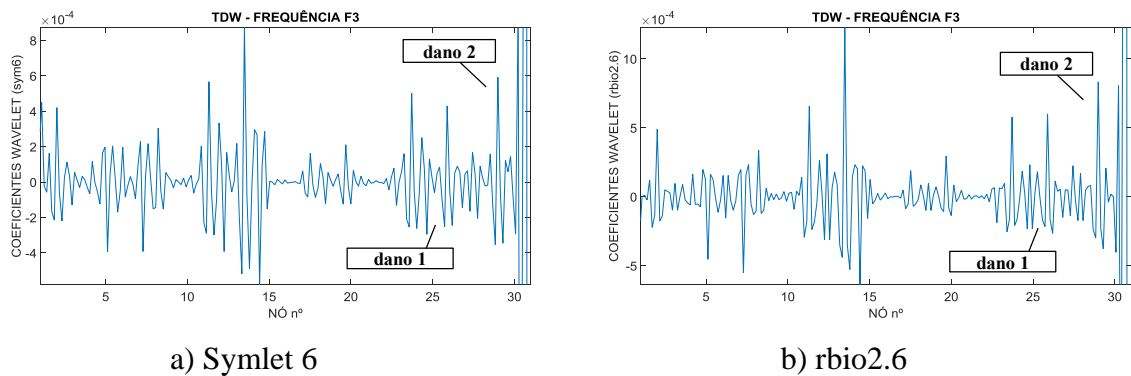


Figura 5.174 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

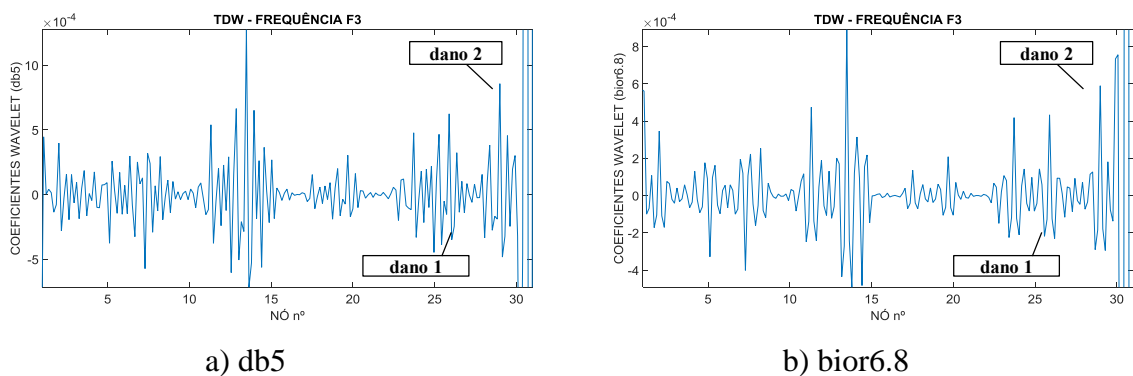
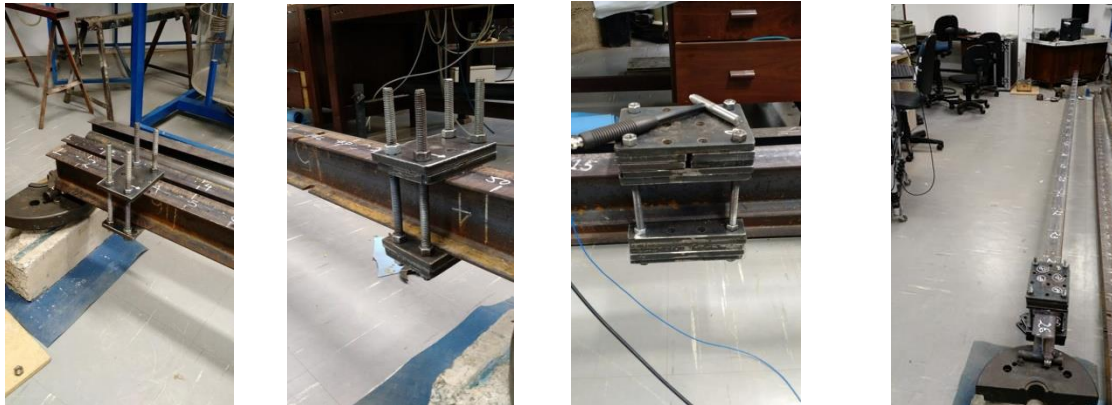


Figura 5.175 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

De acordo com os resultados obtidos anteriormente massa adicional de 3,266 kg não gerou a perturbação necessária nos locais danificados para lograr uma localização satisfatória. Por isto foi necessário testar as seguintes massas adicionais maiores (Figura 5.176):

- 5,526 kg;
- 17,69 kg;
- 24,718 kg;



a) Massa 3,266kg b) Massa 5,526kg c) Massa 17,69kg d) Massa 24,718kg

Figura 5.176 - Testes massa adicional Caso 10.

Os resultados utilizando a massa de 5,526 kg são apresentados no tópico seguinte.

5.12.10.4 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) M = 5,526 kg

Na Figura 5.177 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 5,526 kg.

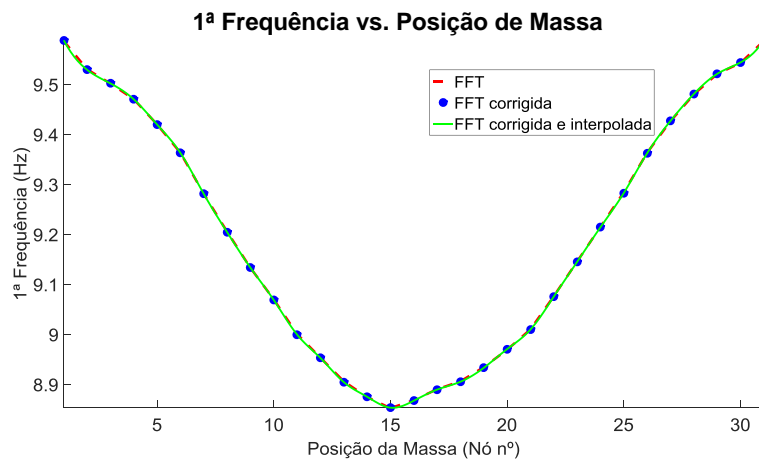
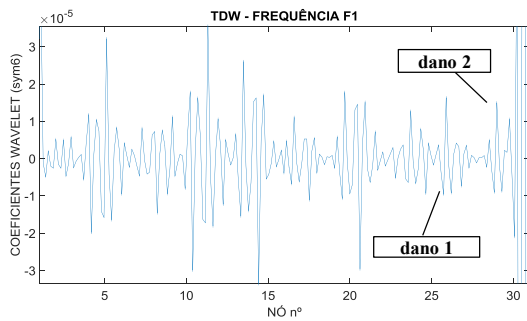
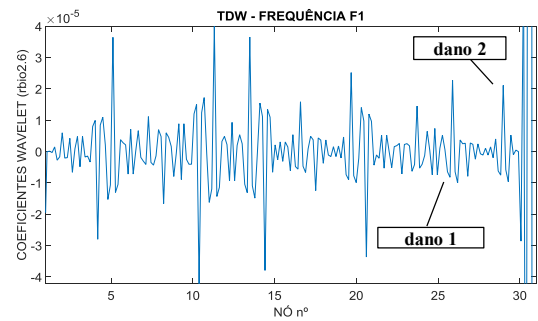


Figura 5.177 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

As Figura 5.178 e Figura 5.179 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

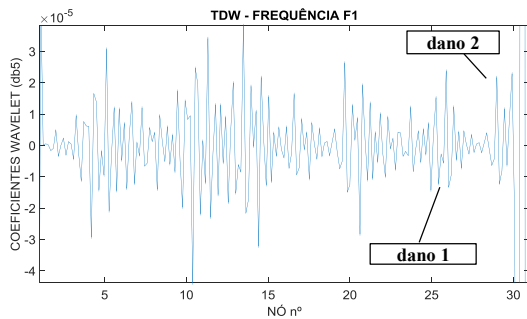


a) Symlet 6

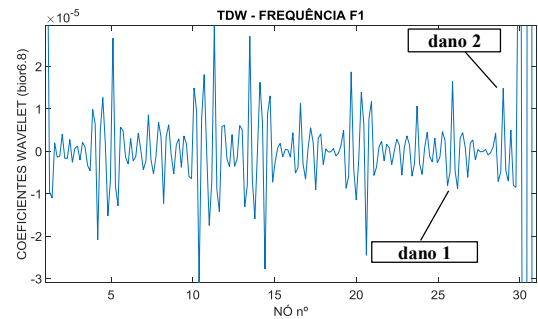


b) rbio2.6

Figura 5.178 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.179 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas Figura 5.178 e Figura 5.179 são geradas perturbações em lugares diferente dos locais danificados.

5.12.10.5 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) M = 5,526 kg

Na Figura 5.180 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 5,526 kg.

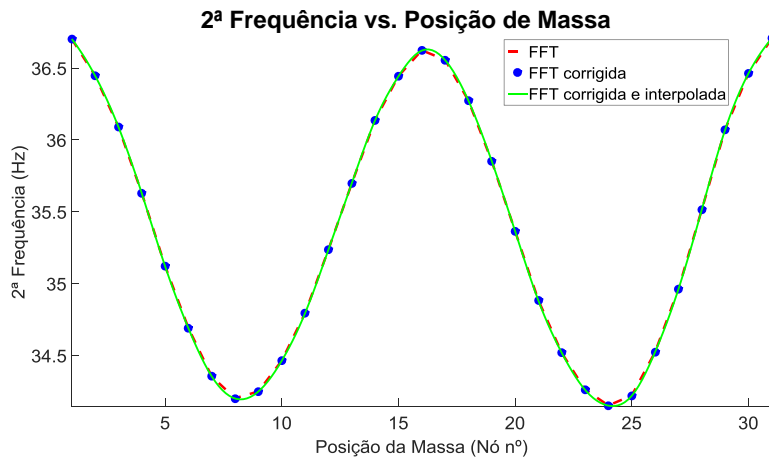
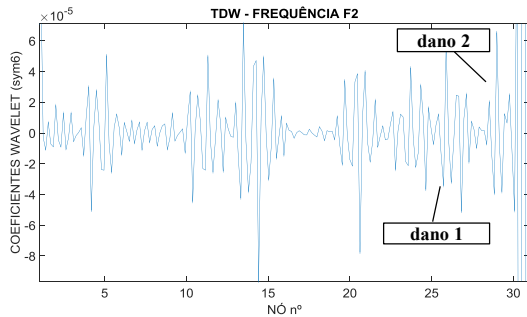
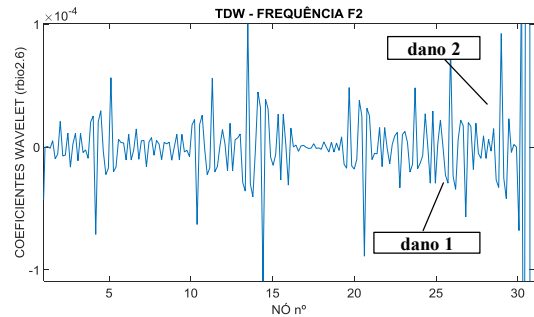


Figura 5.180 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

A Figura 5.181 e a Figura 5.182, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

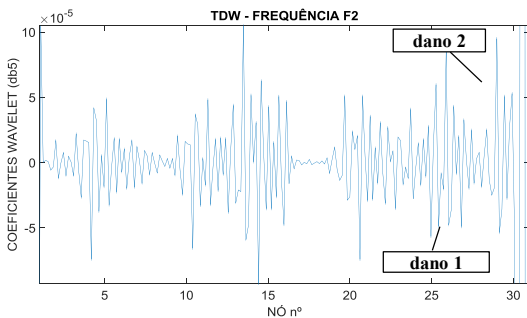


a) Symlet 6

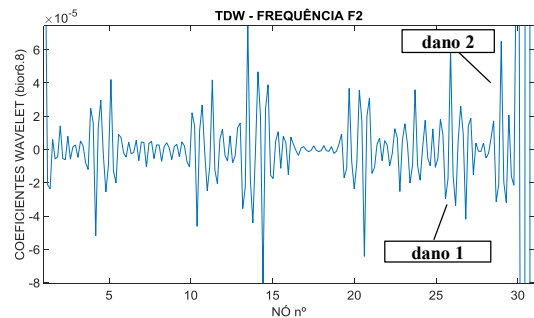


b) rbio2.6

Figura 5.181 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.182 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas Figura 5.181 e Figura 5.182 são geradas perturbações em lugares diferente dos locais danificados. Neste caso a metodologia proposta não atingiu os resultados esperados.

5.12.10.6 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) M = 5,526 kg

Na Figura 5.183 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 5,526 kg.

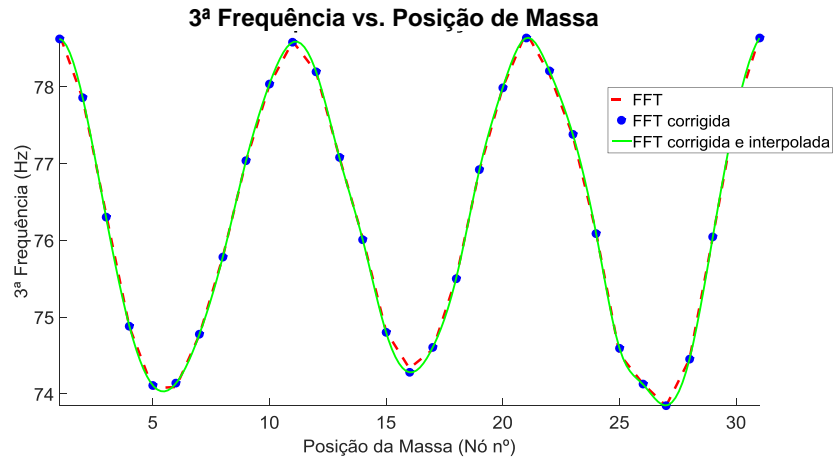
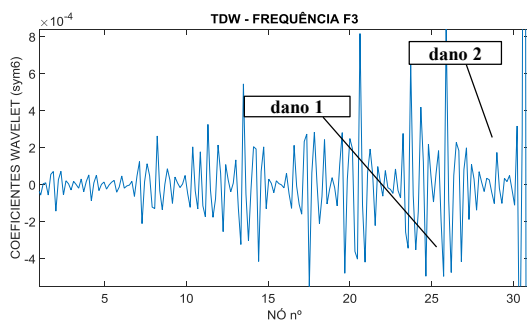
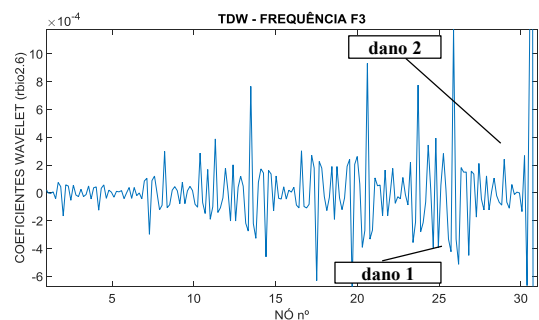


Figura 5.183 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

Os resultados da aplicação das TDW são apresentados nas Figura 5.184 e Figura 5.185.

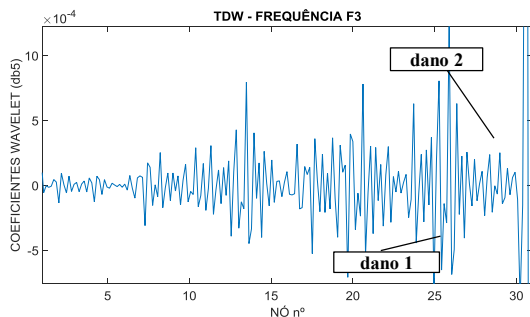


a) Symlet 6

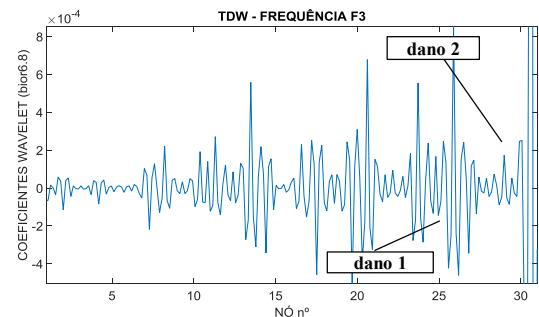


b) rbio2.6

Figura 5.184 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.185 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas Figura 5.184 e Figura 5.185 são geradas perturbações por volta do local danificado (nós 26 e 28).

Os resultados utilizando a massa de 17,69 kg são apresentados a seguir.

5.12.10.7 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) M = 17,69 kg

Na Figura 5.186 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 17,69 kg.

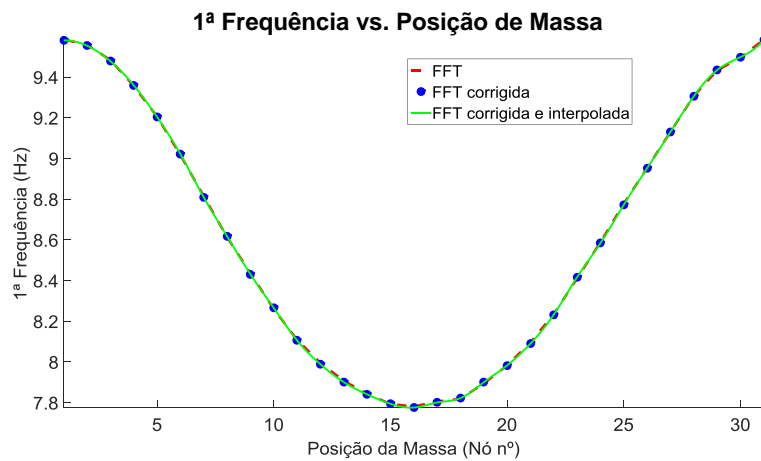


Figura 5.186 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

A Figura 5.187 e a Figura 5.188, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

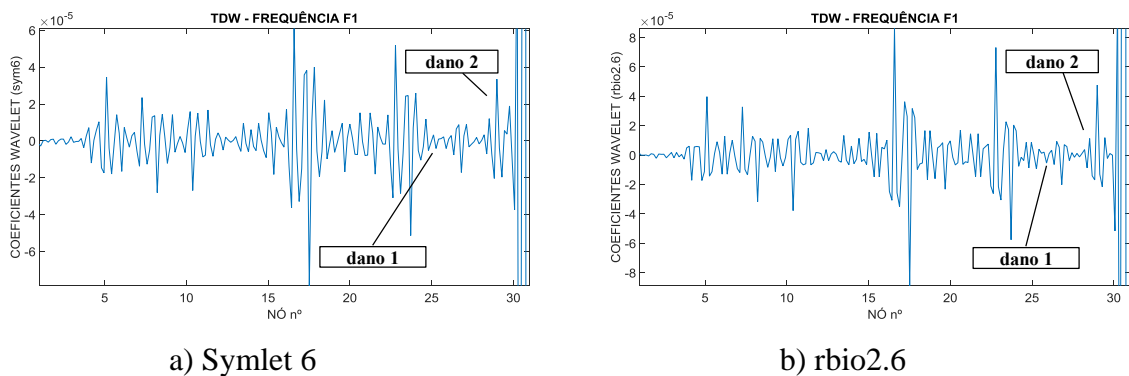


Figura 5.187 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

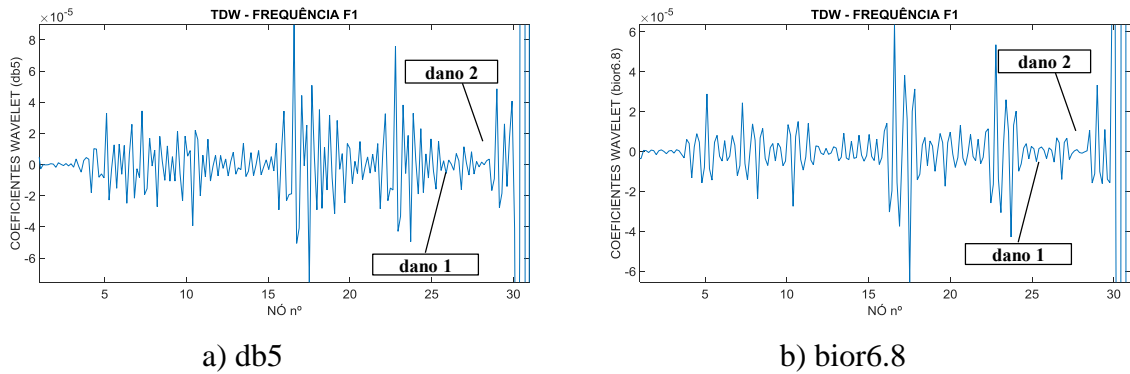


Figura 5.188 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas Figura 5.187 e Figura 5.188, são geradas perturbações em locais diferentes das posições dos danos (nós 26 e 28).

5.12.10.8 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) M = 17,69 kg

Na Figura 5.189 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 17,69 kg.

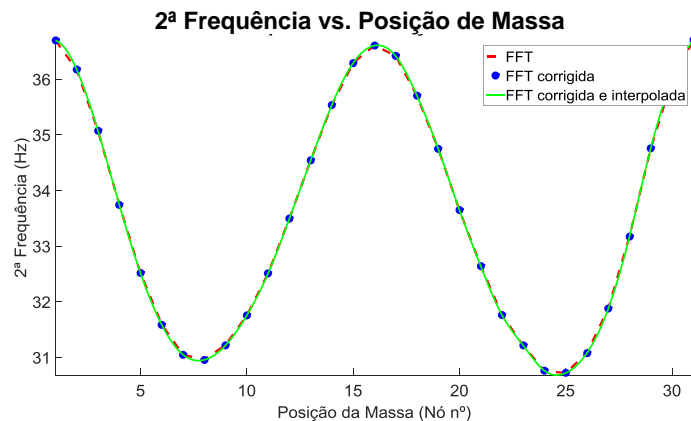


Figura 5.189 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

A Figura 5.190 e a Figura 5.191, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

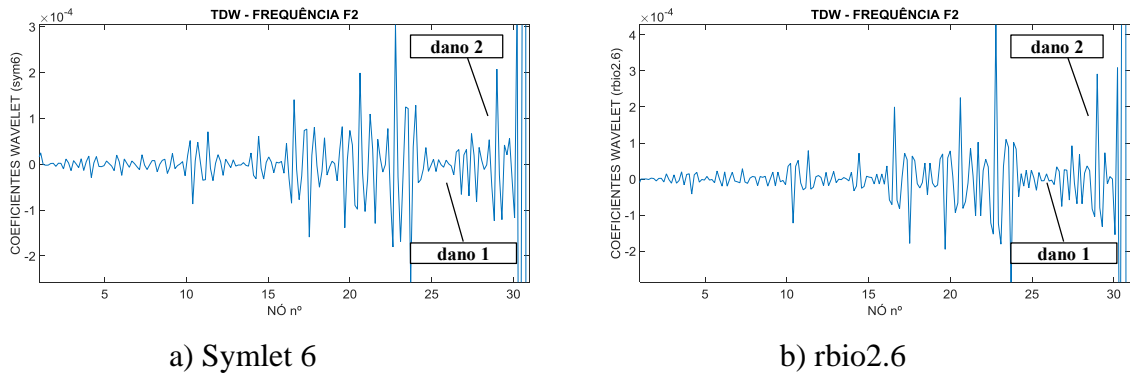


Figura 5.190 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).

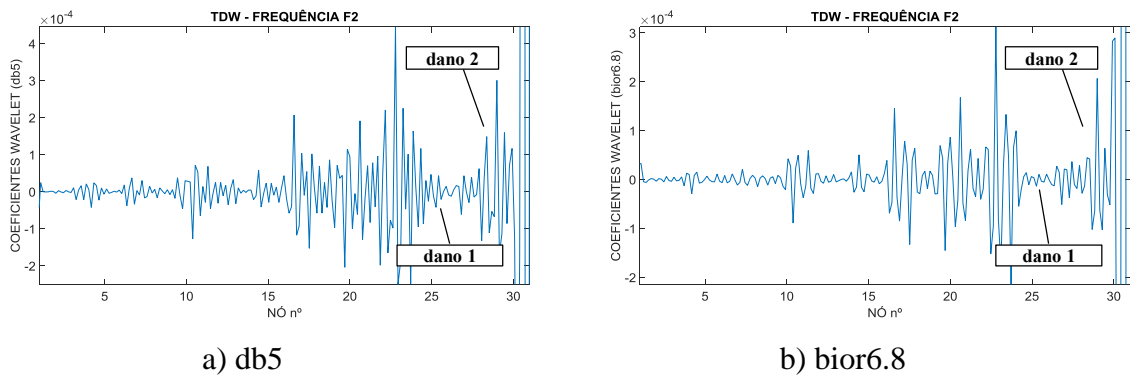


Figura 5.191 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Na Figura 5.190 e na Figura 5.191 são geradas próximas do local danificado (nós 26 e 28).

5.12.10.9 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) M = 17,69 kg

Na Figura 5.192 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 17,69 kg.

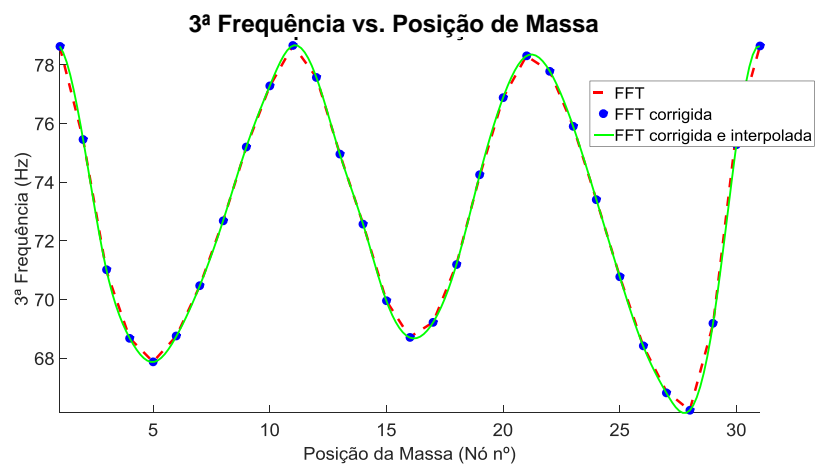
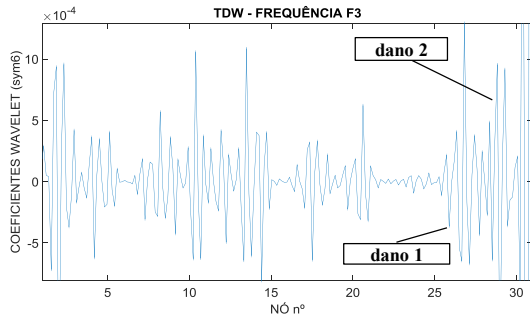
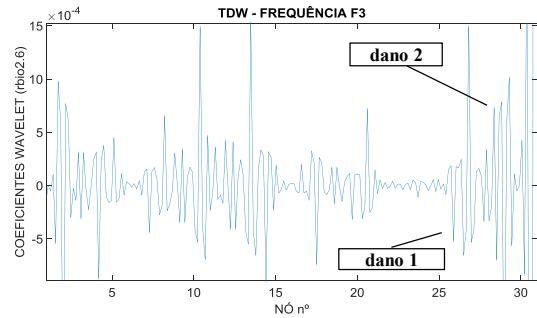


Figura 5.192 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

Os resultados da aplicação das TDW são apresentados nas Figura 5.193 e Figura 5.194.

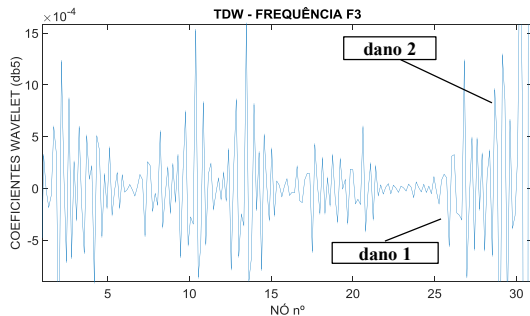


a) Symlet 6

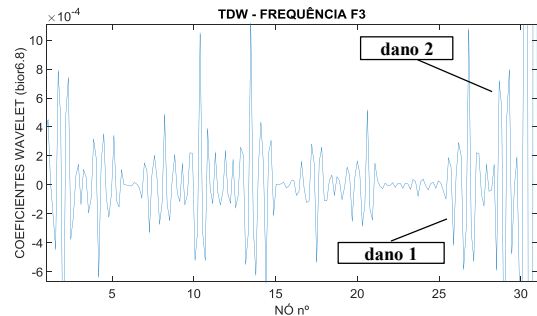


b) rbio2.6

Figura 5.193 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.194 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Na Figura 5.193 e na Figura 5.194, são geradas perturbações em locais diferentes aos danos (nós 26 e 28).

Os resultados utilizando a massa de 24,718 kg, são apresentados a seguir.

5.12.10.10 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) M = 24,718 kg

Na Figura 5.195 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 24,718 kg.

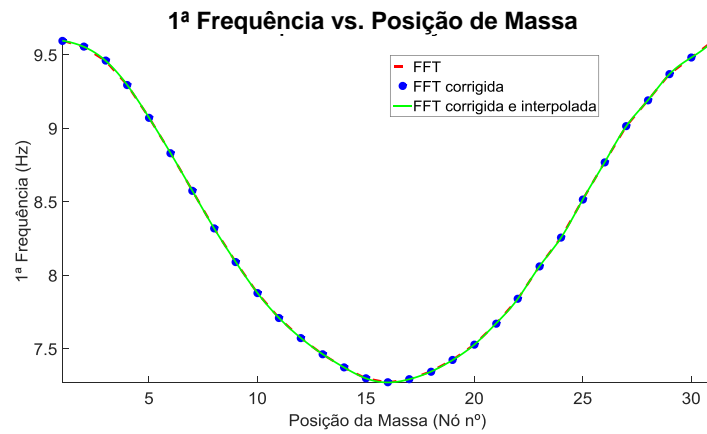
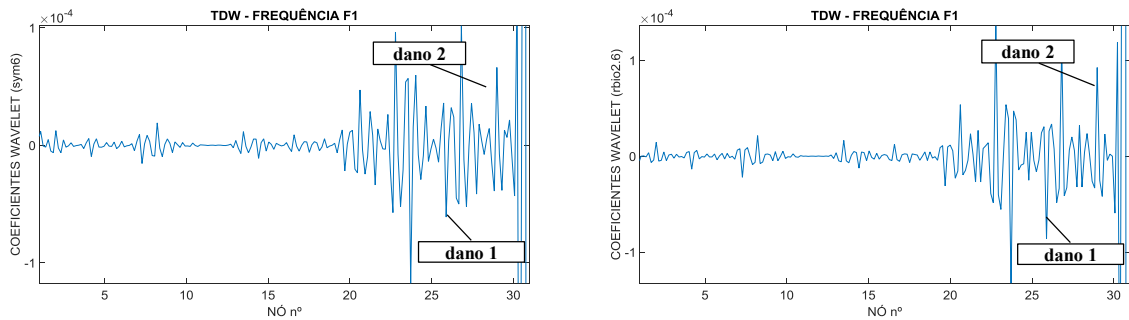


Figura 5.195 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

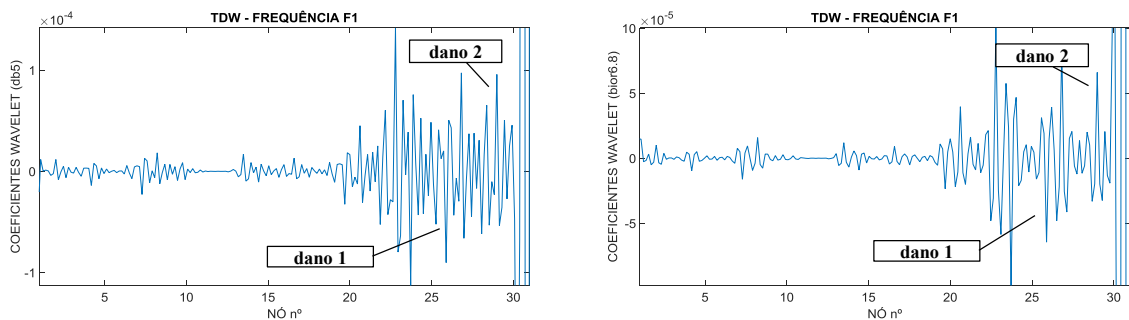
As Figura 5.196 e Figura 5.197 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 5.196 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5

b) bior6.8

Figura 5.197 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas Figura 5.196 e Figura 5.197 são geradas perturbações por volta do local danificado (nós 26 e 28).

5.12.10.11 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) M = 24,718 kg

Na Figura 5.198 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 24,718 kg.

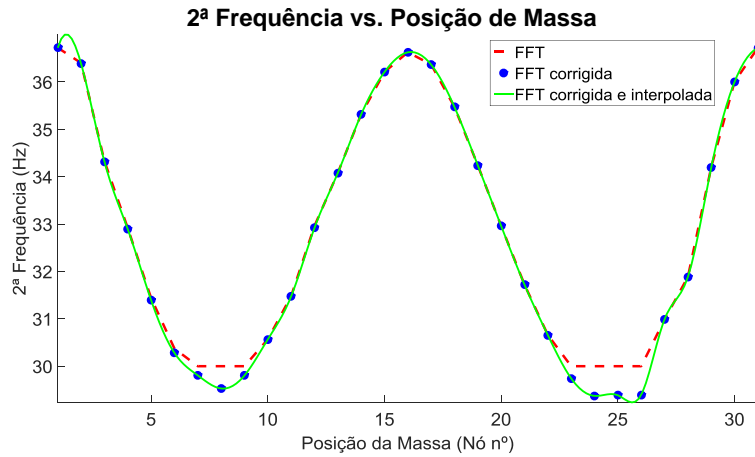


Figura 5.198 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

A Figura 5.199 e a Figura 5.200, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

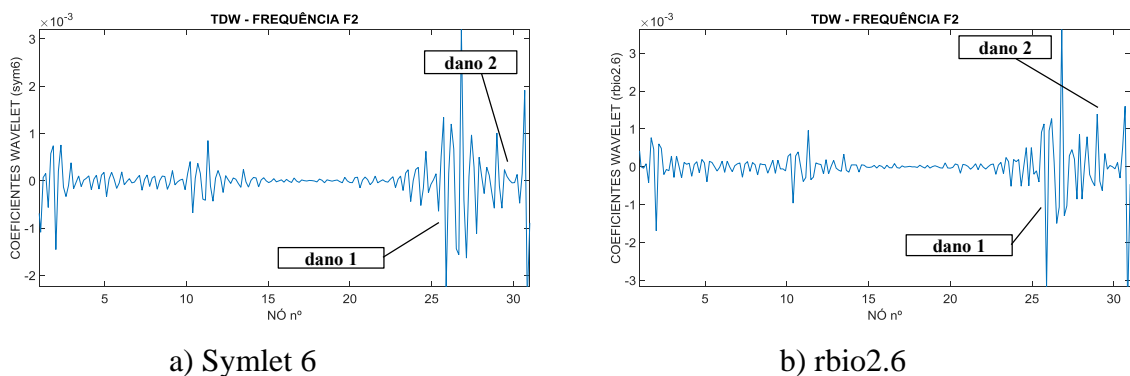


Figura 5.199 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).

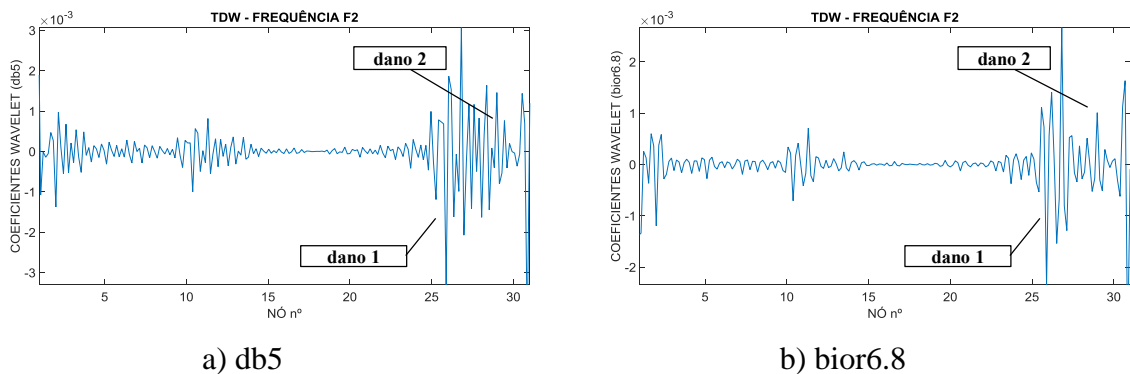


Figura 5.200 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas Figura 5.199 e Figura 5.200 são geradas perturbações por volta do local danificado (nós 26 e 28).

5.12.10.12 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) M = 24,718 kg

Na Figura 5.201 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 24,718 kg.

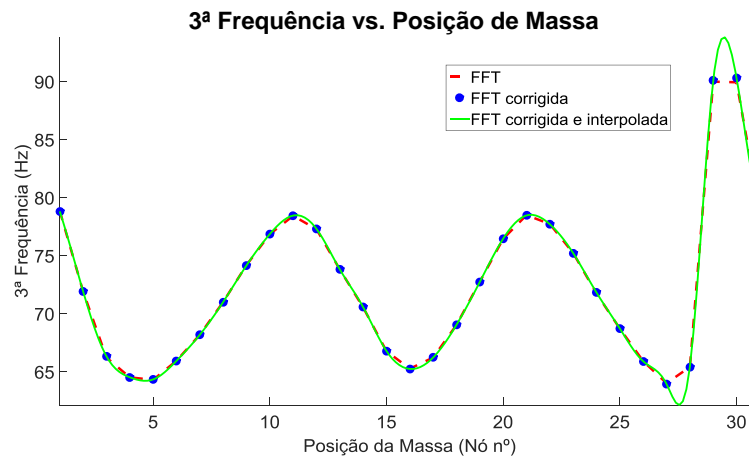
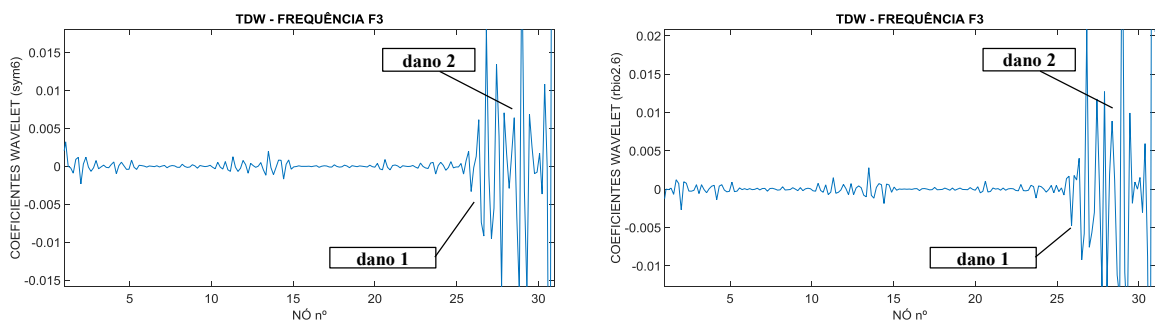


Figura 5.201- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

Os resultados da aplicação das TDW são apresentados nas Figura 5.202 e Figura 5.203.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 5.202 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

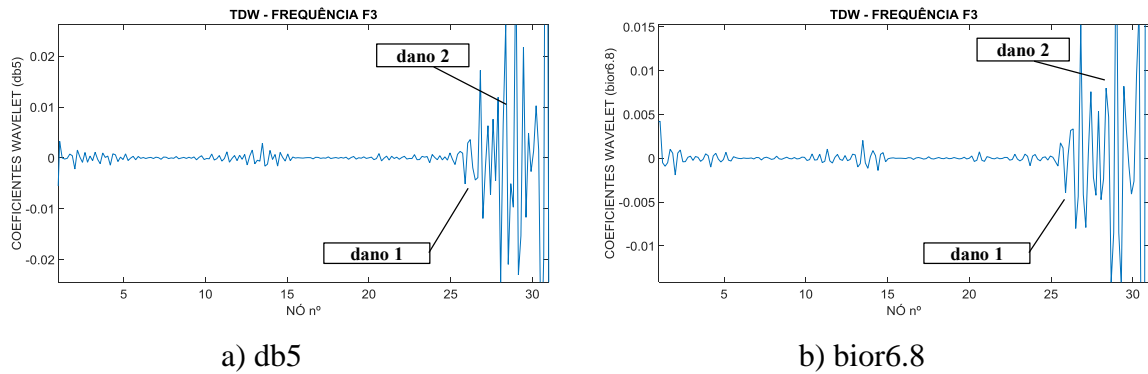


Figura 5.203 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

De acordo com os resultados apresentados anteriormente pode-se observar que utilizado ao massa de 3,266 kg não foram obtidos bons resultados, na medida que a massa adicional incrementou os resultados ficaram melhores.

Utilizando uma massa adicional de 5,526 kg e 17,69 kg apareceram perturbações na segunda frequência, nas posições do dano, já como a massa de 24,718 kg os resultados ficaram melhores, resultando em perturbações nas três frequências na região danificada da viga (nó26 e 27).

5.12.11 –Caso 11 (Viga intacta)

O caso 11 corresponde à viga intacta de 5 m de comprimento (Figura 5.204 e Figura 5.205), discretizada em 30 elementos (31 nós) e submetida a uma massa de 3,266 kg.

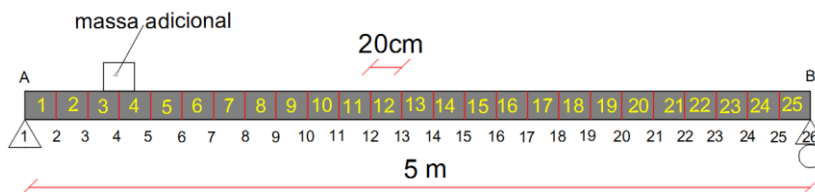


Figura 5.204 - Discretização da viga – Caso 11.



Figura 5.205 - Montagem experimental viga intacta – Caso 11.

5.12.11.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.206 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

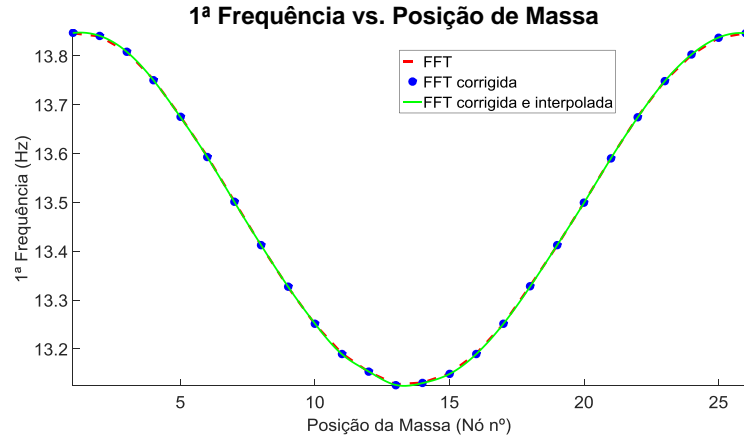
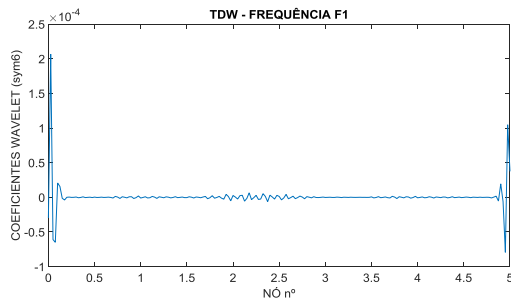
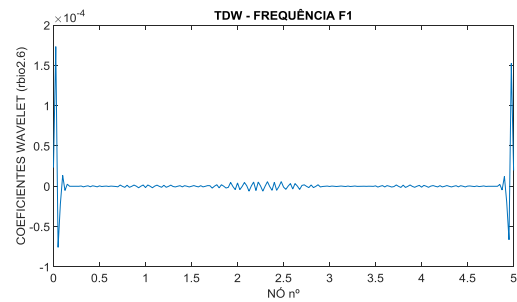


Figura 5.206 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 11.

As Figura 5.207 e Figura 5.208 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

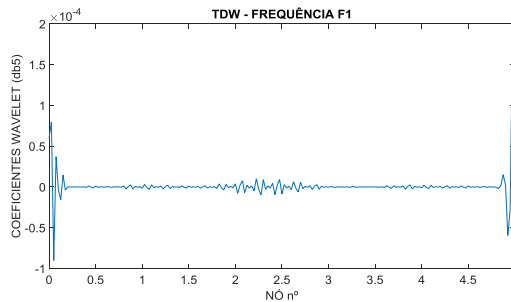


a) Symlet 6

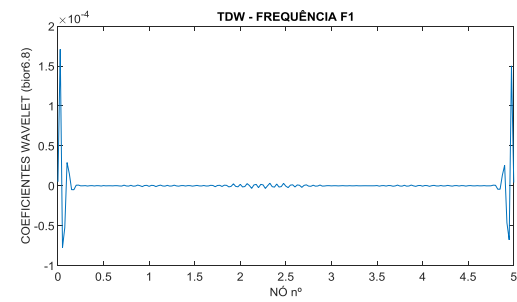


b) rbio2.6

Figura 5.207- Caso 11 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.208 - Caso 11 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas Figura 5.207 e Figura 5.208, observa-se a amplitude das perturbações geradas nos gráficos dos coeficiente Waveletes são significativamente menores em relação aos coeficientes Waveletes gerados nas vigas danificadas.

5.12.11.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.209 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

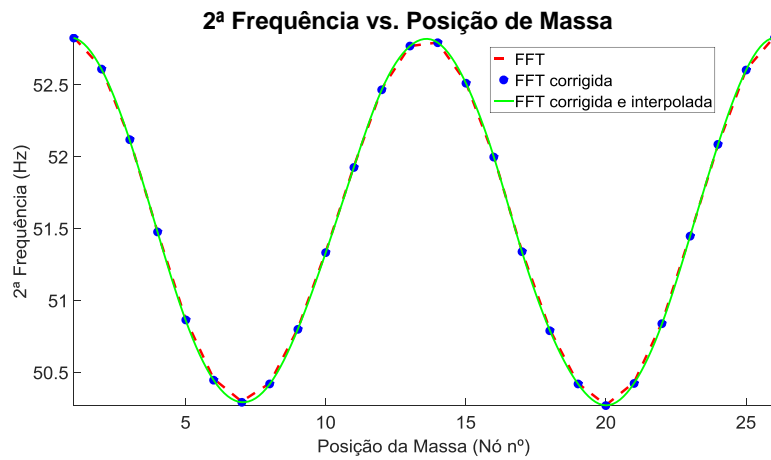
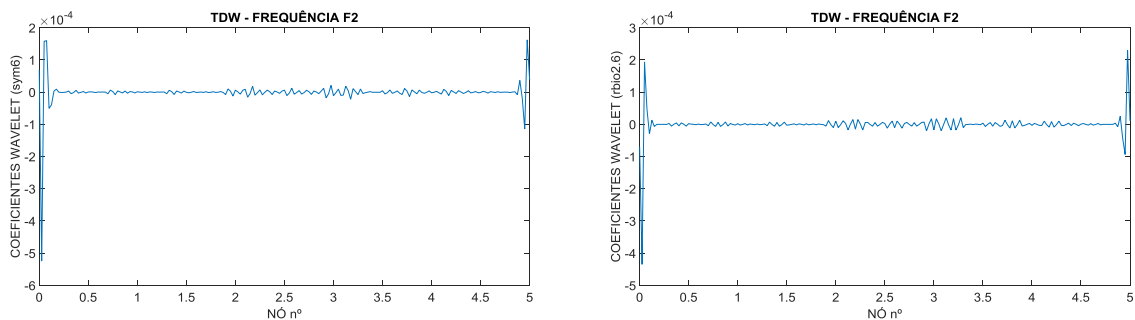


Figura 5.209 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 11.

As Figura 5.210 e a Figura 5.211, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 5.210 - Caso 11 – TDW – segunda Frequência (F2).

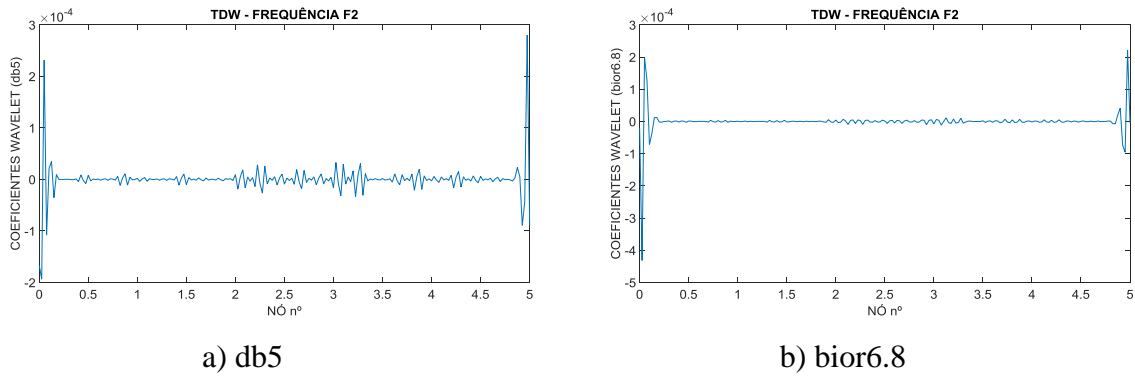


Figura 5.211 - Caso 12 – TDW – segunda Frequência (F2).

Nas Figura 5.210 e Figura 5.211, observa-se a amplitude das perturbações geradas nos gráficos dos coeficiente waveletes são significativamente menores em relação aos coeficientes waveletes gerados nas vigas danificadas.

5.12.11.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.212 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 26 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

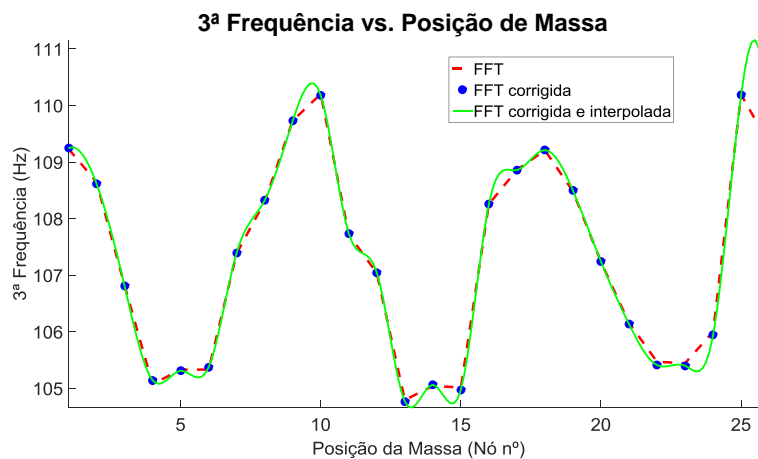
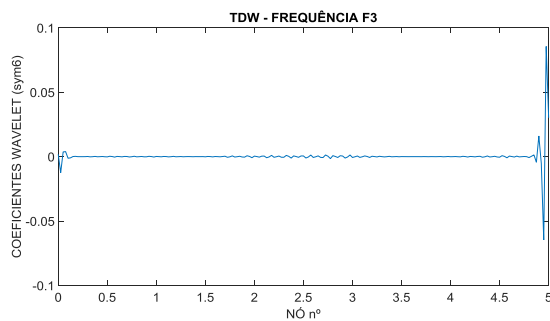
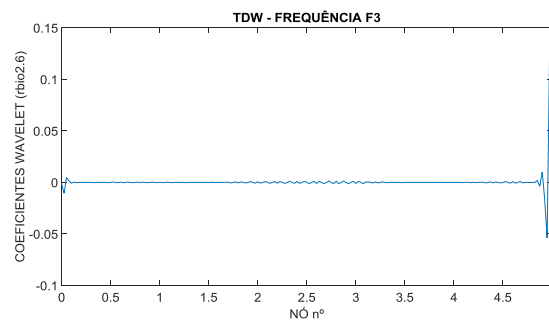


Figura 5.212 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 11.

As Figura 5.213 e Figura 5.214 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

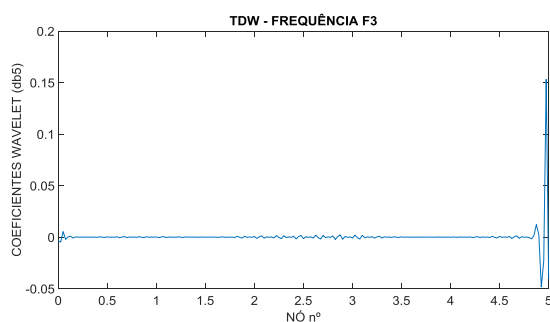


a) Symlet 6

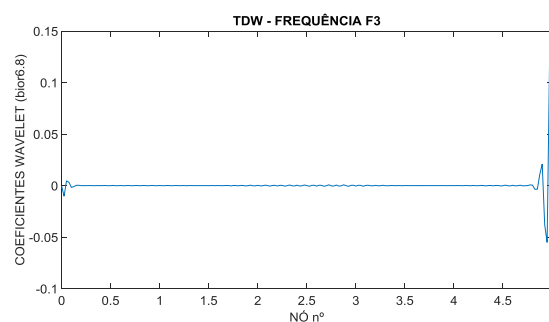


b) rbio2.6

Figura 5.213 - Caso 11 – TDW – terceira Frequência (F3).



a) db5



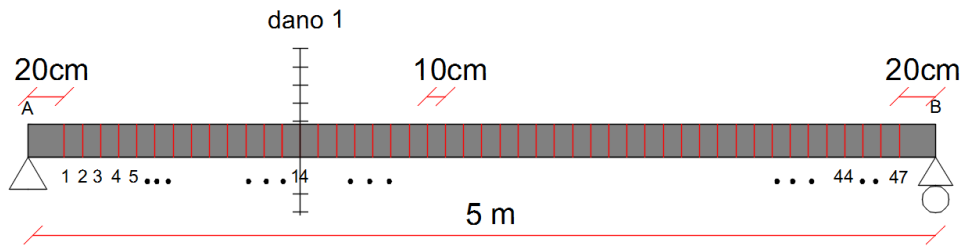
b) bior6.8

Figura 5.214 - Caso 11 – TDW – terceira Frequência (F3).

Nas Figura 5.213 e Figura 5.214, observa-se a amplitude das perturbações geradas nos gráficos dos coeficiente Waveletes são significativamente menores em relação aos coeficientes Waveletes gerados nas vigas danificadas, mesmo considerando a perturbação gerada pelo ruído e à falta de energia para excitar a terceira frequência.

5.12.12 – Caso 12 (dano 1 a 1,5 m com 1 entalhe)

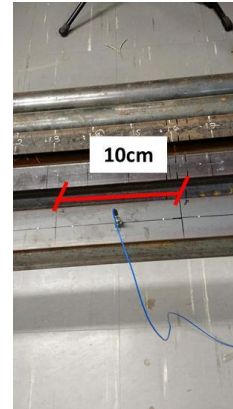
O caso 12 corresponde a viga metálica de 5 m de comprimento com 1 dano localizado a 1,5 m do apoio esquerdo (Figura 5.215). Neste caso de dano foi adotada uma configuração de discretização diferentes as adotadas nos casos 1 ao 4, correspondentes a viga de 5 m. A discretização utilizada foi com elementos de 10 cm de comprimento, com o primeiro e o último nó (nó 1 e 47) localizados a 20 cm dos apoios respetivamente. Desta forma, a posição de dano proposta (dano 1) coincide com o nó 14.



a) Posição de dano – Caso 12.



b) Montagem ensaio Caso 12.



c) Discretização ensaio Caso 12.

Figura 5.215 - Discretização da viga – Caso 12.

Neste ensaio foram utilizadas dois valores de massa adicional: 3,266 kg e 20,104 kg, para estabelecer se o aumento de massa influencia na identificação de danos próximos aos apoios.

A seguir são apresentados os resultados da metodologia proposta utilizando uma massa de 3,266 kg.

5.12.12.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) M = 3,266 kg

Na Figura 5.216 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

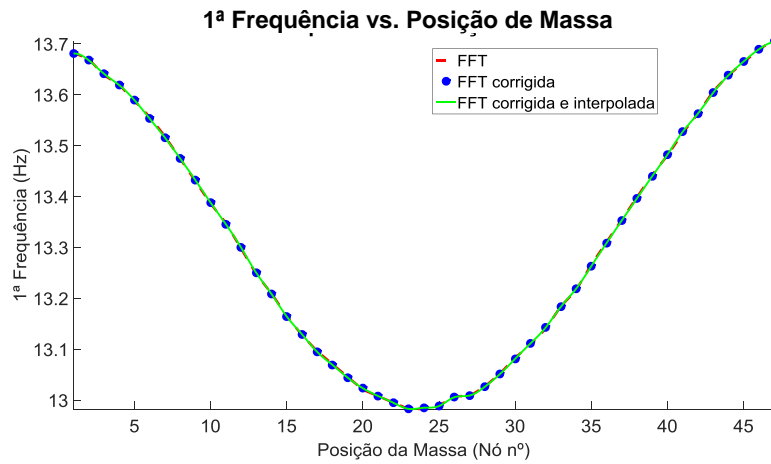
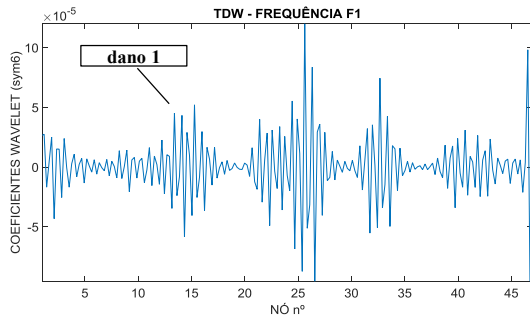
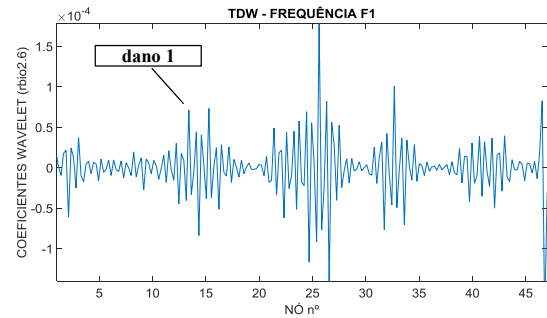


Figura 5.216 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 12.

A Figura 5.217 e a Figura 5.218, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

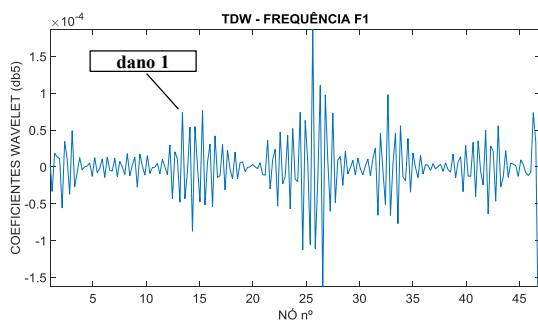


a) Symlet 6

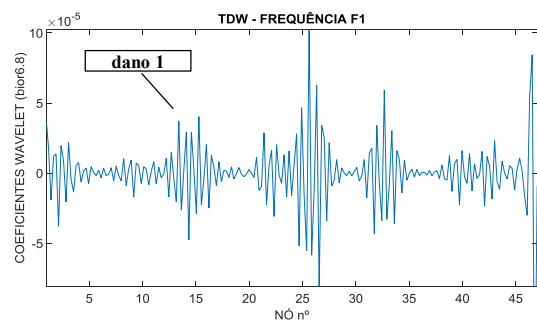


b) rbio2.6

Figura 5.217 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.218 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).

As Figura 5.217 e Figura 5.218 não apresentaram bons resultados.

5.12.12.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) M = 3,266 kg

Na Figura 5.219 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

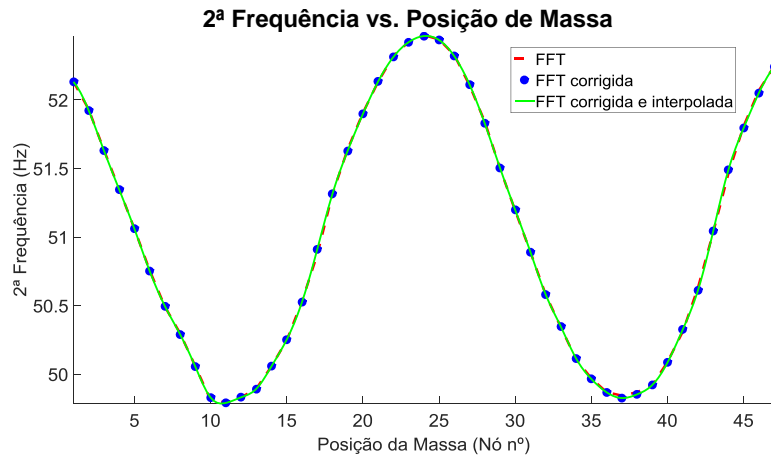
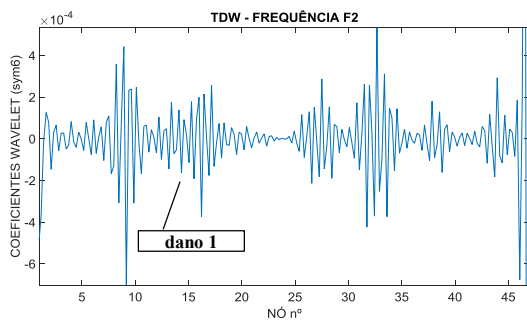
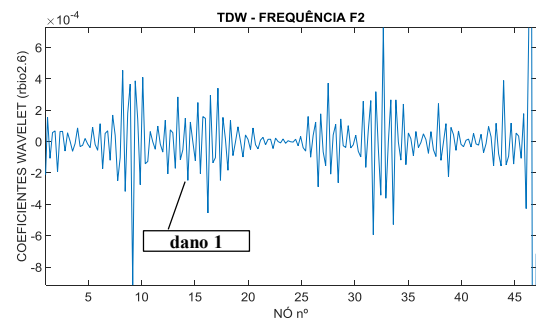


Figura 5.219 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso12.

A Figura 5.220 e a Figura 5.221, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

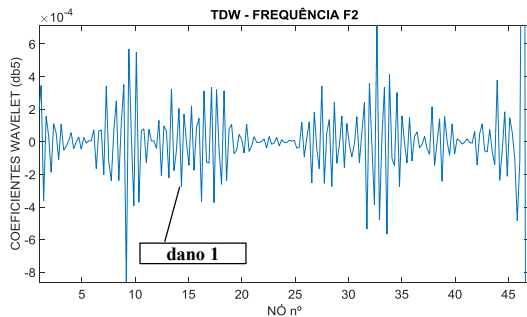


a) Symlet 6

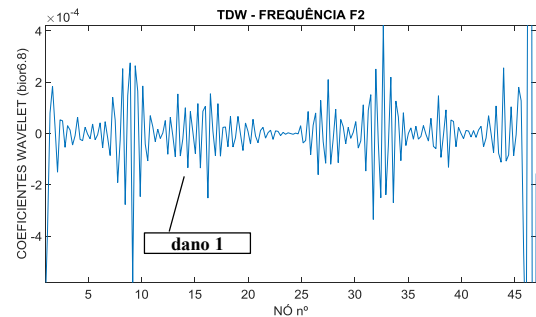


b) rbio2.6

Figura 5.220 - Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.221 - Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2).

A Figura 5.220 e a Figura 5.221, não apresentaram os resultados esperados.

5.12.12.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) M=3,266kg

Na Figura 5.222 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

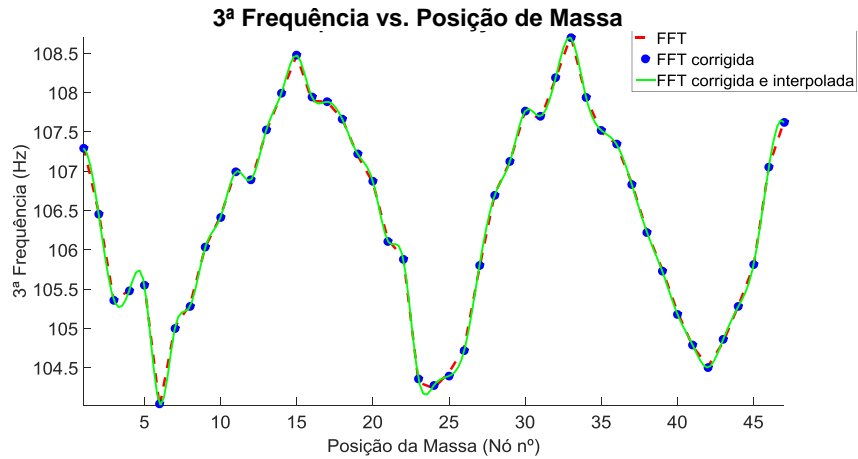
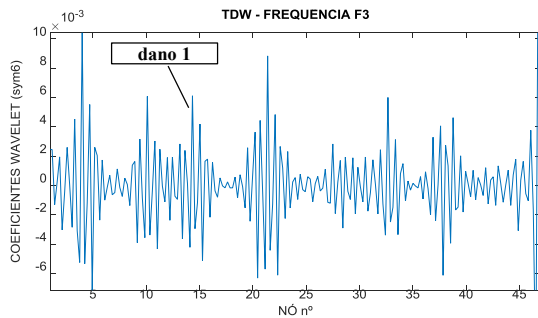
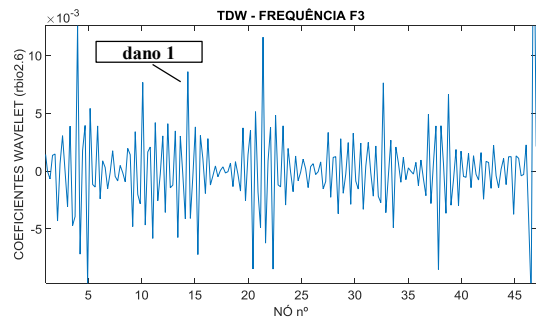


Figura 5.222 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 12.

Mesmo considerando a perturbação gerada no gráfico anterior (Figura 5.222), foram aplicadas as TDW. Os resultados são apresentados nas Figura 5.223 e Figura 5.224.



a) Symlet 6



b) rbio2.6

Figura 5.223 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 12.

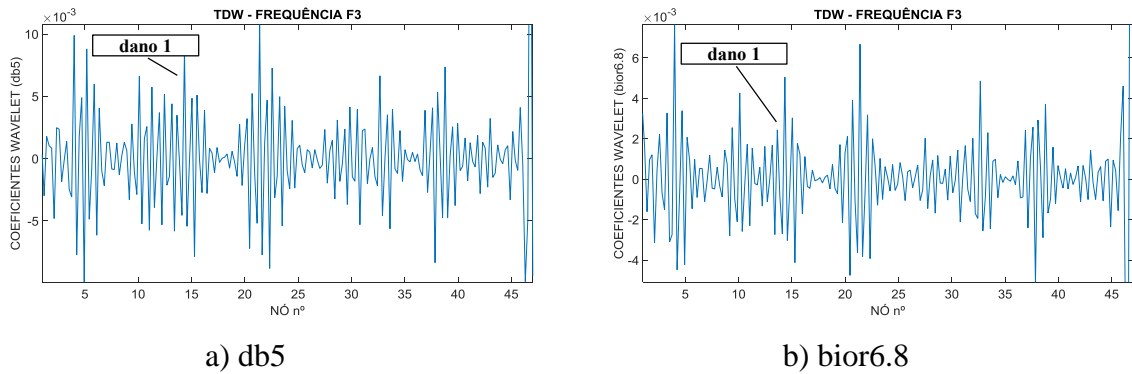


Figura 5.224 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 12.

Nos gráficos das três frequências não foi possível identificar o dano localizado a 1,5 m (nó 14).

A seguir são apresentados os resultados utilizando uma massa adicional $M = 20,204$ kg.

5.12.12.4 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) $M = 20,204$ kg

Na Figura 5.225 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm).

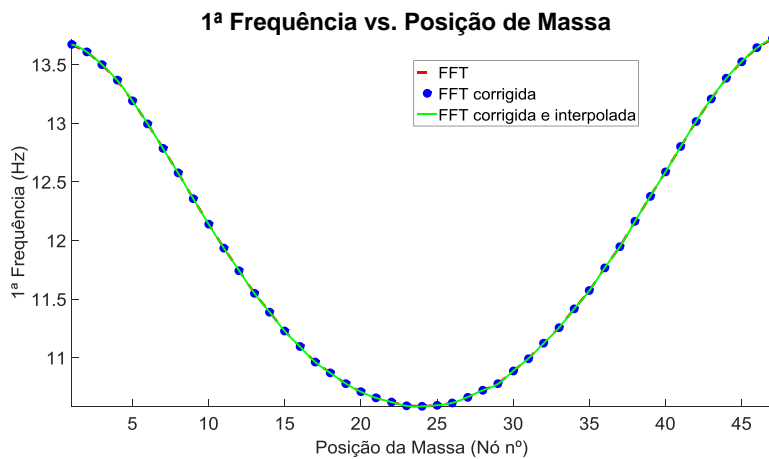
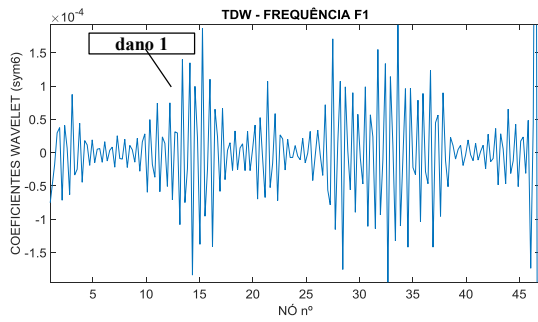
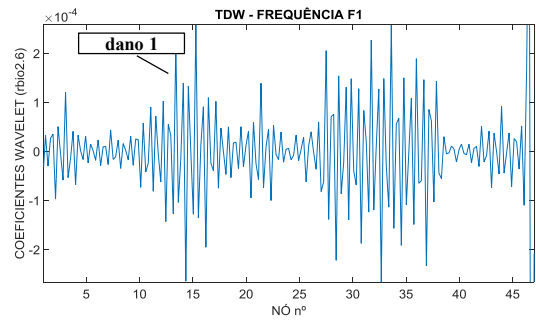


Figura 5.225 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 12.

A Figura 5.226 e a Figura 5.227, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

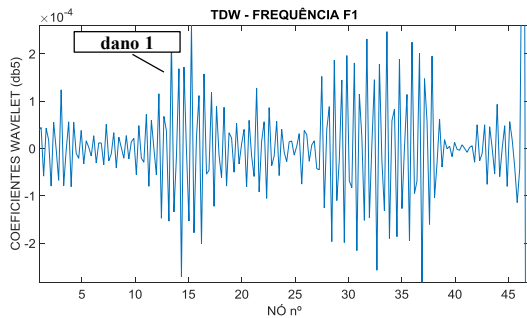


a) Symlet 6

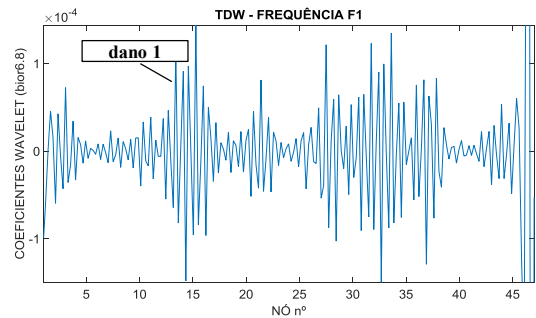


b) rbio2.6

Figura 5.226 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.227 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).

5.12.12.5 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) M=20,204kg

Na Figura 5.228 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm).

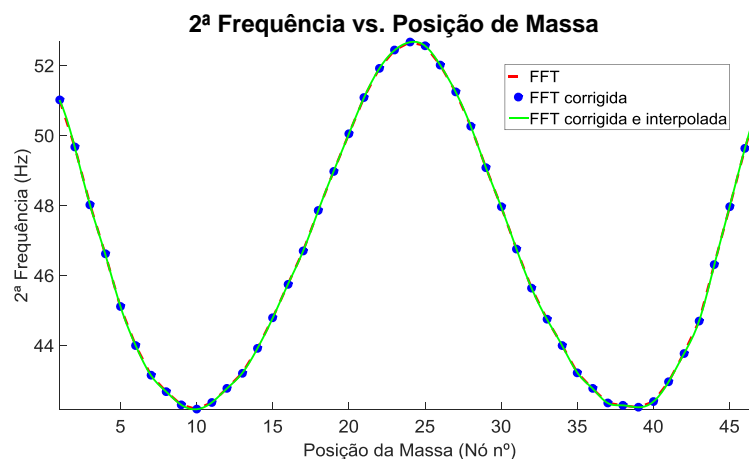
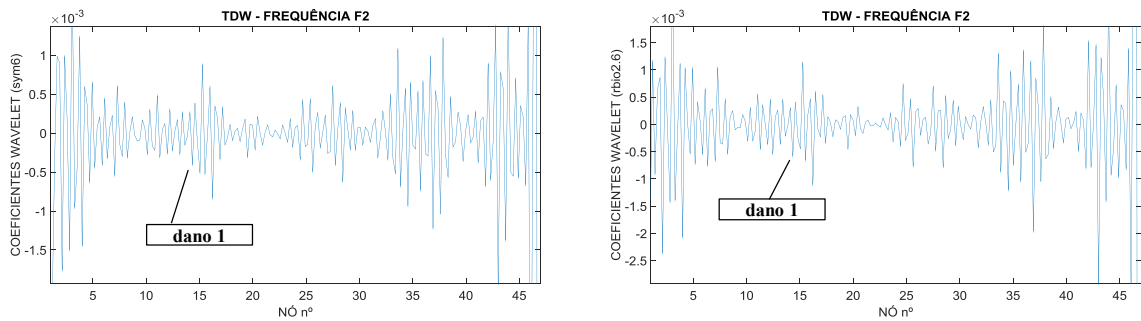


Figura 5.228 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso12.

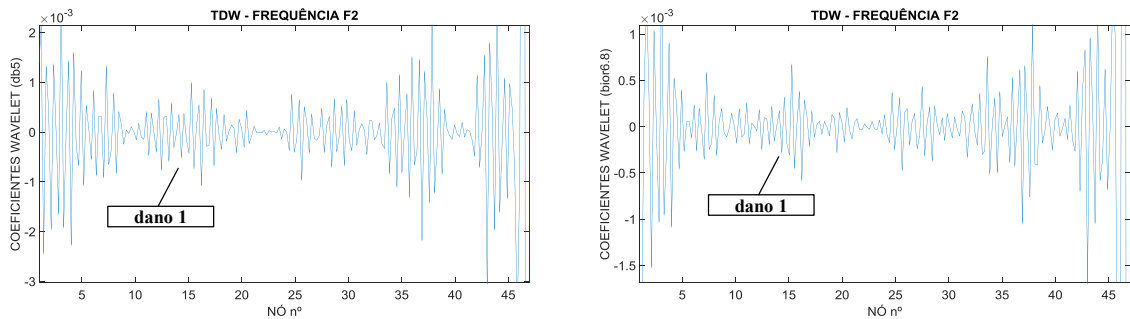
A Figura 5.229 e a Figura 5.230, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 5.229 - Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5

b) bior6.8

Figura 5.230 - Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2).

5.12.12.6 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) M = 20,204 kg

Na Figura 5.231 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

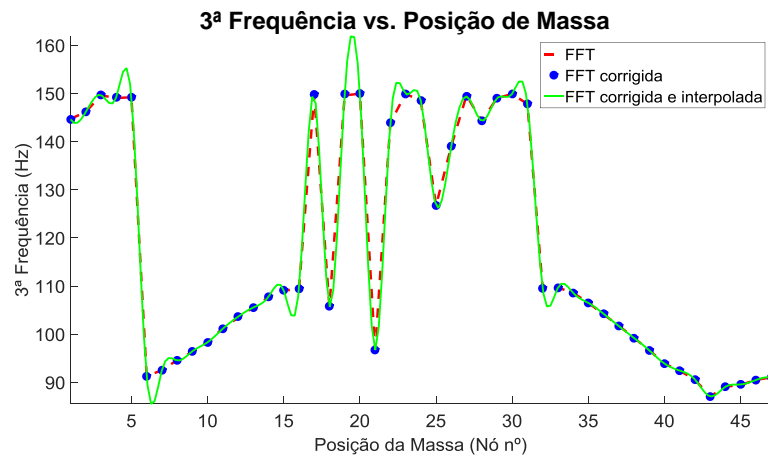
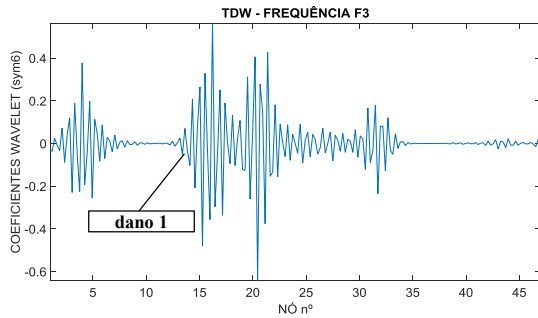
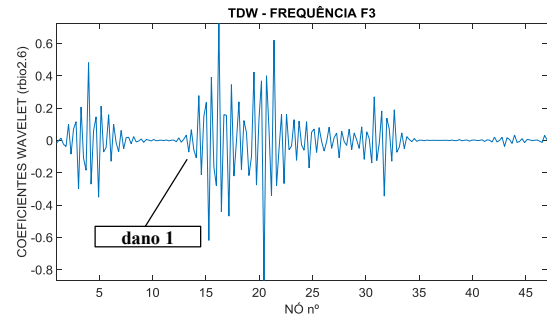


Figura 5.231 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 12.

Mesmo considerando a perturbação gerada no gráfico anterior (Figura 5.231), foram aplicadas as TDW. Os resultados são apresentados nas Figura 5.232 e Figura 5.233.

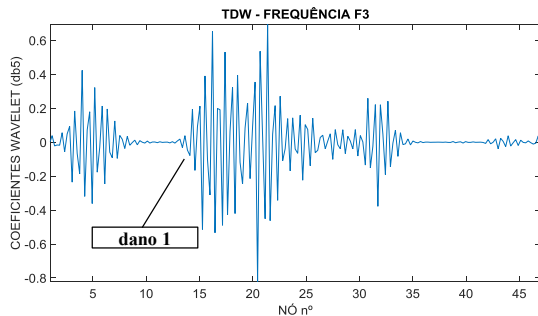


a) Symlet 6

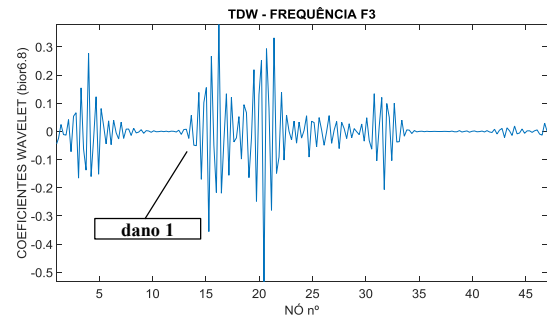


b) rbio2.6

Figura 5.232 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 12.



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.233 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3) - Caso 12.

Nos gráficos das três frequências (Figura 5.225 a Figura 5.233) e mudando a massa adicional não foi possível identificar o dano localizado a 1,5 m (nó 14).

5.12.13 – Caso 13 (dano 1 a 1,5 m com 2 entalhes)

O Caso 13 corresponde a viga metálica de 5 m de comprimento utilizada no Caso 12 com um entalhe a mais, localizado a 2,5 cm (Figura 5.234).

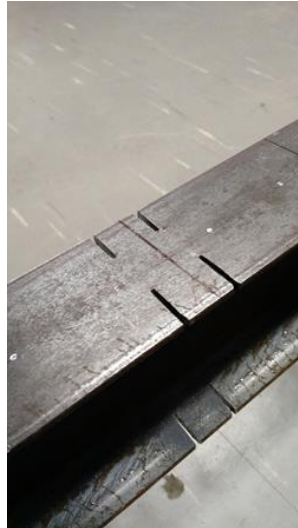


Figura 5.234 - Caso 13.

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios com uma massa adicional (M) de 3,266 kg.

5.12.13.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) M = 3,266 kg

Na Figura 5.235 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

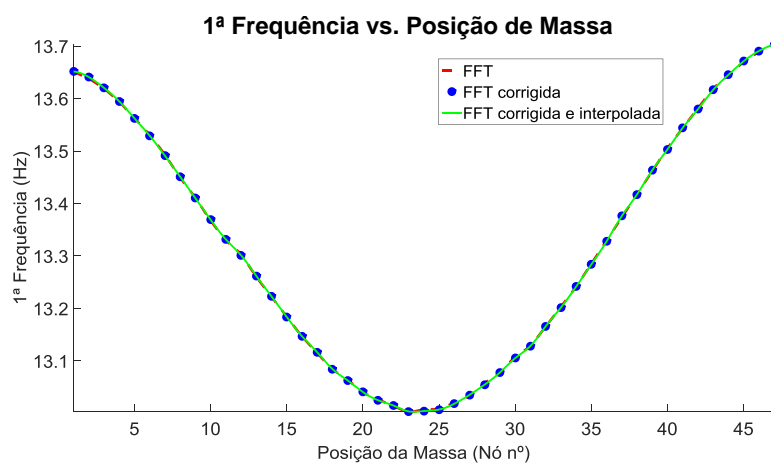
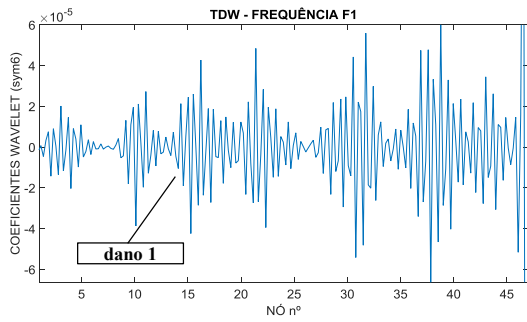
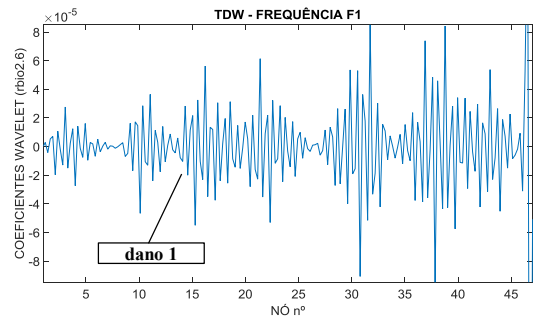


Figura 5.235 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 13.

A Figura 5.236 e a Figura 5.237, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

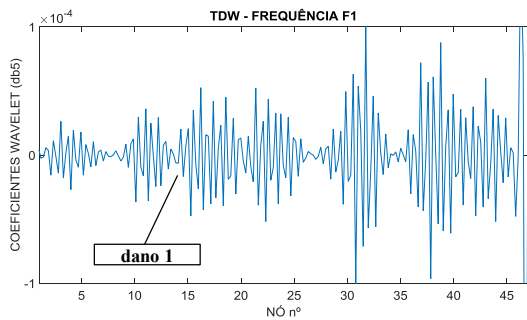


a) Symlet 6

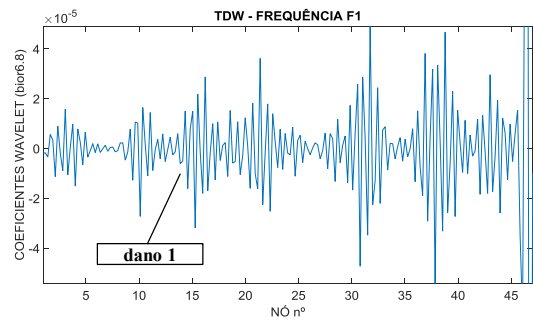


b) rbio2.6

Figura 5.236 - Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.237 - Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1).

5.12.13.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) M = 3,266 kg

Na Figura 5.238 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

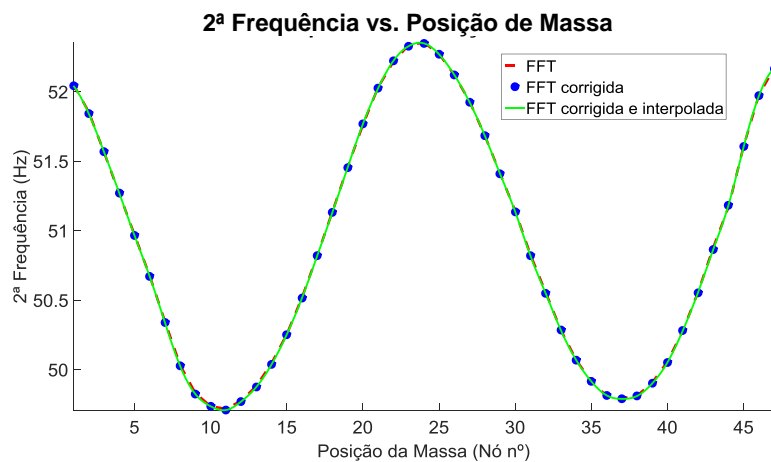
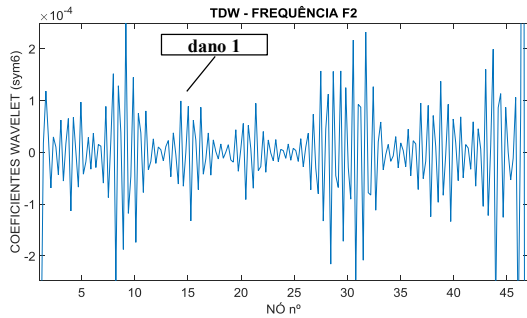
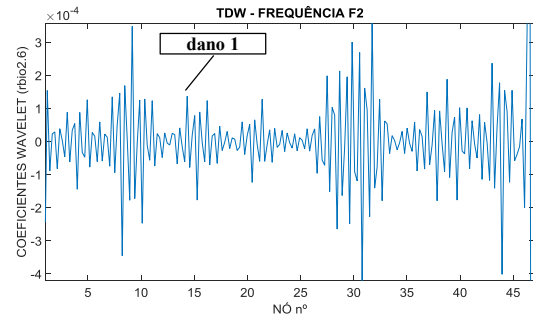


Figura 5.238 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso13.

A Figura 5.239 e a Figura 5.240, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

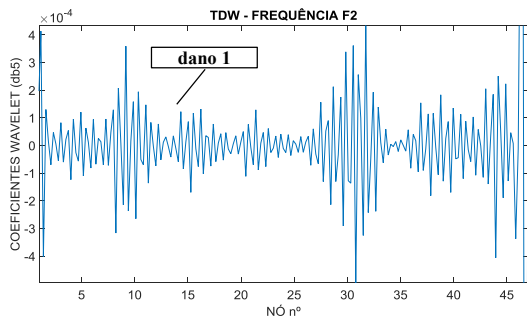


a) Symlet 6

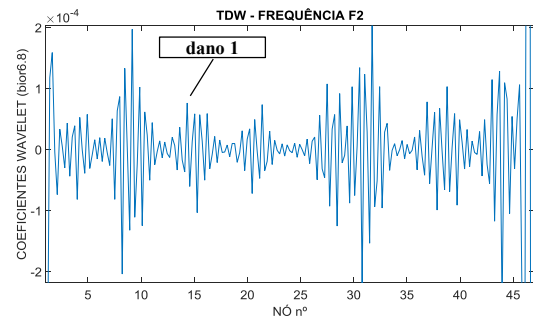


b) rbio2.6

Figura 5.239 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.240 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).

5.12.13.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) M=3,266kg

Na Figura 5.241 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

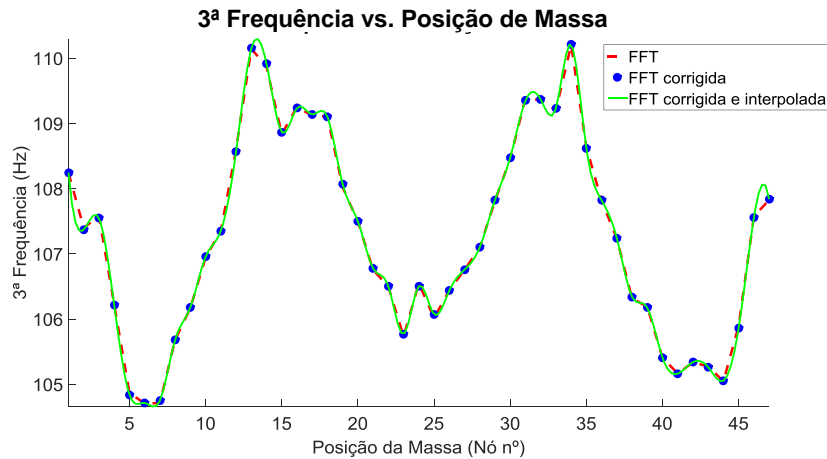


Figura 5.241 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 13 .

A Figura 5.242 e a Figura 5.243, apresentam os gráficos correspondentes à TDW.

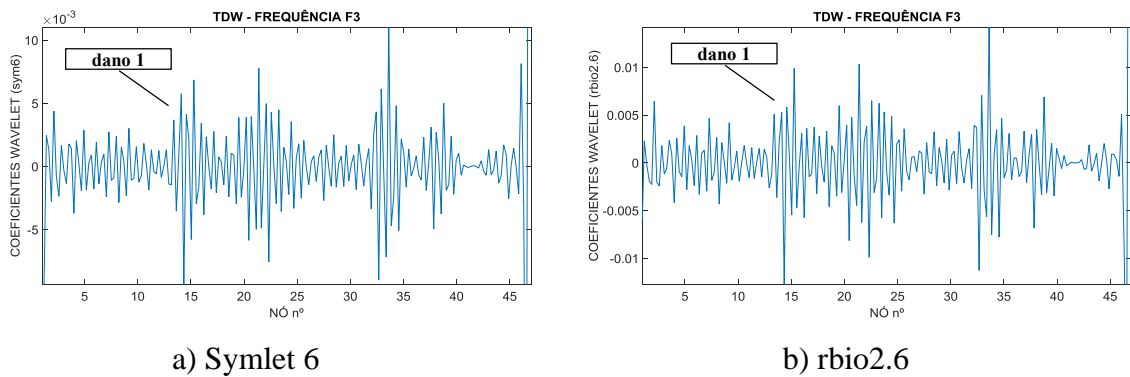


Figura 5.242 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).

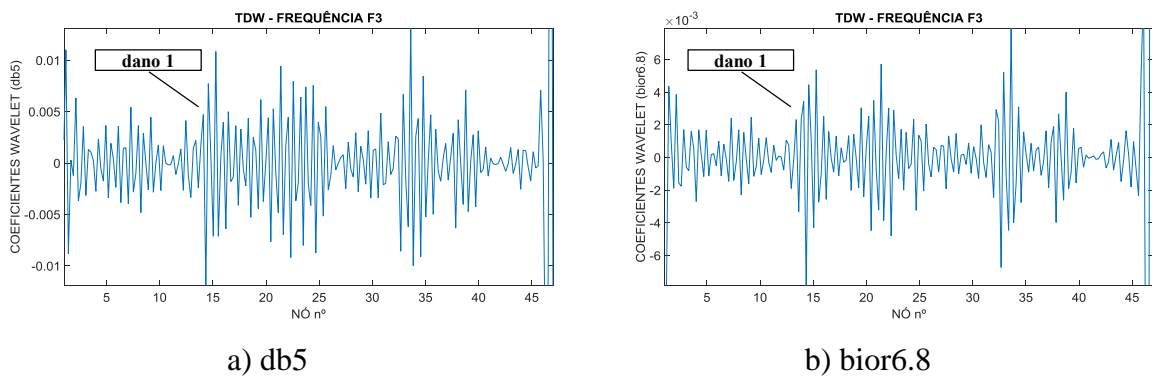


Figura 5.243 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nos gráficos das três frequências (Figura 5.235 a Figura 5.243) não foi possível identificar o dano localizado a 1,5m (nó 14).

Neste caso de dano também foi testada uma massa maior ($M=19,944$ kg). Os resultado são apresentados a seguir.

5.12.13.4 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) $M=19,944$ kg

Na Figura 5.244 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm).

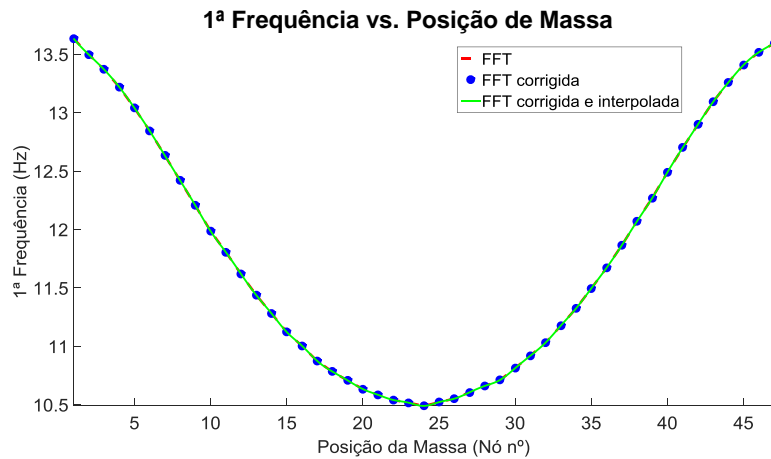
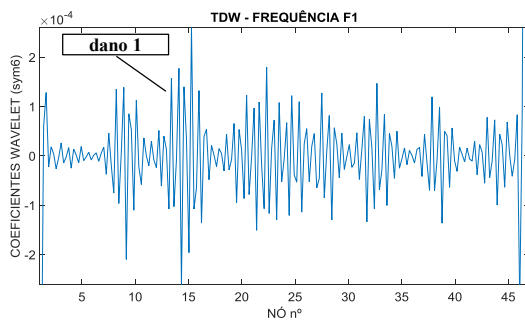
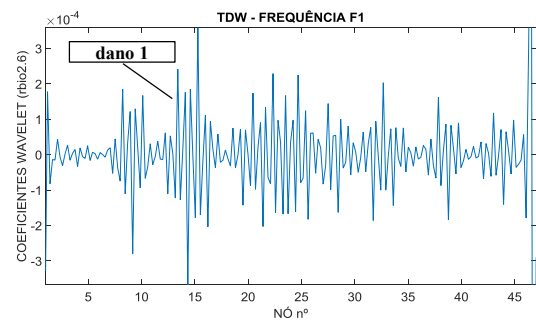


Figura 5.244- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 13.

A Figura 5.245 e a Figura 5.246, apresentam os gráficos correspondentes à TDW.

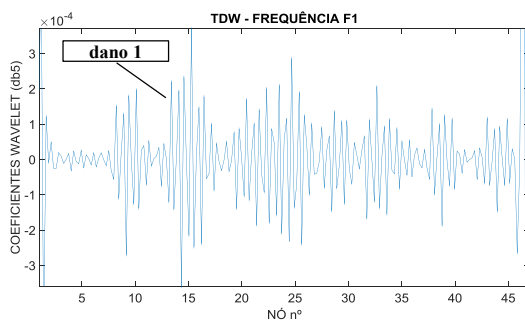


a) Symlet 6

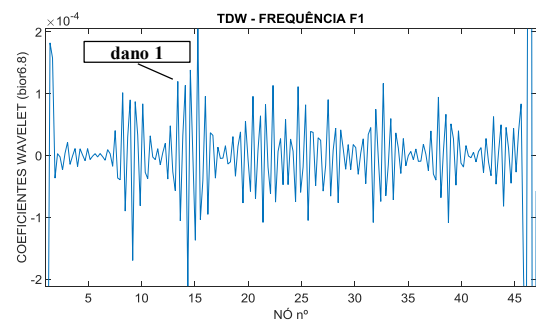


b) rbio2.6

Figura 5.245 - Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1) .



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.246 - Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1) .

5.12.13.5 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) M=19,944 kg

Na Figura 5.247 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm).

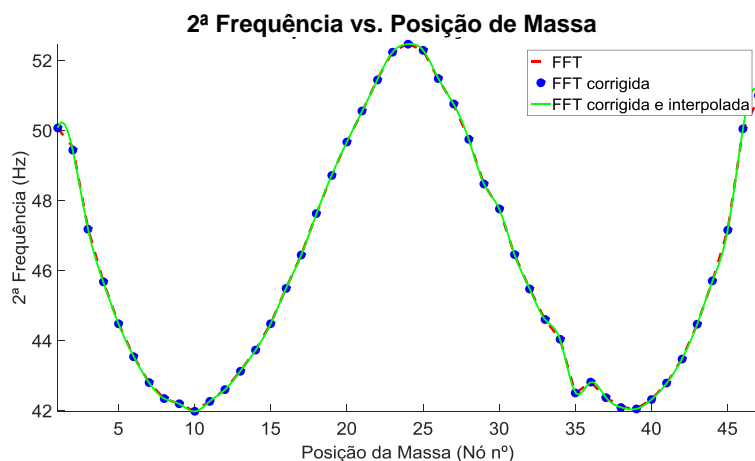
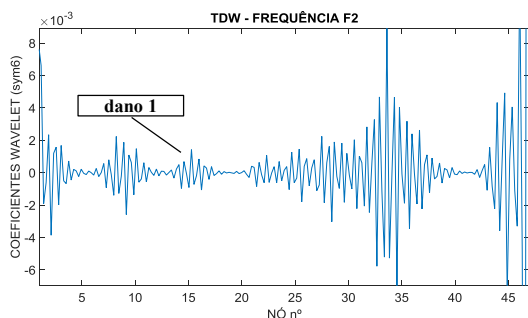
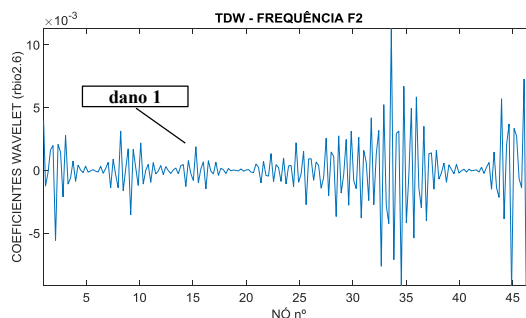


Figura 5.247- Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso13.

A Figura 5.248 e a Figura 5.249, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

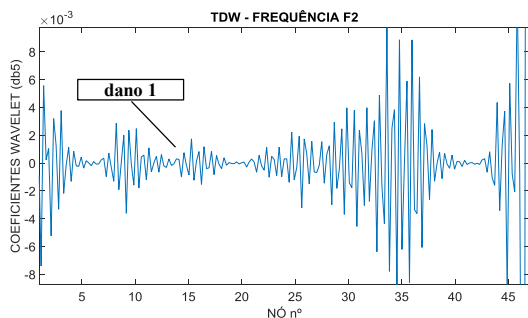


a) Symlet 6

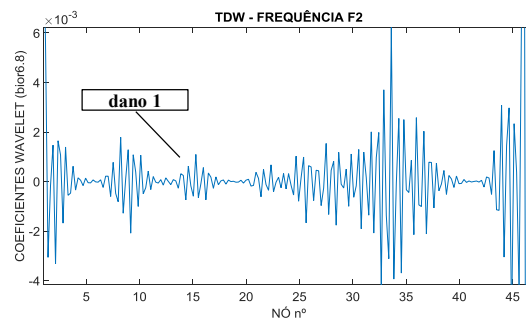


b) rbio2.6

Figura 5.248 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.249 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).

5.12.13.6 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) M=19,944 kg

Na Figura 5.250 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm).

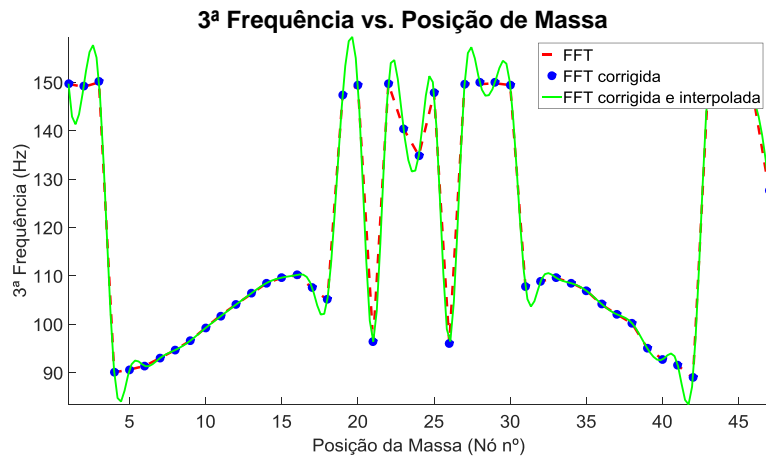
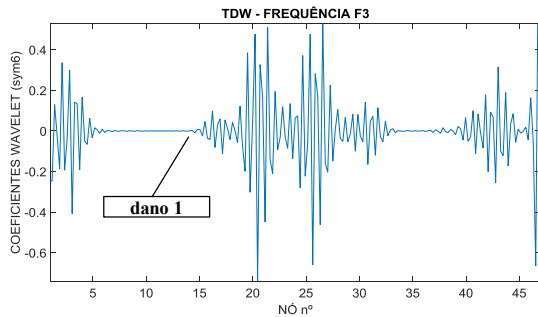
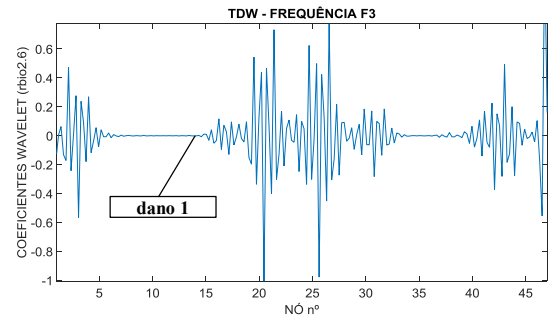


Figura 5.250 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 13.

A Figura 5.251 e a Figura 5.252, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

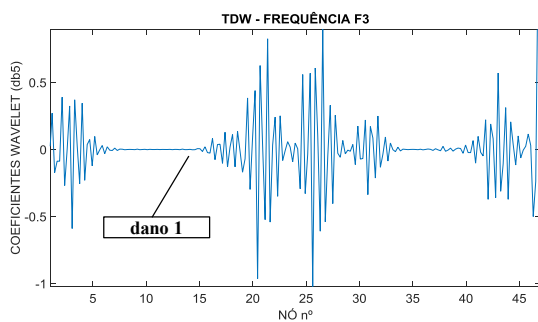


a) Symlet 6

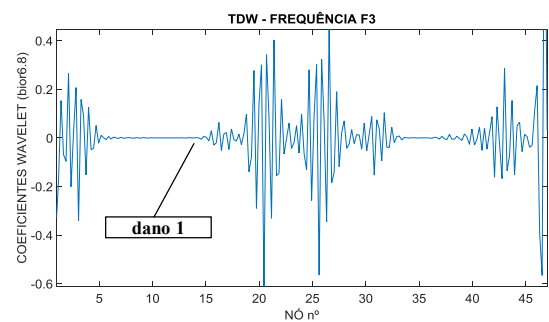


b) rbio2.6

Figura 5.251 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.252 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nos gráficos das três frequências (Figura 5.244 a Figura 5.252), apenas na primeira frequência foi gerada uma perturbação mas que não é suficiente para determinar se existe

um dano ou não. A segunda e terceira frequência apresentaram perturbações em locais diferentes a posição do dano.

5.12.14– Caso 14 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes)

O caso 14 corresponde à viga metálica de 5 m de comprimento utilizada no Caso de dano 13, considerando mais um entalhe localizado do lado do anterior a 2,5 cm (Figura 5.253).

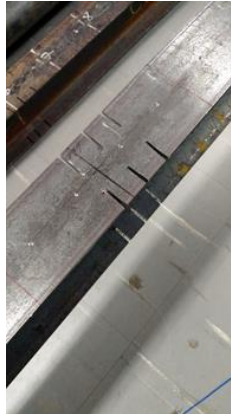


Figura 5.253 - Caso 14.

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios com uma massa adicional (M) de 3,266 kg.

5.12.14.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.254 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

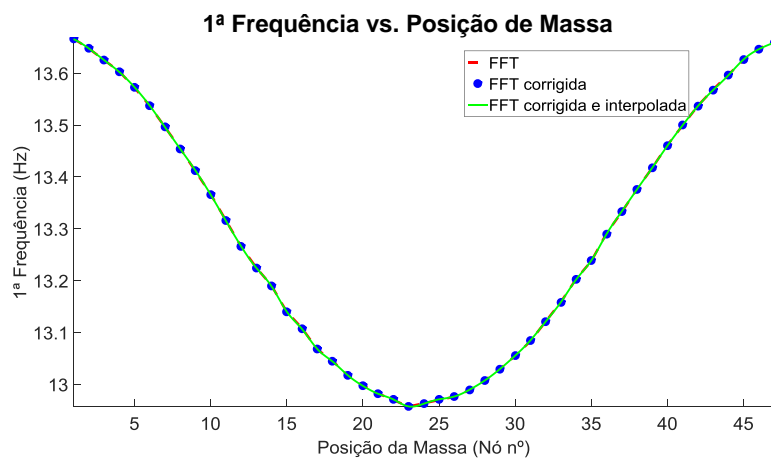
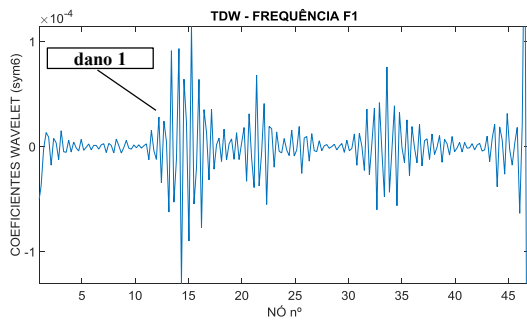
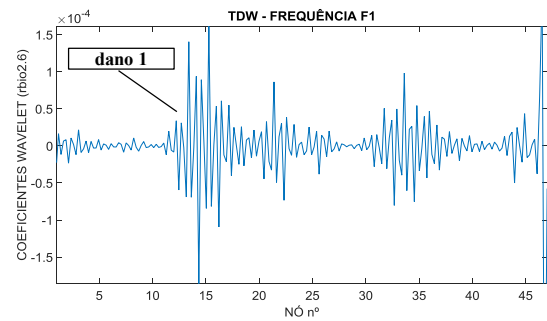


Figura 5.254 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 14.

A Figura 5.255 e a Figura 5.256, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

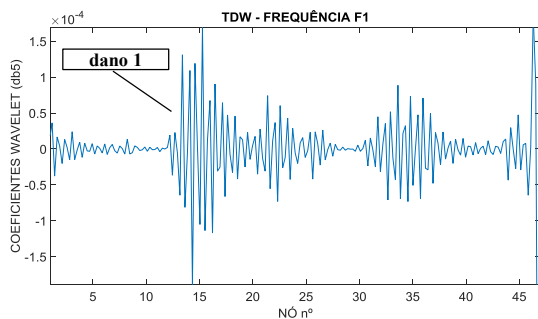


a) Symlet 6

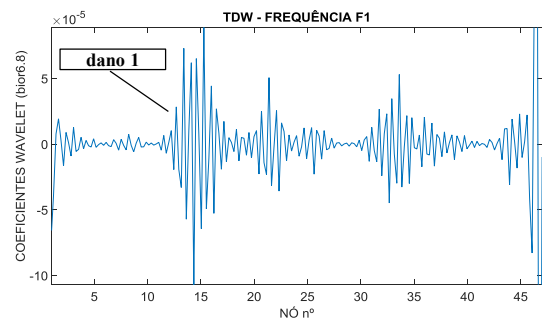


b) rbio2.6

Figura 5.255 - Caso 14 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.256 - Caso 14 – TDW – Primeira Frequência (F1).

5.12.14.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.257 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à Segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

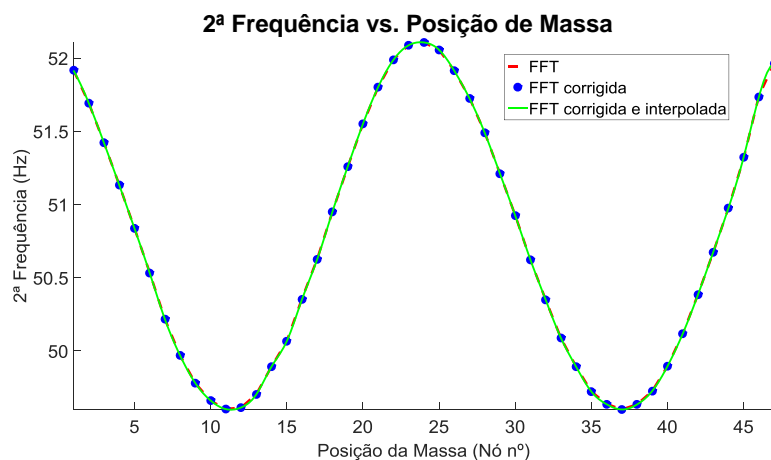
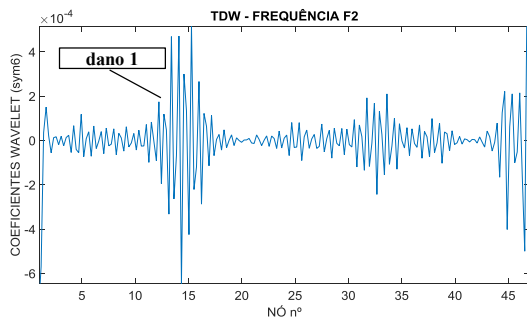
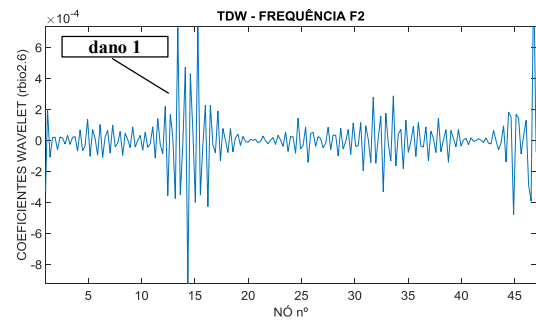


Figura 5.257- Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso14.

A Figura 5.258 e a Figura 5.259, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal.

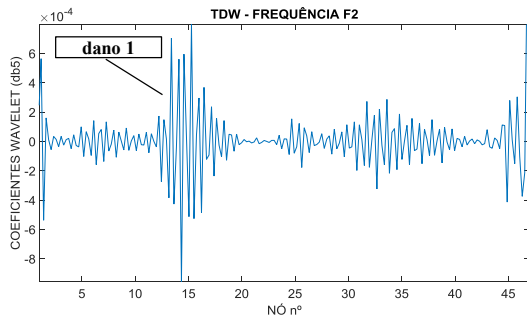


a) Symlet 6

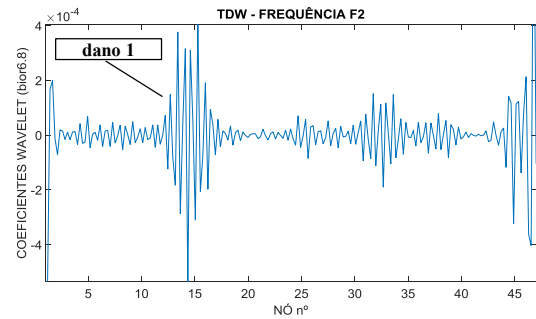


b) rbio2.6

Figura 5.258 - Caso 14 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.259 - Caso 14 – TDW – Segunda Frequência (F2).

5.12.14.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.260 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à Terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 47 nós da viga (discretização feita a cada 10 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

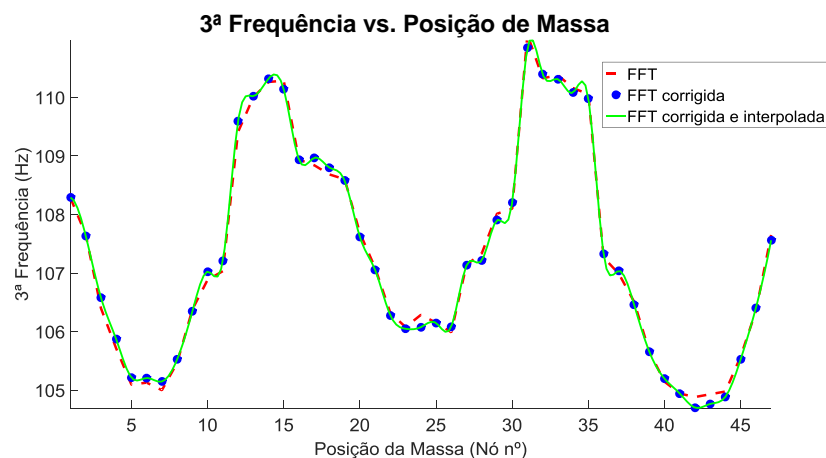


Figura 5.260 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 14.

A Figura 5.261 e a Figura 5.262, apresentam os gráficos correspondentes à TDW.

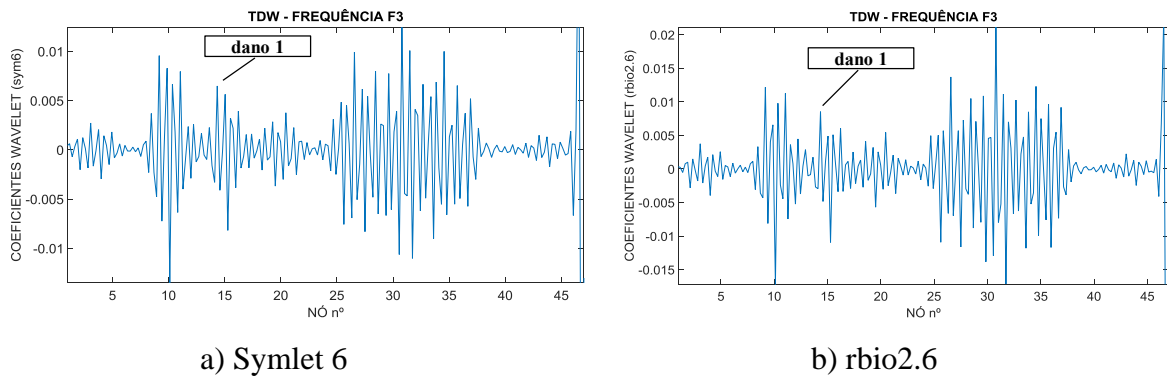


Figura 5.261 - Caso 14 – TDW – Terceira Frequência (F3).

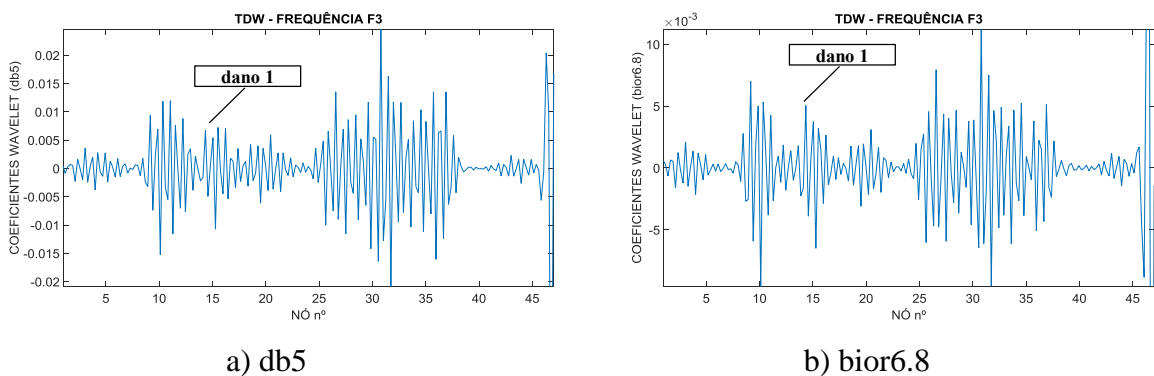


Figura 5.262 - Caso 14 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nos gráficos dos coeficientes utilizando as duas primeiras frequências (Figura 5.254 a Figura 5.262) foi possível identificar a posição do dano (3 entalhes no nó 14), devido as grandes perturbações geradas por volta deste nó. No gráfico correspondente a terceira frequência não foi possível a localização do dano pela dificuldade de excitação desta frequência.

5.12.15– Caso 15 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes)

A discretização do caso 15 foi mudada para 20 cm, isto, para testar a efetividade do método quando o dano estiver localizado entre dois nós. O Caso 15 corresponde à viga metálica de 5 m de comprimento utilizada no Caso 14 com dois danos localizados a 1,5 m (entre os nós 7 e 8) e 4,5 m (entre os nós 22 e 23) de cordo com a Figura 5.263.

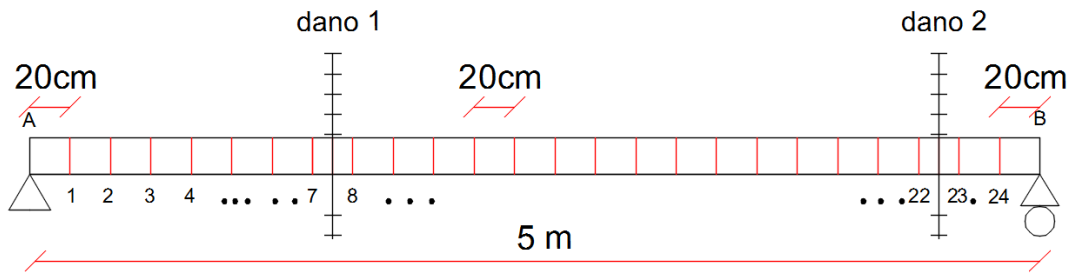


Figura 5.263- Caso 15.

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios com uma massa adicional (M) de 3,266 kg.

5.12.15.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.264 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 24 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

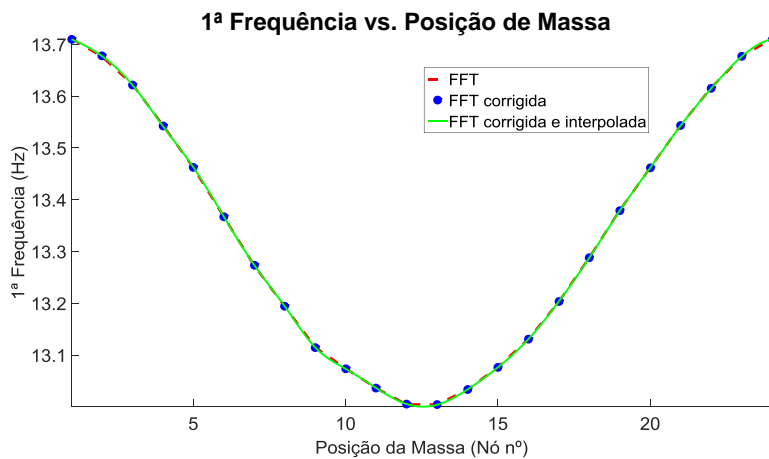
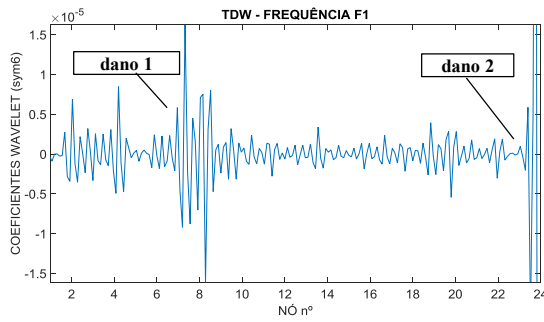
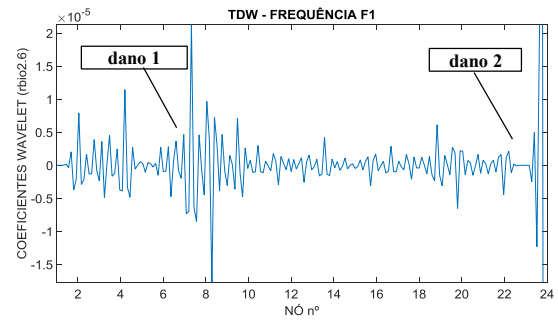


Figura 5.264 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 15.

A Figura 5.265 e a Figura 5.266, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

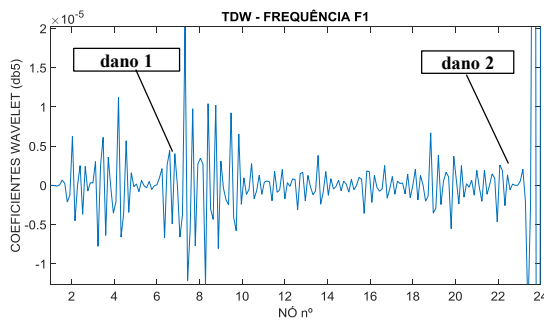


a) Symlet 6

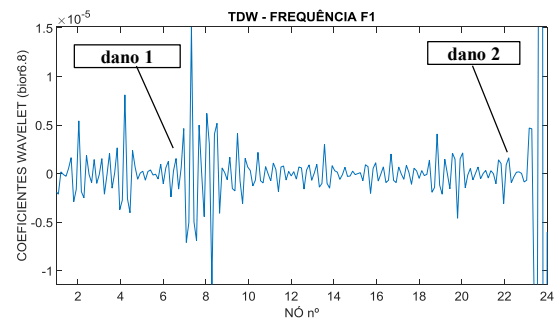


b) rbio2.6

Figura 5.265 - Caso 15 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.266 - Caso 15 – TDW – Primeira Frequência (F1).

5.12.15.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.267 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 24 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

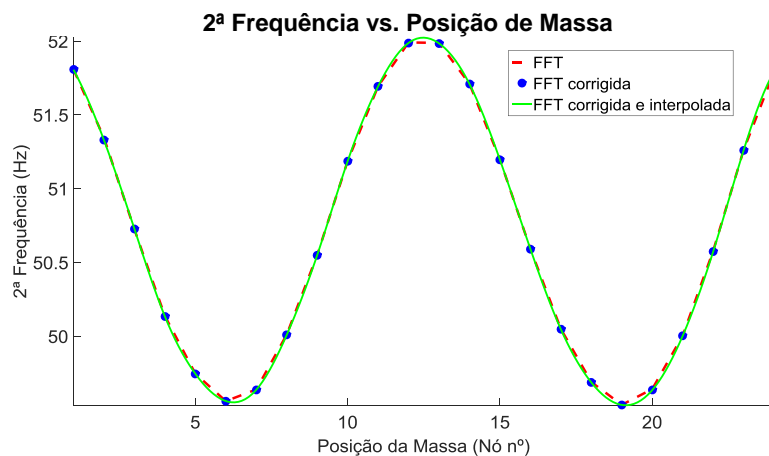
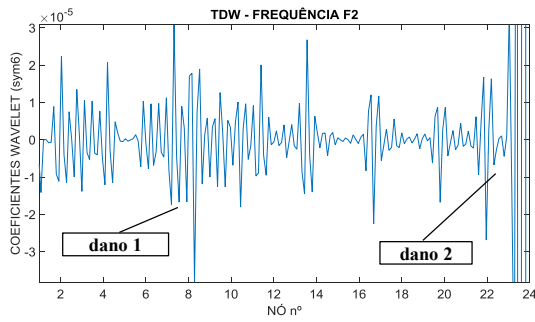
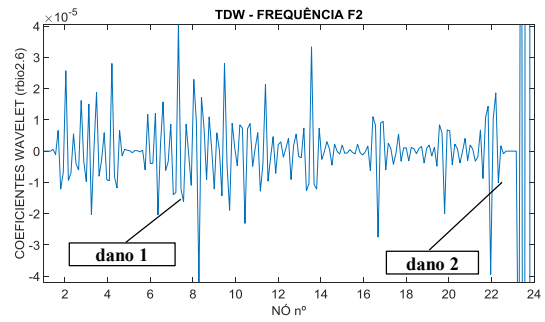


Figura 5.267 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso15.

A Figura 5.268 e a Figura 5.269, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

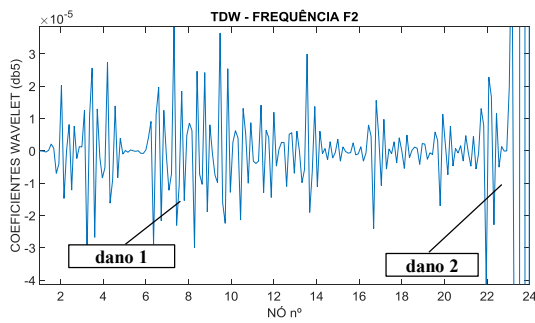


a) Symlet 6

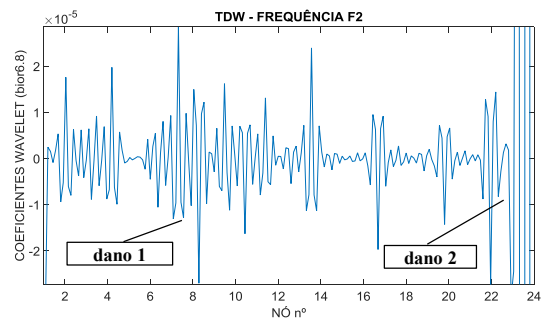


b) rbio2.6

Figura 5.268 - Caso 15 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.269 - Caso 15 – TDW – Segunda Frequência (F2).

5.12.15.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.270 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 24 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

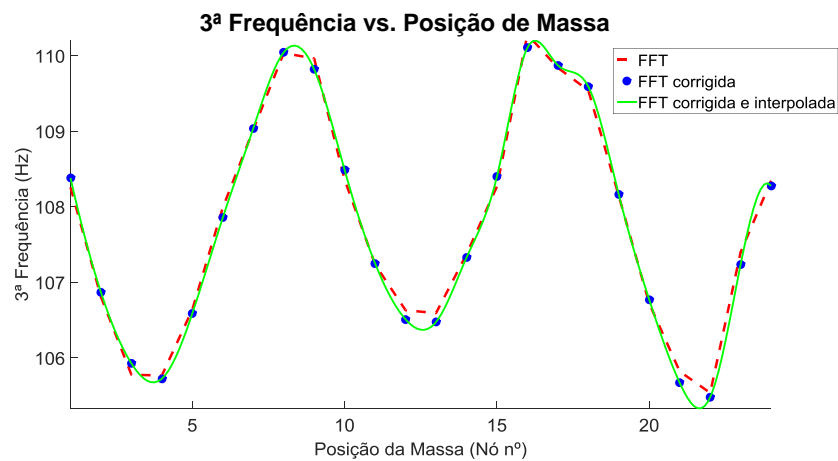
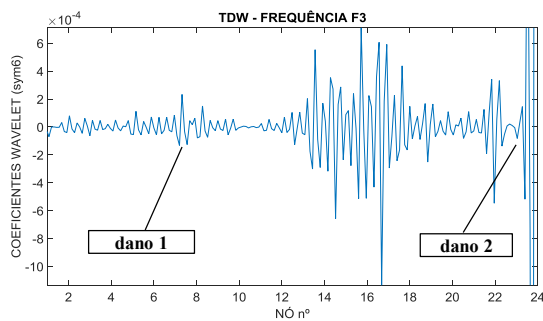
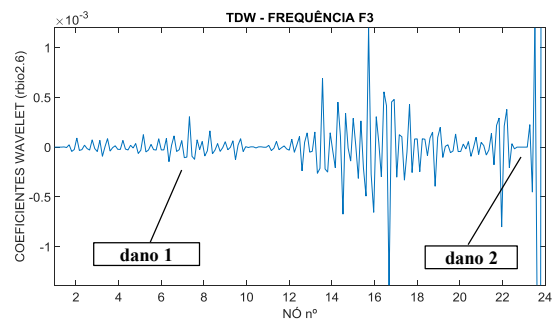


Figura 5.270 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 15.

A Figura 5.271 e a Figura 5.272, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

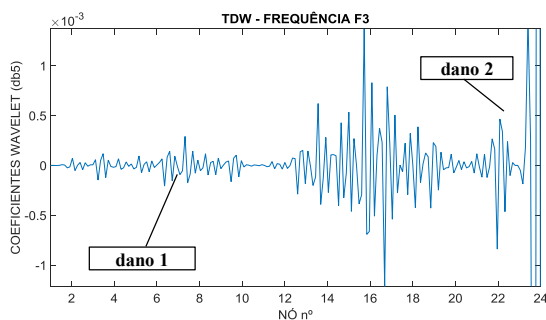


a) Symlet 6

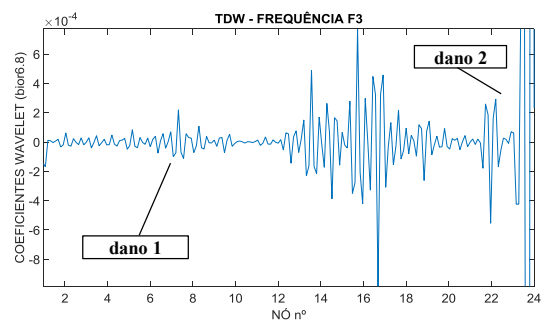


b) rbio2.6

Figura 5.271 - Caso 15 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.272 - Caso 15 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas Figura 5.265 e Figura 5.266 correspondentes à primeira frequência, são geradas perturbações por volta do dano 1 (entre os nós 7 e 8), já o dano 2 não gerou nenhum tipo de alteração. Nas Figura 5.268 e Figura 5.269 são apresentados os resultados para a segunda frequência (F2), neles são geradas perturbações ao longo de toda a viga e na região danificada (dano 1) os picos são um pouco maiores mas a determinação da localização do dano fica confusa. Os gráficos utilizando a terceira frequência não apresentaram bons resultados.

5.12.16 – Caso 16 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes)

A discretização do Caso 16 foi a mesma utilizada no Caso 15, com dois danos localizados a 1,5m (entre os nós 7 e 8) e 4,5m (entre os nós 22 e 23) de acordo com a Figura 5.263.

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios com uma massa adicional (M) de 3,266 kg.

5.12.16.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.273 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 24 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

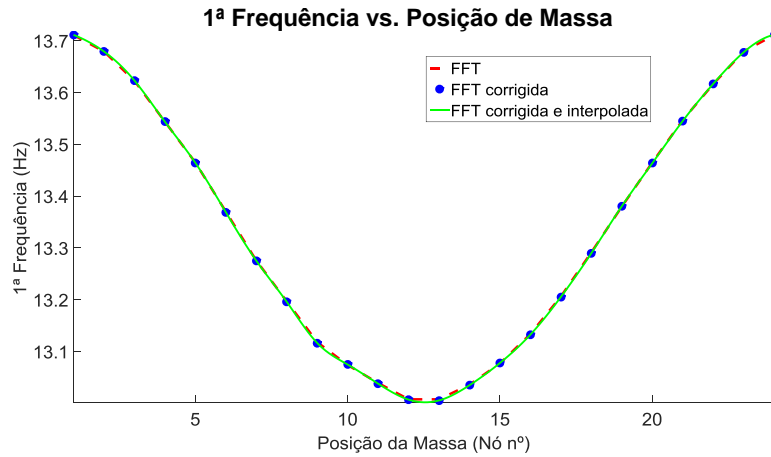
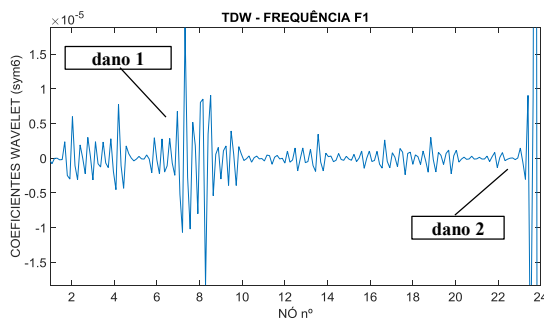
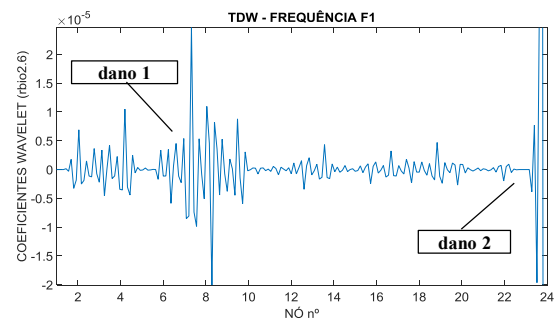


Figura 5.273 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 16.

A Figura 5.274 e a Figura 5.275, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

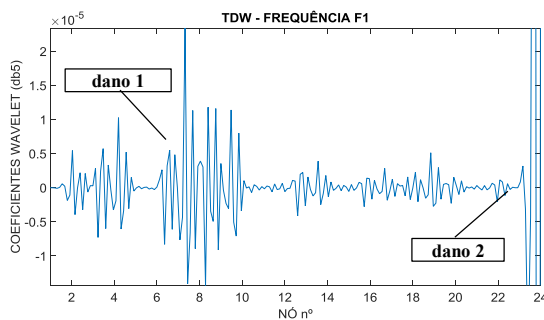


a) Symlet 6

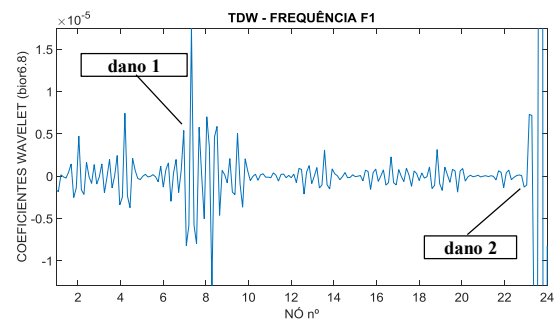


b) rbio2.6

Figura 5.274 - Caso 16 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.275 - Caso 16 – TDW – Primeira Frequência (F1).

5.12.16.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.276 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 24 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

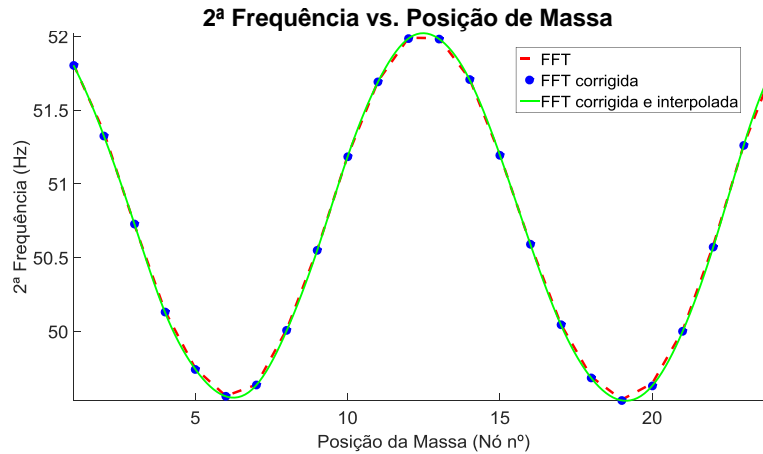
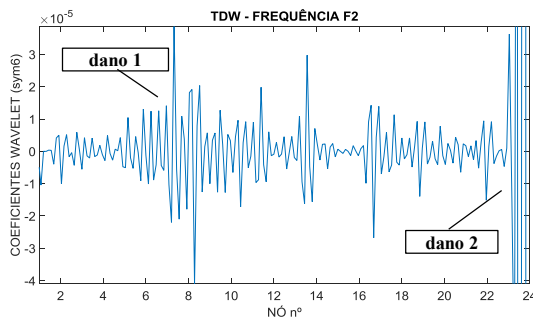
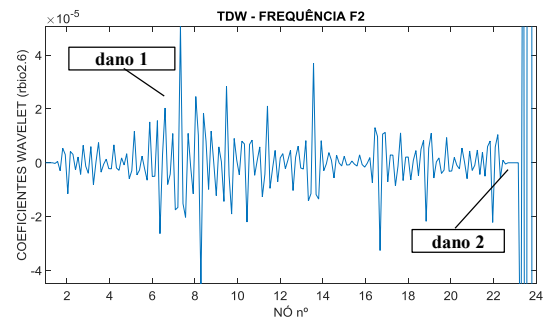


Figura 5.276 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso16.

A Figura 5.277 e a Figura 5.278, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

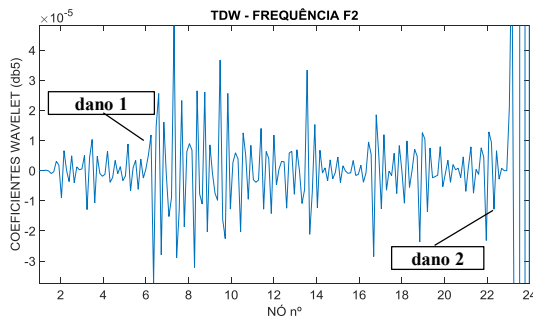


a) Symlet 6

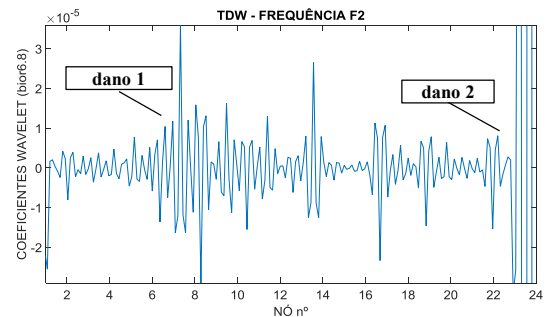


b) rbio2.6

Figura 5.277 - Caso 16 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.278 - Caso 16 – TDW – Segunda Frequência (F2).

5.12.16.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.279 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 24 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

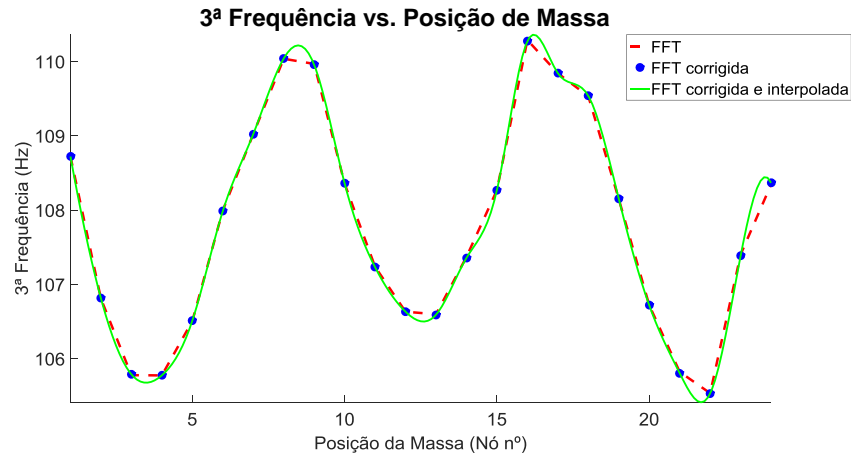
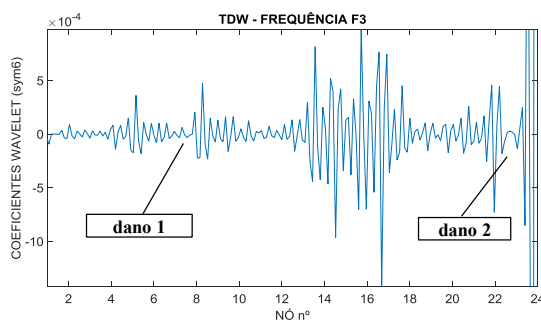
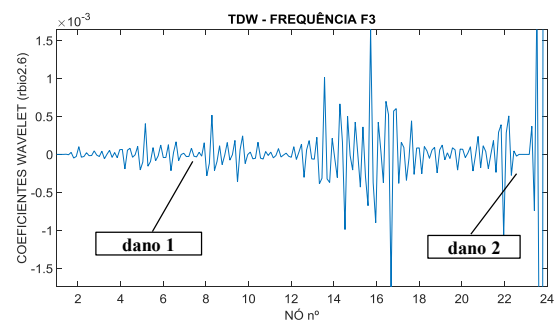


Figura 5.279 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 16.

A Figura 5.280 e a Figura 5.281, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

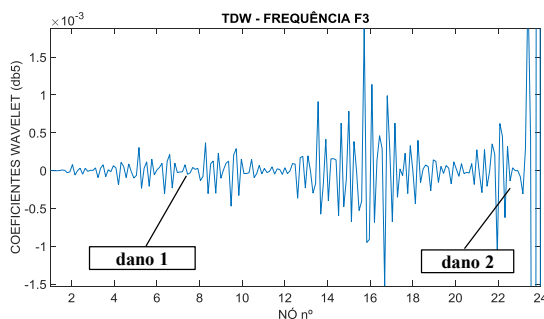


a) Symlet 6

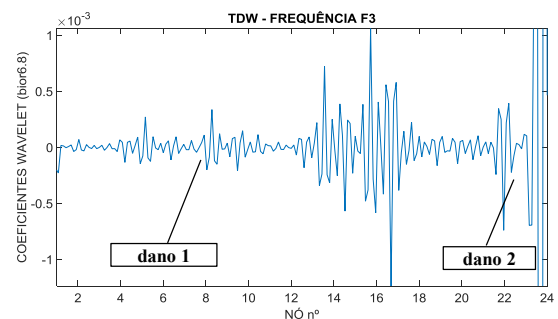


b) rbio2.6

Figura 5.280 - Caso 16 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.281 - Caso 16 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Os resultados obtidos no processamento do Caso 16 foram similares aos obtidos no Caso 15. Na primeira frequência é claramente visível a perturbação do dano 1 (localizado entre os nós 7 e 8), o dano 2 (localizado entre os nós 22 e 23) não apresentou nenhuma perturbação considerável, portanto a localização do dano 2 não foi possível.

Na segunda frequência também foi possível identificar o pico máximo na região danificada (entre os nós 7 e 8) correspondente ao dano 1, já o dano 2 não foi possível de identificar.

Na terceira frequência não foi possível a localização do dano.

5.12.17– Caso 17 (dano a 3,0 m com 1 entalhe)

Com o propósito de analisar danos localizados no trecho central da viga ($L/2$), foi proposto um caso de dano (Caso17), para a viga de 6m de comprimento. A discretização adotada foi com elementos de 20 cm de comprimento similar à utilizada no Caso 4 (Figura 5.282). O dano está localizado no nó 16 ($L/2=3$ m) e a massa utilizada foi $M=3,266$ kg.

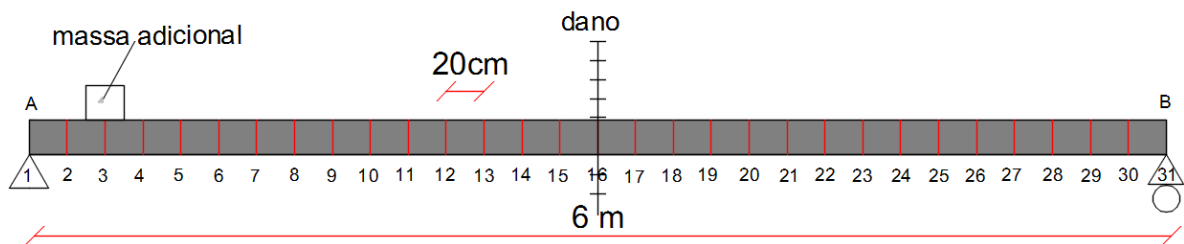


Figura 5.282 - Caso 17.

A seguir são apresentados os resultados.

5.12.17.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.283 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

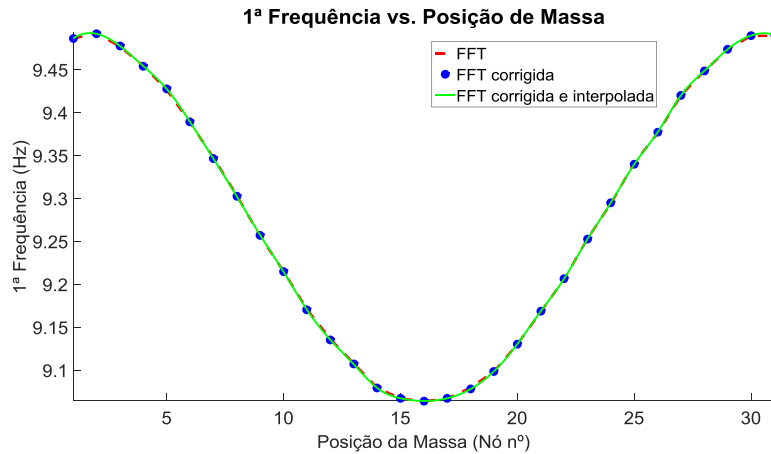
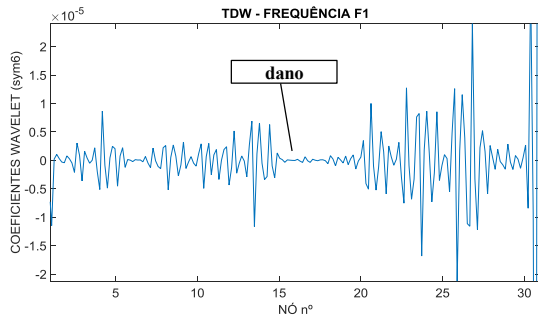
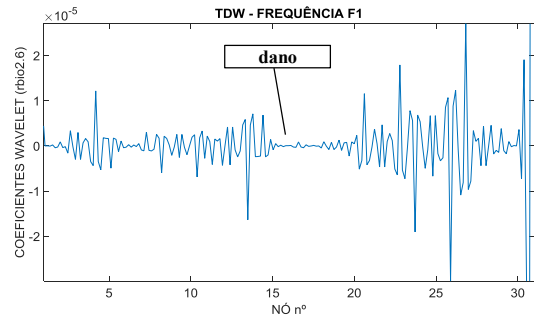


Figura 5.283 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 17 .

A Figura 5.284 e a Figura 5.285 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

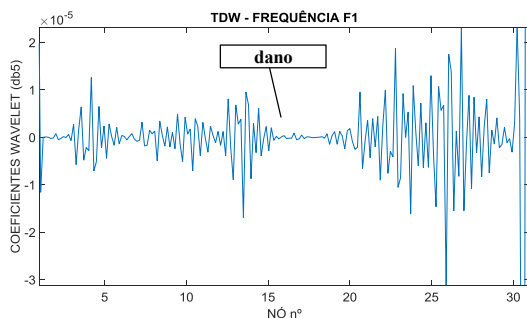


a) Symlet 6

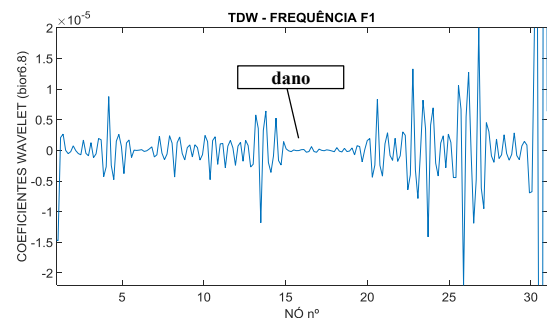


b) rbio2.6

Figura 5.284 - Caso 17 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.285 - Caso 17 – TDW – Primeira Frequência (F1).

5.12.17.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.286 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

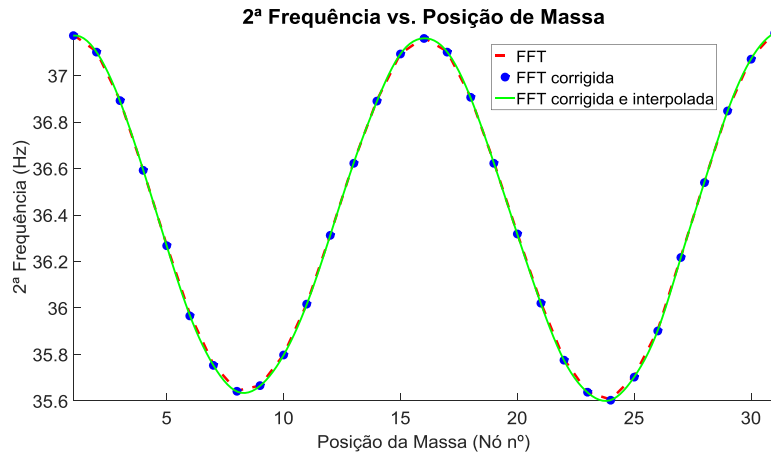
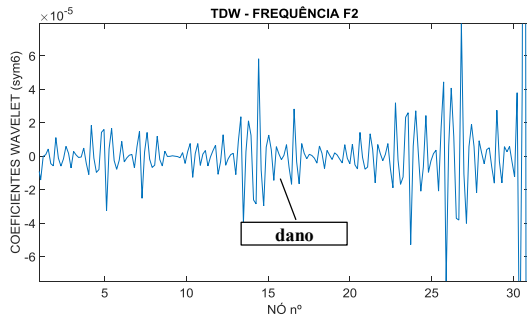
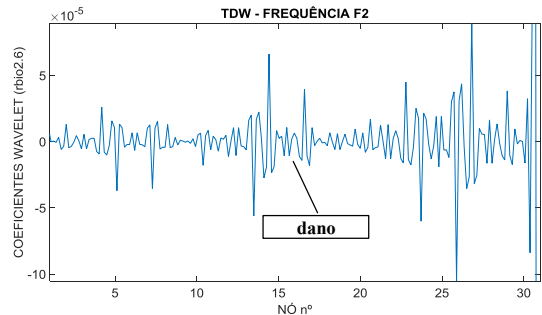


Figura 5.286 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso17.

A Figura 5.287 e a Figura 5.288, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

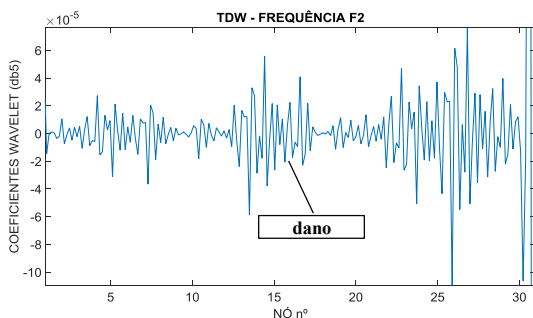


a) Symlet 6

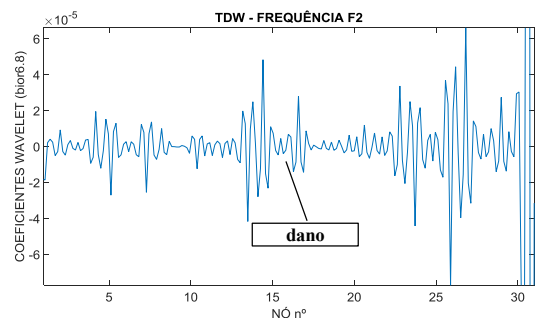


b) rbio2.6

Figura 5.287 - Caso 17 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.288 - Caso 17 – TDW – Segunda Frequência (F2).

5.12.17.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.289 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

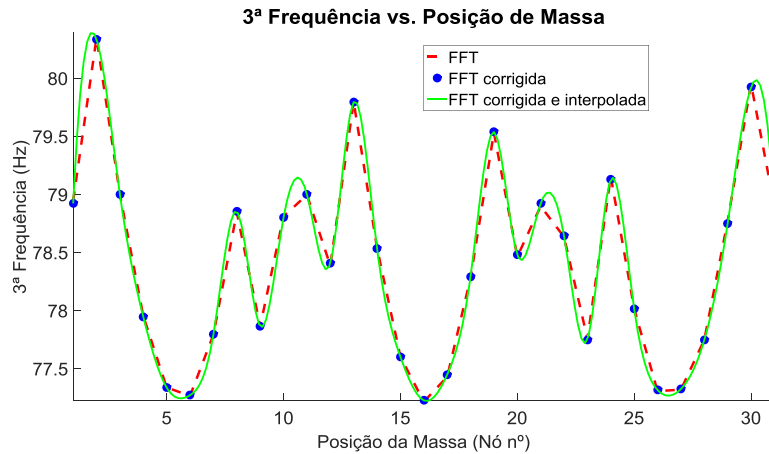
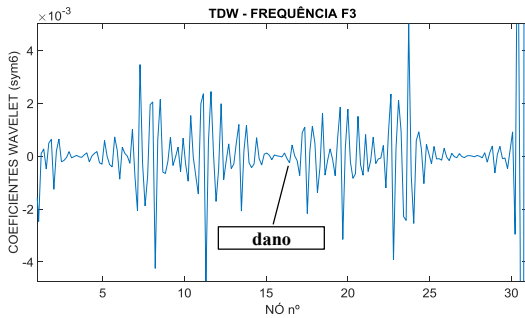
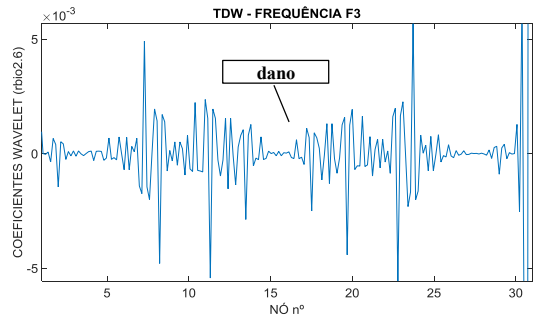


Figura 5.289 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 17.

A Figura 5.290 e a Figura 5.291, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

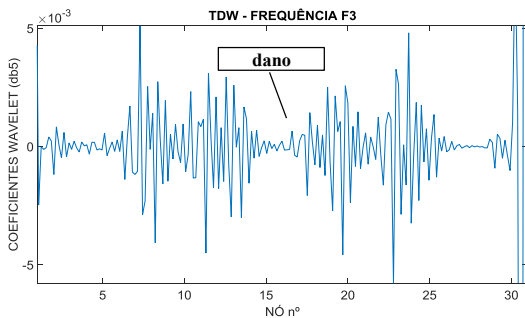


a) Symlet 6

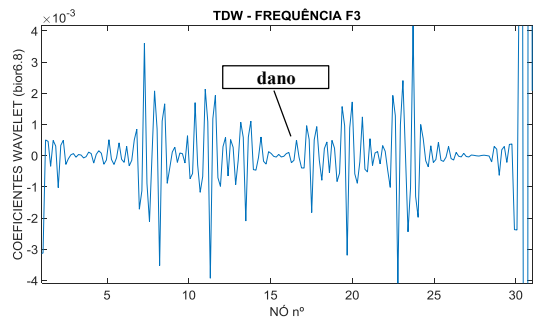


b) rbio2.6

Figura 5.290 - Caso 17 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.291 - Caso 17 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Analisando os resultados do Caso 17 não é possível estabelecer se existe uma região danificada, devido a que as perturbações geradas estão localizadas em locais diferentes do dano.

5.12.18– Caso 18 (dano a 3,0 m com 3 entalhes)

Para o caso 18 foi utilizada a mesma viga do Caso 17 com um incremento do dano na região central (3 entalhes). A montagem da viga é apresentado na Figura 5.292.



a) Montagem experimental Caso 18.



b) Dano Caso 18.

Figura 5.292 - Caso 18.

Os resultados da metodologia utilizando uma massa adicional $M=3,266\text{kg}$ são apresentados a seguir.

5.12.18.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 5.293 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

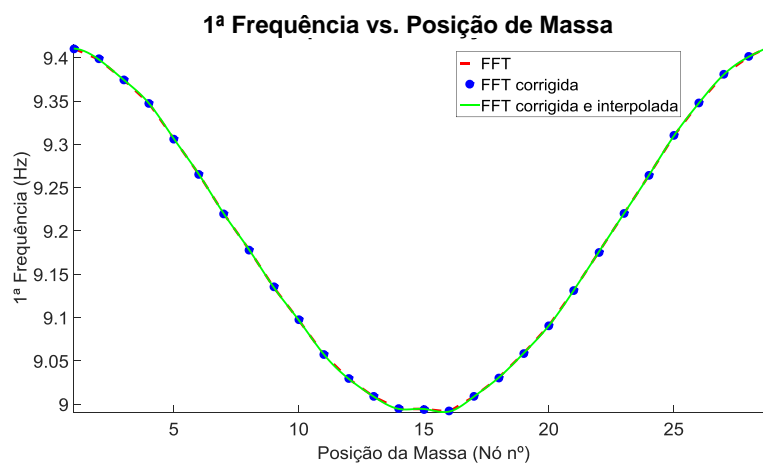
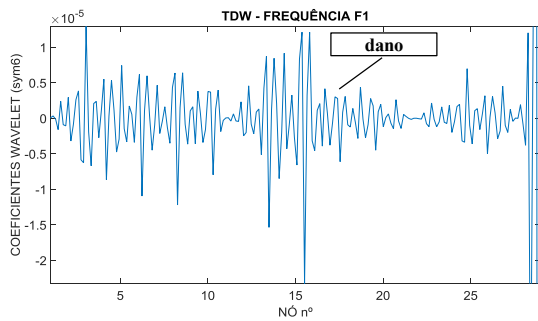
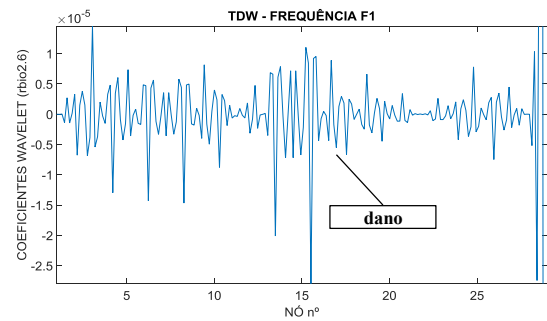


Figura 5.293 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 18.

A Figura 5.294 e a Figura 5.295, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

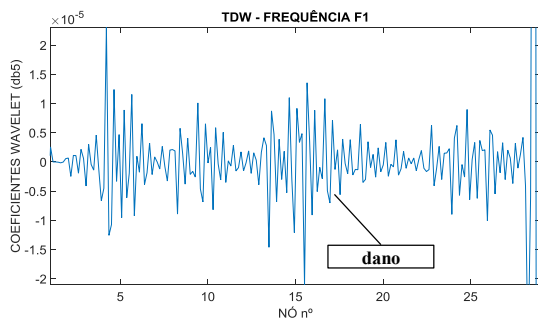


a) Symlet 6

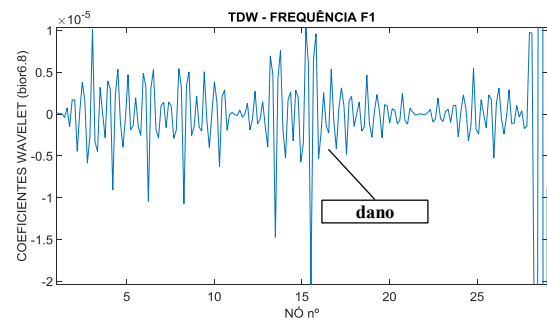


b) rbio2.6

Figura 5.294 - Caso 18 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.295 - Caso 18 – TDW – Primeira Frequência (F1).

5.12.18.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 5.296 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

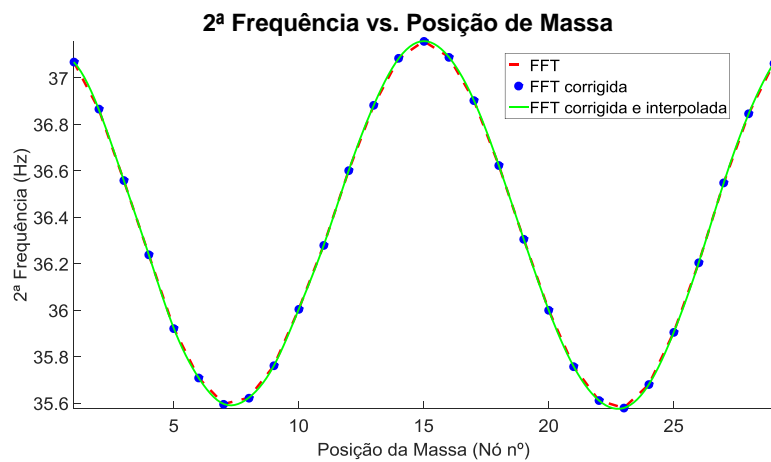
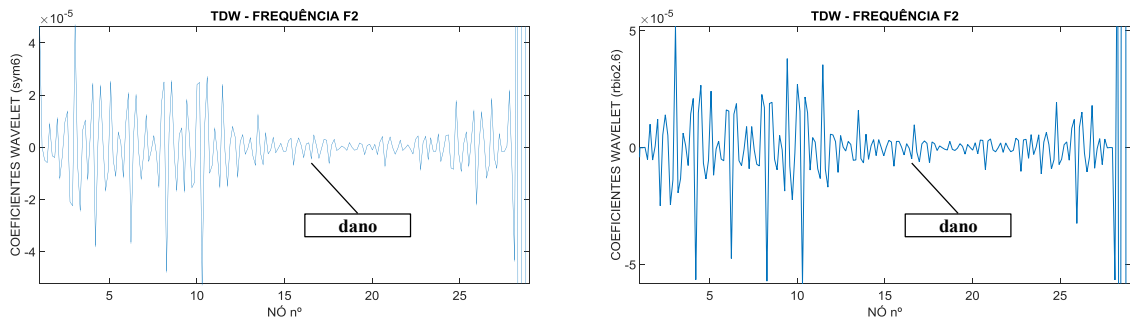


Figura 5.296 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2)-Caso18.

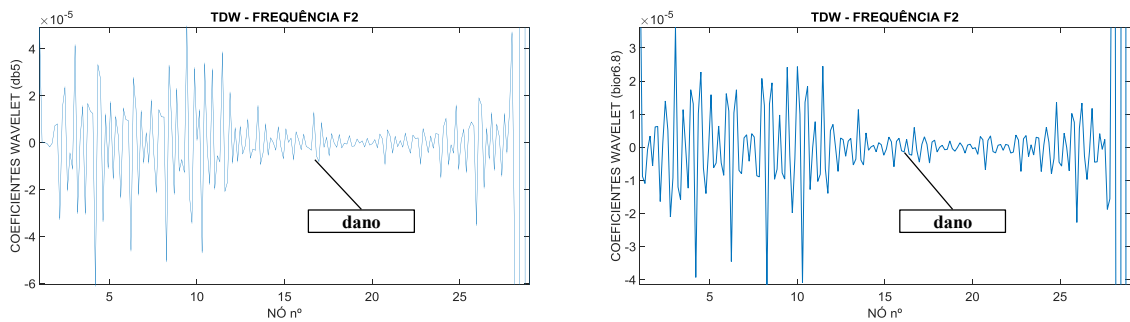
A Figura 5.297 e a Figura 5.298, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 5.297 - Caso 18 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5

b) bior6.8

Figura 5.298 - Caso 18 – TDW – Segunda Frequência (F2).

5.12.18.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 5.299 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

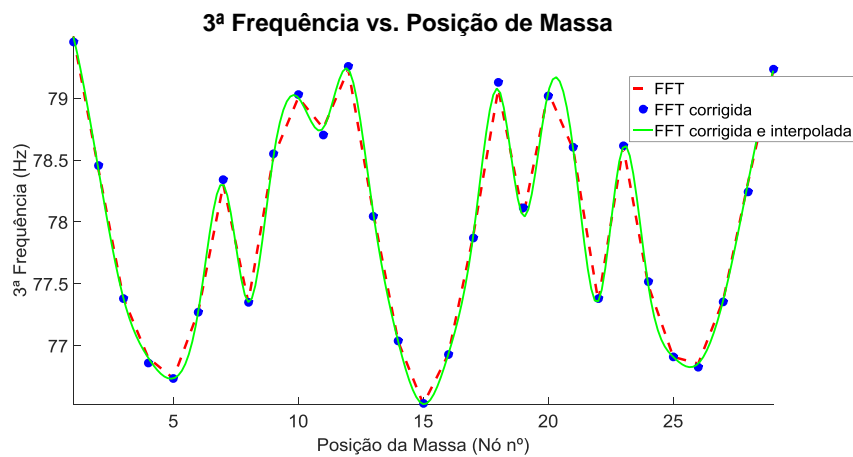
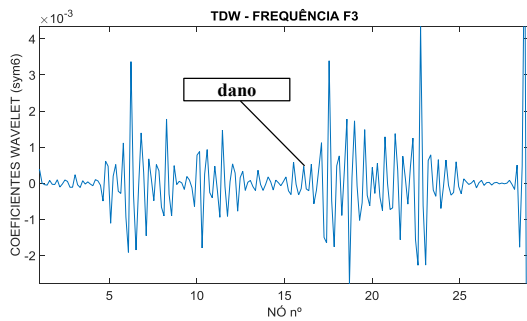
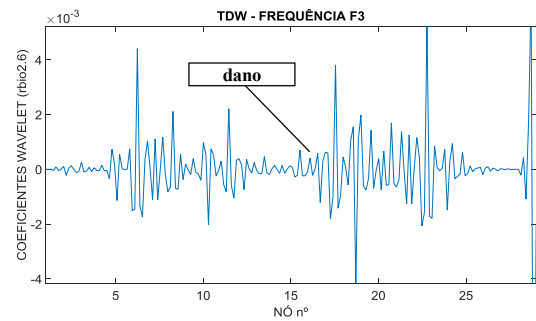


Figura 5.299 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 18 .

A Figura 5.300 e a Figura 5.301, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

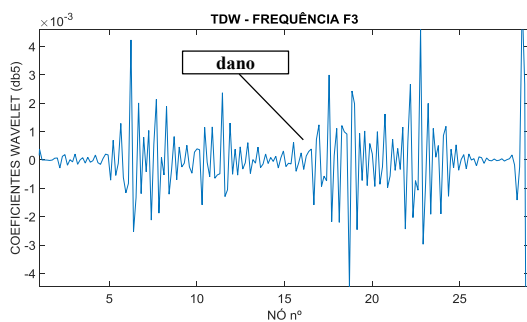


b) Symlet 6

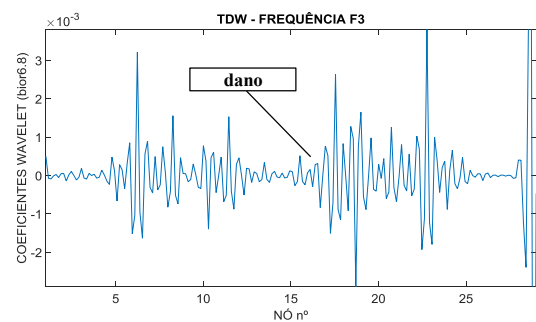


b) rbio2.6

Figura 5.300 - Caso 18 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 5.301 - Caso 18 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Analisando os resultados do Caso 18 é possível identificar o dano utilizando a curva da Primeira frequência vs Posição de massa, apresentado os maiores picos nos coeficientes waveletes na região central. A segunda frequência não apresentou bons resultados, devido ao trecho central ($L/2$) ser uma região de deslocamento nulo no modo de vibração associado a segunda frequência natural (Figura 5.302).

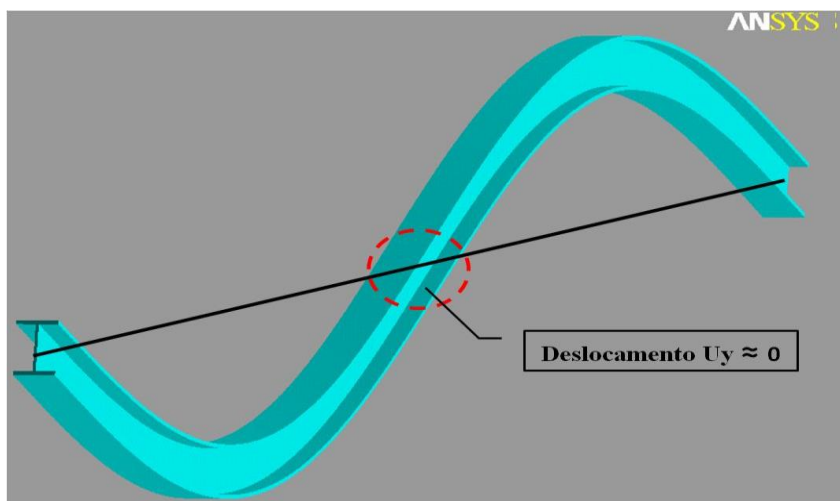


Figura 5.302 - Deslocamento nulo – Caso 18.

A terceira frequência não apresentou bons resultados devido a interferência do ruído no sinal.

5.12.19 –Resumo e observações sobre os ensaios experimentais.

De acordo com os resultados apresentados anteriormente, algumas observações da metodologia para identificação de danos proposta serão citadas a seguir:

1. O menor valor de massa testado de 1,168kg não gerou a variação de frequências necessárias para gerar perturbações nos coeficientes wavelets nos locais danificados
2. Para as vigas de 5 m de comprimento, os melhores resultados foram obtidos com a massa de 3,266kg o que representa o 5,8% do peso total da viga (Peso total = 56,25 kg), apresentando perturbações nos locais danificados na primeira frequência e gerando uma clara identificação dos entalhes localizados a 1,5m utilizando a primeira e a terceira frequência. Já na segunda frequência apenas foi gerada uma perturbação perto do apoio (dano 2), e no local do dano 1 não registrou nenhuma alteração significativa.
3. No caso 1 (dano 1 a 1,5 m), utilizando uma massa $M=10,320$ kg foram obtidos resultados razoáveis mas não tão precisos como os obtidos com a massa de 3,266 kg. Para este valor de massa a curva da primeira frequência apresentou os maiores picos nas regiões danificadas, mas nas regiões intermediárias (trecho central) são notadas perturbações um pouco menores.

4. No Caso 2 fica evidente a localização do dano a 1,5 m, isto, pela perturbação na primeira frequência utilizando-se uma massa adicional de 3,266kg, já o segundo dano localizado próximo do apoio não foi possível de identificar.
5. Para o dano 1, localizado a 1,5 m do apoio somente foi possível a sua identificação, quando o tamanho do dano foi de 3 entalhes (Caso 1, 2, 14, 15 e 16). A região danificada gerou perturbações claramente visíveis em volta da região danificada nas curvas obtidas com a primeira e segunda frequências utilizando-se uma massa adicional de 3,266 kg.
6. Para o dano localizado próximo dos extremos (10% de L) não é possível a identificação do defeito, devido a proximidade dos apoios que constituem uma fonte principal do ruído no sinal. O único resultado aceitável foi obtido na viga de 6 m com uma massa de 24,718 kg, que gerou perturbações na região danificada.
7. No caso de dano da viga de 6m com um dano no trecho central (L/2) foi possível a identificação do defeito a partir de 3 entalhes e com uma massa de 3,266 kg.
8. O teste de impacto utilizado nesta pesquisa, fornece uma entrada de energia limitada no sistema, portanto as frequências altas são seriamente afetadas pela presença de ruído e pela falta de energia para excitação (Norton; Karczub (2007)).

Na seguinte tabela é apresentado o resumo dos ensaios experimentais, definidos em três níveis de identificação:

- Excelente (**E**): a identificação do dano é claramente visível com a localização do maior pico e com pouca interferência das demais perturbações.
- Regular (**R**): é possível a localização do dano, mas as demais perturbações presentes ao longo do sinal apresentam amplitudes consideráveis, indicando falsos danos.
- Deficiente (**D**): não é possível a identificação do dano, devido as perturbações presentes no sinal.
- Viga Intacta (**VI**)

Tabela 5.8 – Avaliação resultados análise experimental

Identificação do dano (E: Excelente; R: Regular; D: Deficiente; VI: Viga intacta) - Análise Experimental																	
Caso	Massa adicional (Kg)	Dano 1 (1,5m)			Dano 2 (4,5m)			Dano 1 (3m)			Dano 2 (5m)			Dano 3 (5,4m)			
		F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	
1	3,266	E	D	E	E	E	E										
2	3,266	E	D	D	D	D	D										
3	3,266	E	E	D	E	R	D										
4	3,266	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	
5	3,266														D	D	D
6	3,266														D	D	D
7	3,266														D	D	D
8	3,266											D	D	R	D	D	R
9	3,266											D	D	D	D	D	D
10	3,266											D	D	D	D	D	D
10	24,718											E	E	E	E	E	E
11	3,266	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI
12	3,266	D	D	D													
12	20,204	D	D	D													
13	3,266	D	D	D													
13	19,944	R	D	D													
14	3,266	E	E	D													
15	3,266	E	R	D	D	D	D										
16	3,266	E	E	D	D	D	D										
17	3,266							D	D	D							
18	3,266							E	D	D							

De acordo com a Tabela 5.8, o método proposto apresentou bons resultados com danos a partir de 3 entalhes localizados no trecho central da viga (dano1 a 1,5m) (Figura 5.303 e Figura 5.304).

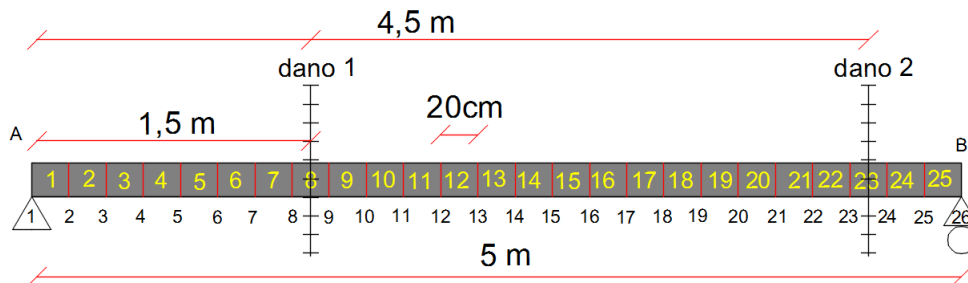


Figura 5.303- Posição dano viga 5m .



Figura 5.304- Descrição dano 3 entalhes

Nas Figura 5.305 e Figura 5.306 são apresentadas as curvas da primeira e segunda frequência para a viga de 5m de comprimento considerando a viga intacta como referência e os casos de dano 12, 13 e 14, correspondentes ao dano progressivo em 1,5m com 1,2 e 3 entalhes respetivamente. A terceira frequência não apresentou bons resultados.

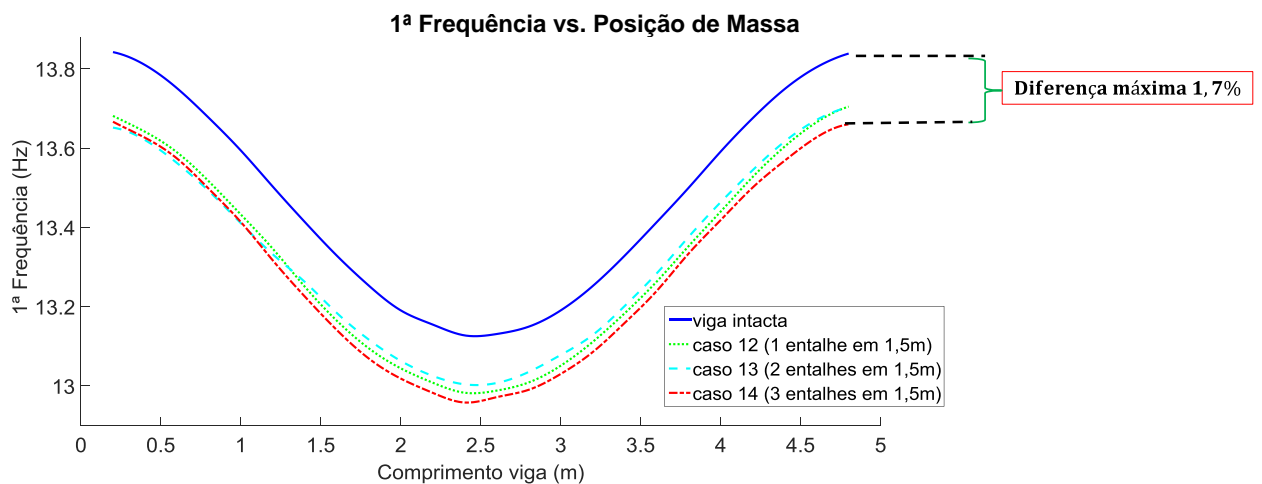


Figura 5.305 – Resumo Primeira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 5m).

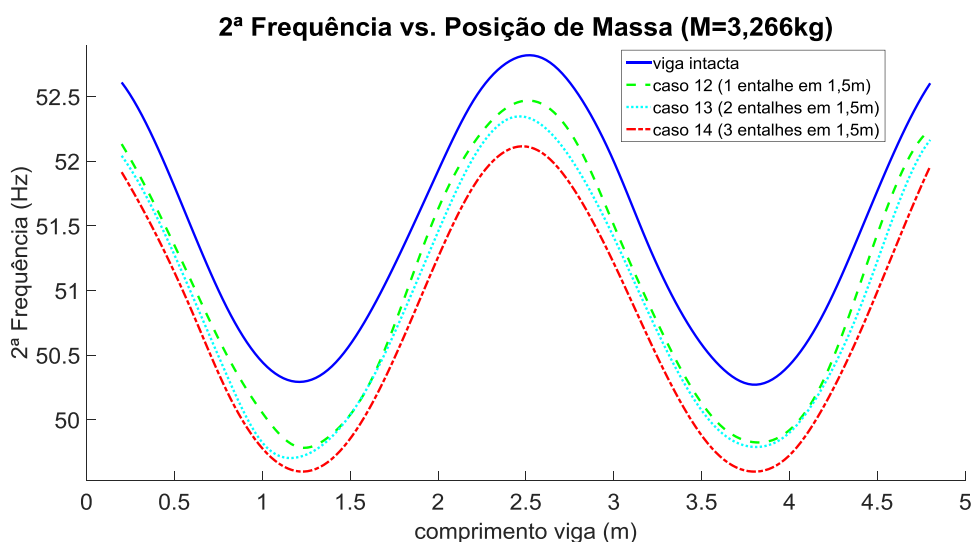


Figura 5.306 - Resumo Segunda Frequência vs. Posição da Massa (viga de 5m).

Nas Figura 5.305 e Figura 5.306, observa-se uma clara diminuição em relação a viga intacta das primeiras duas frequências devido ao incremento progressivo do dano.

De acordo com Tabela 5.8 a primeira frequência conseguiu gerar perturbações por volta do dano composto de 3 entalhes localizados a 1,5m, isto é, os casos de dano 1,2,3,14,15 e 16. Essas perturbações são geradas em forma de picos nos gráficos dos coeficientes Wavelets, mas além das perturbações geradas pelo enfraquecimento da estrutura, são também geradas perturbações ao longo da viga devidas ao ruído presente no sinal, indicando falsos danos.

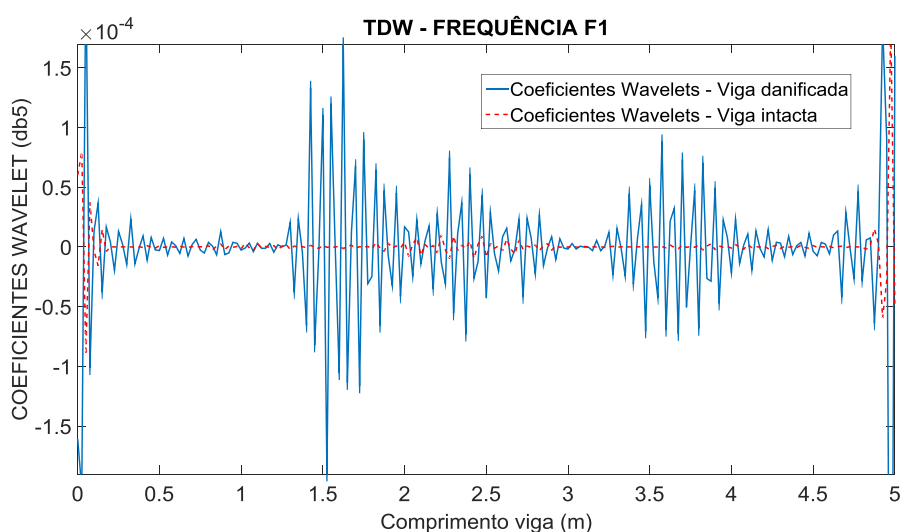


Figura 5.307 – Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada.

Na Figura 5.307 observa-se que um defeito qualquer gera uma perturbação ao longo do sinal, verifica-se também que as perturbações geradas pela presença do dano são muito maiores do que as perturbações geradas no mesmo local da viga intacta.

Na Figura 5.308 são apresentados os gráficos dos coeficientes wavelets utilizando a primeira frequência dos casos de dano 11 (viga intacta) e 2 (viga danificada). Observa-se que as perturbações geradas pelo dano são maiores do que as perturbações geradas pelo ruído presente no sinal.

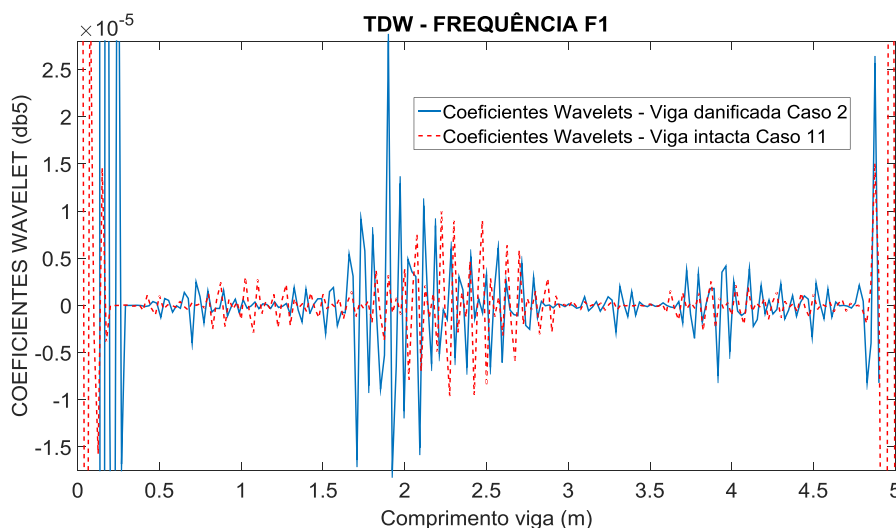


Figura 5.308– Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada.

Para os casos de dano onde não foi possível localizar os danos, os coeficientes wavelets também apresentaram valores maiores em relação aos coeficientes da viga intacta. Esses casos de dano são: Caso 12 e 13 compostos por danos de 1 e 2 entalhes respectivamente localizados a 1,5m. A diferença entre esses dois sinais (Figura 5.309) pode-se constituir como uma prova da deterioração da estrutura mesmo sem localizar o dano, método que se enquadra no Nível I segundo Rytter (1993) (seção 2.1.1). Da mesma forma acontece com a segunda e terceira frequências (Figura 5.310 e Figura 5.311) utilizando as quatro funções Wavelet mãe propostas na metodologia como apresentado a seguir:

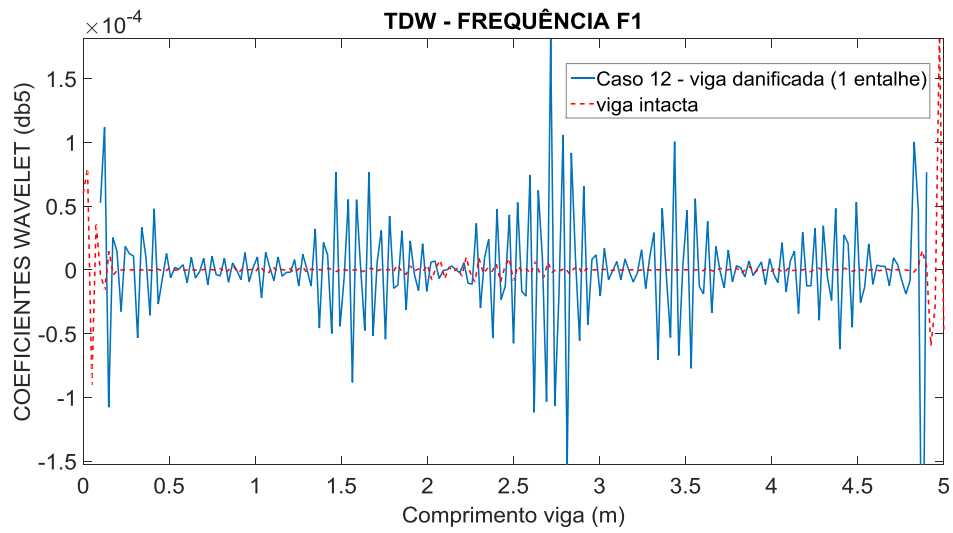


Figura 5.309– Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada (F1).

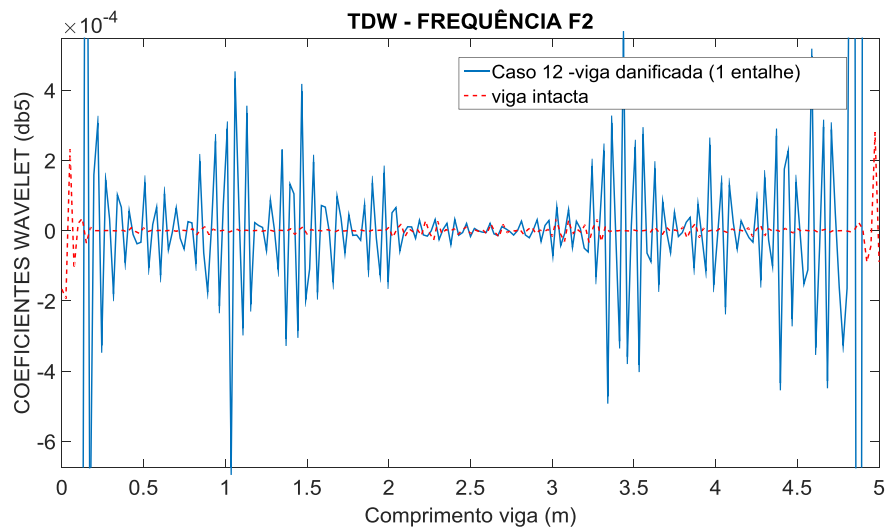


Figura 5.310– Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada (F2).

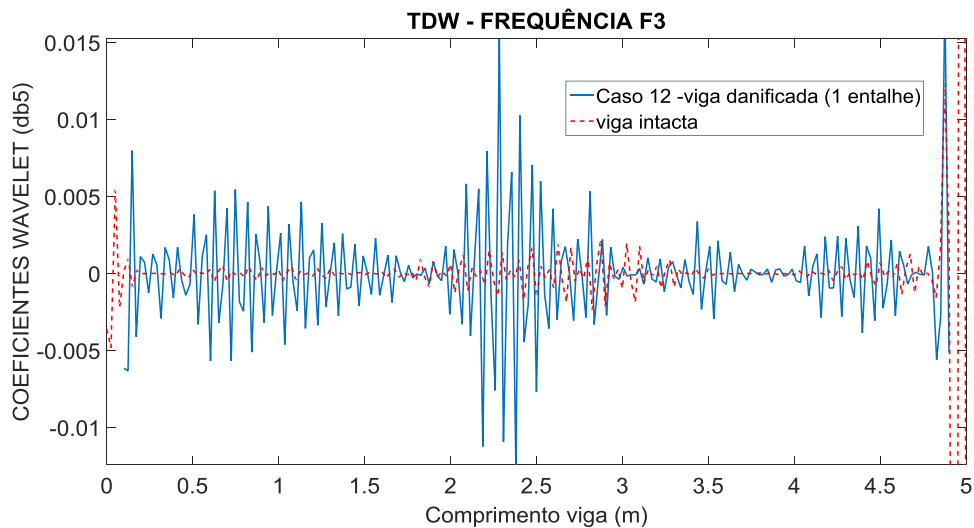


Figura 5.311– Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada (F3).

Nas Figura 5.312 a Figura 5.317 são apresentadas as curvas da primeira, segunda e terceira frequência para a viga de 6m de comprimento considerando a viga intacta como referência. Os casos de dano 17 e 18 foram apresentados separadamente pois a posição do dano é diferente dos outros casos.

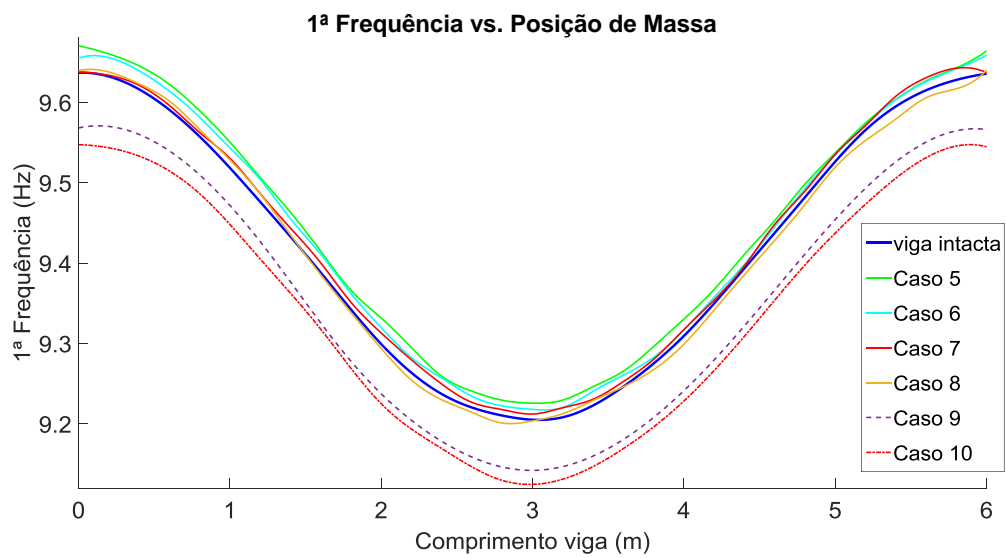


Figura 5.312– Resumo Primeira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6m)

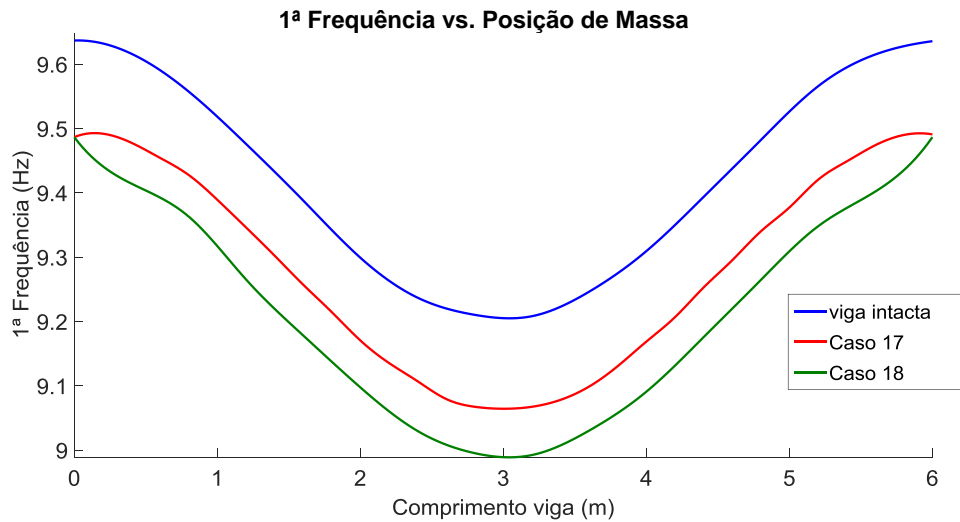


Figura 5.313 – Resumo Primeira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6 m).

Nas Figura 5.312 e Figura 5.313, observa-se nos casos de dano 5, 6, 7 e 8 a diminuição por causa do incremento do dano não fica evidente, já nos casos de dano 9, 10, 17 e 18 é claramente visível a diminuição da primeira frequência por causa da presença do dano.

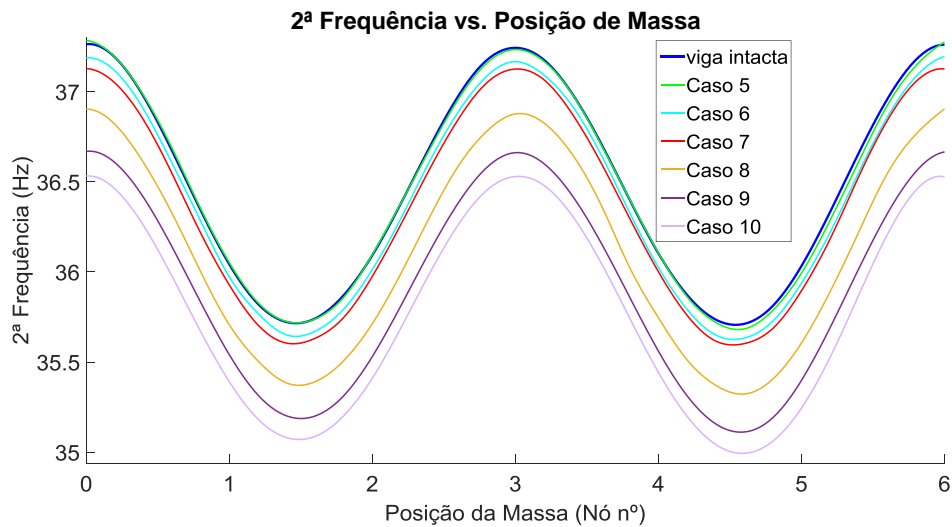


Figura 5.314 – Resumo Segunda Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6 m).

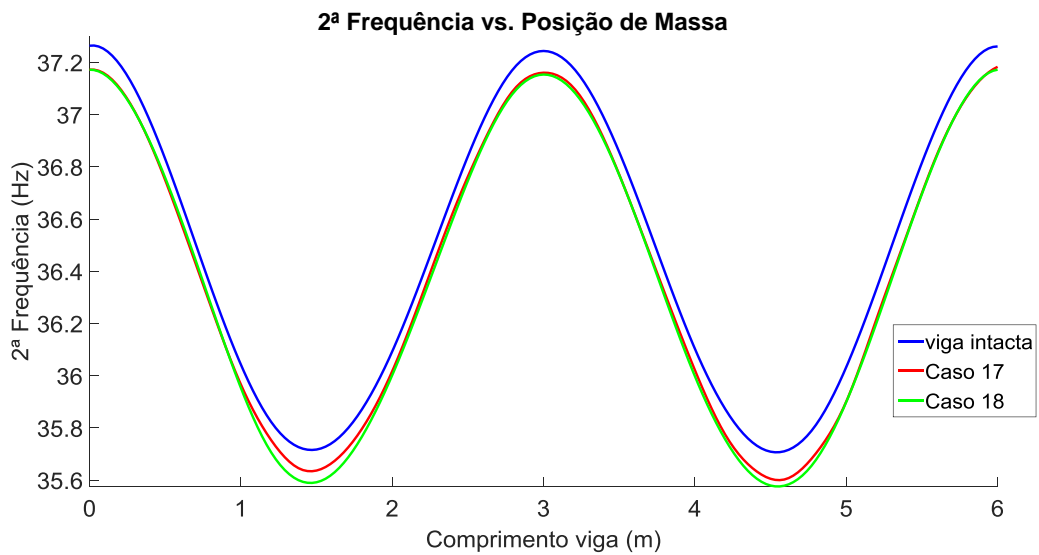


Figura 5.315 – Resumo Segunda Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6 m).

Nas Figura 5.314 e Figura 5.315, observa-se a para os casos de dano uma diminuição da segunda frequência devida ao aumento progressivo do dano.

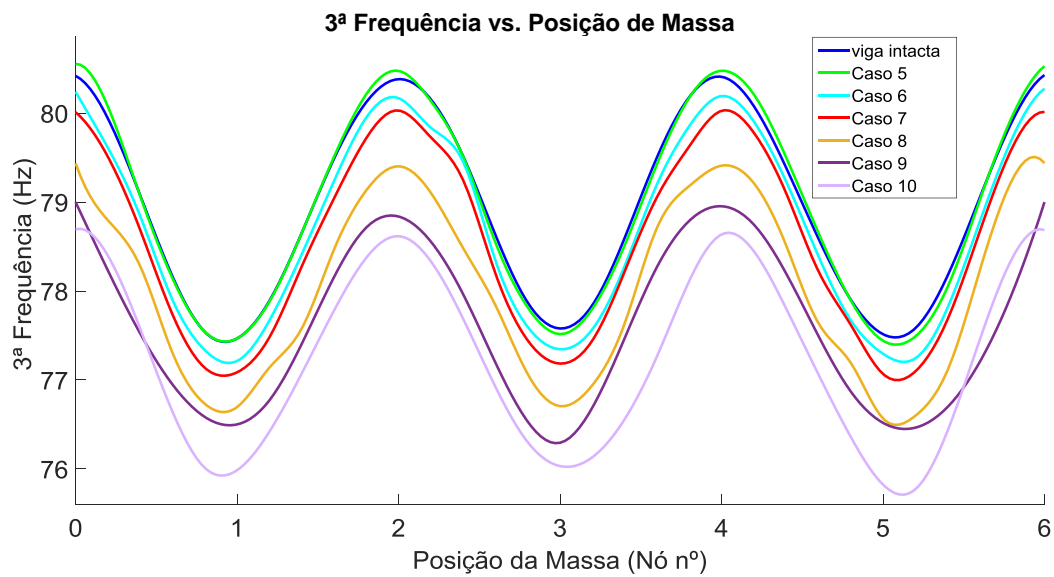


Figura 5.316 – Resumo Terceira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6 m).

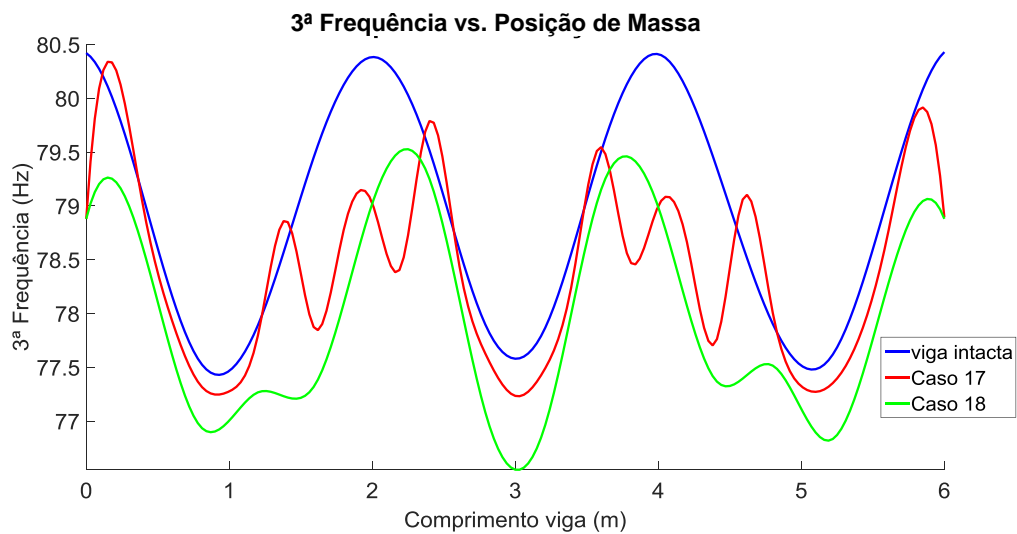


Figura 5.317 – Resumo Terceira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 6 m).

Nas Figura 5.316 e Figura 5.317, observa-se para os casos de dano 5, 6, 7, 8, 9 e 10 uma diminuição da terceira frequência devida ao aumento progressivo do dano.

Para os casos 5, 6, 7, 8 e 9 com danos localizados próximos ao apoio e sobre os quais não foi possível identificar o dano, apresentaram perturbações maiores do que as perturbações da viga intacta, fato que serve como ferramenta para determinar se a estrutura está danificada ou não. Segundo Rytter(2013) o método é classificado como nível I (Figura 5.318).

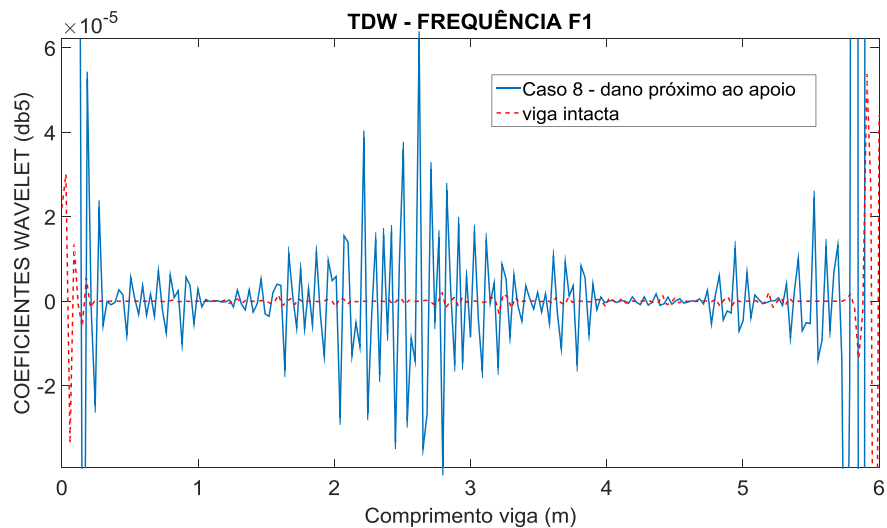


Figura 5.318– Gráfico coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada.

Na Figura 5.318 são apresentados os gráficos dos coeficientes Wavelets para a curva correspondente a primeira frequência do Caso 8 e da viga intacta (Caso 4). Os coeficientes wavelets para os casos de dano 5, 6, 7 e 9 apresentaram o mesmo comportamento.

Para o caso 18, com 3 entalhes localizados no meio do vão, a perturbação gerada pela presença do dano é claramente visível, apresentando também perturbações ao longo do sinal com amplitudes maiores do que os Coeficientes Wavelets da viga intacta (Figura 5.319).

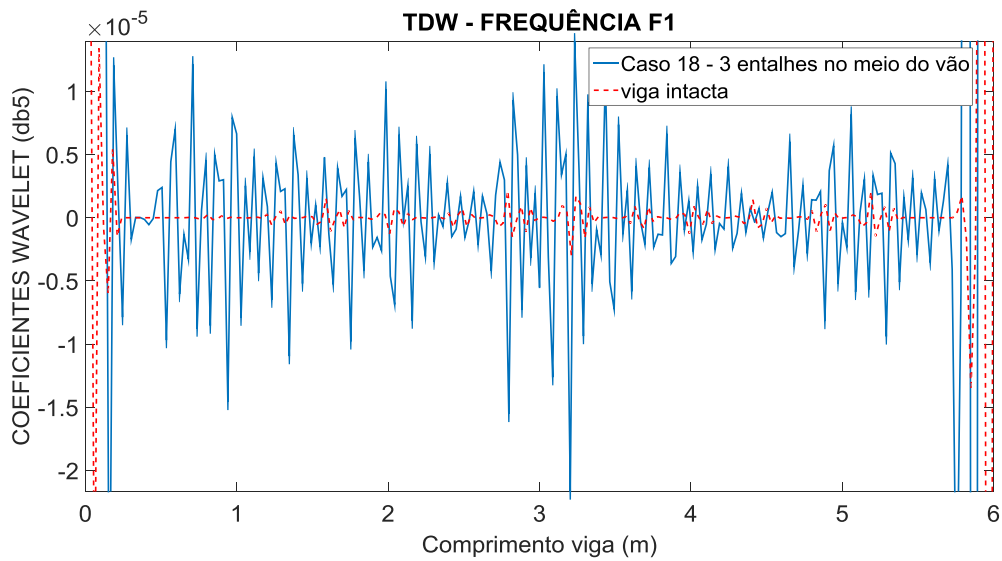


Figura 5.319– Gráfico Coeficientes Wavelets (db5) viga intacta e danificada.

Na Figura 5.320 é apresentado o gráfico correspondente aos Coeficientes Wavelets da viga intacta apresentados também na Figura 5.319. Observa-se o valor dos picos gerados na viga intacta tem uma ordem de grandeza por volta de $3E-6$, já na Figura 5.319 os picos gerados nos Coeficientes Wavelets na viga danificada apresentam valores por volta de $1e-5$. Os Coeficientes Wavelets apresentam perturbações nos extremos devidas a descontinuidade geométrica da viga nos apoios.

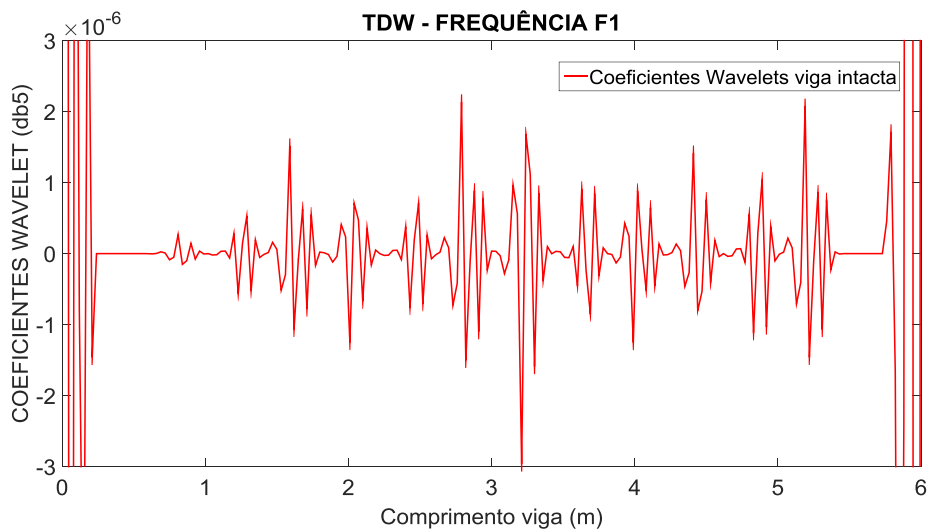


Figura 5.320 – Gráfico Coeficientes Wavelets (db5) viga intacta.

6. - ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica foi realizada como o objetivo de reproduzir ao máximo as condições reais dos ensaios feitos com vigas metálicas no laboratório, considerando os seguintes parâmetros:

- a) Tipo de análise (transiente);
- b) Apoios (biapoiada);
- c) Tempo de análise (t);
- d) Força de impacto (excitação);
- e) Amortecimento da estrutura;
- f) Massa adicional;
- g) Geometria da estrutura em 3D;
- h) Simulação do dano;
- i) Discretização da viga (geração da malha);
- j) Espectro de acelerações (sinal temporal $x(t)$);
- k) Inclusão do ruído no sinal;
- l) Janelamento;
- m) Métodos para correção de frequências;
- n) Identificação das frequências;
- o) Obtenção das curvas Frequências (F) vs. Posição de Massa (M);
- p) Interpolação;
- q) Aplicação TDW;

O software utilizado para modelar a estrutura foi o ANSYS (versão 11.0 - APDL). A fim de realizar a escolha do elemento que melhor represente a análise experimental, foram testados 4 elementos disponíveis na biblioteca do ANSYS:

- a) BEAM3;
- b) BEAM188;
- c) SHELL63;
- d) SOLID45;

As características de cada um dos elementos citados anteriormente são apresentadas a seguir:

a) BEAM3: é um elemento uniaxial com tensão, compressão e capacidade de flexão. O elemento tem três graus de liberdade por nó; translação nos eixos x e y e rotação ao redor do eixo z (Palechor (2013)).

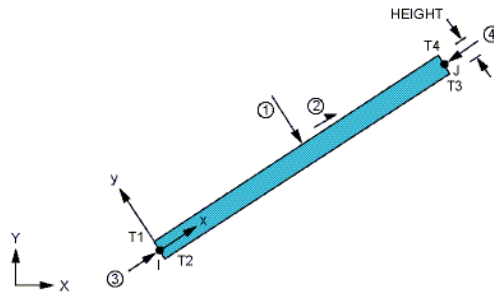


Figura 6.1 - Elemento BEAM3, da Biblioteca (ANSYS, 2007).

b) BEAM188: este elemento é linear composto por 2 nós, com seis graus de liberdade por nó (Figura 6.2), deslocamentos x, y, z e rotação em torno de x, y e z, respectivamente, e é utilizado na modelagem de vigas, sendo possível definir qualquer tipo de seção (Rêgo (2013)).

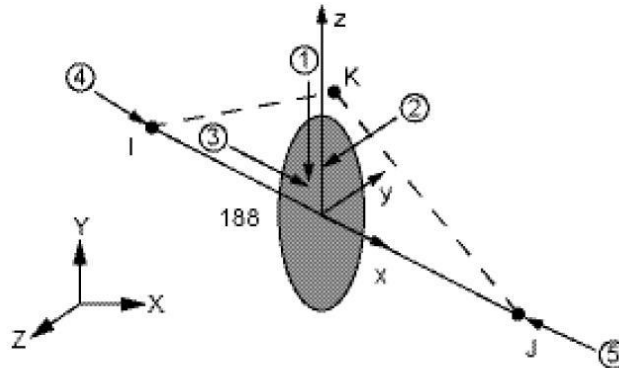


Figura 6.2 - BEAM188, elemento do ANSYS.

c) SHELL63: este elemento tem aplicações na modelagem de estruturas feitas a partir de lâminas ou em elementos de parede delgada. Na Figura 6.3, mostra-se o elemento. Este elemento é definido por 4 nós, cada um dos quais tem seis graus de liberdade: 3 de translação e 3 de rotação. Os eixos de coordenadas x e y do elemento são definidos no mesmo plano do elemento e tem uma espessura que é definida em suas constantes reais. O sistema coordenado deste elemento define uma face superior e uma face inferior (Ansys (2012)).

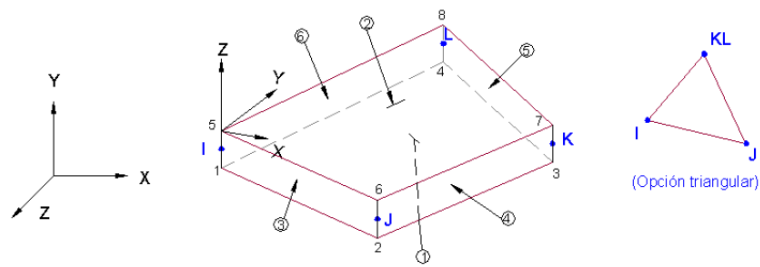


Figura 6.3 - Elemento SHELL63, da Biblioteca (ANSYS, 2007).

d) SOLID45: as características da modelagem numérica e do elemento SOLID45 são apresentadas na seção seguinte (seção 6.1).

As características tanto geométricas quanto do material, utilizadas na modelagem da viga, foram os mesmos valores apresentados na Tabela 6.1 e as propriedades determinadas experimentalmente no capítulo 4 (Área A , Momento de inércia I_x , Módulo de elasticidade E , Densidade ρ).

Tabela 6.1- Propriedades geométricas e do material – modelagem numérica.

DADOS PERFIL - I	
Material	Aço
h (m)	0,1016
bf (m)	0,0676
tw (m)	0,00483
tf (m)	0,0074
E (Pa)	200,0474E+9
Coefficiente de Poisson	0,3
A (m ²)	1,43156E-03
I _x (m ⁴)	2,4513E-06
Comprimento (m)	5,0 e 6,0 m
ρ (densidade kg/m ³)	7858,156

Os parâmetros de comparação considerados na escolha do elemento foram as frequências naturais, portanto, o objetivo das quatro modelagens utilizando cada um dos elementos antes mencionados, foi estabelecer qual deles oferece uma maior aproximação dos resultados reais. Para isso, foram consideradas as frequências analíticas obtidas com o desenvolvimento da equação do movimento da viga de Euler Bernoulli, como parâmetro de comparação (Equação (6.1)).

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad ; \quad \lambda_i = n\pi \quad (6.1)$$

Para a escolha do tipo de elemento, foi considerada a modelagem numérica da viga de 6 m de comprimento e os parâmetros estabelecidos foram reproduzidos nas vigas de 5 m.

Os resultados das primeiras cinco frequências naturais para a viga intacta de 6 m de comprimento, são apresentados nas Tabela 6.2 a Tabela 6.5.

Tabela 6.2 – Frequências obtidas na modelagem numérica com o elemento BEAM188.

f(Hz)	Viga Timoshenko BEAM188	Analítica	Diferença (%)
1	9,229	9,110	1,302
2	36,675	36,440	0,645
3	90,219	81,990	10,037
4	143,070	145,760	1,846
5	219,600	227,750	3,579

Tabela 6.3 – Frequências obtidas na modelagem numérica com o elemento BEAM3.

f(Hz)	Viga Bernoulli BEAM3	Analítica	Diferença (%)
1	9,209	9,110	1,083
2	36,808	36,440	1,010
3	82,721	81,990	0,892
4	146,820	145,760	0,727
5	210,990	227,750	7,359

Tabela 6.4 – Frequências obtidas na modelagem numérica com o elemento SHELL63.

f(Hz)	SHELL63	Analítica	Diferença (%)
1	10,407	9,110	14,237
2	41,194	36,440	13,046
3	91,039	81,990	11,037
4	156,560	145,760	7,409
5	250,320	227,750	9,910

Tabela 6.5 – Frequências obtidas na modelagem numérica com o elemento SOLID45.

f(Hz)	SOLID45	Analítica	Diferença (%)
1	9,6918	9,110	6,386
2	38,410	36,440	5,406
3	85,058	81,990	3,742
4	146,924	145,760	0,798
5	237,517	227,750	4,288

A modelagem mais próxima em relação à primeira frequência foi com o elemento BEAM3 apresentado um erro de 1,083% em relação à frequência obtida analiticamente.

Entre os elementos SHELL63 e SOLID45, este último apresentou resultados mais próximos dos analíticos e com o objetivo de se ter uma modelagem numérica em 3D que simule melhor a geometria do dano como sendo uma eliminação dos elementos (entalhe) mais próximo da realidade, foi escolhido o elemento SOLID45.

O tipo de análise desenvolvida foi dinâmica transiente, visando ter um maior controle dos resultados, inclusive facilitando a inserção de ruído $r(t)$ no sinal temporal $x(t)$ correspondente ao espectro de acelerações.

No seguinte fluxograma é apresentado o roteiro executado na análise numérica transiente:

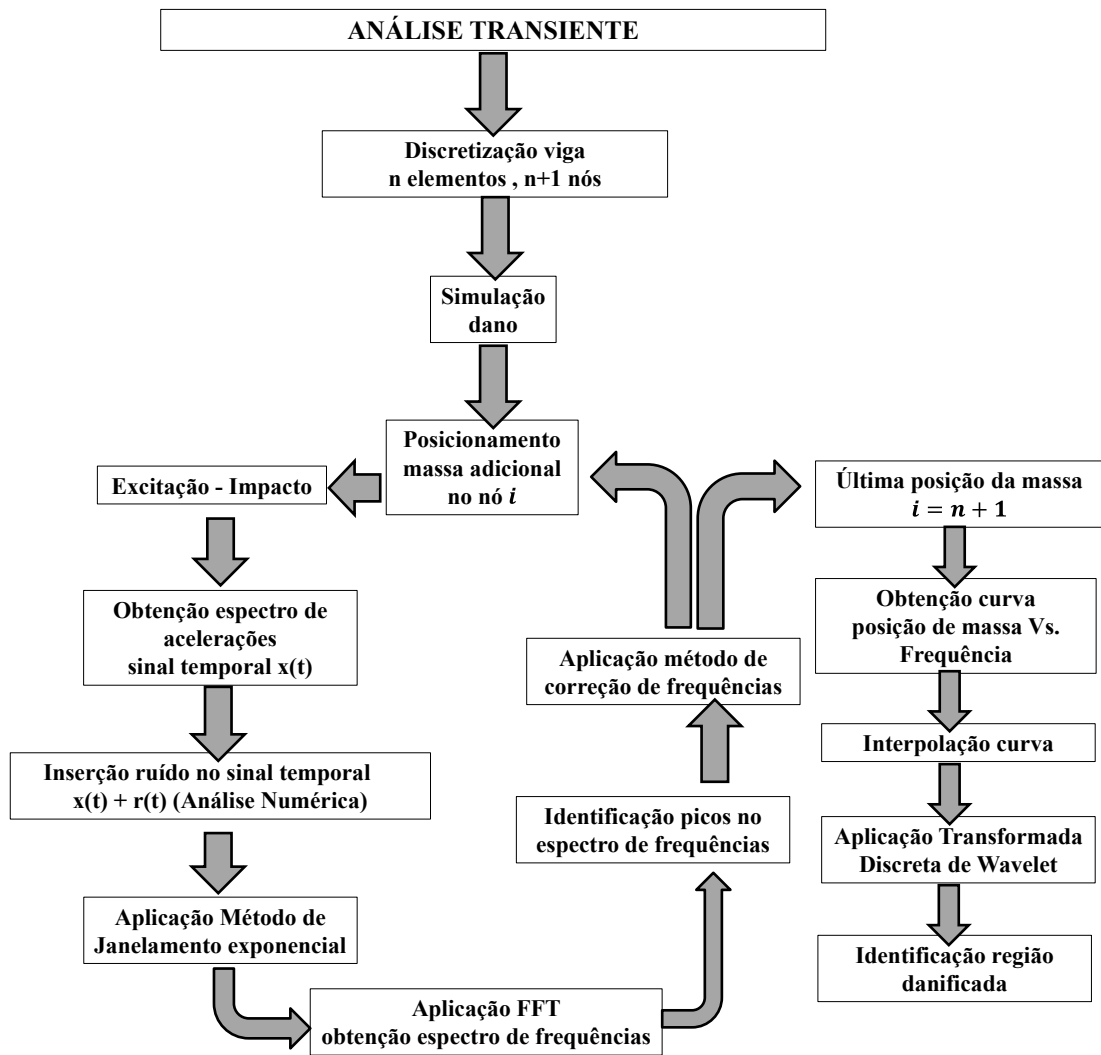


Figura 6.4 – Fluxograma modelagem numérica transiente.

A seguir são apresentadas as modelagens feitas com o elemento SOLID45.

6.1 -Modelagem numérica Elemento SOLID45

O elemento SOLID45 é usado para modelagem de estruturas sólidas 3-D, tal elemento é composto por 8 nós com 3 graus de liberdade em cada um (Figura 6.5).

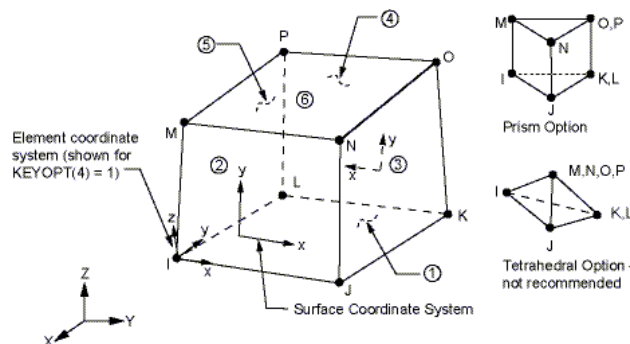


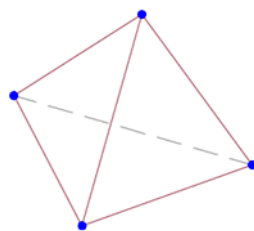
Figura 6.5 - Elemento SOLID45 obtido da Biblioteca do ANSYS (ANSYS, 2007).

A geometria, as localizações dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento estão representados na Figura 6.5. O elemento é definido por 8 nós. Cada um dos nós tem 3 graus de liberdade, correspondente a 3 direções de deslocamento. O elemento básico tem forma de hexaedro, mas pode ser utilizado como um prisma.

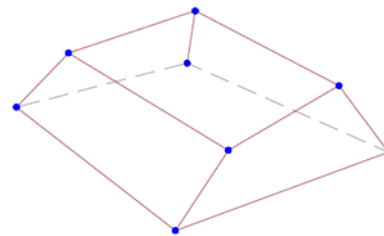
A Figura 6.5 identifica as faces do elemento e representa o sistema de coordenadas. As propriedades do material são ortotrópicas (quando suas propriedades mecânicas são únicas e independem das direções de três eixos mutuamente perpendiculares).

O método dos elementos finitos é um dos métodos mais práticos para a análise de estruturas. A análise de modelos 3-D necessita de maior uso de recursos computacionais e utiliza mais tempo de execução do que uma análise unidimensional ou bidimensional. Por isso, é importante simplificar ao máximo as condições e características do modelo.

As formas básicas dos elementos para a modelagem 3-D são o tetraedro e o hexaedro, conforme representado na Figura 6.6. O tetraedro não é muito utilizado devido a maior quantidade de elementos requeridos para gerar uma boa malha, o que implica num maior tempo de resolução da análise. Além disso, a visualização do modelo em tetraedros (pirâmides) não é tão fácil como a divisão de hexaedros (blocos).



(c) Tetraedro.



(d) Hexaedro.

Figura 6.6 - Modelagem 3-D com o elemento SOLID45 obtido da Biblioteca do ANSYS (ANSYS, 2007).

As cargas para este elemento são definidas em dois tipos: cargas nodais e cargas do elemento. As cargas nodais são definidas nos nós e não estão diretamente relacionadas aos elementos. Estas cargas nodais estão associadas aos graus de liberdade no nó e normalmente são inseridas como restrições de deslocamentos, forças e cargas nodais. As cargas do elemento são cargas de superfície que consideram o peso próprio do corpo além das cargas de inércia. As características do elemento SOLID45 estão resumidas na Tabela 6.6.

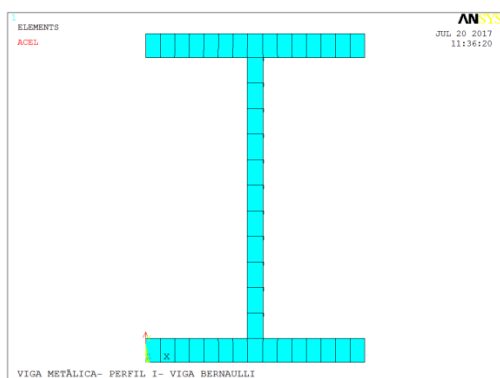
Tabela 6.6 - Características do elemento SOLID45.

CARACTERÍSTICAS DO ELEMENTO SOLID45	
Nodos	I,J,K,L,M,N,O,P
Graus de liberdade	UX, UY,UZ
Propriedades do Material	E (módulo de elasticidade), PRX (coeficiente de Poisson), DENS (densidade), DAMP (coeficiente de amortecimento)
Cargas Superficiais- pressão	Face 1 (J-I-L-K), face 2 (I-J-N-M), face 3 (J-K-O-N), face 4 (K-L-P-O), face 5 (L-I-M-P), face 6 (M-N-O-P)

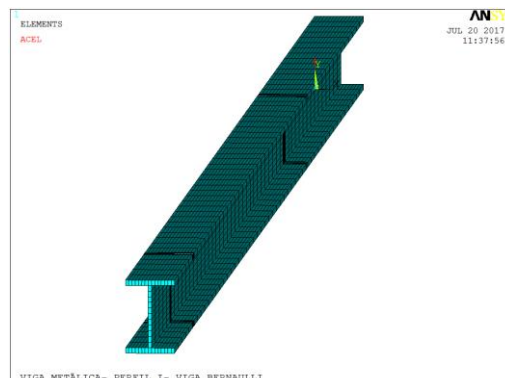
6.2 - Discretização da viga (geração da malha)

A geometria da viga foi gerada de acordo com as características próprias que foram testadas, conforme representado na Figura 6.7, e as propriedades determinadas experimentalmente (Área A , Momento de inércia I_x , Módulo de elasticidade E , Densidade ρ).

A discretização da malha ficou condicionada pelo número total de elementos devido a complexidade e gasto computacional, esta discretização foi gerada de forma regular e nas regiões danificadas foi realizado um refinamento para facilitar a eliminação de elementos na simulação do entalhe (Figura 6.7).



a) Seção transversal.



b) Discretização longitudinal.

Figura 6.7 – Discretização da viga na modelagem numérica.

Para a escolha do número de elementos foi verificada a convergência da frequência fundamental. Para isso foi realizada uma análise modal na viga de 5 m de comprimento, mudando o número de elementos de acordo com a discretização da mesma em relação ao eixo longitudinal, ou seja, variando o tamanho dos elementos em relação ao eixo z. Os resultados são apresentados na Tabela 6.7

Tabela 6.7 - Convergência malha do modelo com o elemento SOLID45.

Comprimento do elemento (m)	Nº elementos	Primeira Frequência F1 (Hz)	Primeira Frequência-Analítica Blevins F1 (Hz)
0,200	1517	13,232	13,1184
0,100	2501	13,212	13,1184
0,080	3403	13,208	13,1184
0,060	4510	13,206	13,1184
0,040	5453	13,205	13,1184
0,020	10578	13,204	13,1184
0,010	20869	13,203	13,1184
0,005	41246	13,203	13,1184

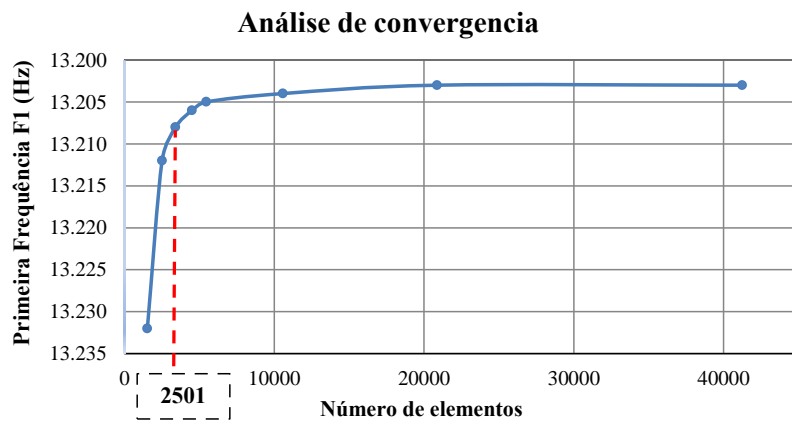


Figura 6.8 - Gráfico da convergência para o elemento SOLID45.

Na Figura 6.8 é mostrado que a convergência da primeira frequência com o elemento SOLID45 estabiliza após 10.000 elementos, e considerando o gasto computacional foram testadas várias configurações de malha. Nessa pesquisa foi escolhido o modelo com uma malha de 2.501 elementos executado em um computador com as seguintes características: Memória ram de 8 Gb, Processador Intel Core i7-4700MQ @2,40GHz, sistema operacional Windows 7 Ultimate, com um tempo total de processamento de 72 horas por cada modelo. De acordo com as características acima, se torna inviável considerar malhas mais refinadas, além disso, a diferença da primeira frequência em relação a frequência analítica é de apenas 0,7%.

6.3 - Simulação do dano

Nos ensaios experimentais os danos foram simulados realizando entalhes simétricos nas mesas superior e inferior. Na modelagem numérica a discretização foi feita de forma

regular para facilitar a simulação do dano, deletando elementos da malha de acordo com a geometria dos casos de dano apresentados na seção 4.9 (Figura 6.9).

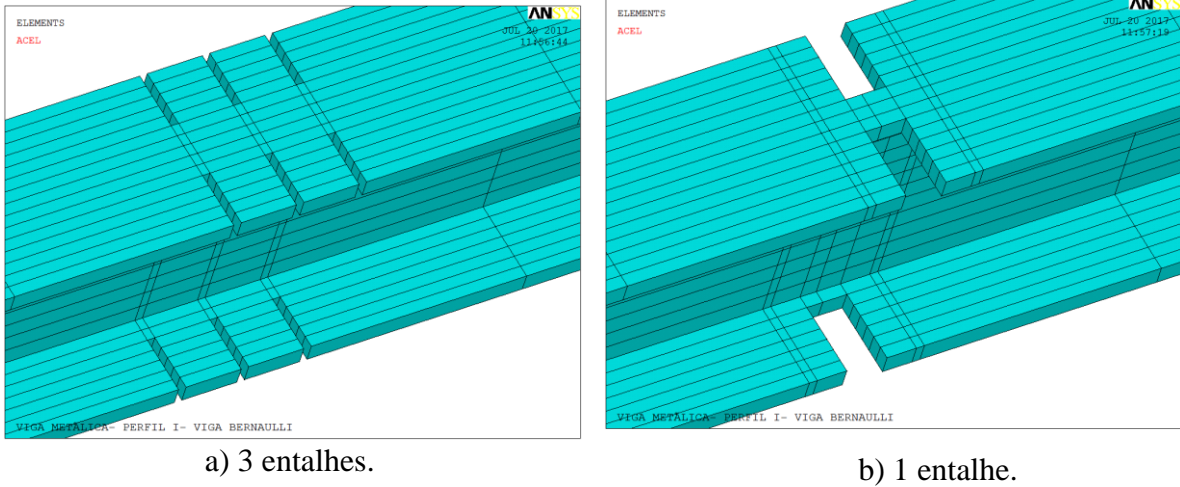


Figura 6.9 – Simulação do dano na análise numérica.

6.4 - Apoios

As condições de apoio foram reproduzidas na análise numérica, restringindo a fileira de nós que estiveram em contato com os roletes utilizados nos ensaios experimentais. As restrições foram de acordo com o tipo de apoio (1º e 2º gênero) (Figura 6.10).

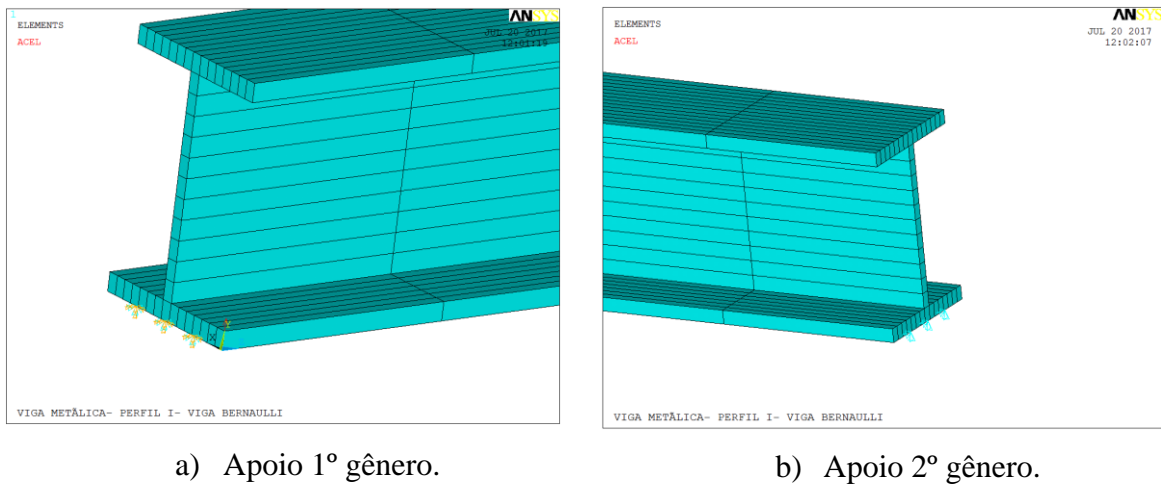


Figura 6.10 – Apoios análise numérica.

6.5 - Massa adicional

Para simular o efeito da massa adicional, foi utilizado o elemento MASS21 como mostra a Figura 6.11. Este elemento de massa concentrada pode ter até 6 graus de liberdade, sendo 3 de translação e 3 rotação nas direções x, y e z. Os valores de massa e inércia rotacional podem ser atribuídos a cada direção em relação aos 3 eixos coordenados.

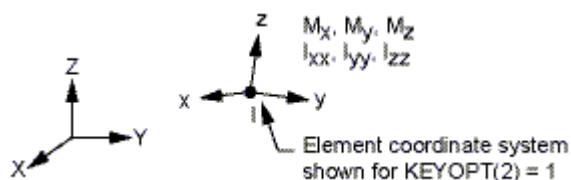


Figura 6.11- Características do elemento MASS21 (ANSYS, 2007).

Este elemento foi utilizado para simular a massa adicional colocada na parte superior da viga sobre os nós definidos previamente na discretização. Neste caso foram testadas massas de 3,266 kg, que apresentaram os melhores resultados nos ensaios experimentais. O elemento de massa adicional MASS21 foi aplicado diretamente no nó como mostra a Figura 6.12.

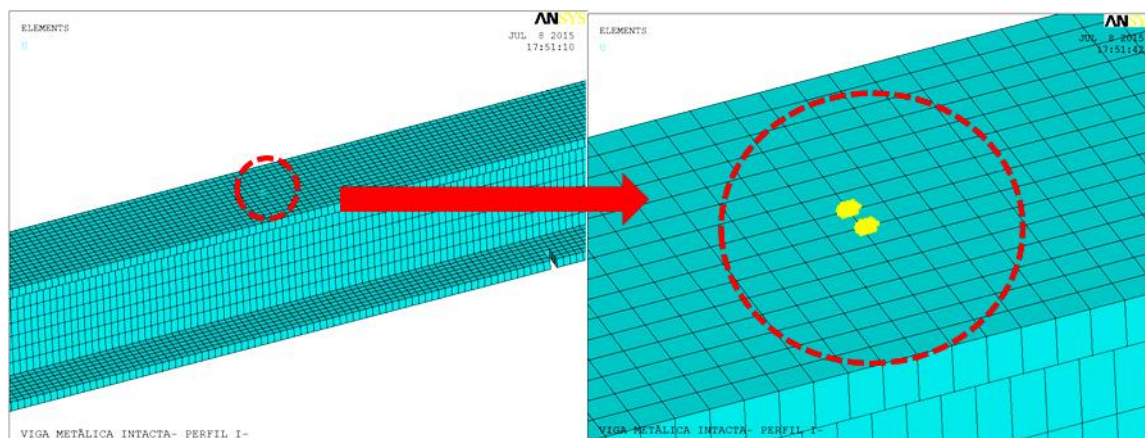


Figura 6.12- Aplicação do elemento MASS21 na modelagem numérica.

Na modelagem numérica foi considerada a ação da inércia rotacional da massa gerada pelas chapas de aço utilizadas como massas adicionais (seção 5.3). Esta propriedade foi introduzida dentro das constantes reais do elemento MASS21. O eixo de rotação da massa adicional foi o eixo longitudinal que passa pelo centro de gravidade da seção transversal da viga (Figura 6.13).

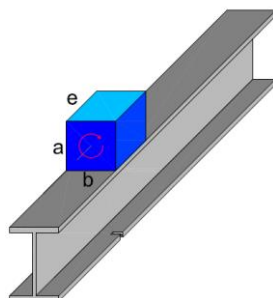


Figura 6.13- Características inércia rotacional gerada pelas chapas de aço.

A Equação (6.2) foi utilizada para determinar o valor da inércia rotacional, considerando a altura da massa adicional como sendo um cubo de 10 cm de altura (seção 5.3).

$$I = \frac{1}{12} M(a^2 + b^2) \quad (6.2)$$

6.6 - Tipo de análise (transiente)

A análise dinâmica transiente é uma técnica utilizada para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura sob uma carga variável no tempo. O período de tempo, inércia e amortecimento, são parâmetros importantes neste tipo de análise.

A importância de tais parâmetros se dá quando a estrutura está submetida a uma condição de carga representada por um impulso, isto é, quando há uma mudança de carga acentuada em uma fração de tempo. Se os efeitos da inércia são insignificantes para as condições de carga a ser consideradas, uma análise estática pode ser usada em seu lugar.

Para o modelo desenvolvido nesta pesquisa, a viga foi submetida à uma carga (impulso) que gerou um impacto na região central com uma força igual a força máxima desenvolvida pelo martelo de excitação nos ensaios experimentais de 400 N (40 kg). A força do martelo foi medida utilizando o sistema de aquisição de dados e o software LABVIEW. Esta força apresentou os melhores resultados excitando a primeira e a segunda frequência (Figura 6.14).

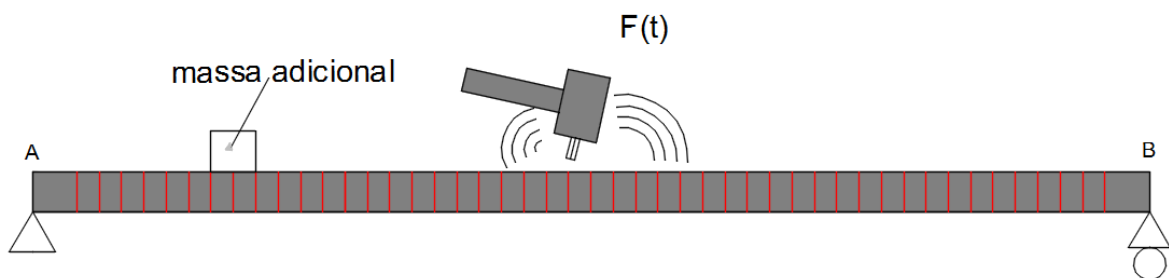


Figura 6.14 – Força de excitação considerada no modelo numérico.

Uma vez escolhida a força de impulso ideal para excitar todos os modos de vibração, a resposta da viga deve conter todas as frequências referentes a cada modo. No entanto, não é possível produzir uma força de impulso numérica ideal, ao invés disso, é aplicada uma força constante ao longo de um período de tempo curto dt (Figura 6.15).

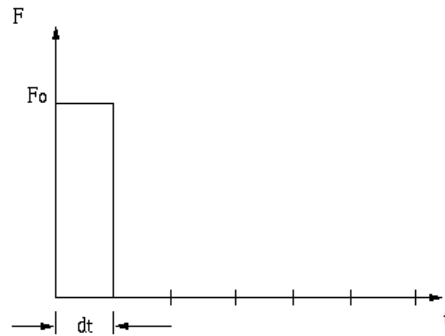


Figura 6.15 – Função impulso $F(t)$.

A força aplicada na análise numérica foi escolhida de acordo com a força máxima que pode ser desenvolvida pelo martelo utilizado nos ensaios experimentais, cujo valor é de 400 N, e o tempo de aplicação utilizado dt , foi de 0,01 s. A força $F(t)$ foi aplicada no trecho central da viga entre $L/3$ e $L/2$.

O tamanho do passo de tempo Δt é regulado pela frequência máxima, de modo que a estrutura deseja captar. Quanto menor o intervalo de tempo, maior é a frequência do modo que irá capturar (Ansys (2012)).

$$\Delta t = \frac{1}{20f} \quad (6.3)$$

Onde f é a frequência mais alta que se pretende capturar e Δt o intervalo de tempo. Nesta pesquisa foi utilizado um passo de tempo Δt , igual ao utilizado nos ensaios experimentais de 0,000605 s. De acordo com este intervalo de tempo a frequência mais alta que poderia ser capturada seria de 82,64 Hz (Equação (6.4)). Desta forma o intervalo de tempo escolhido serviu para a modelagem proposta, devido ao fato da terceira frequência variar na faixa de 80 e 110 Hz, nas vigas de 5 e 6 m de acordo com a massa adicional utilizada.

$$f = \frac{1}{20\Delta t} = \frac{1}{20(0,000605)} = 82,64\text{Hz} \quad (6.4)$$

6.7 - Amortecimento da estrutura

O amortecimento é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e de estruturas, sendo particularmente sensível à presença de danos. É o fenômeno pelo qual a energia mecânica de um sistema gerada por uma fonte de excitação é dissipada em forma de calor

ou energia. Esta propriedade determina a amplitude, frequência e o tempo de vibração após cessada a excitação (Asha (2010)).

Ocorrem três formas principais de dissipação de energia em um sistema:

- Amortecimento ou atrito interno (material);
- Amortecimento estrutural (apoios, ligações);
- Amortecimento fluídico (interação fluido estrutura).

O amortecimento interno está associado aos defeitos da microestrutura do material. O movimento de um sistema pode ser também descrito por equações diferenciais baseadas nas Leis de Newton, que envolvem parâmetros variáveis no tempo. Para alguns tipos de materiais, observa-se que a força do amortecimento não depende significativamente da frequência. Este tipo de amortecimento interno é chamado de amortecimento hysterético.

O amortecimento estrutural é resultado da dissipação de energia mecânica causada por fricção devido ao movimento relativo entre componentes e por impacto ou contato intermitente nas articulações ou apoios da estrutura. (Asha (2010))

O amortecimento fluídico corresponde a um componente mecânico movendo-se em um fluido. A força de arraste é expressa em função da densidade do fluido, de uma constante de arraste (em função do número de Reynold's e da geometria) e da velocidade relativa.

É importante considerar o amortecimento de uma estrutura para simular corretamente o comportamento dinâmico, para isto, o software ANSYS oferece três formas de executar uma análise transiente:

1. Completo (“*full*”);
2. Superposição de modos (“*mode-superposition*”);
3. Reduzido (“*reduced*”).

Dos três métodos mencionados anteriormente, somente o método completo permite a obtenção das acelerações nodais (sinal temporal $a(t)$), por esta razão foi escolhido este método para desenvolver os modelos desta pesquisa. O método completo não reduz as matrizes e é o mais geral e dos três métodos.

As seguintes formas de amortecimento estão disponíveis no programa ANSYS:

- Amortecimento Alfa (α) e Beta (β) (Amortecimento de Rayleigh);
- Amortecimento do material;
- Razão de amortecimento ξ ;
- Amortecimento modal.

A razão de amortecimento ξ e o amortecimento α , são utilizados para simular o amortecimento viscoso e a constante β o amortecimento hysterético.

Na análise transiente completa realizada no ANSYS, foi necessário ingressar os valores de amortecimento viscoso e hysterético por intermédio das constantes α e β utilizadas em conjunto para calcular o modelo de amortecimento de Rayleigh.

A concepção básica da construção de matriz de amortecimento é atribuída a Lord Rayleigh e tem como base a combinação linear (Soriano (2014)):

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (6.5)$$

Onde:

[C]: matriz de amortecimento;

[M]: matriz de massa;

[K]: matriz de rigidez.

A partir do estabelecimento das razões de amortecimento de dois modos naturais de vibração, as constantes de proporcionalidade α e β são determinadas com a condição de que a matriz modal seja ortogonal em relação a matriz [C].

Logo, com a especificação das razões de amortecimento ξ_i e ξ_j , respetivamente para o i-ésimo e para o j-ésimo modos de vibração, obtém-se as seguintes expressões para as constantes de proporcionalidade α e β (Soriano (2014)):

$$\alpha = 2 \frac{\omega_i^2 \omega_j \xi_j - \omega_i \omega_j^2 \xi_i}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \quad (6.6)$$

$$\beta = 2 \frac{\omega_i \xi_i - \omega_j \xi_j}{\omega_i^2 - \omega_j^2}$$

Para especificar tanto α como β para uma dada razão de amortecimento ξ , é comum assumir que a soma dos termos α e β é quase constante em uma faixa de frequências (Figura 6.16). Portanto, dado ξ e uma faixa de frequência ω_i a ω_j , duas equações simultâneas podem ser resolvidas para α e β (Equação (6.7)).

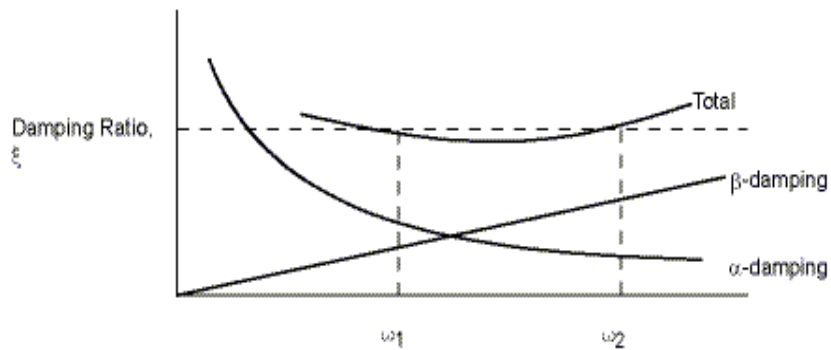


Figura 6.16 – Amortecimento de Rayleigh (Ansys (2012)).

$$\xi_i = \alpha/2\omega_i + \beta\omega_i/2 \quad (6.7)$$

Onde:

w representa a frequência.

Com o estabelecimento da mesma razão ξ para os modos de referência φ_i e φ_j , as razões α e β tomam as formas:

$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (6.8)$$

$$\beta = 2\xi \frac{1}{\omega_i + \omega_j}$$

Assim, para determinar o coeficiente de amortecimento ξ da viga metálica (perfil-I) biapoiada, foi realizada uma análise modal experimental na viga intacta de 6 m de comprimento, sem a adição de nenhuma massa adicional e defeitos. A viga foi dividida em 10 elementos (11 nós) de comprimento igual a 60 cm (Figura 6.17 e Figura 6.18).



a)



b)

Figura 6.17 – Montagem experimental análise modal.

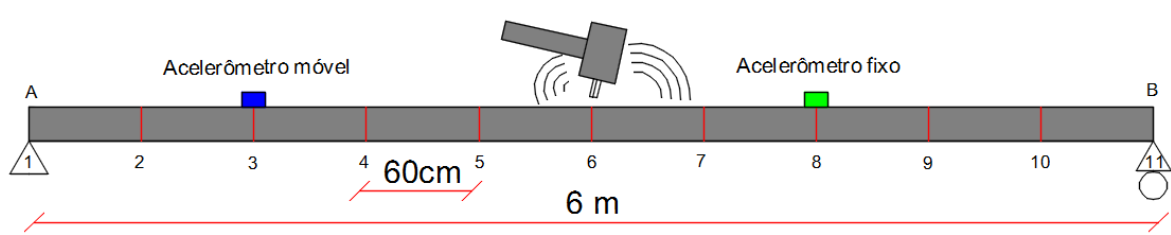


Figura 6.18 – Análise modal experimental para o cálculo do amortecimento.

Nos ensaios experimentais foram adotados um acelerômetro fixo no nó 8 e um acelerômetro móvel. Após a obtenção dos resultados experimentais dos espectros de acelerações foram processados utilizando o pacote computacional ARTEMIS Modal Pro.

Na Figura 6.19 é apresentada a geometria e configuração no software ARTEMIS.

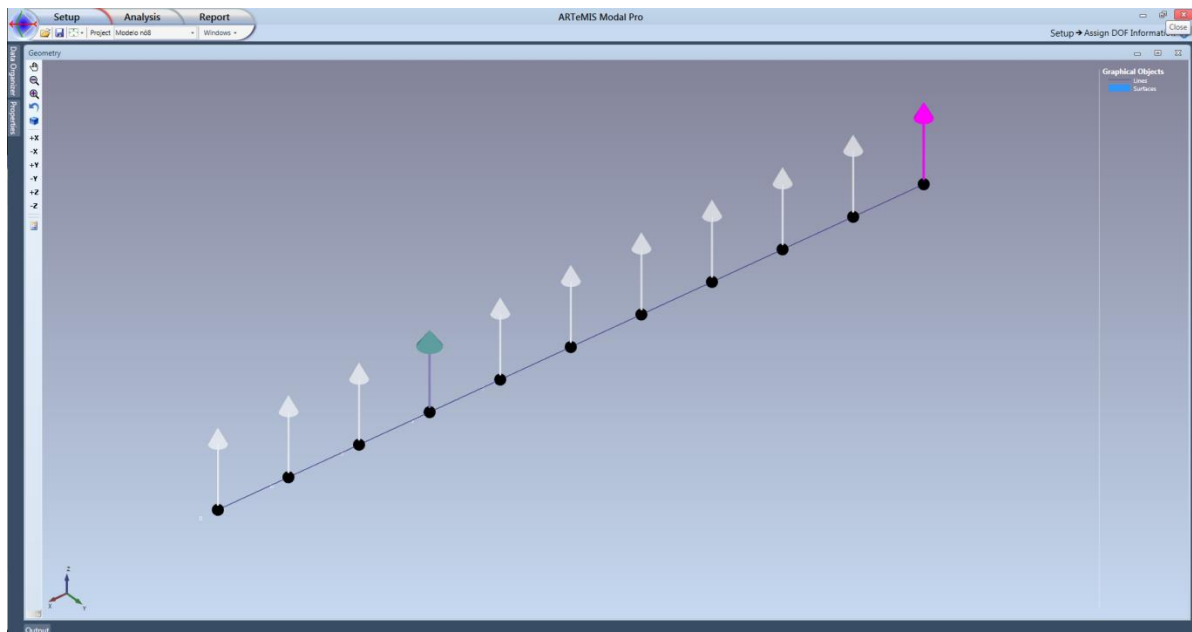


Figura 6.19 – Processamento dados experimentais no software ARTEMIS.

Nas Figura 6.20 e Figura 6.21, é apresentada a inserção dos 11 espectros de acelerações correspondetes a cada posição do acelerômetro móvel, os quais foram vinculados a cada nó.

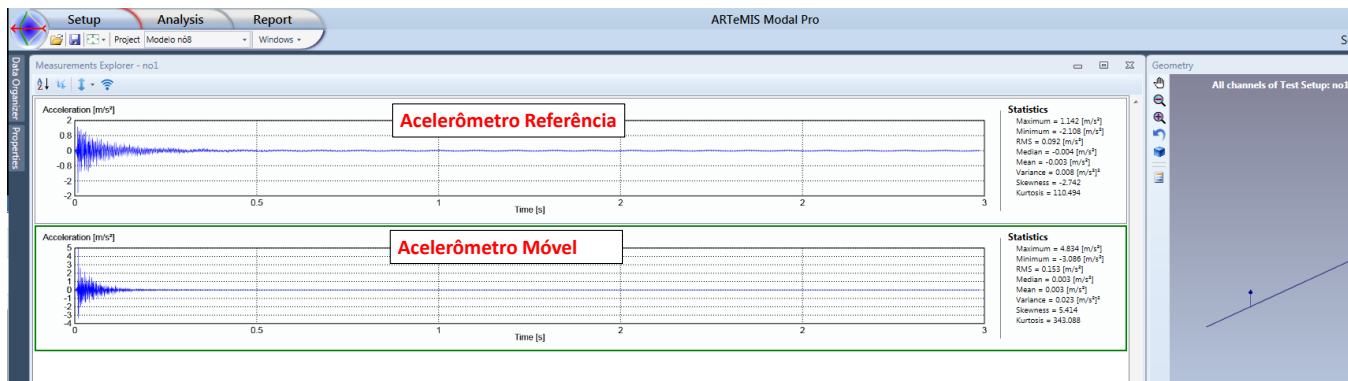


Figura 6.20- Inserção das leituras dos acelerômetros no software ARTEMIS.

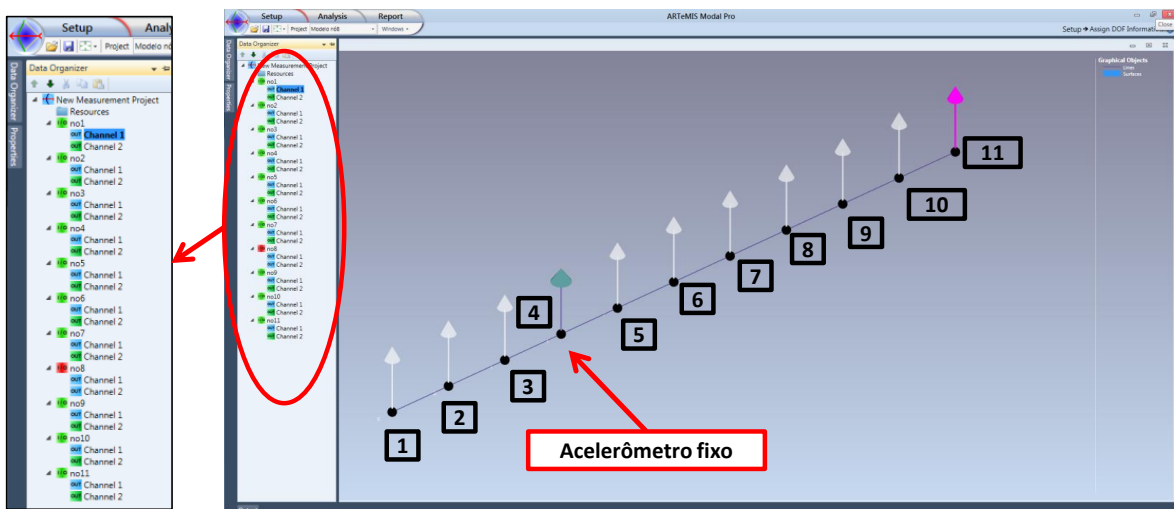


Figura 6.21 – Vinculação dos sinais dos acelerômetros no software ARTEMIS.

Depois da vinculação dos espectros de acelerações realizou-se o processamento de dados pelo método *Decomposição no Domínio da Frequência (Enhanced Frequency Domain Decomposition EFDD)*. O método utiliza um algoritmo para identificação das características modais da estrutura a partir de medições experimentais. A técnica do método FDD é baseada na decomposição de valores singulares (*Singular Value Decomposition SVD*) da matriz de densidade espectral (*Spectral Density SD*) no domínio da frequência (Brincker; Ventura (2015)).

O método EFDD (Figura 6.22) foi utilizado tendo como objetivo determinar as frequências naturais da viga e o coeficiente de amortecimento ξ para as três primeiras frequências naturais da estrutura.

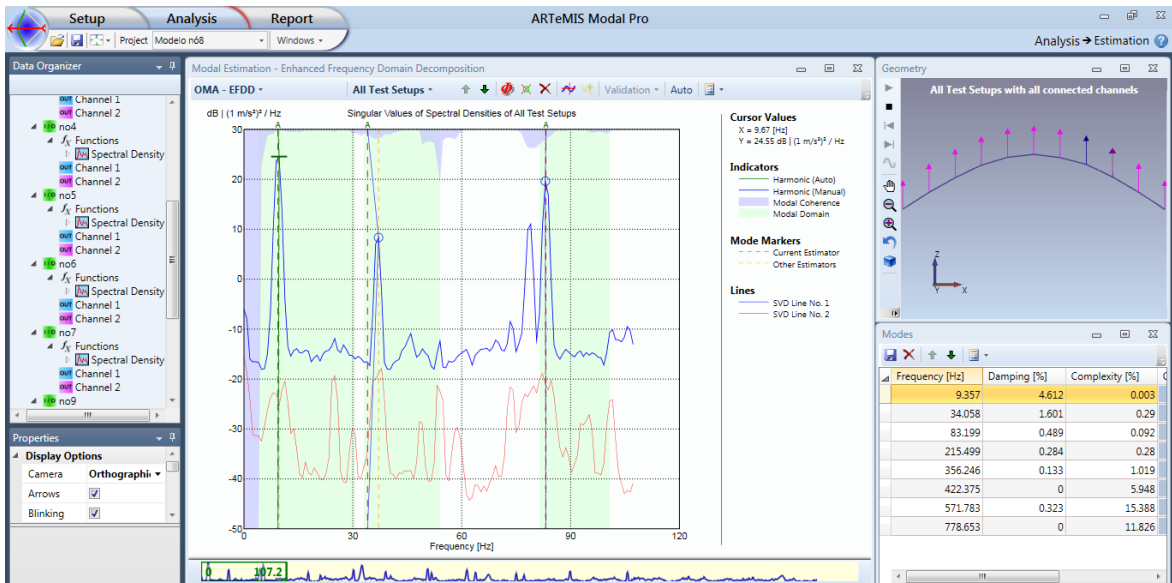


Figura 6.22 – Método EFDD.

Da Figura 6.23 até a Figura 6.25 são apresentados os resultados das três frequências naturais com seus respectivos modos de vibração e coeficientes de amortecimento.



Figura 6.23 – Primeiro modo de vibração $F_1=9,357\text{Hz}$, amortecimento $\xi=4,612\%$.

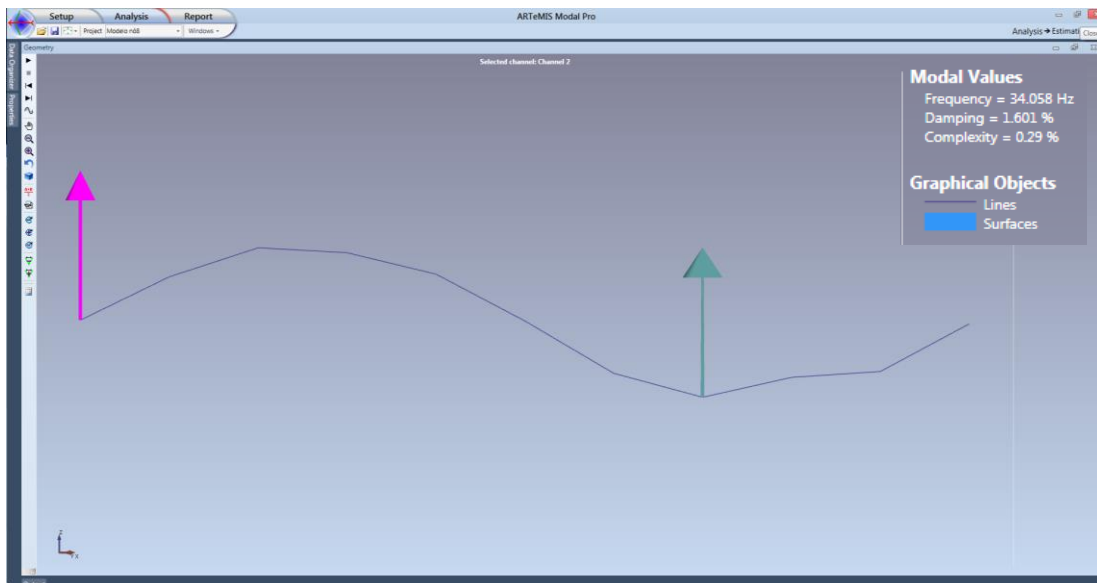


Figura 6.24 – Segundo modo de vibração $F_2=34,058\text{Hz}$, amortecimento $\xi=1,601\%$.

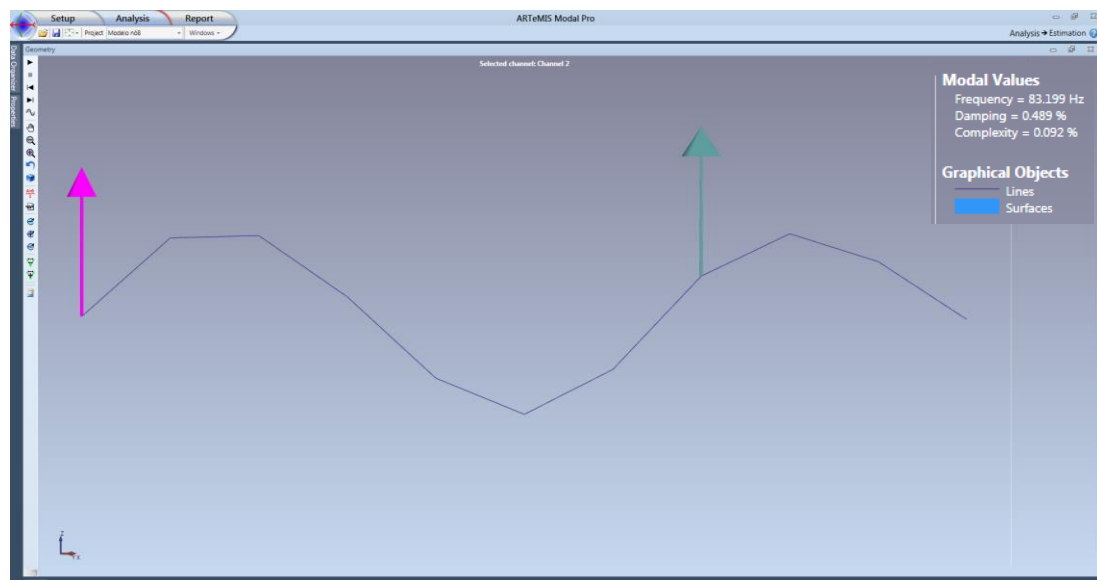


Figura 6.25 – Terceiro modo de vibração $F_3=83,199\text{Hz}$, amortecimento $\xi=0,489\%$.

O resumo das frequências e os coeficientes de amortecimento calculados no software ARTEMIS são apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Frequências e coeficientes de amortecimento ARTEMIS

Análise Experimental		
Nº Frequência	Frequências (Hz)	Coefficiente de Amortecimento (ξ %)
1	9,357	4,612
2	34,058	1,601
3	83,199	0,489

Para a execução da análise numérica transiente foram utilizados coeficientes α e β , diferentes para cada frequência natural, visto que os amortecimentos da estrutura variam para cada forma modal relacionada.

Assim, para cada caso foram reproduzidos três modelos numéricos, definindo em cada um deles uma das três frequências naturais como dominante, portanto o coeficiente de amortecimento predominante ξ , gerou coeficientes de amortecimento α e β , diferentes para cada modelo numérico. Os resultados são apresentados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Coeficientes de Rayleigh análise experimental utilizados na análise numérica.

Análise Experimental			Coeficientes Amortecimento de Rayleigh	
Nº Frequência	Frequências (Hz)	Coefficiente de Amortecimento (ξ %)	α	β
1	9,357	4,612	0,677072632073	0,002124611309
2	34,058	1,601	0,235037572409	0,000737533111
3	83,199	0,489	0,082260058349	0,000105665759

6.8 - Tempo de análise (t)

A configuração de frequência de amostragem (F_s), intervalo de tempo (Δt), número de dados analisados (N) e tempo total de análise (t), foram os mesmos adotados nos ensaios experimentais: frequência de amostragem $F_s = 1653$ Hz, $\Delta t = 0,000605$ seg e número de dados analisados $N = 16384$ (em escala diádica = 2^{14}).

Na Tabela 6.10 são apresentadas as diferentes configurações que foram testadas nos ensaios experimentais apresentados no capítulo 5.

Tabela 6.10 – Configurações do equipamento adotadas na análise numérica.

Configuração	Frequência de amostragem (F_s) Hz	Período T (Δt [seg])	Número de dados analisados (N)	Tempo total de análise t (seg)
1	4274	0,000234	8192	2
2	4274	0,000234	16384	4
3	2049	0,000488	8192	4
4	2049	0,000488	16384	8
5	1653	0,000605	16384	10
6	1653	0,000605	32768	20

6.9 - Espectro de acelerações (sinal temporal $x(t)$)

Após a análise transiente, foram obtidos do ANSYS, o vetor de acelerações em duas posições: um nó localizado em $L/2$ e outro em $L/4$, para determinar a primeira, terceira e segunda frequência respectivamente. Evitando assim os pontos de deslocamento nulos que apresentam o segundo e terceiro modo de vibração em $L/2$ e $L/3$ respectivamente.

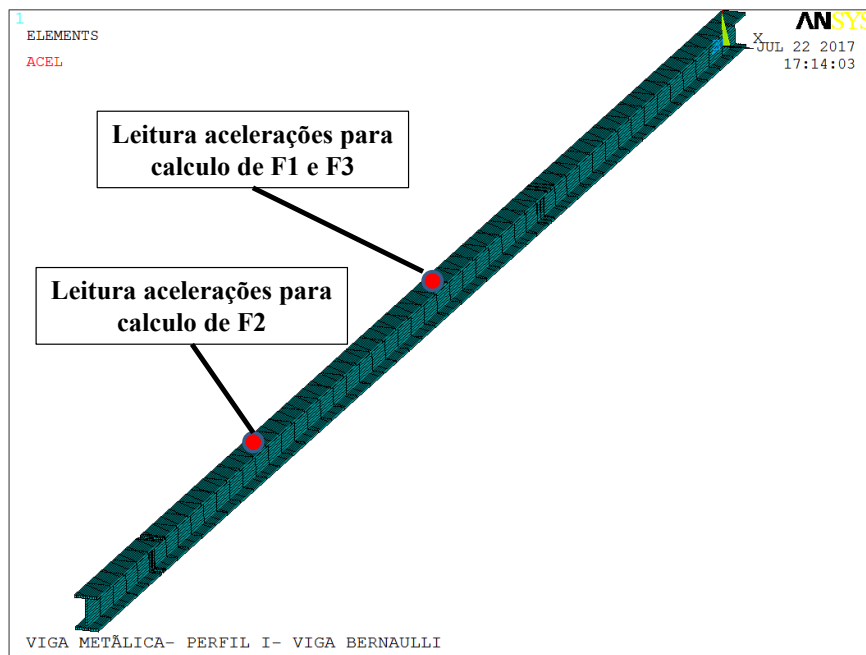


Figura 6.26 – Leitura acelerações na análise numérica.

Na Figura 6.27 é apresentado um dos espectros de acelerações obtidos na modelagem numérica.

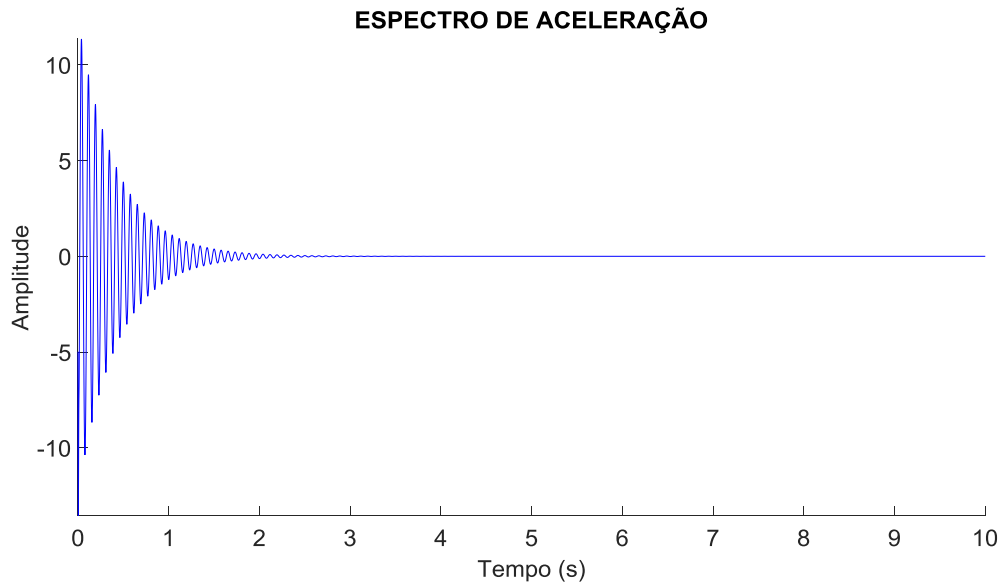


Figura 6.27 – Modelo do espectro de aceleração obtido do ANSYS.

6.10 - Inclusão do ruído no sinal

Ruído é definido como qualquer degradação do sinal original, o que resulta em diferenças consideráveis em relação às respostas esperadas. Todos os sistemas reais têm ruídos tais como:

- Ruído de medição;
- Ruído de quantização / amostragem;
- Ruído térmico (vibração das partículas internas com a mudança de temperatura).

É importante considerar a inclusão de ruído no sinal, devido a alta influência que apresenta nos ensaios experimentais, nos resultados e na efetividade do método de identificação de danos proposto.

Em princípio, cada fenômeno físico está definido pela sua própria função de densidade de probabilidade, no entanto os processos aleatórios estacionários são geralmente de natureza gaussiana e portanto, tem a conhecida distribuição de densidade de probabilidade gaussiana dada por (Norton; Karczub (2007)):

$$p(x) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{\frac{1}{2}}} e^{-(x-m_x)^2/2\sigma^2} \quad (6.9)$$

Onde:

m_x : é a média do sinal ;

σ : é ao desvio padrão.

Esta distribuição de probabilidade, também chamada de distribuição normal é parametrizada pelo valor médio (m_x) e pelo desvio padrão (σ). Quando o valor médio é nulo e o desvio padrão unitário, é chamada gaussiana.

Nesta pesquisa optou-se por criar um sinal de ruído branco com distribuição gaussiana $r(t)$, com média nula e desvio padrão unitário adotando como parâmetro de referência a maior amplitude gerada no sinal temporal $a(t)$ (espectro de acelerações), obtido na modelagem numérica. Foram testados valores de ruído de 1%, 2% 5% e 10% em relação aquela amplitude.

Nas Figura 6.28 a Figura 6.30 são apresentados os espectros de acelerações $a(t)$ e o sinal de $r(t)$, com valores de ruído de 1, 2 e 5%, respetivamente.

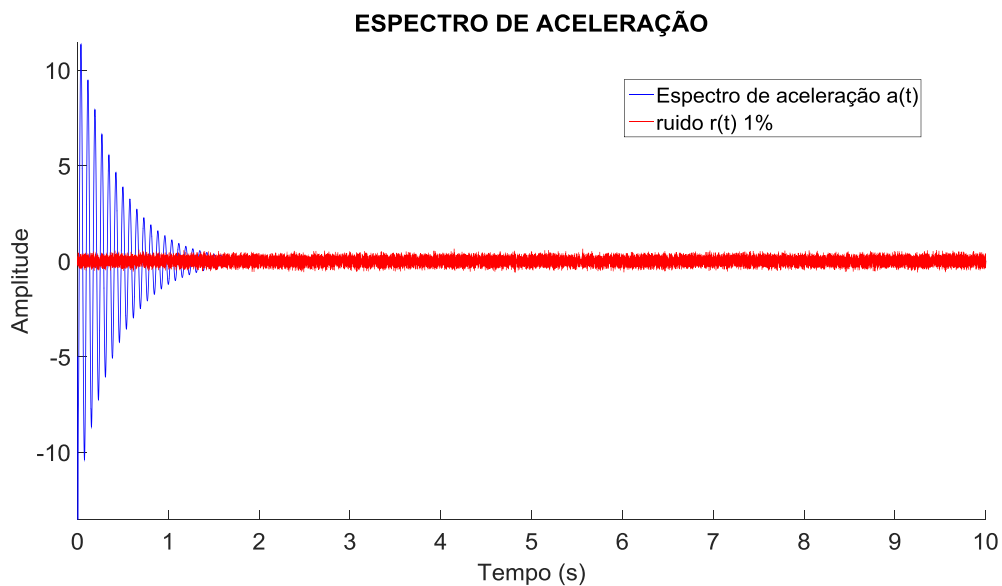


Figura 6.28 – Sinal temporal $a(t)$, ruído $r(t)$ de 1%.

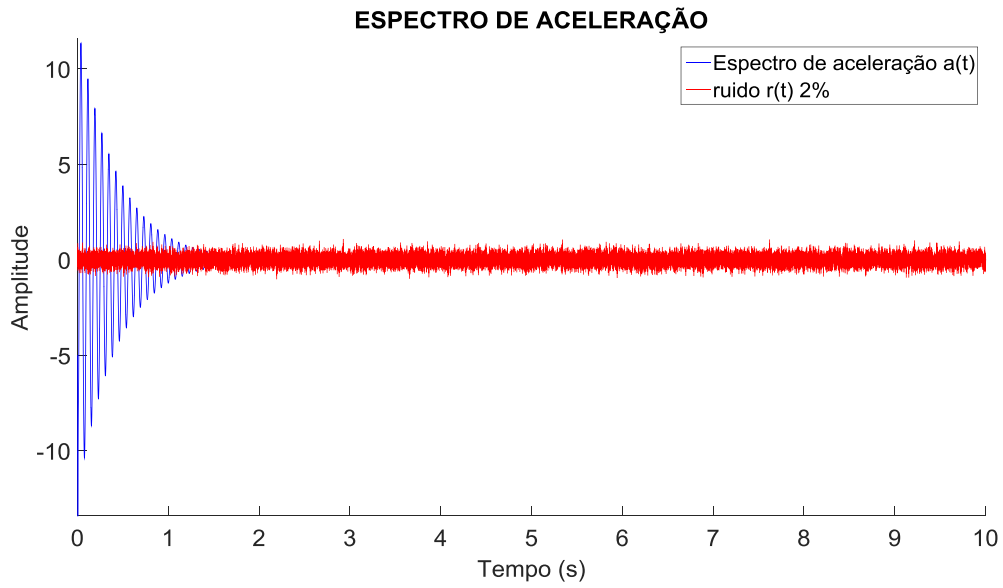


Figura 6.29 – Sinal temporal $a(t)$ com ruído $r(t)$ de 2%.

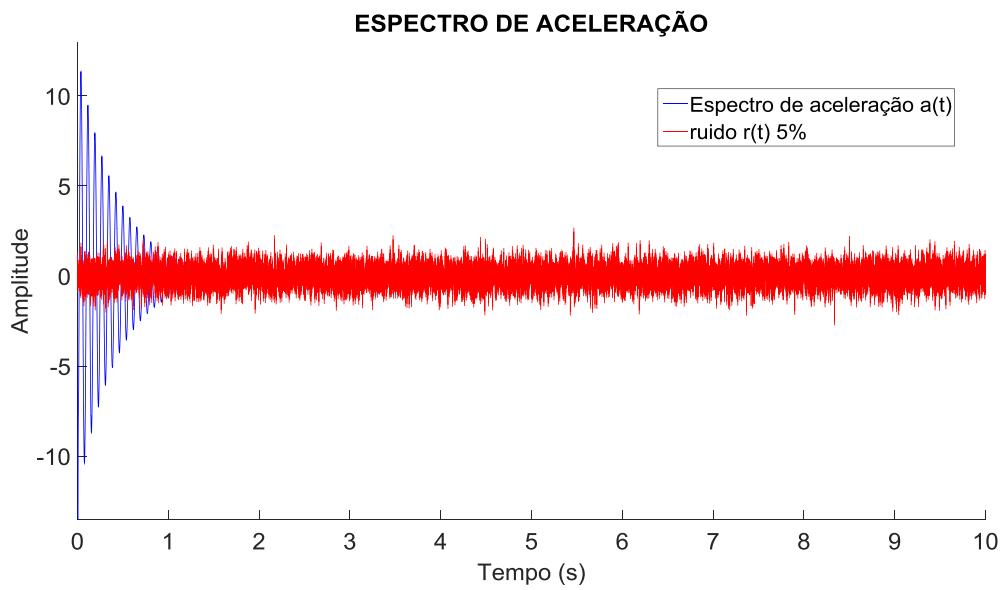


Figura 6.30 – Sinal temporal $a(t)$ com ruído $r(t)$ de 5%.

Na Figura 6.31 é apresentado o sinal original $a(t)$ obtido da análise numérica e o sinal com a adição do ruído $r(t)$.

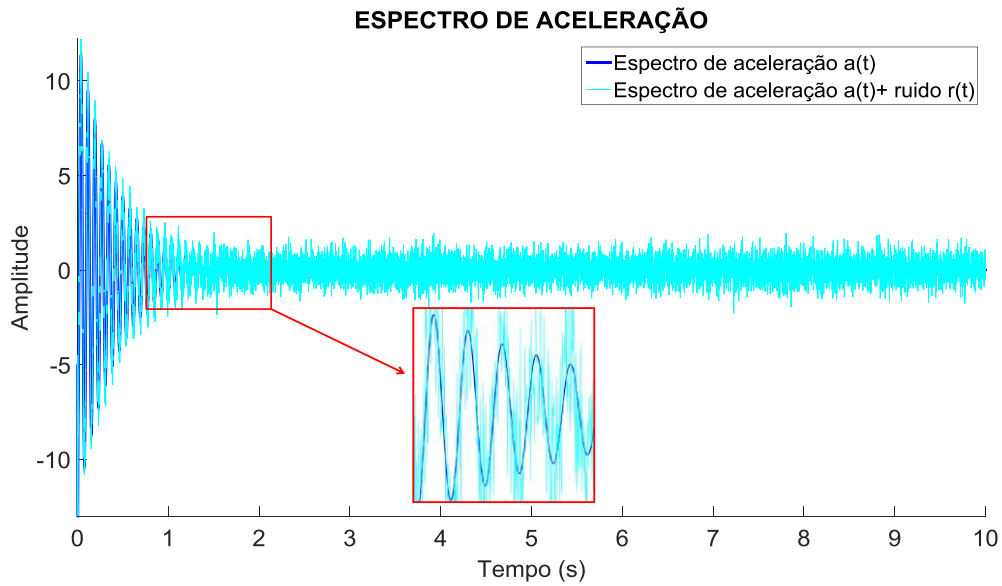


Figura 6.31 – Sinal temporal $a(t)$ com a adição do ruído $r(t)$.

Da mesma forma como foi tratado o sinal experimental das acelerações obtidas no laboratório, os espectros da modelagem numérica tiveram o mesmo tratamento. Assim, antes da aplicação da janela exponencial e da TRF foi adicionado um vetor de zeros no final do sinal original para diminuir o passo Δf no espectro de frequências (Figura 6.32).

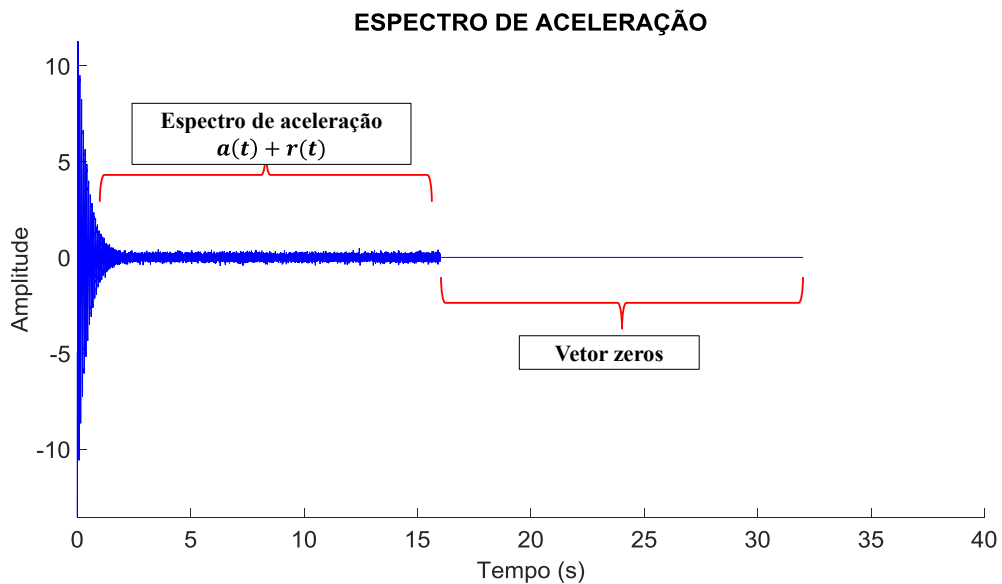


Figura 6.32- Interpolação Espectro de Frequências.

6.11 Janelamento

Na Figura 6.33 é apresentado o espectro de acelerações antes e após a aplicação da janela exponencial.

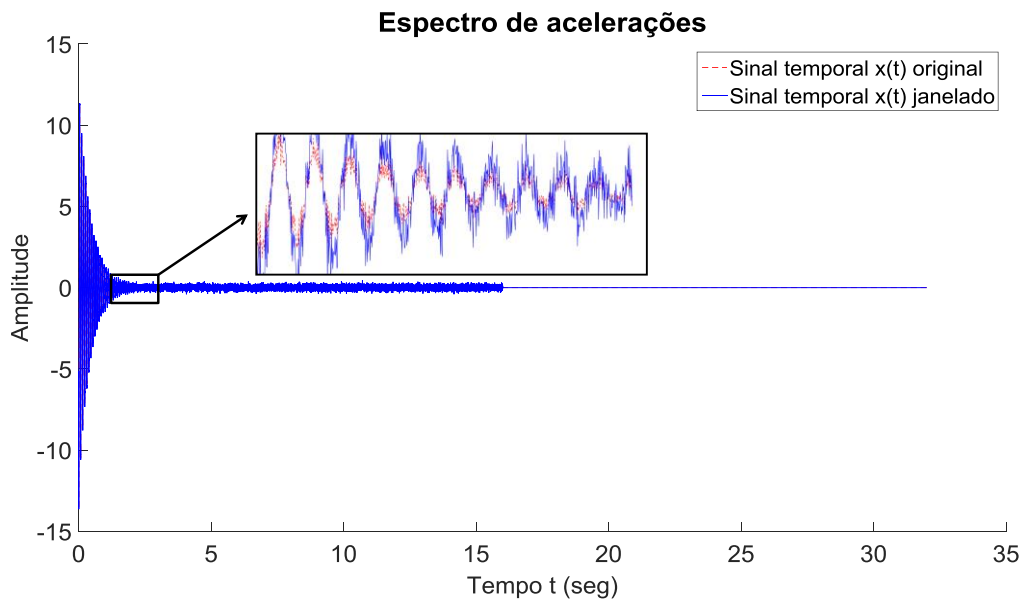


Figura 6.33 – Aplicação janela exponencial.

6.12 -Aplicação FFT e correção de Frequências

A Figura 6.34 apresenta o resultado após a aplicação da Transformada Rápida de Fourier no sinal temporal janelado.

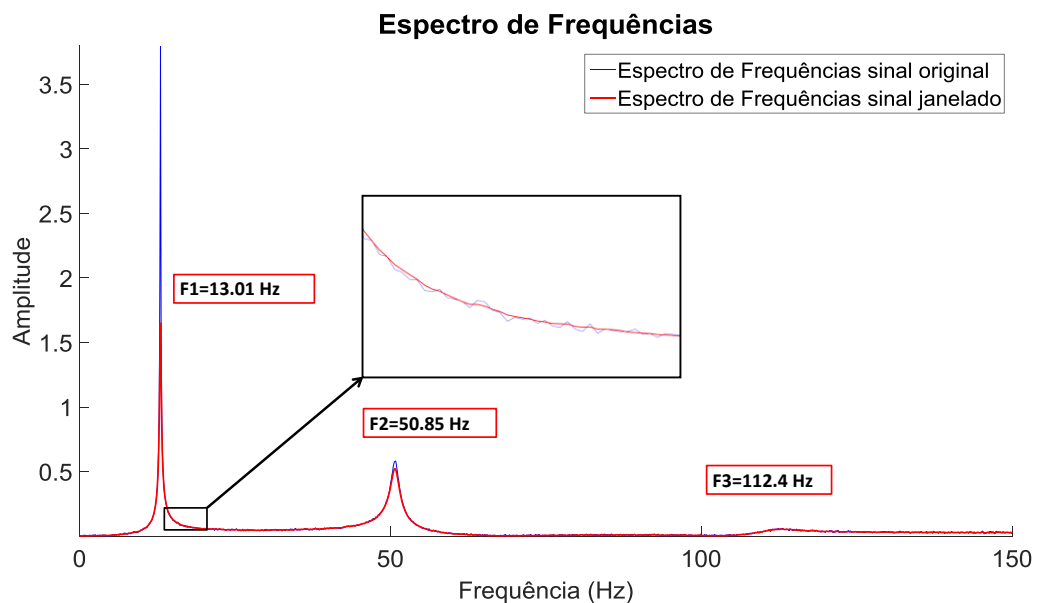


Figura 6.34 – Espectro de Frequências

Após a identificação dos picos de frequências, foram corrigidos utilizando o mesmo procedimento que nos ensaios experimentais, utilizando a média ponderada das dez linhas espectrais adjacentes ao maior pico identificado para cada faixa de frequência.

6.13 Resultados

A seguir são apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta nesta pesquisa da modelagem numérica da viga feito como o elemento SOLID45.

Para evitar a perturbação gerada pela descontinuidade dos apoios nos extremos da viga, a discretização começou com o primeiro nó localizado a 10 cm do apoio e o último nó (25) localizado 10 cm antes do apoio. No total foram considerados 25 pontos com 24 elementos de 20 cm de comprimento (Figura 6.35).

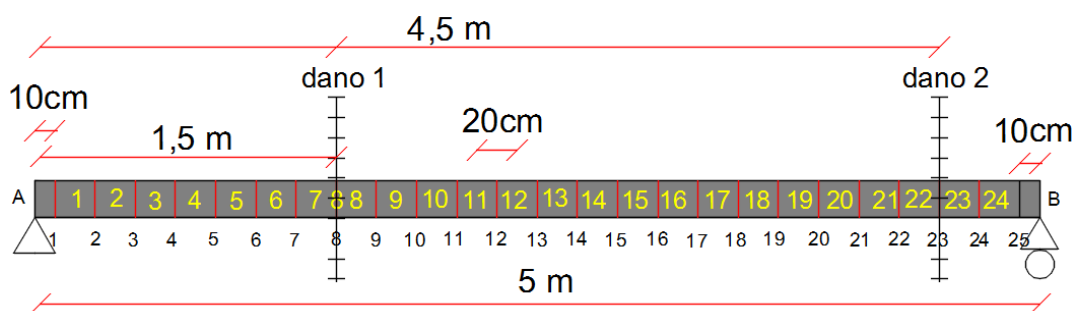


Figura 6.35 – Discretização modelo numérico ANSYS.

6.13.1 – Caso 1 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 1 entalhe)

O caso 1 corresponde a duas posições de dano, a primeira representada por três entalhes simétricos na mesa superior e inferior localizados a 1,5 m (nó 8) do apoio esquerdo, espaçados a cada 2,5 cm e a segunda posição de dano por um entalhe localizado em 4,5 m (nó 23) em relação ao mesmo apoio. As duas posições de dano geraram uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2% e 65,6% da seção transversal respectivamente.

Para avaliar a influência de ruído especificamente no Caso 1, foram testados cinco valores de porcentagens de ruído (0, 1, 2, 5 e 10%), como explicado anteriormente (Capítulo 6.10).

A seguir são apresentados os resultados para o Caso 1 desconsiderando ruído no sinal ($r(t) = 0$; 0%).

6.13.1.1 - Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 0%

Na Figura 6.36 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a primeira frequência da viga vs. posição da massa ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

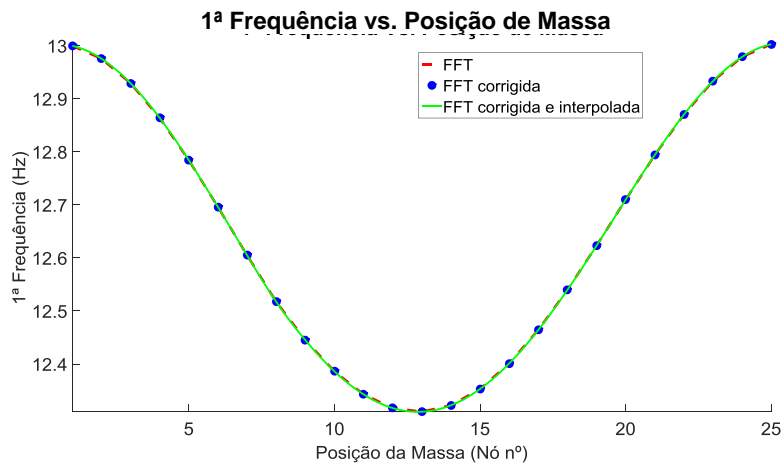
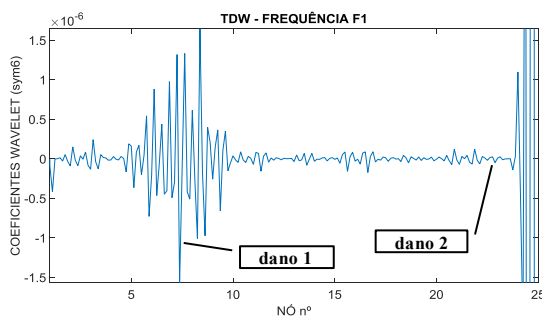


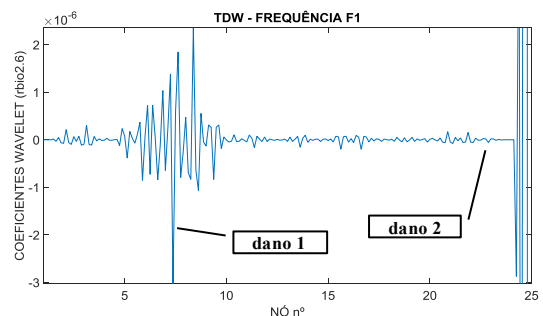
Figura 6.36 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.

Na Figura 6.36 podem ser observadas três curvas, a primeira (linha tracejada) representa as frequências dos picos da TRF, a segunda (asterisco) representa a frequência corrigida utilizando as linhas espectrais da TRF ao redor do pico como uma média ponderada para calcular a frequência real. E a terceira curva (linha contínua) representa a interpolação dos dados das frequências corrigidas (asterisco) pelo método de interpolação cubic spline de terceiro grau.

Na Figura 6.37 e na Figura 6.38, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6



b) rbio2.6

Figura 6.37 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

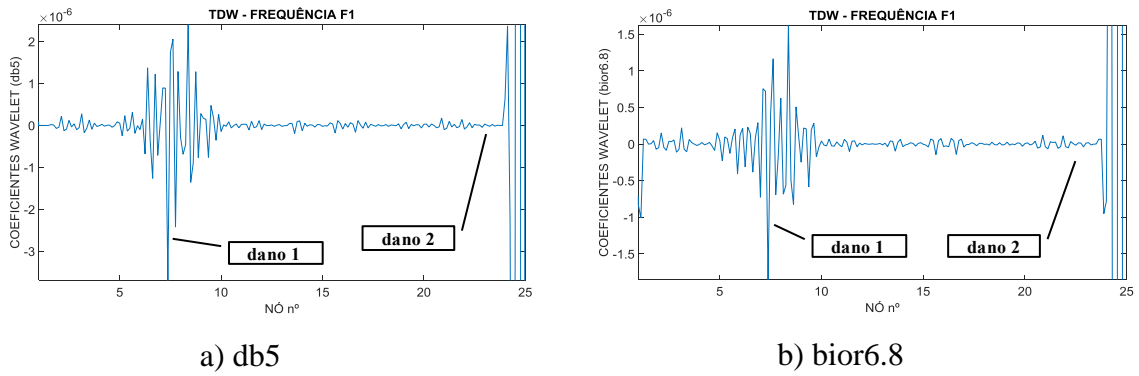


Figura 6.38 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.37 e Figura 6.38), observar-se a perturbação gerada em volta do nó 8 (dano 1) localizado a 1,5 m do apoio esquerdo. O gráfico não apresenta perturbações por volta do nó 23 (dano 2).

6.13.1.2 - Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 0%

Na Figura 6.39 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

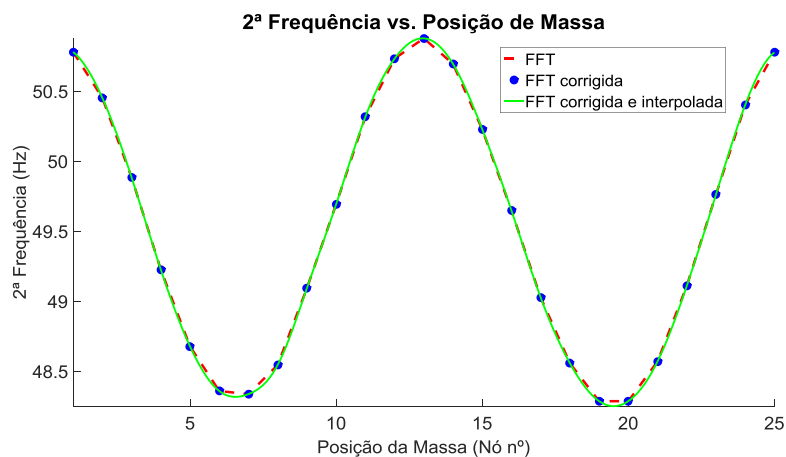
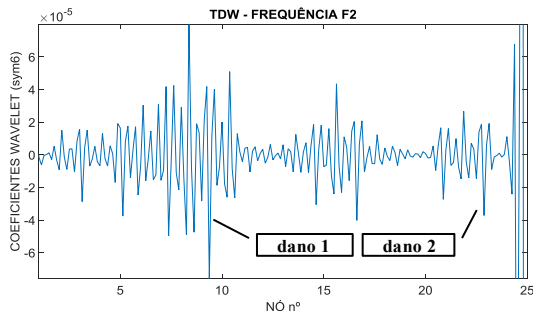
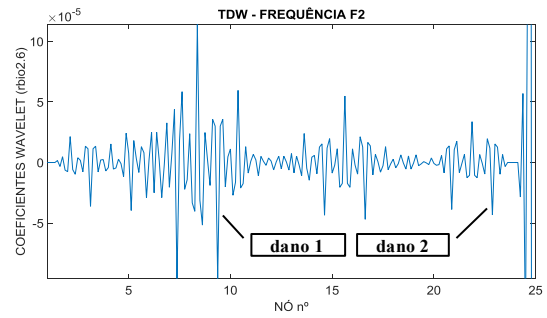


Figura 6.39 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 1.

As Figura 6.40 e Figura 6.41, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

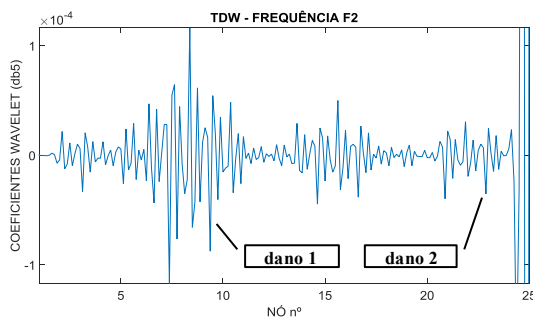


a) Symlet 6

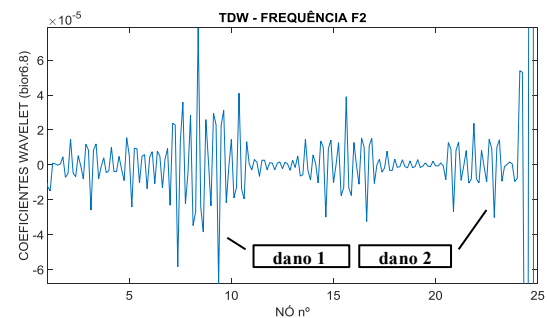


b) rbio2.6

Figura 6.40 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.41- Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.40 e Figura 6.41) foi possível identificar a região danificada, correspondente ao dano 1, localizado no nó 8. Na segunda posição de dano (dano 2) foram identificadas algumas perturbações que se confundem com as perturbações geradas ao longo da viga.

6.13.1.3 - Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 0%

Na Figura 6.42 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

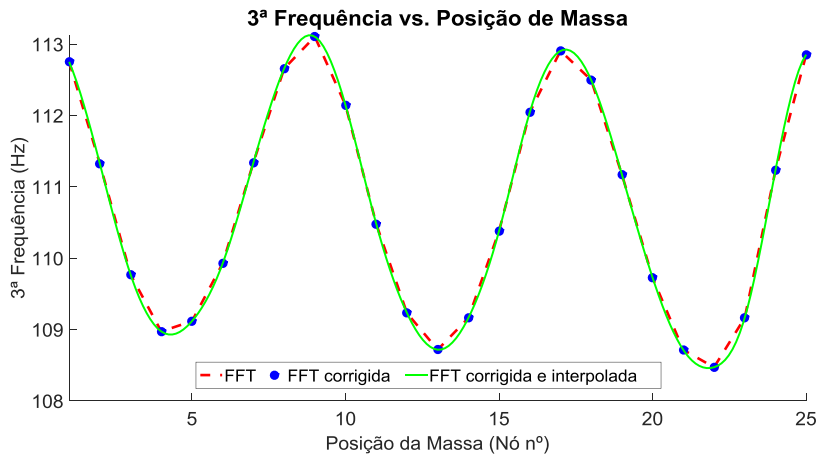
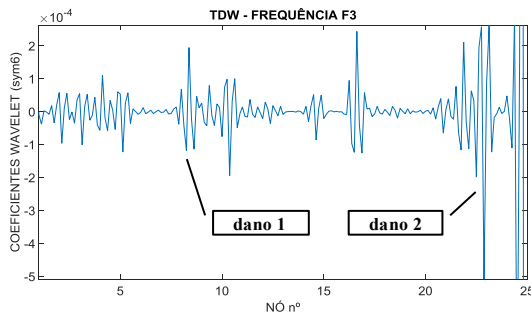
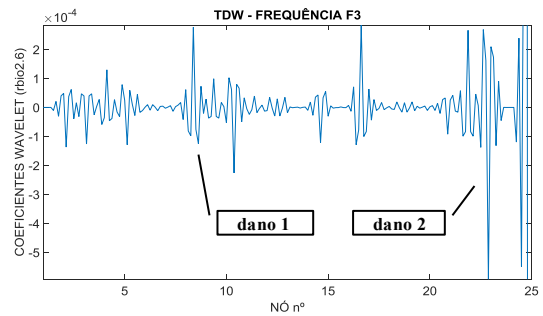


Figura 6.42 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 1.

As Figura 6.43 e Figura 6.44 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

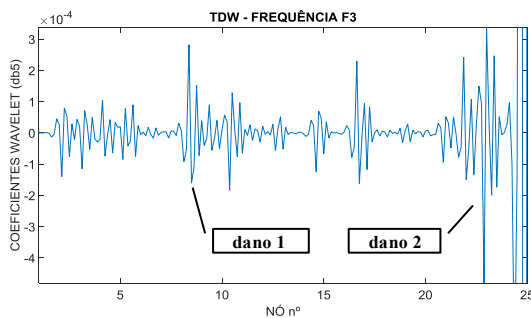


a) Symlet 6

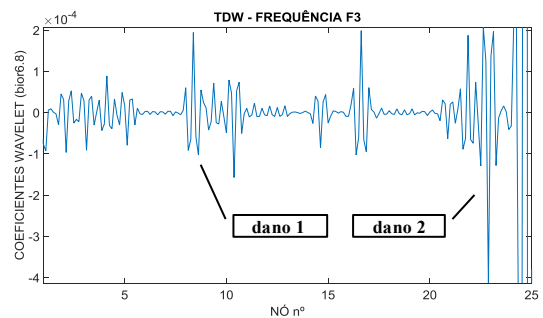


b) rbio2.6

Figura 6.43 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.44 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.43 e Figura 6.44), podem-se observar a perturbação gerada no dano 1 (nó 8) e no dano 2 (nó 23), porém também apresentam perturbações em outros pontos (falsos danos).

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%

6.13.1.4 - Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.45 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

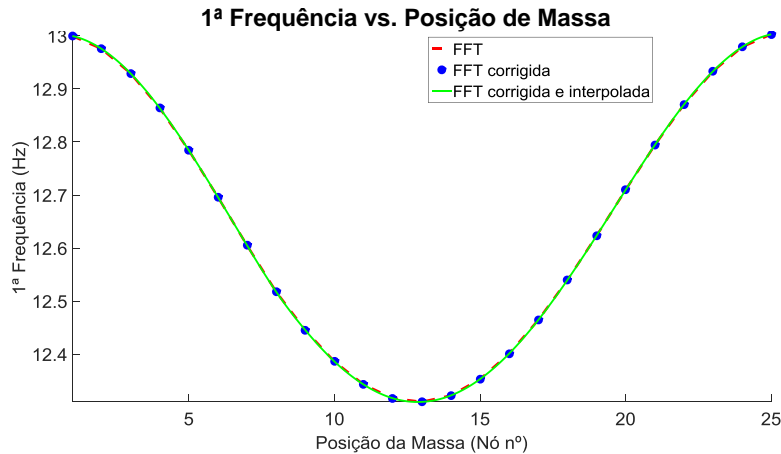


Figura 6.45 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.

As Figura 6.46 e Figura 6.47, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

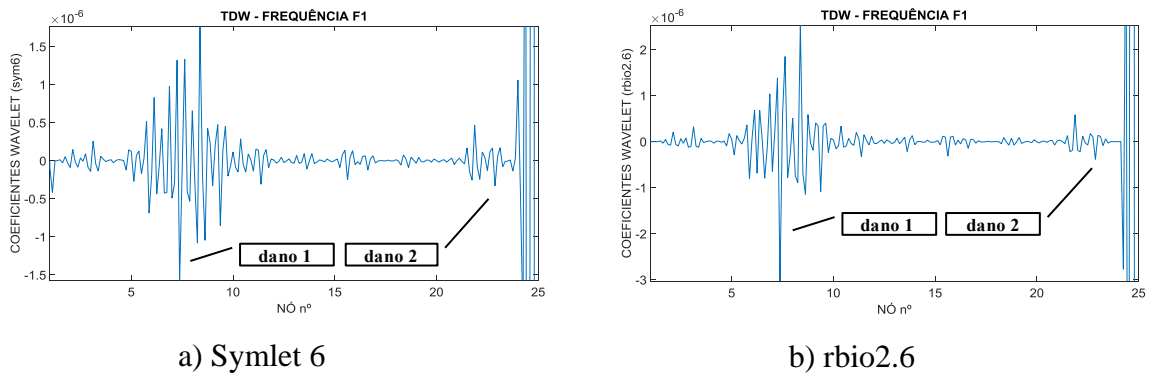


Figura 6.46 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

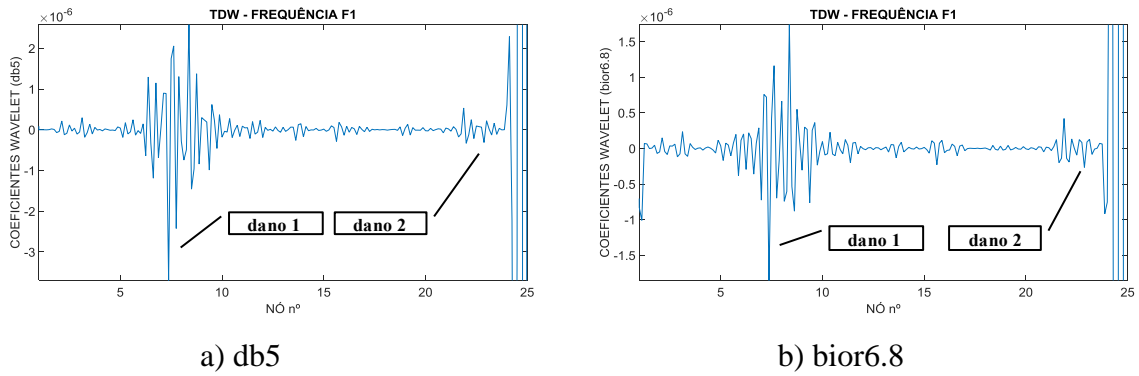


Figura 6.47 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.46 e Figura 6.47), podem-se observar que foram geradas perturbações coincidindo com o nó 8, correspondentes a posição de dano 1 (1,5 m). O gráfico também apresenta pequenas perturbações por volta do nó 23 (dano 2), mas não é claramente visível a identificação do dano já que existem perturbações da mesma ordem de grandeza ao longo de toda a viga.

6.13.1.5 - Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.48 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

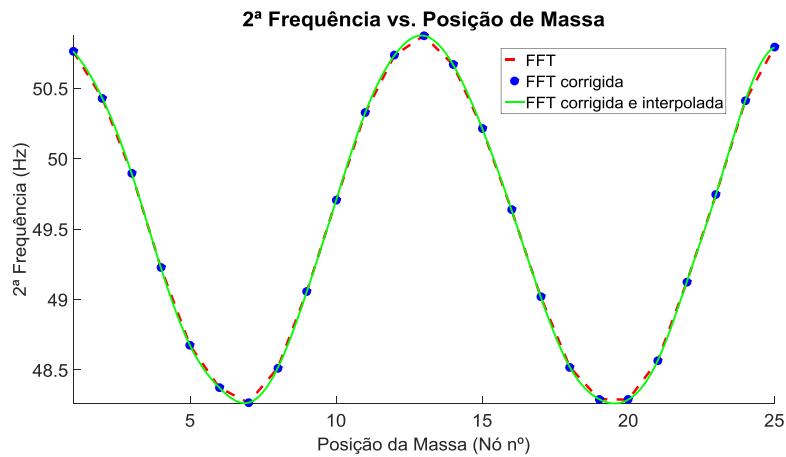
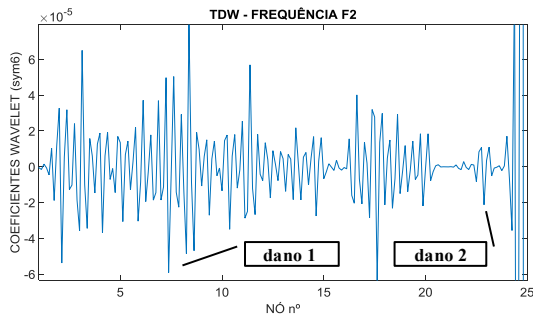
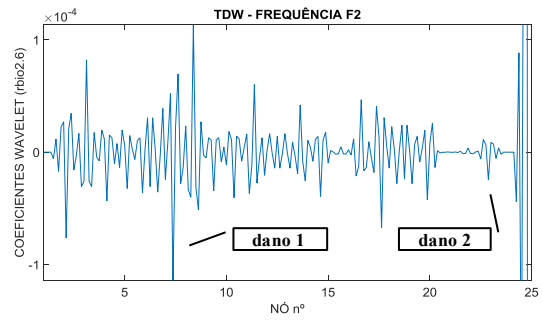


Figura 6.48 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 1.

As Figura 6.49 e Figura 6.50, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

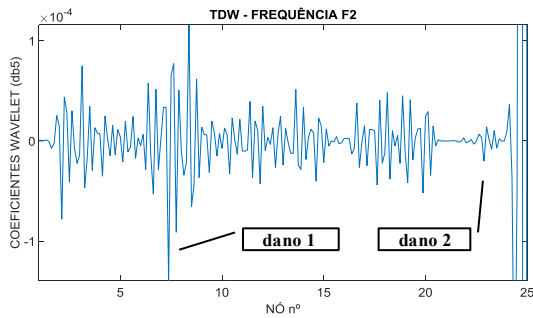


a) Symlet 6

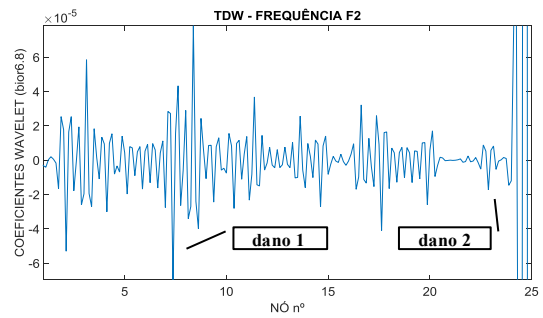


b) rbio2.6

Figura 6.49 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.50 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.49 e Figura 6.50) foi possível identificar a região danificada, correspondente ao dano 1, localizado no nó 8. Na segunda posição de dano (dano 2) não foram identificadas perturbações.

6.13.1.6 - Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.51 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

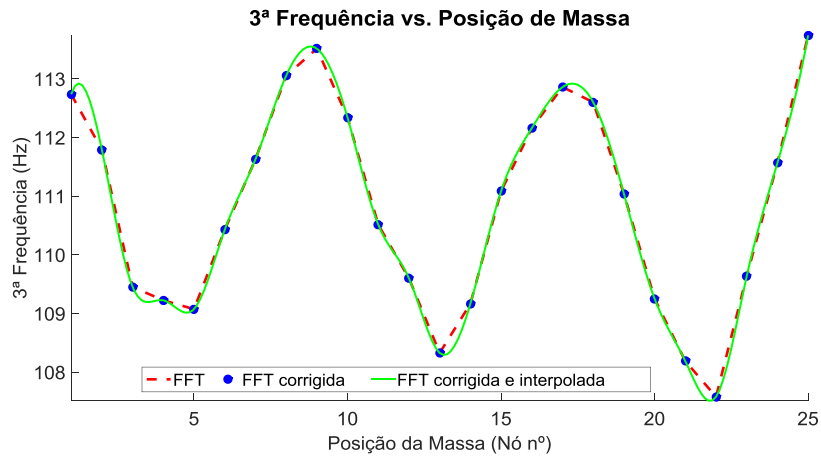
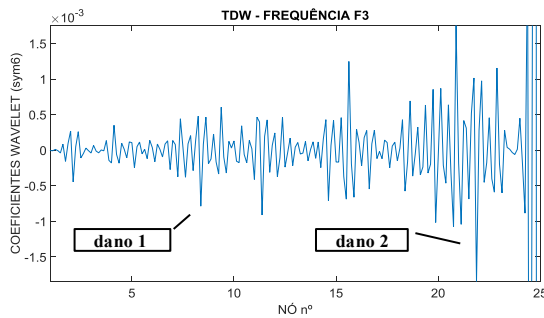
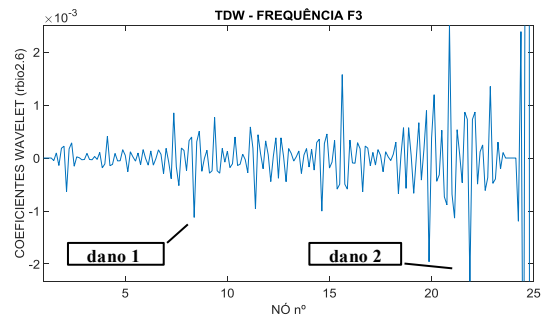


Figura 6.51- Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 1.

As Figura 6.52 e Figura 6.53 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

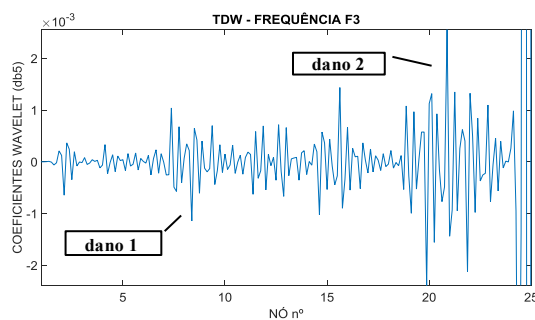


a) Symlet 6

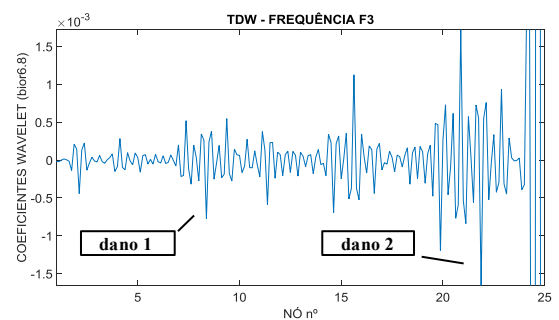


b) rbio2.6

Figura 6.52 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.53 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.52 e Figura 6.53), podem-se observar a perturbação gerada no dano 2 (nó 23). No dano 1 não foi possível a identificação do dano.

A seguir são apresentados dos resultados para o primeiro caso considerando ruído no sinal ($r(t)$; 2%).

6.13.1.7 - Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 2%

Na Figura 6.54 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

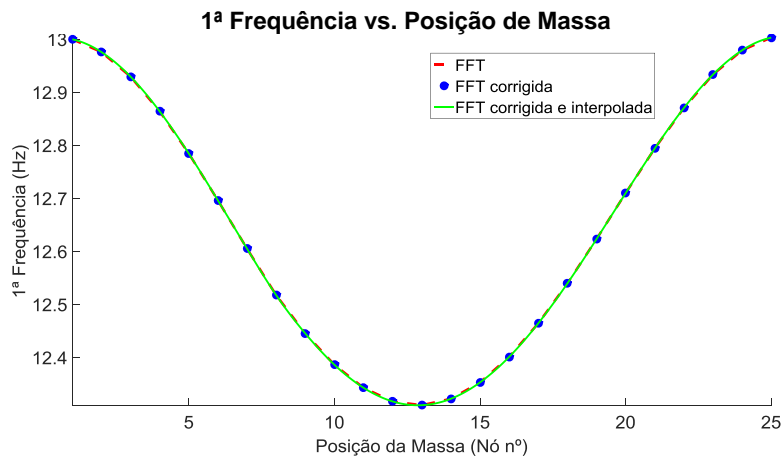
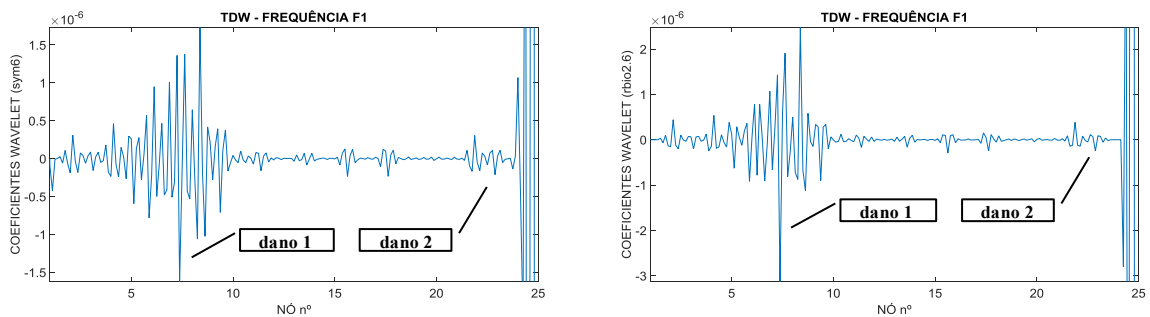


Figura 6.54 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.

As Figura 6.55 e Figura 6.56, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 6.55 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

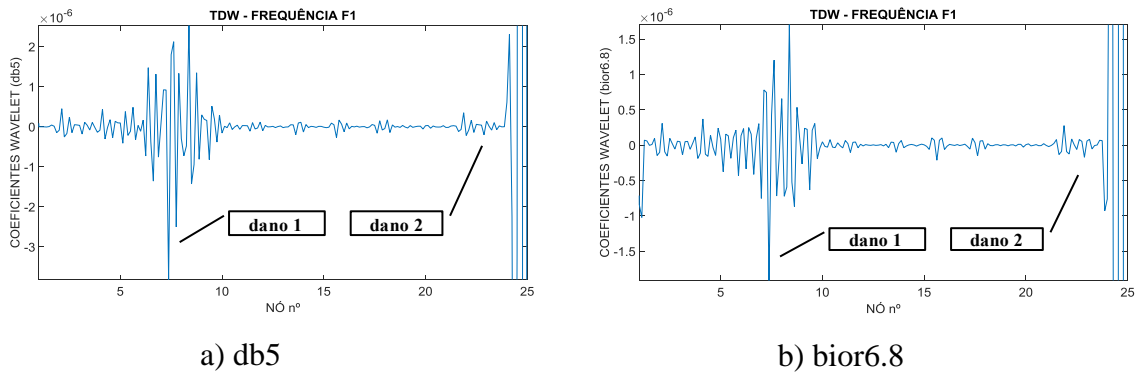


Figura 6.56 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.55 e Figura 6.56), podem-se observar que foram geradas com o nó 8, correspondentes a posição de dano 1 (1,5 m).

6.13.1.8 - Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 2%

Na Figura 6.57 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

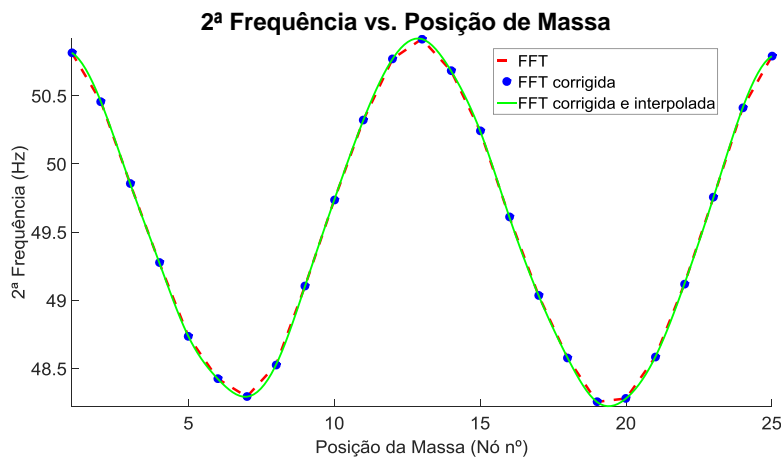


Figura 6.57 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso1.

A Figura 6.58 e a Figura 6.59, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

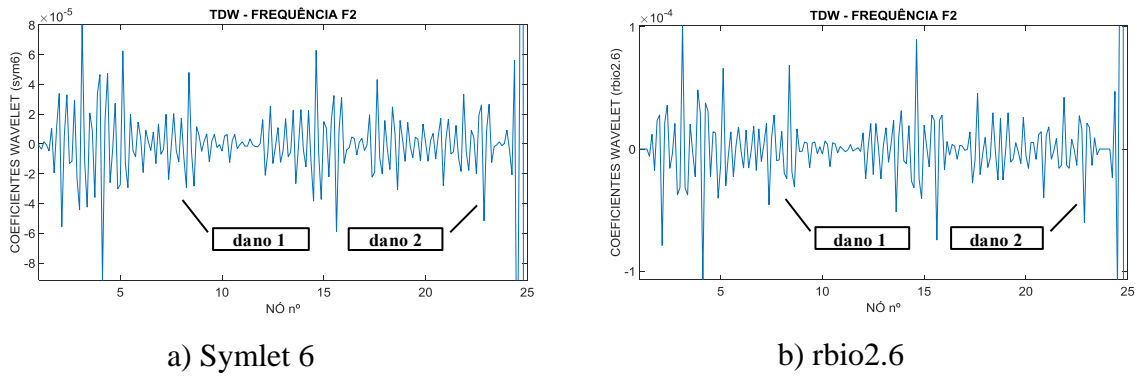


Figura 6.58 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).

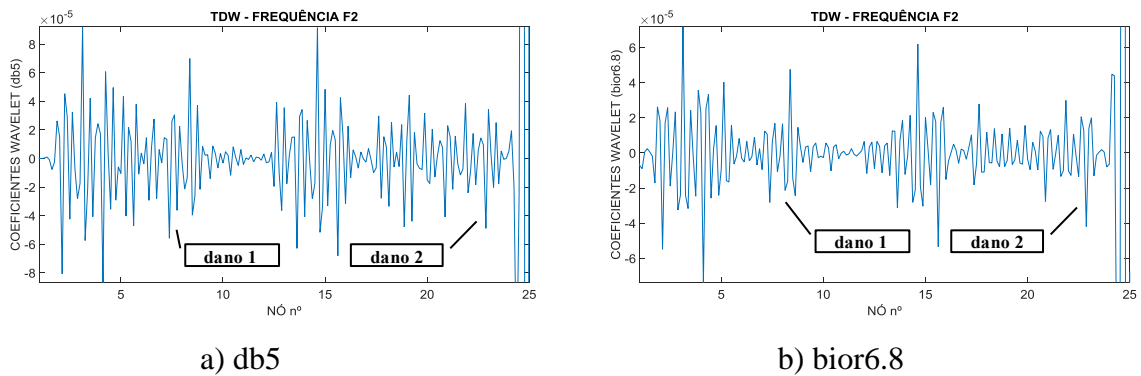


Figura 6.59 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.58 e Figura 6.59) não foi possível a identificação das regiões danificadas, devido ao ruído incluso no sinal.

6.13.1.9 - Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 2%

Na Figura 6.60 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

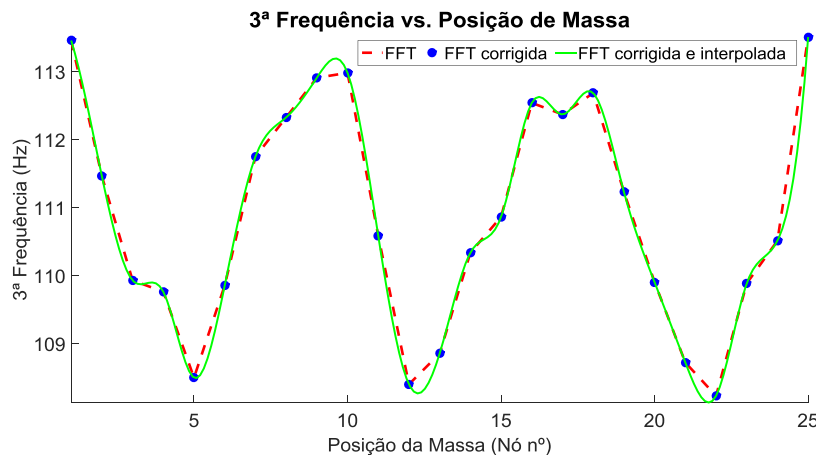
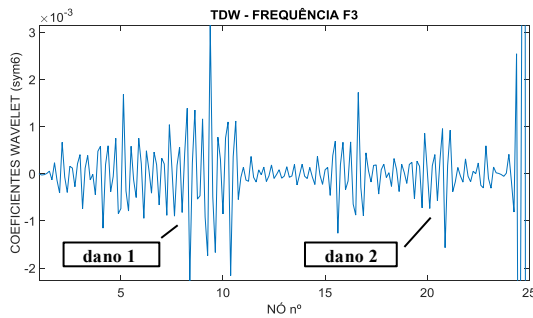
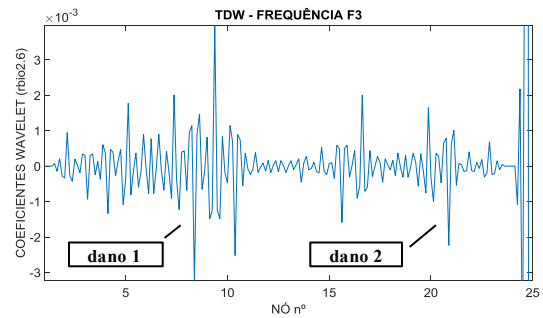


Figura 6.60 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 1.

A Figura 6.61 e a Figura 6.62, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

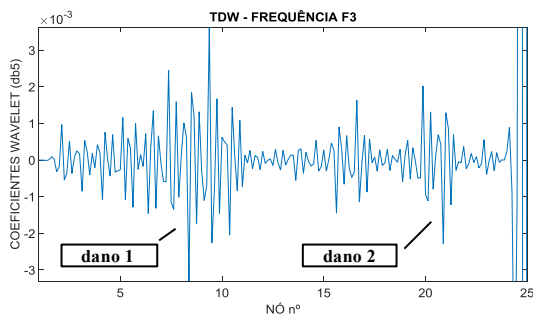


a) Symlet 6

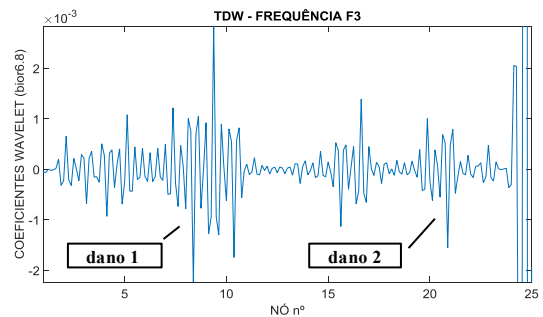


b) rbio2.6

Figura 6.61- Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.62 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.61 e Figura 6.62/Figura 6.53), não foi possível a identificação do dano, devido ao ruído presente no sinal.

A seguir são apresentados dos resultados para o primeiro caso considerando ruído no sinal ($r(t)$; 5%).

6.13.1.10 - Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 5%

Na Figura 6.63 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

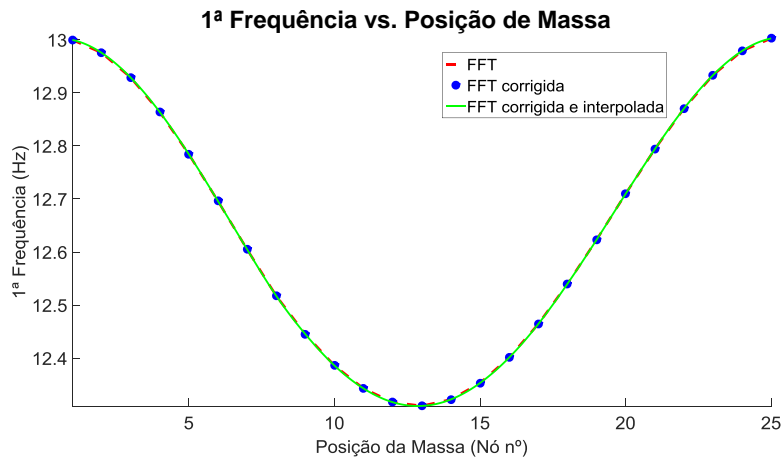
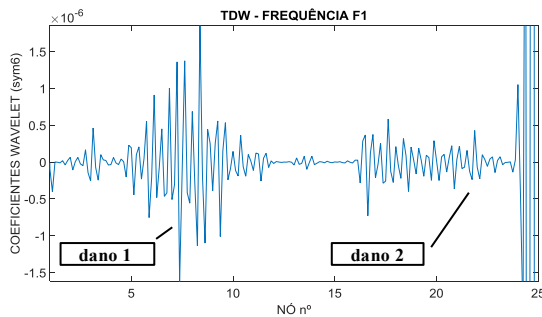
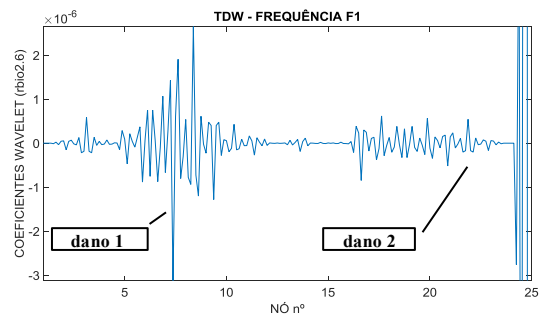


Figura 6.63 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 1.

A Figura 6.64 e a Figura 6.65, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

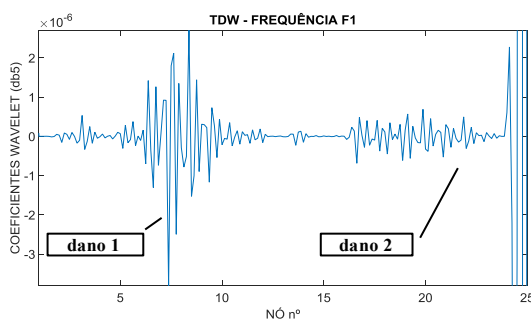


a) Symlet 6

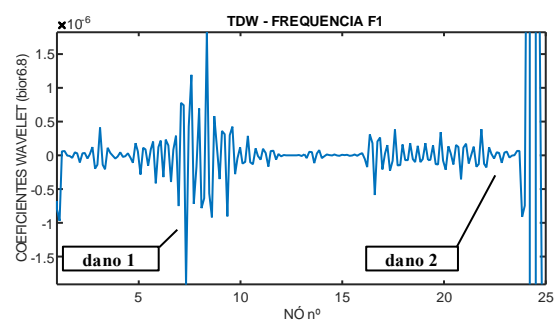


b) rbio2.6

Figura 6.64 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.65 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.64 e Figura 6.65), podem-se observar claramente que a maior perturbação acontece por volta do nó 8 (dano 1). Não foi possível a identificação do dano 2.

6.13.1.11 - Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 5%

Na Figura 6.66 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

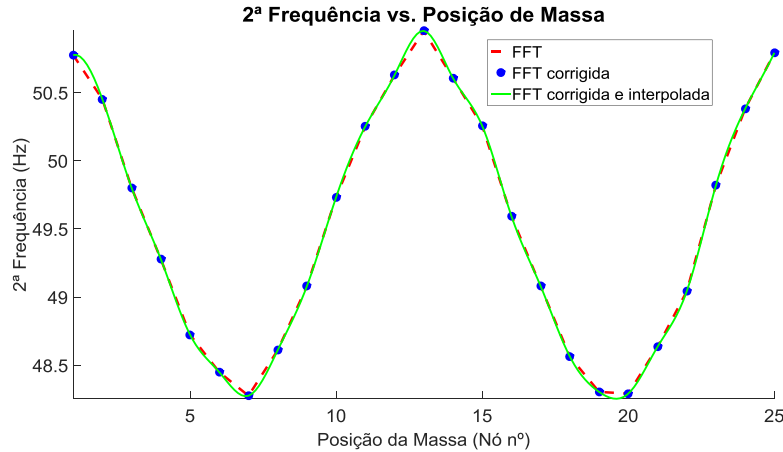
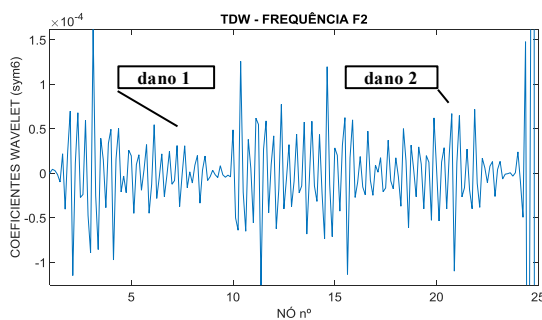
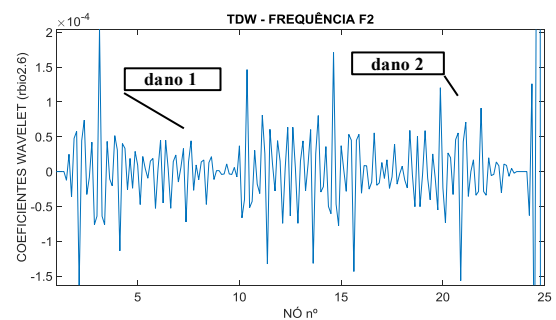


Figura 6.66 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2)-Caso 1.

As Figura 6.67 e Figura 6.68 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

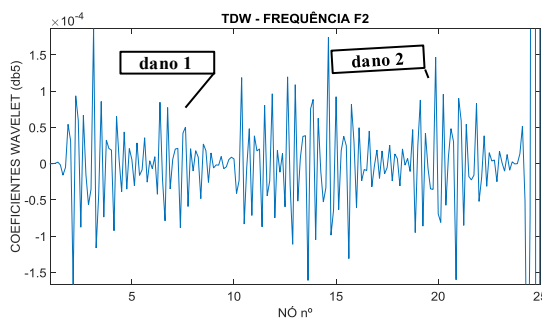


a) Symlet 6

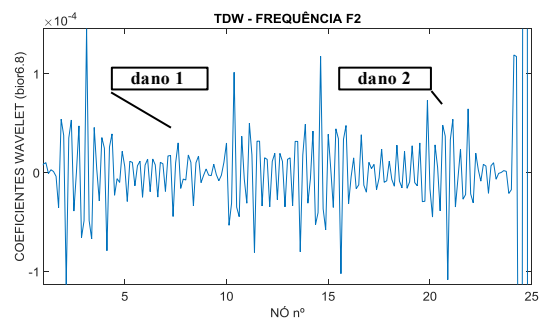


b) rbio2.6

Figura 6.67 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.68 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.67Figura 6.49 e Figura 6.68Figura 6.50) não foi possível a identificação das regiões danificadas.

6.13.1.12 - Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 5%

Na Figura 6.69 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

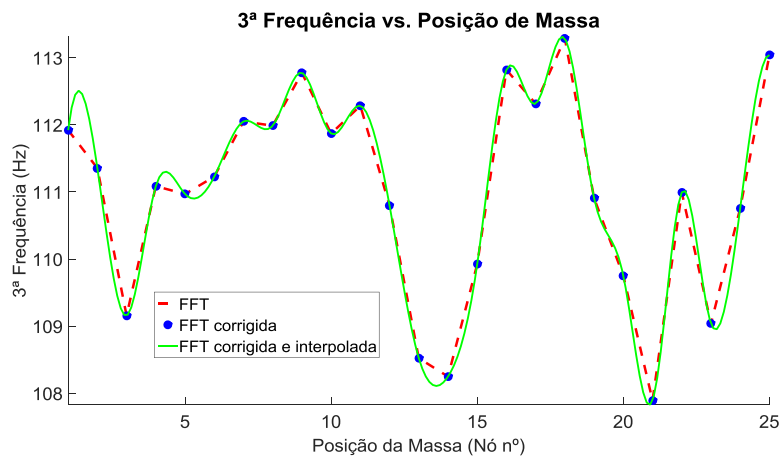
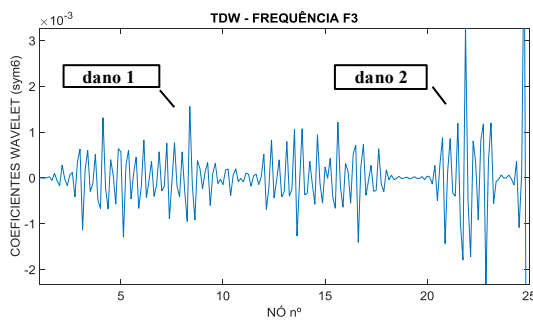
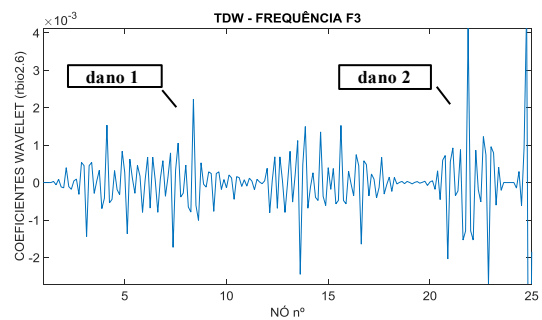


Figura 6.69 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3)-Caso 1.

A Figura 6.70 e a Figura 6.71 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6



b) rbio2.6

Figura 6.70 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

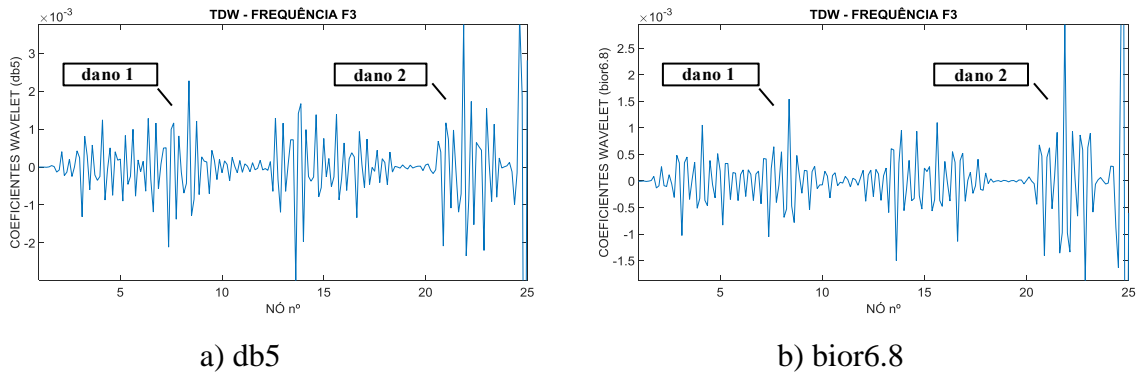


Figura 6.71- Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Neste modelo numérico, não foi possível obter uma curva próxima da real (3ª Frequência vs. posição de Massa), portanto não foi possível a identificação dos danos.

A seguir são apresentados dos resultados para o primeiro caso considerando ruído no sinal ($r(t)$; 10%).

6.13.1.13 - Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 10%

Na Figura 6.72 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

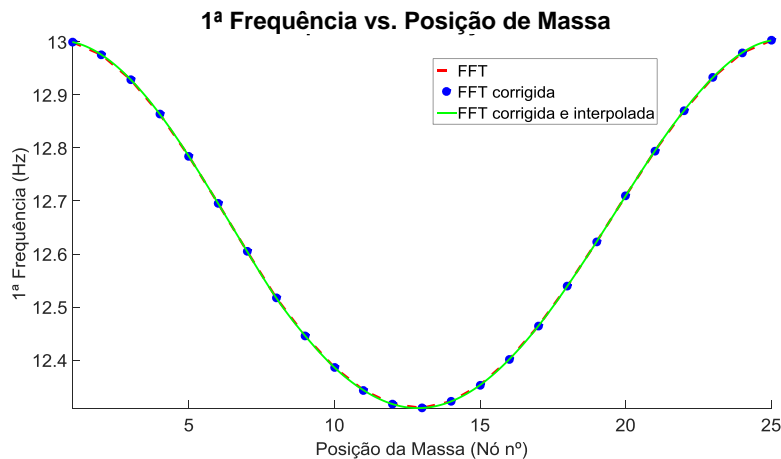
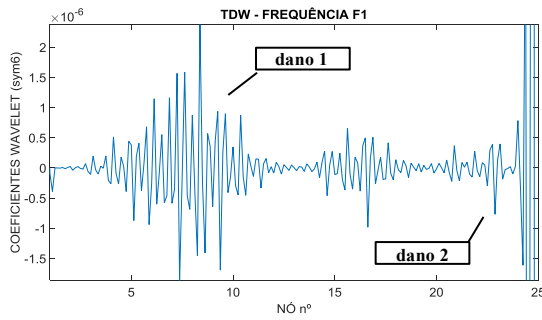
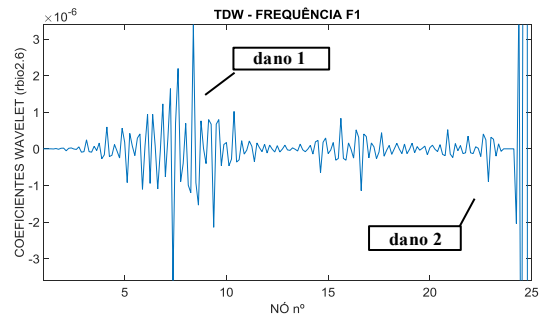


Figura 6.72- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1)-Caso 1 .

A Figura 6.73 e a Figura 6.74 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

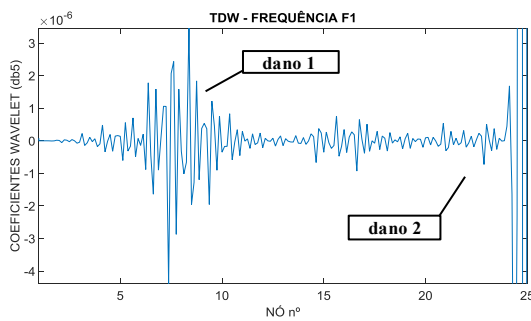


a) Symlet 6

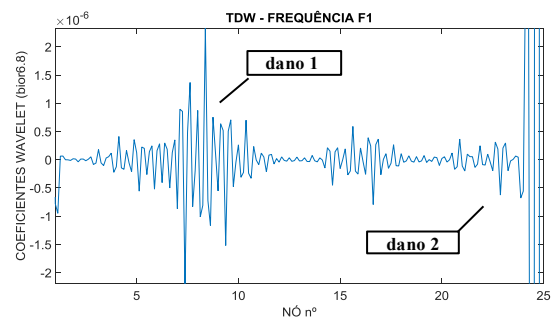


b) rbio2.6

Figura 6.73 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.74 - Caso 1 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.73 e Figura 6.74), pode-se observar que foi gerada uma perturbação coincidindo com o nó 8, correspondentes a posição de dano 1 (1,5 m). O gráfico não apresentou picos no dano 2.

6.13.1.14 - Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 10%

Na Figura 6.75 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

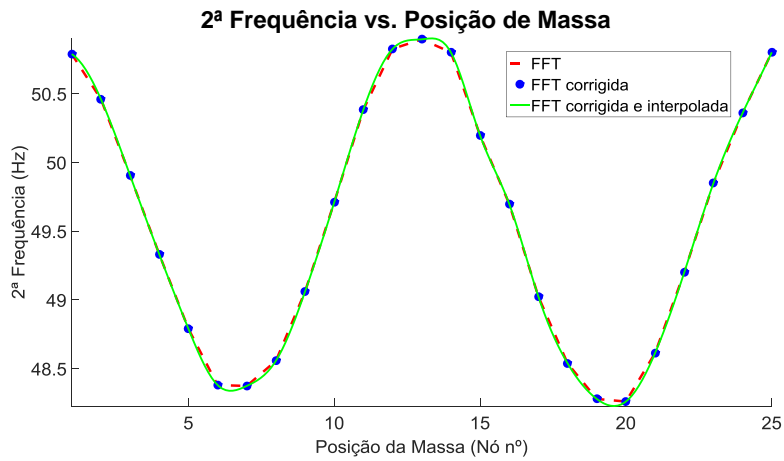
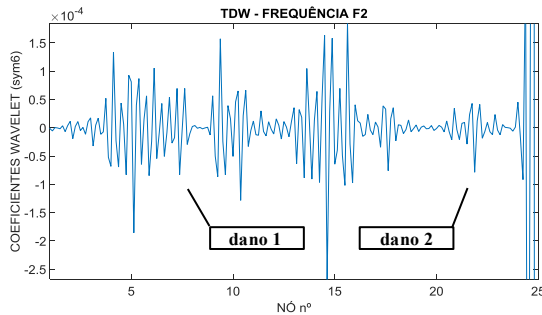
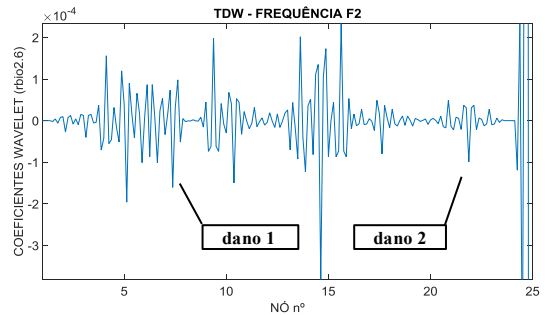


Figura 6.75 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2)-Caso 1.

A Figura 6.76 e a Figura 6.77, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

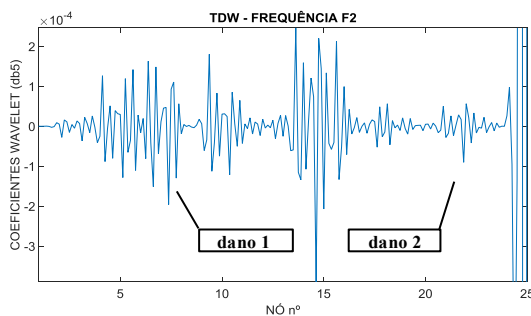


a) Symlet 6

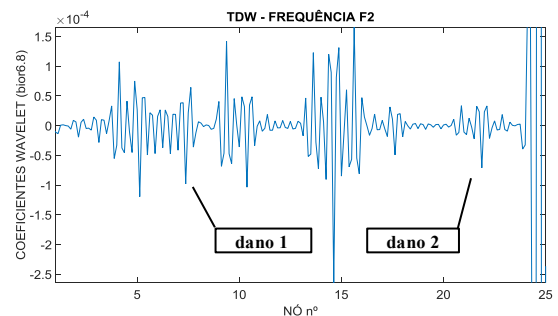


b) rbio2.6

Figura 6.76 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.77 - Caso 1 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.76 e Figura 6.77) não foi possível a localização das regiões danificadas.

6.13.1.15 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 10%

Na Figura 6.78 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

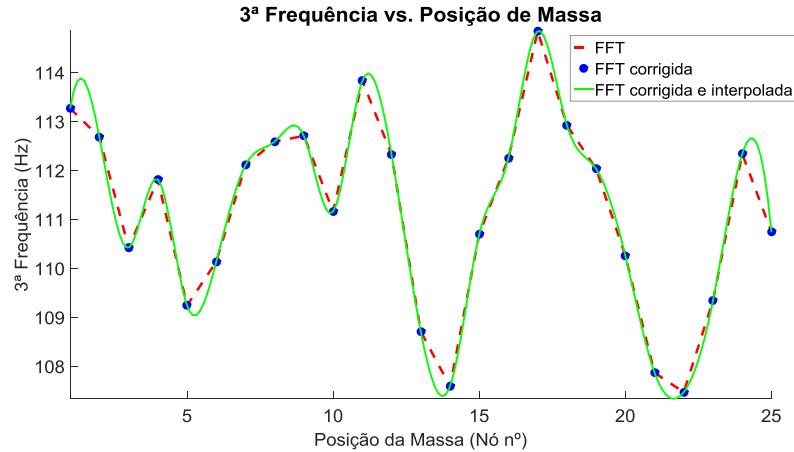
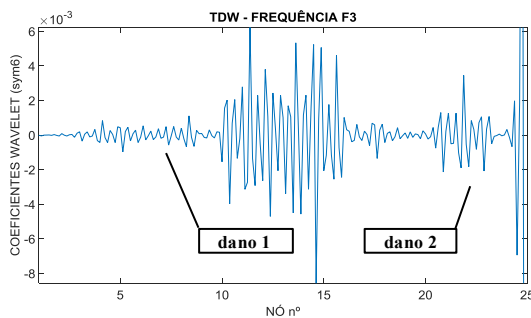
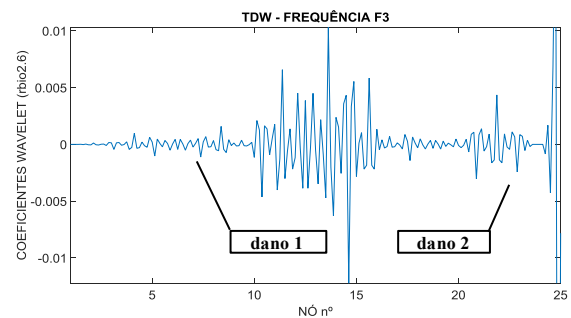


Figura 6.78 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 1.

As Figura 6.79 e Figura 6.80 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

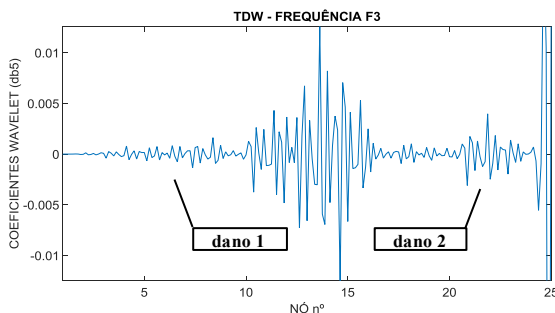


a) Symlet 6

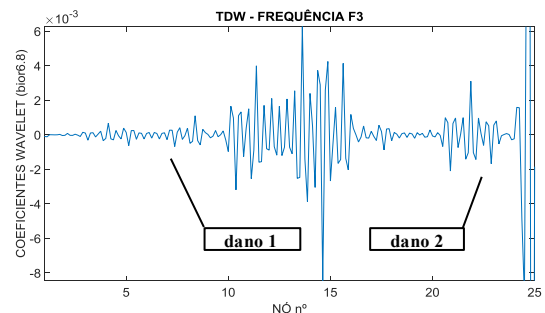


b) rbio2.6

Figura 6.79 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.80 - Caso 1 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.79 e Figura 6.80) não foi possível a localização dos danos.

De acordo com os resultados apresentados anteriormente para o caso 1, considerando diferentes níveis de ruído no sinal (0%, 1%, 2%, 5% e 10%), pode-se concluir que:

- 1) O ruído presente no sinal teve uma menor influência na primeira frequência, ficando claramente visível a identificação e localização do dano 1 nos cinco níveis de ruído propostos.
- 2) Considerando um nível de ruído de 0%, os resultados também apresentaram perturbações, devido a pequenas diferenças na correção de frequências e ao processo de interpolação dos pontos discretos.
- 3) A segunda frequência (F2) é válida para identificação do dano para níveis de ruído iguais ou menores de 1%. Para níveis maiores o sinal apresenta perturbações em locais intactos.
- 4) A terceira frequência não constitui um parâmetro definitivo para identificação do dano, já que nos resultados apresentados anteriormente e para os diferentes níveis de ruído, a terceira frequência não apresentou bons resultados.

Desta forma, optou-se por considerar 1% como nível de ruído para os demais casos de danos propostos devido a semelhança dos resultados com os ensaios experimentais, nos quais foi possível a identificação do dano 1 até com a segunda frequência (F2).

6.13.2 – Caso 2 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes)

O caso 2 corresponde a duas posições de dano: a primeira representada por três entalhes simétricos na mesa superior e inferior localizados a 1,5 m (nó 8) do apoio esquerdo, espaçados a cada 2,5 cm, e a segunda por dois entalhes localizados em 4,5 m (nó 23) em relação ao mesmo apoio. As duas posições de dano geraram uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2% e 65,6% da seção transversal respectivamente.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.2.1 - Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.81 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

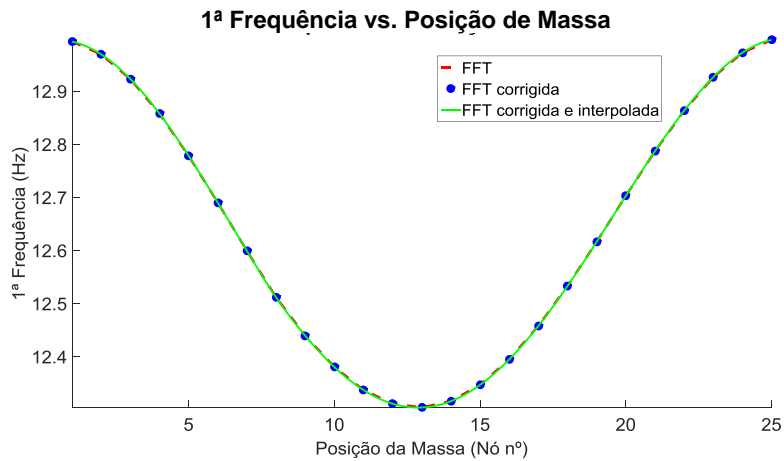
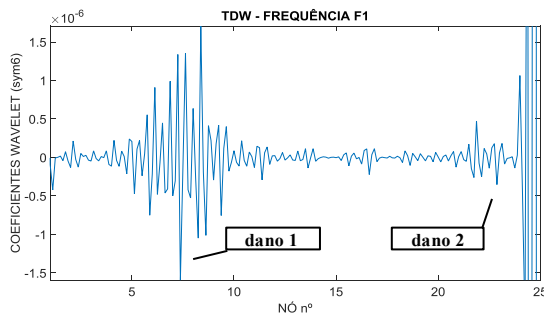
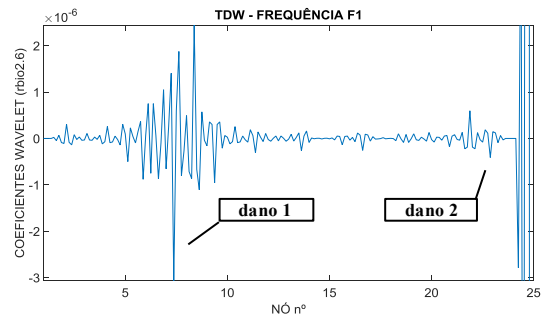


Figura 6.81- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1)-Caso 2.

A Figura 6.82 e a Figura 6.83 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

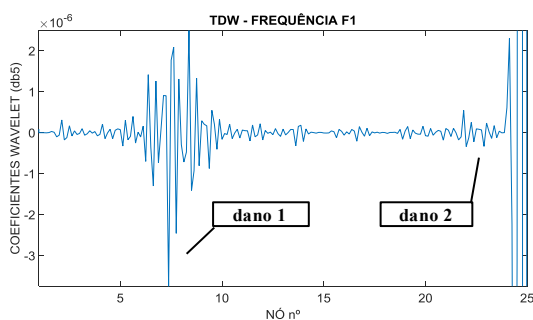


a) Symlet 6

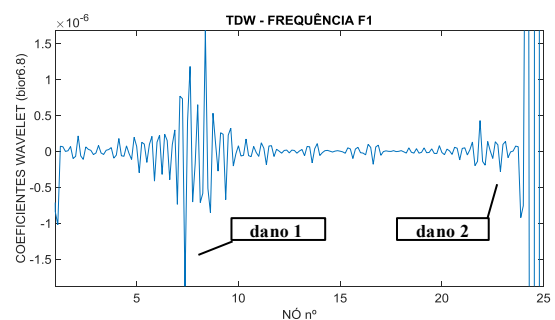


b) rbio2.6

Figura 6.82 - Caso 2 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.83 - Caso 2 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.82 e Figura 6.83), pode-se observar a perturbação gerada por volta do nó 8 (dano 1) localizado a 1,5 m do apoio esquerdo. O gráfico

apresentou pequenas perturbações por volta do nó 23 (dano 2) com uma amplitude um pouco maior em relação aos picos gerados pelo ruído.

6.13.2.2 - Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.84 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

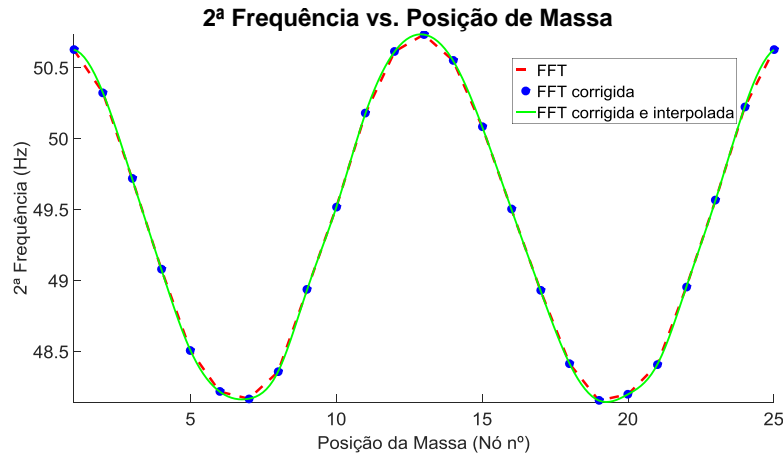
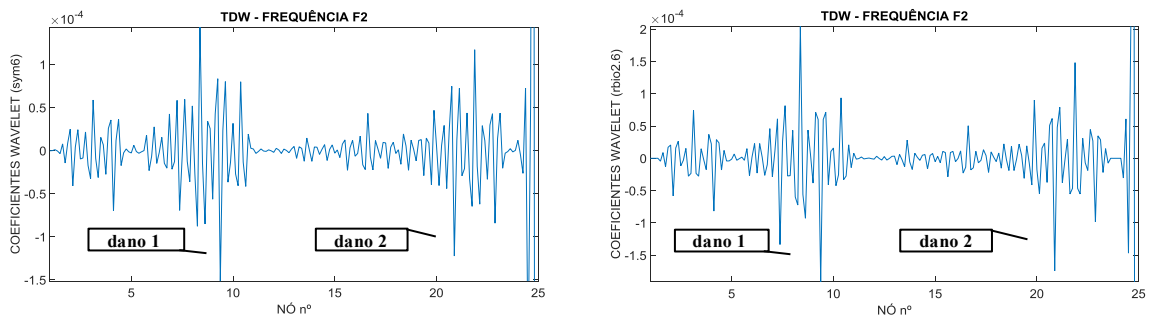


Figura 6.84 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 2.

A Figura 6.85 e a Figura 6.86 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 6.85 - Caso 2 – TDW – Segunda Frequência (F2).

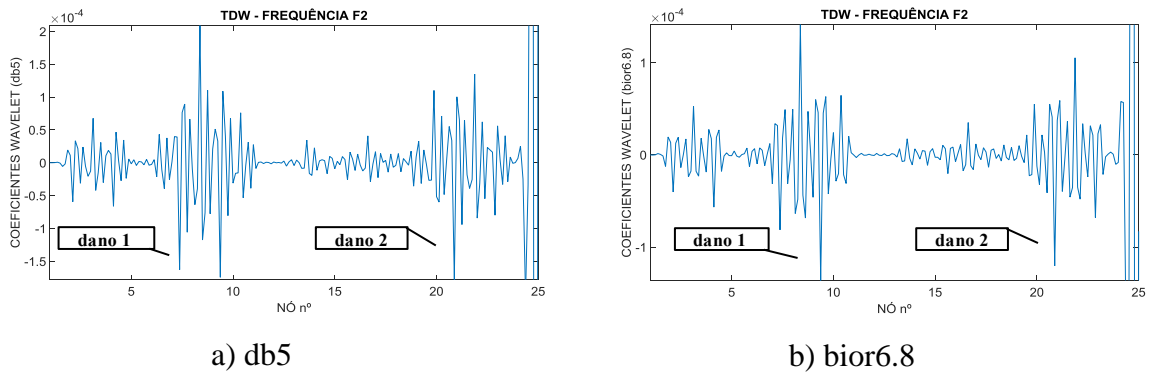


Figura 6.86 - Caso 2 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.85 e Figura 6.86), foi possível identificar os dois danos (dano1 e dano2) localizados nos nós 8 e 23.

6.13.2.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.87 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

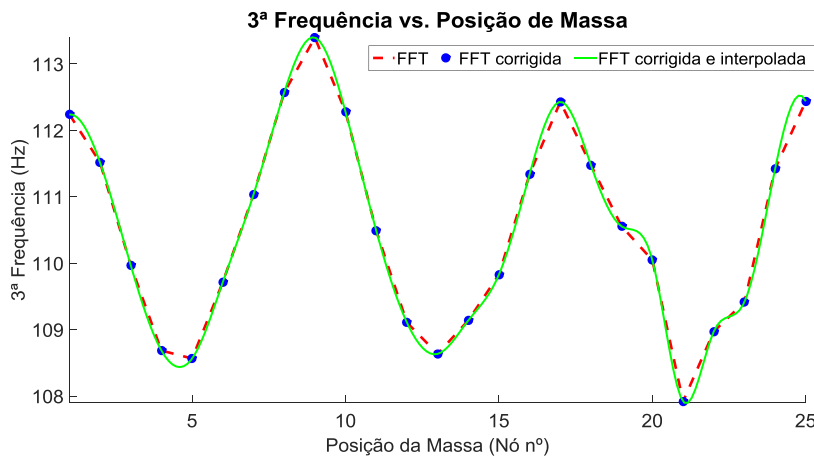
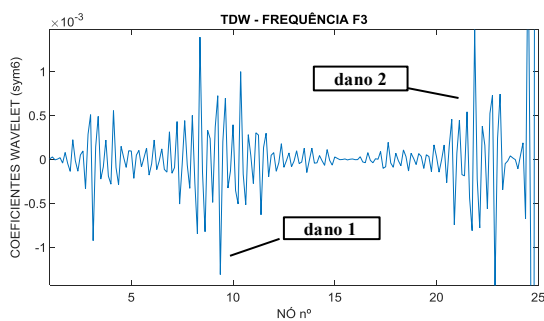
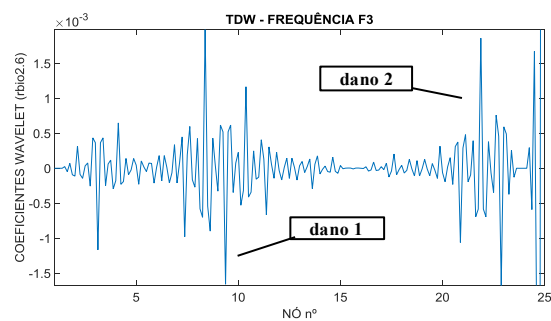


Figura 6.87 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 2.

A Figura 6.88 e a Figura 6.89, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

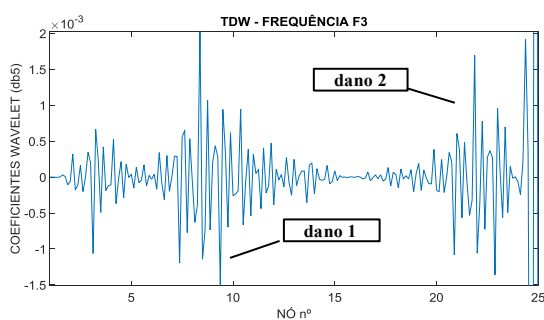


a) Symlet 6

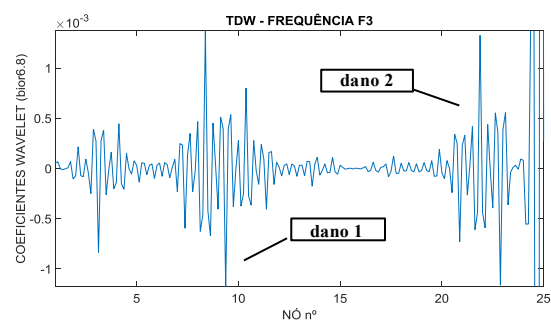


b) rbio2.6

Figura 6.88 - Caso 2 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.89 - Caso 2 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.88 e Figura 6.89), pode-se observar a perturbação gerada no dano 1 (nó 8) e no dano 2 (nó 23), correspondentes às posições dos dois danos.

6.13.3 – Caso 3 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes)

O caso 3 corresponde a duas posições de dano: a primeira representada por três entalhes simétricos na mesa superior e inferior localizados a 1,5 m (nó 8) do apoio esquerdo, espaçados a cada 2,5 cm e a segunda, por três entalhes localizados em 4,5 m (nó 23) em relação ao mesmo apoio. As duas posições de dano geraram uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2% e 65,6% da seção transversal respectivamente.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.3.1 - Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.90 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

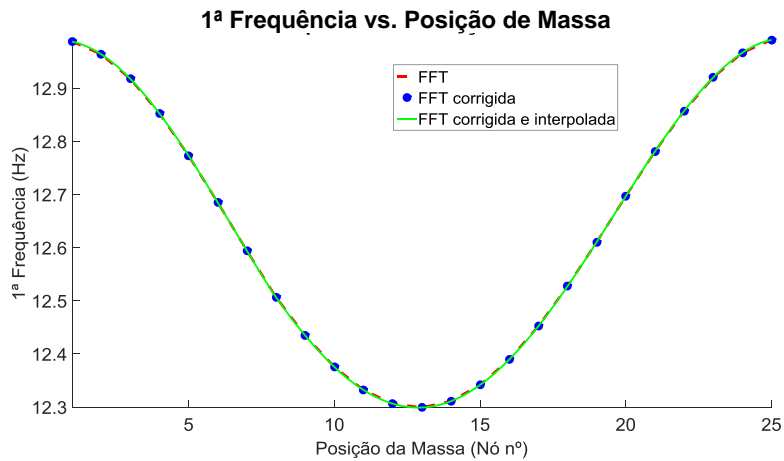
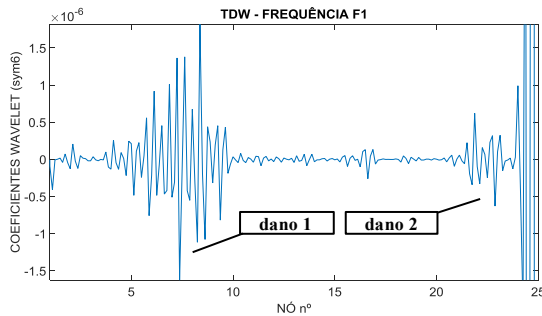
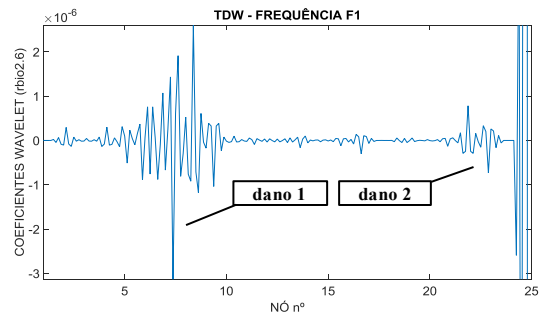


Figura 6.90 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 3.

A Figura 6.91 e a Figura 6.92, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

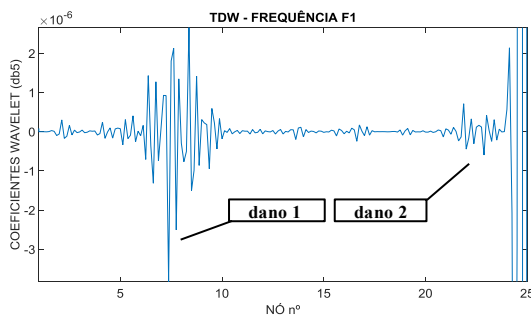


a) Symlet 6

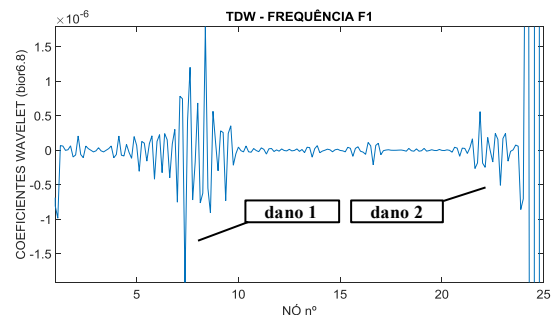


b) rbio2.6

Figura 6.91- Caso 3 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.92 - Caso 3 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.91 e Figura 6.92), pode-se observar a perturbação gerada por volta do nó 8 (dano 1) localizado a 1,5 m do apoio esquerdo. O gráfico apresenta uma perturbação pequena por volta do nó 23 (dano 2).

6.13.3.2 - Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.93 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

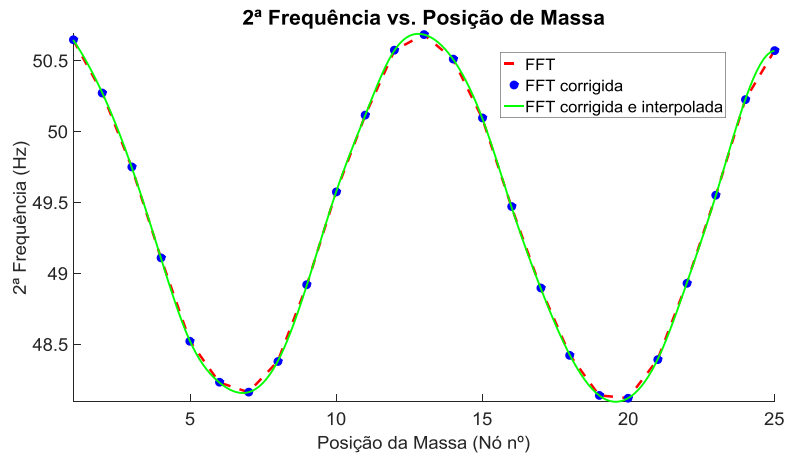
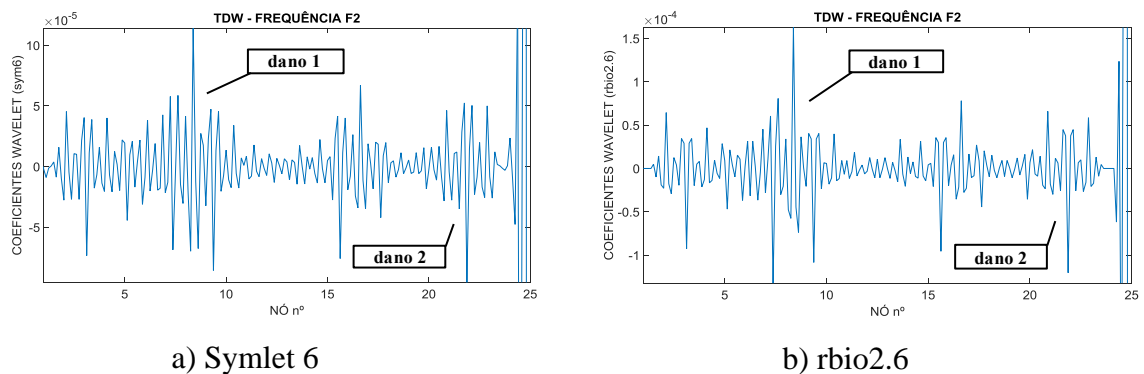


Figura 6.93 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 3.

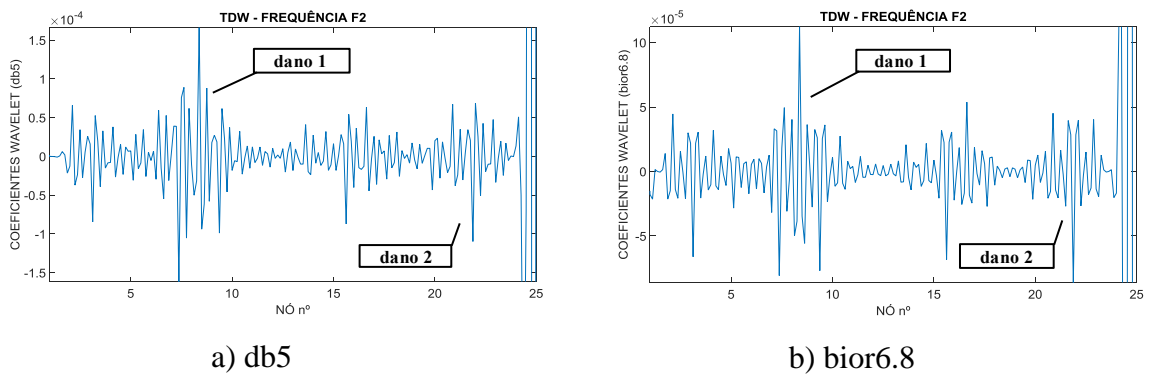
As Figura 6.94 e Figura 6.95 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 6.94 - Caso 3 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5

b) bior6.8

Figura 6.95 - Caso 3 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.94 e Figura 6.95), foi possível identificar os dois danos (dano1 e dano2) localizados nos nós 8 e 23. O gráfico também apresenta perturbações indicando um falso dano no nó 15.

6.13.3.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.96 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

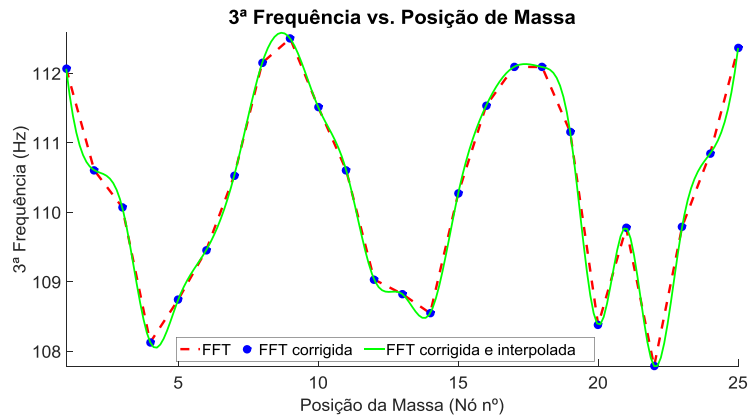
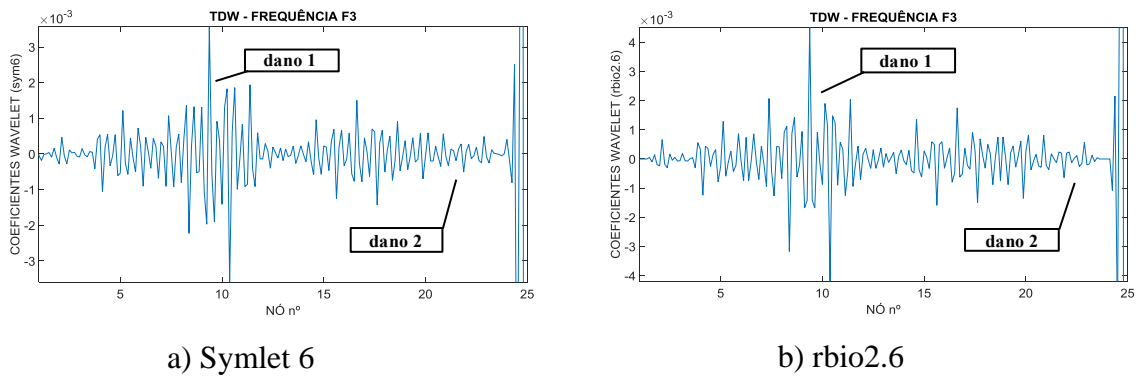


Figura 6.96 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 3.

A Figura 6.96 apresentou perturbações que não permitiram obter uma curva suave.

A Figura 6.97 e a Figura 6.98 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 6.97 - Caso 3 – TDW – Terceira Frequência (F3).

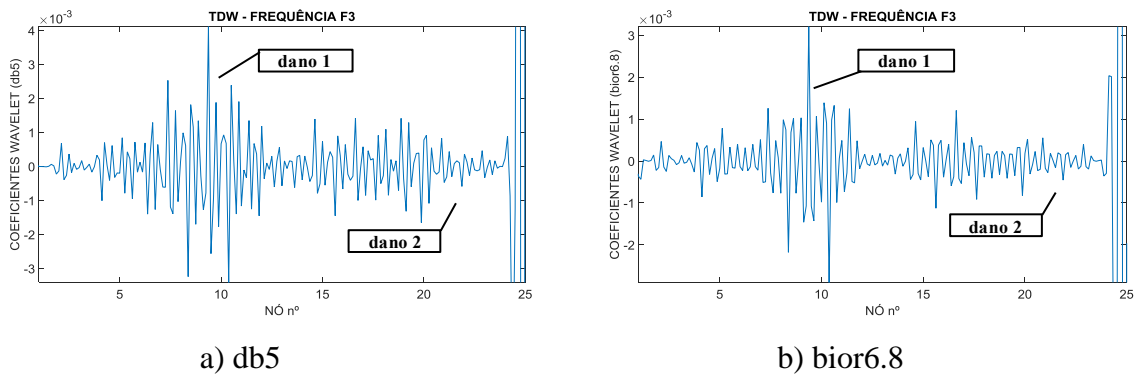


Figura 6.98 - Caso 3 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.97 e Figura 6.98), pode-se observar a perturbação gerada no dano 1 (nó 8), mas não constitui em prova suficiente para afirmar o local do dano, devido as perturbações presentes no sinal.

6.13.4 – Caso 4 (Viga intacta L = 6,0 m)

O caso 4 corresponde a viga intacta de 6 m de comprimento (Figura 6.99), discretizada em 30 elementos (31 nós) e submetida a uma massa de 3,266 kg.

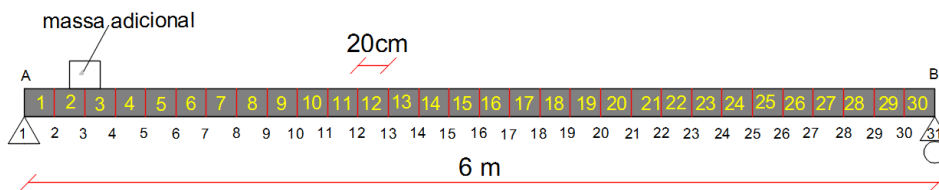


Figura 6.99 - Discretização da viga – Caso 4.

6.13.4.1 - Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 6.100 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

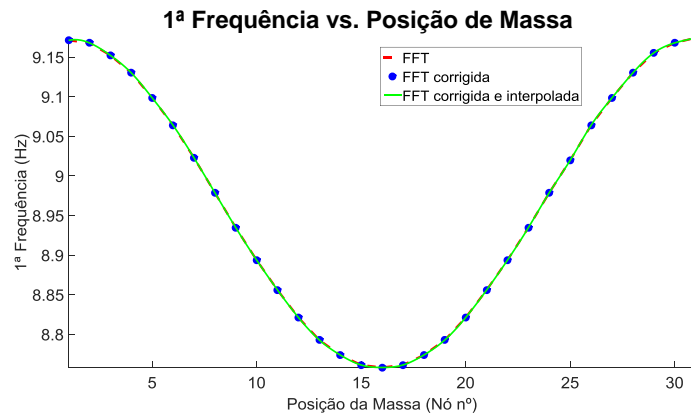


Figura 6.100 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 4.

6.13.4.2 - Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 6.101 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

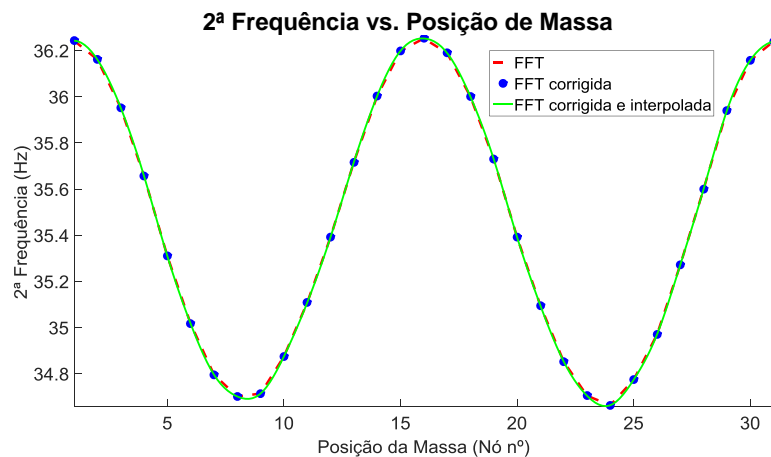


Figura 6.101- Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 4.

6.13.4.3 - Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 6.102 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

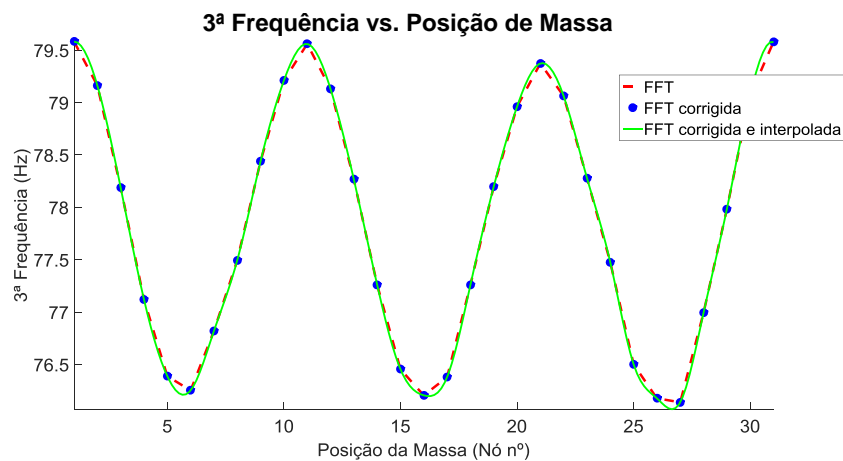


Figura 6.102 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 4.

6.13.5 – Caso 5 (dano 2 a 5,6 m com 1 entalhe)

O caso 5 corresponde ao primeiro caso da viga de 6 m de comprimento (1 entalhe). E com o objetivo de analisar a influência da proximidade dos danos nos apoios da estrutura, foi estabelecido para este ensaio que o primeiro dano estivesse localizado a uma distância de 60 cm do apoio ou nó 28 (Figura 6.103), o que equivale a 10% de $L = 6$ m (comprimento), desta forma o dano fica proporcional em relação ao Caso 2 (viga de 5 m), localizado a 50 cm do apoio (10 % de $L = 5$ m). O dano gerou uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2%.

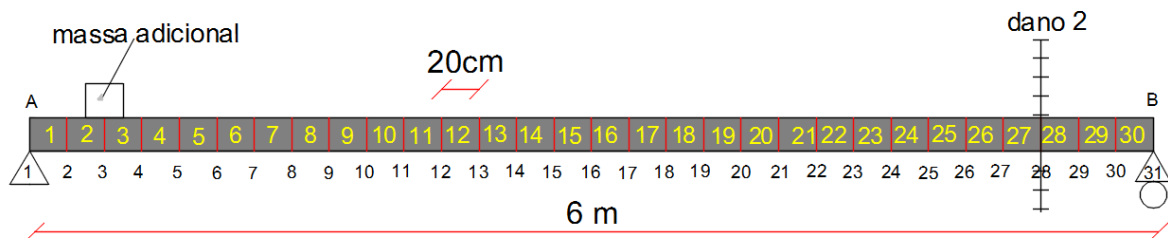


Figura 6.103 - Discretização da viga - Caso 5.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.5.1 - Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.104 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

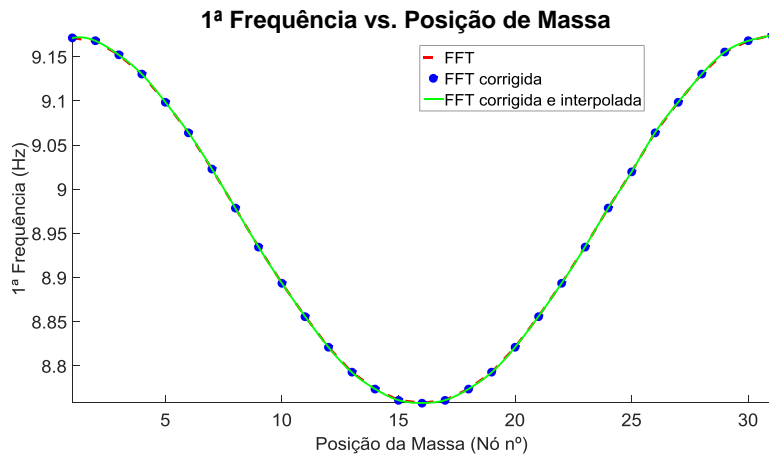
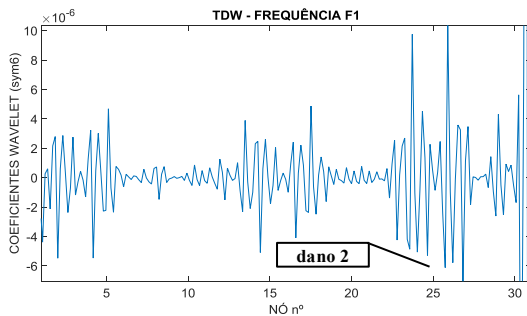
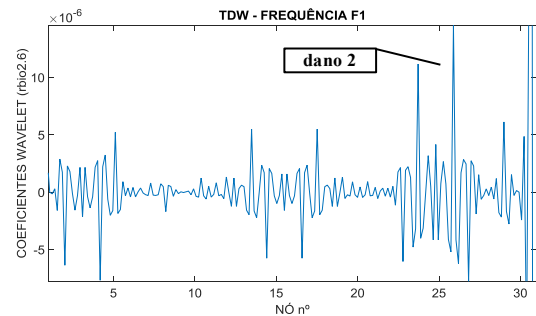


Figura 6.104 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 5.

A Figura 6.105 e a Figura 6.106, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

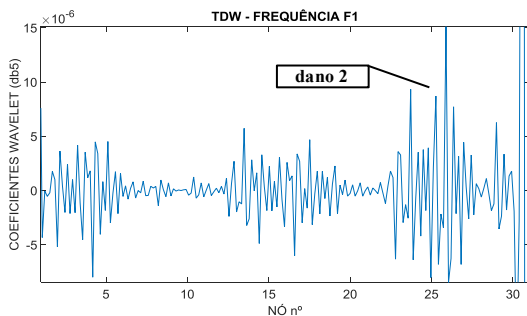


a) Symlet 6

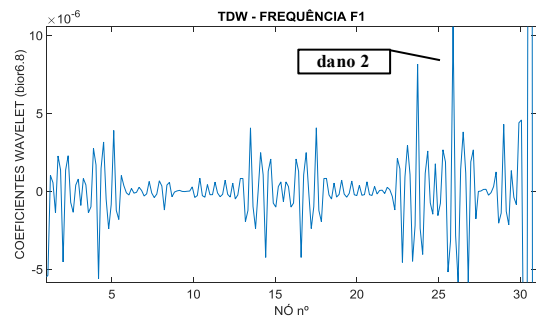


b) rbio2.6

Figura 6.105 - Caso 5 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.106 - Caso 5 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.105 e Figura 6.106), pode-se observar a maior perturbação gerada por volta do nó 27 próximo do nó 28 (dano 1) localizado a 0,6 m do apoio direito.

6.13.5.2 - Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.107 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

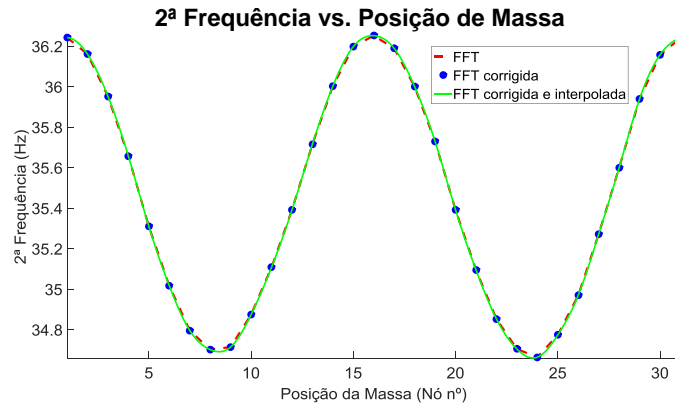
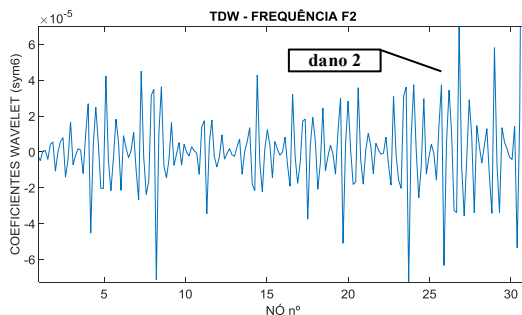
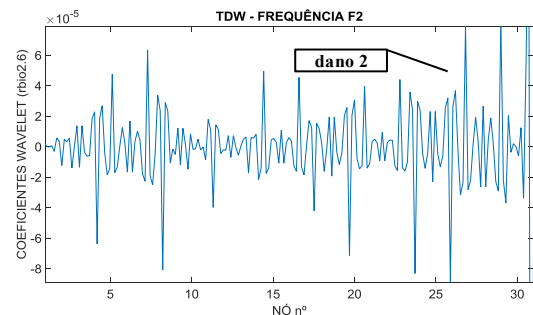


Figura 6.107 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 5.

A Figura 6.108 e a Figura 6.109 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

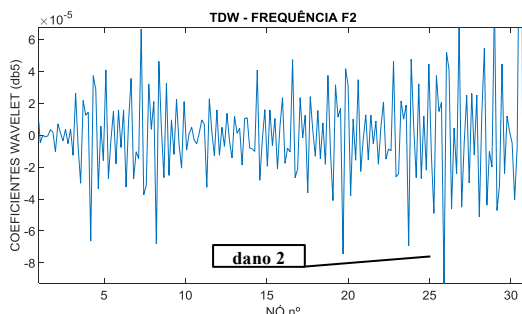


a) Symlet 6

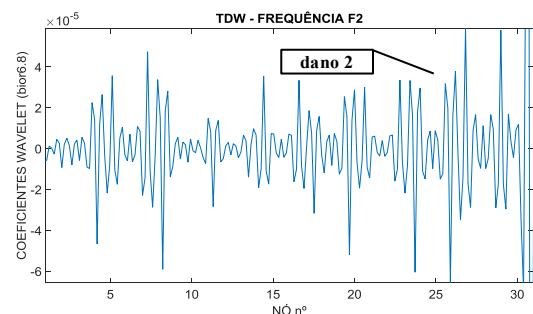


b) rbio2.6

Figura 6.108 - Caso 5 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.109 - Caso 5 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.108 e Figura 6.109), não foi possível identificar os dois danos (dano1 e dano2) localizados nos nós 8 e 23.

6.13.5.3 - Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.110 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

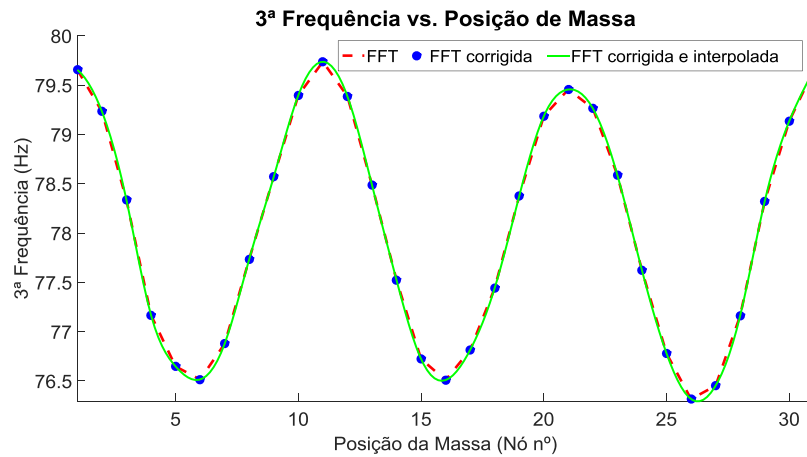
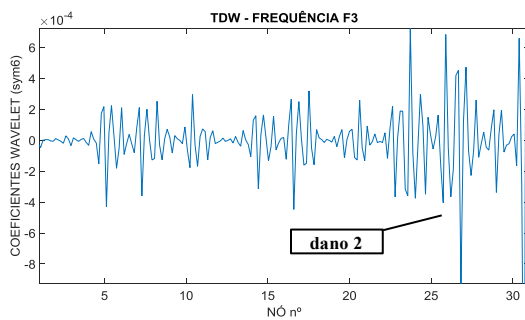
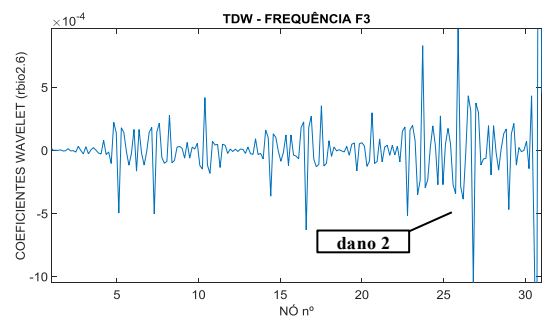


Figura 6.110 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 5.

A Figura 6.111 e a Figura 6.112, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6



b) rbio2.6

Figura 6.111 - Caso 5 – TDW – Terceira Frequência (F3).

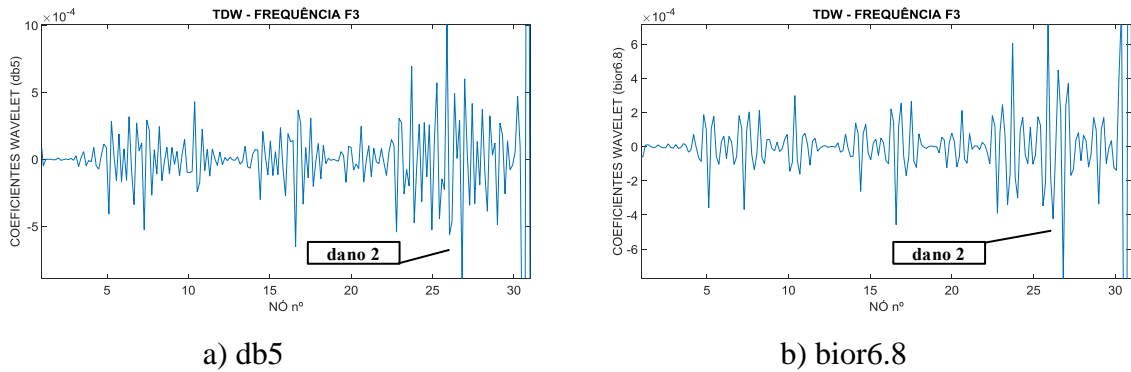


Figura 6.112 - Caso 5 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.111 e Figura 6.112), observa-se a perturbação gerada próxima do dano 1 (nó 28).

6.13.6 – Caso 6 (dano 2 a 5,6 m com 2 entalhes)

O caso 6 corresponde ao caso da viga de 6 m de comprimento (2 entalhes) localizados a uma distância de 60 cm do apoio ou nó 28 (Figura 6.113), o que equivale a 10% de $L = 6$ m (comprimento). O dano gerou uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2%.

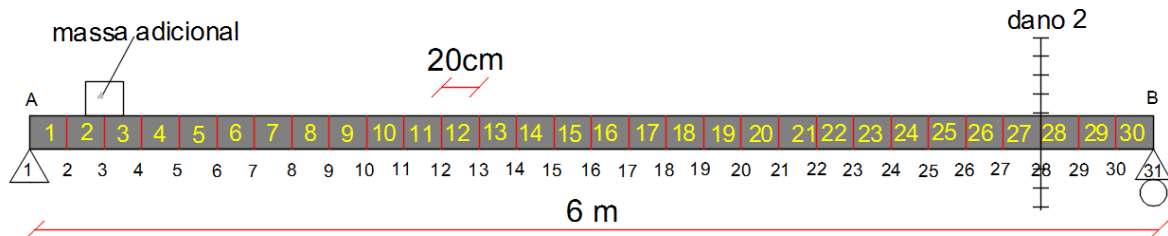


Figura 6.113 - Discretização da viga - Caso 6.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.6.1 - Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.114 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

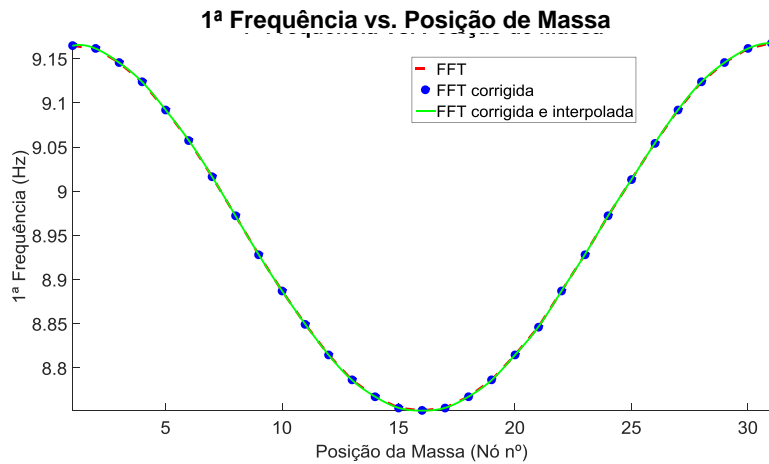
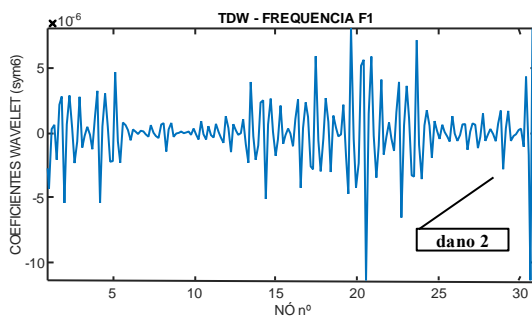
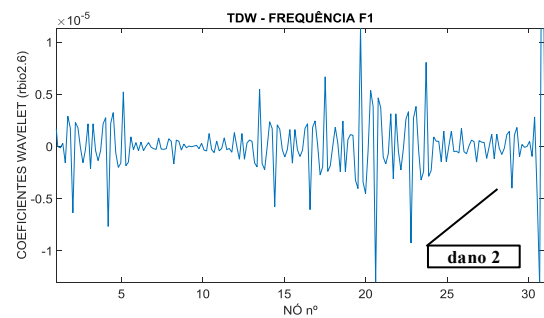


Figura 6.114 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 6.

A Figura 6.115 e a Figura 6.116 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

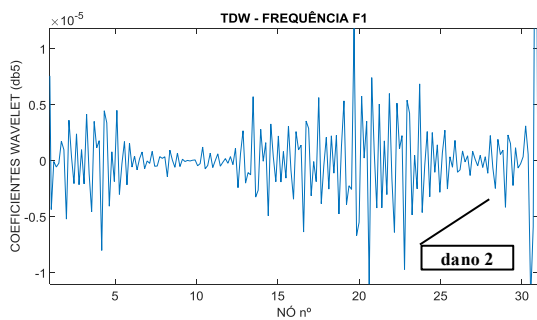


a) Symlet 6

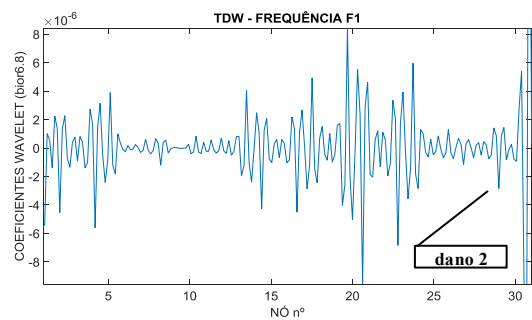


b) rbio2.6

Figura 6.115 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.116 - Caso 6 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.115 e Figura 6.116), observa-se uma perturbação maior por volta do nó 23 localizado a 1 m do dano (nó 28).

6.13.6.2 - Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.117 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

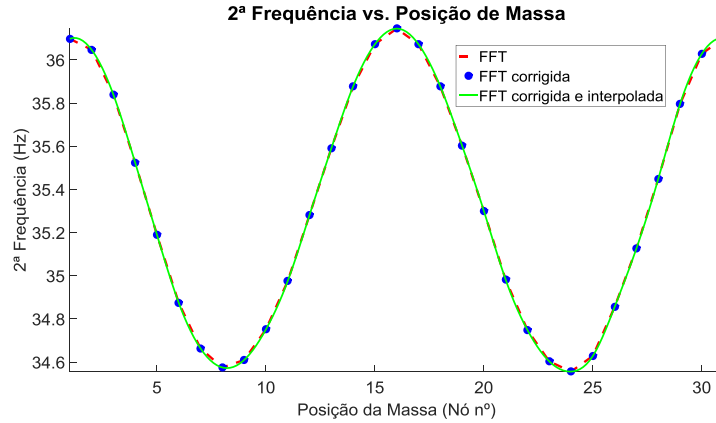
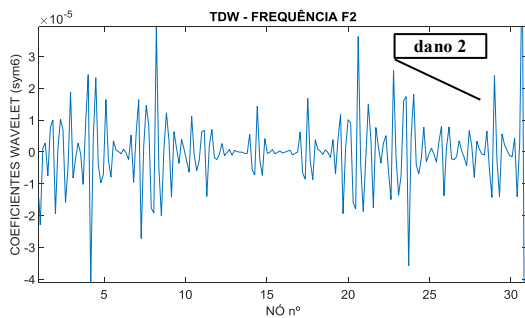
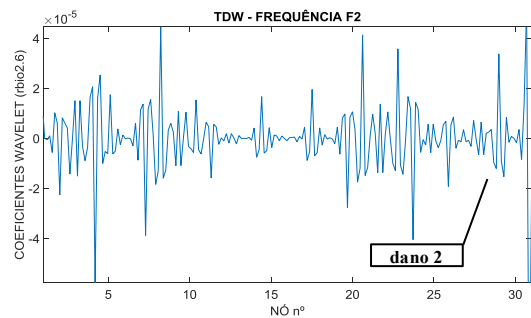


Figura 6.117 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 6.

A Figura 6.118 e a Figura 6.119, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.

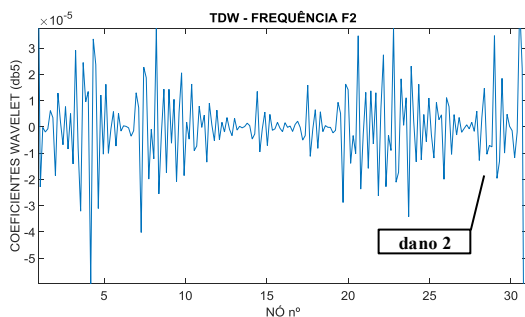


a) Symlet 6

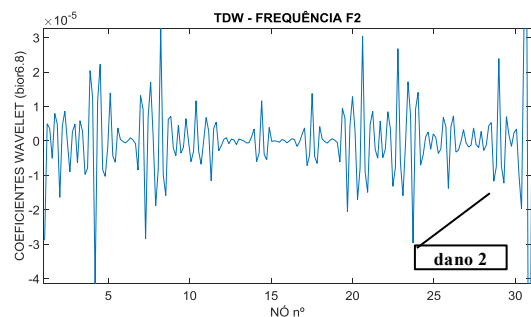


b) rbio2.6

Figura 6.118 - Caso 6 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.119 - Caso 6 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.118 e Figura 6.119), não foi possível identificar os dois danos (dano1) localizados no nó 28.

6.13.6.3 - Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.120 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

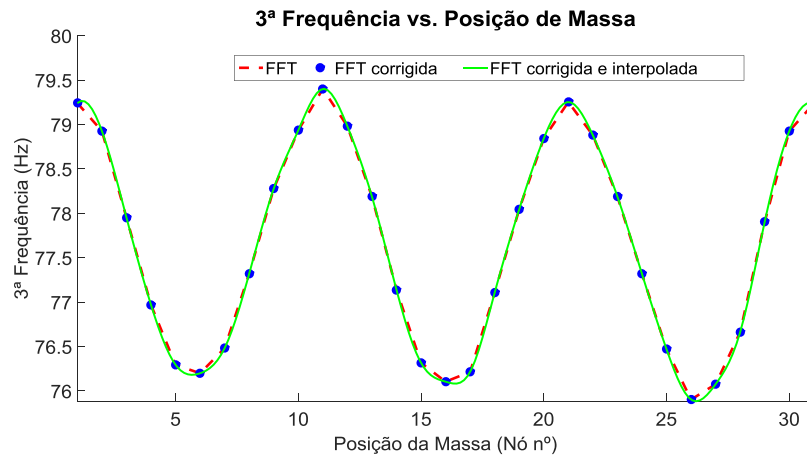
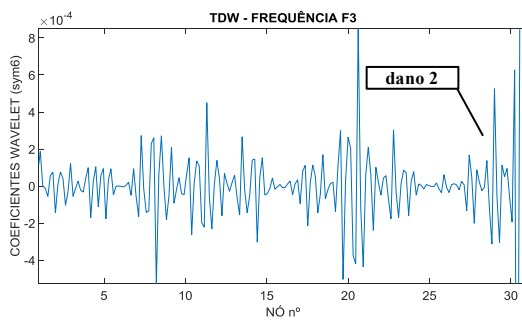
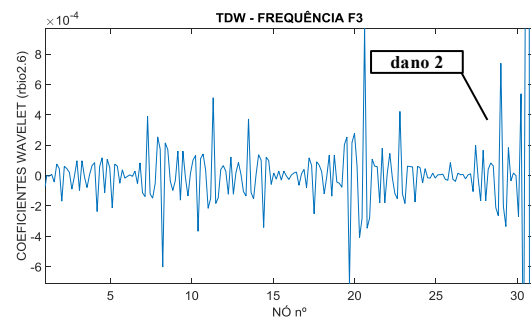


Figura 6.120 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 6.

A Figura 6.121 e a Figura 6.122, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior considerando a utilização de quatro funções wavelet mãe.



a) Symlet 6



b) rbio2.6

Figura 6.121- Caso 6 – TDW – Terceira Frequência (F3).

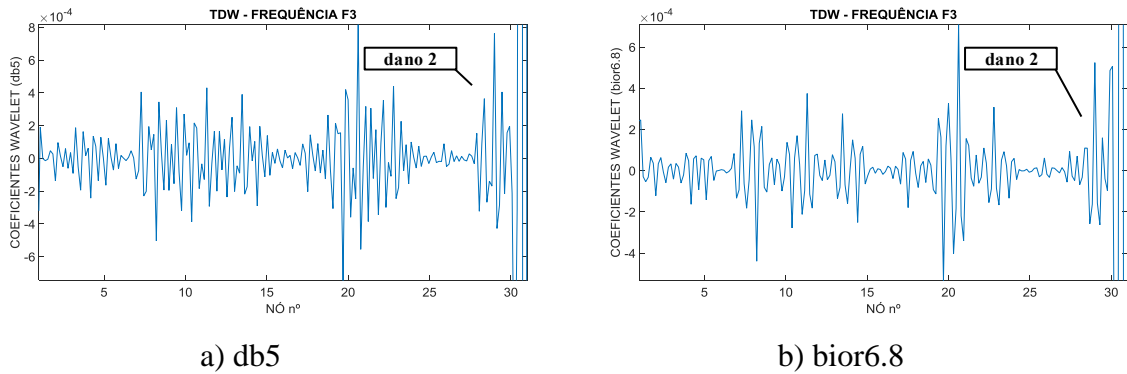


Figura 6.122 - Caso 6 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.121 e Figura 6.122), observa-se a perturbação gerada por volta do nó 23 localizado a 1m do dano 1 (nó 28).

6.13.7 – Caso 7 (dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

O caso 7 corresponde ao caso da viga de 6 m de comprimento (3 entalhes) localizados a uma distância de 60 cm do apoio ou nó 28 (Figura 6.123), o que equivale a 10% de $L=6\text{ m}$ (comprimento). O dano provocou uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2%.

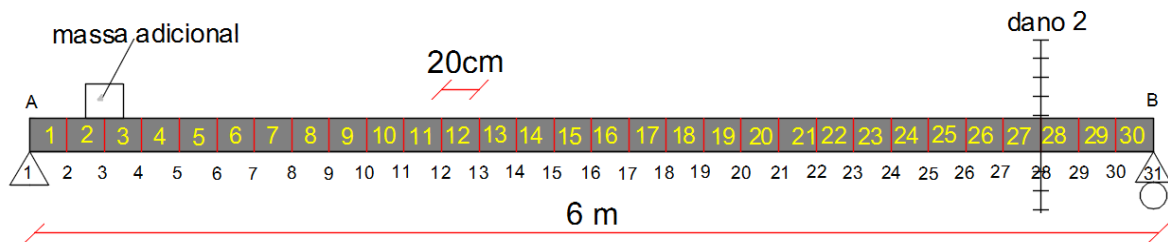


Figura 6.123 - Discretização da viga - Caso 7.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.7.1 - Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.124 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

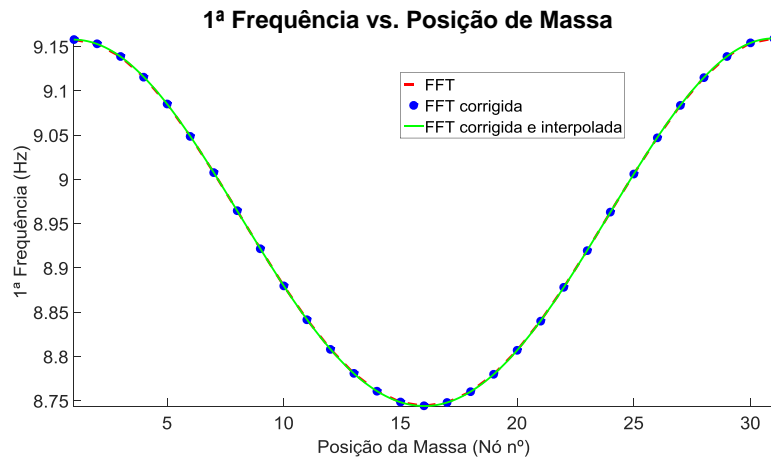
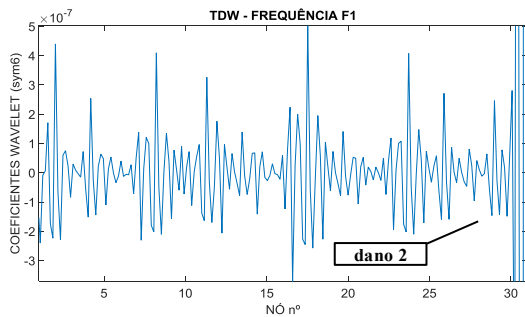
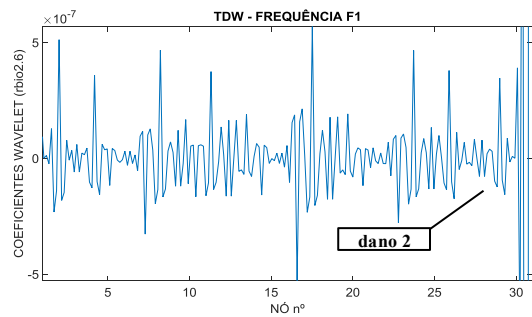


Figura 6.124 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1)-Caso 7.

A Figura 6.125 e a Figura 6.126, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

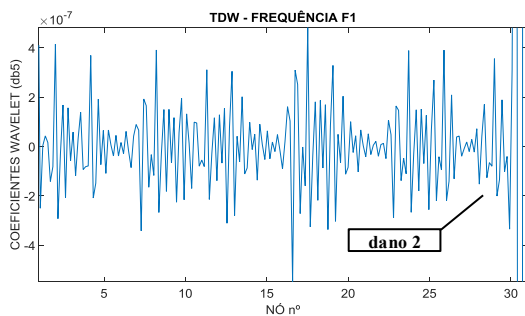


a) Symlet 6

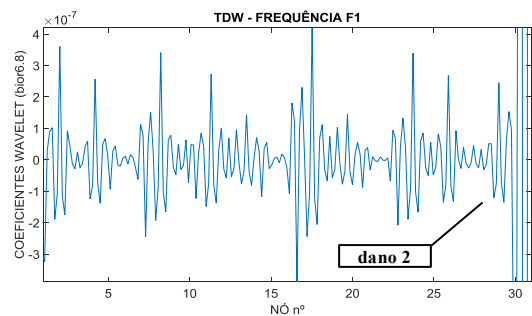


b) rbio2.6

Figura 6.125 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.126 - Caso 7 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.125 e Figura 6.126), não foi possível a localização do dano.

6.13.7.2 - Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.127 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

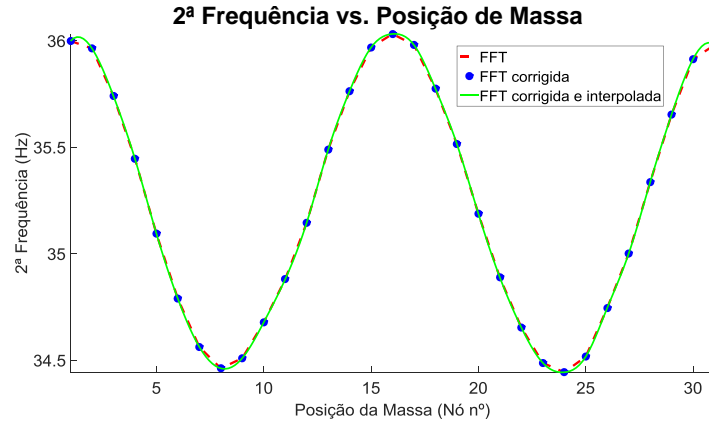
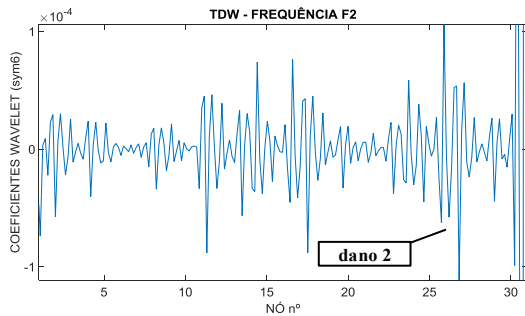
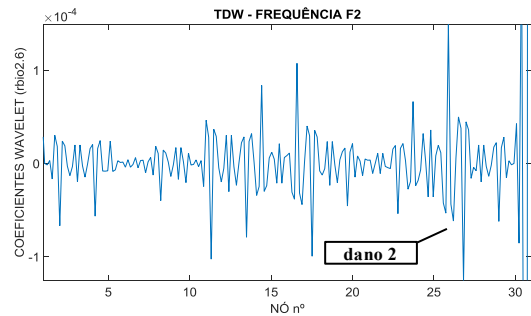


Figura 6.127 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2)-Caso 7.

A Figura 6.128 e a Figura 6.129, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

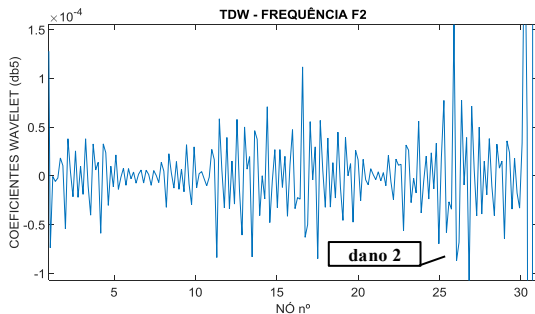


a) Symlet 6

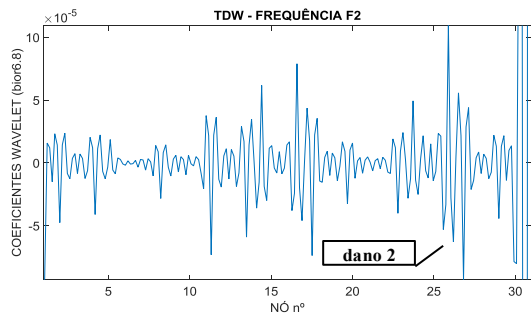


b) rbio2.6

Figura 6.128 - Caso 7 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.129 - Caso 7 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.128 e Figura 6.129), observa-se a maior perturbação está localizada no nó 28 (dano 2), mas não constitui uma prova clara da presença do dano, devido as perturbações geradas pelo ruído ao longo da estrutura.

6.13.7.3 - Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.130 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

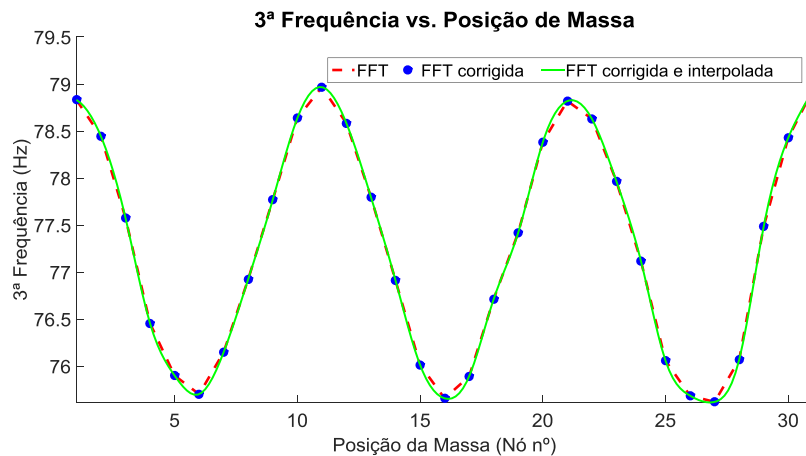
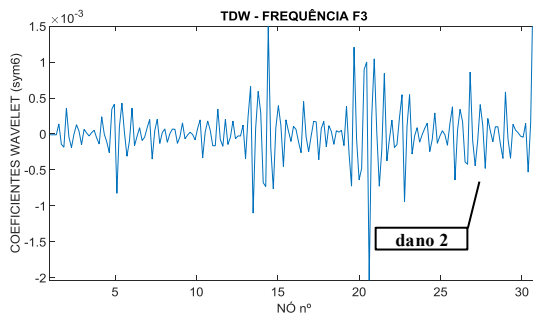
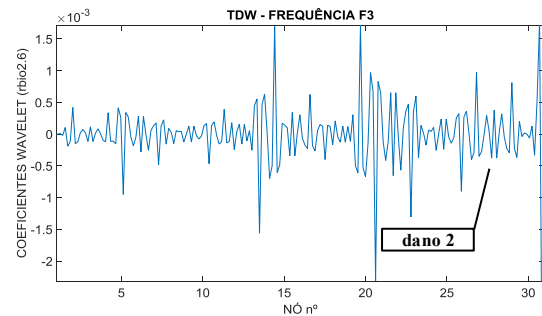


Figura 6.130 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 7.

A Figura 6.131 e a Figura 6.132, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

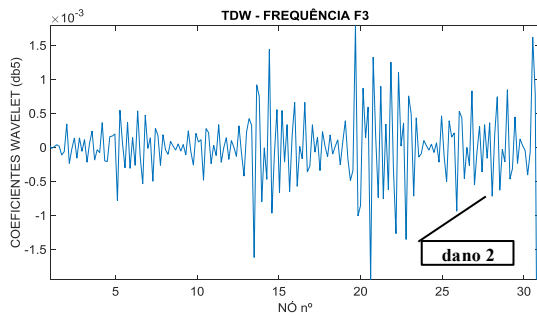


a) Symlet 6

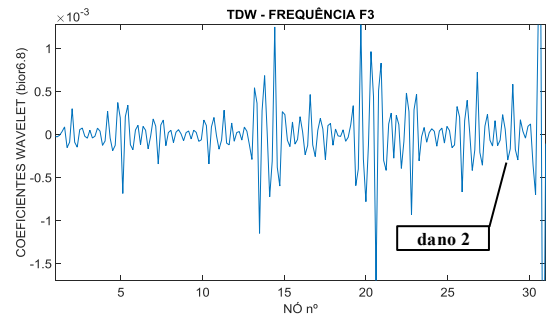


b) rbio2.6

Figura 6.131 - Caso 7 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.132 - Caso 7 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.131 e Figura 6.132), não foi possível a localização do dano.

6.13.8 – Caso 8 (dano 1 a 5,0 m com 1 entalhe e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

No caso 8 foram consideradas duas posições de dano (Figura 6.133), compostos por 3 entalhes no nó 28 e um entalhe no nó 26. Os danos geraram uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2%.

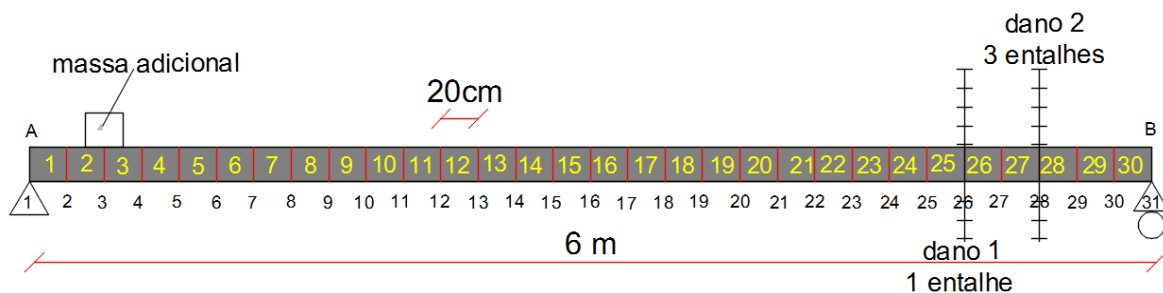


Figura 6.133 - Discretização da viga - Caso 8.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.8.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.134 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

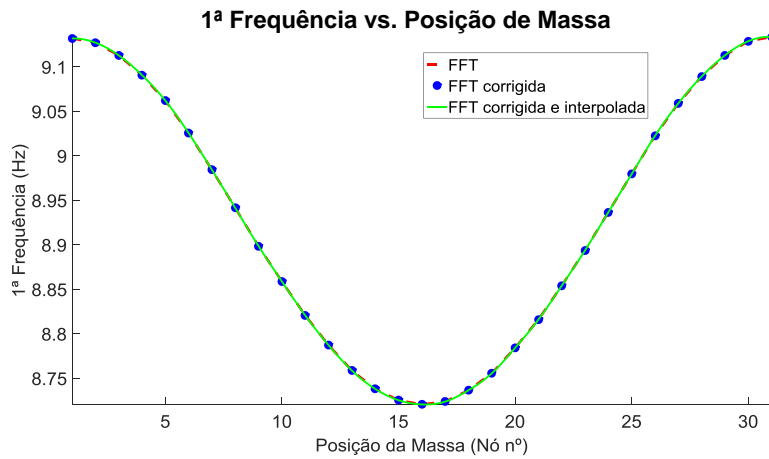
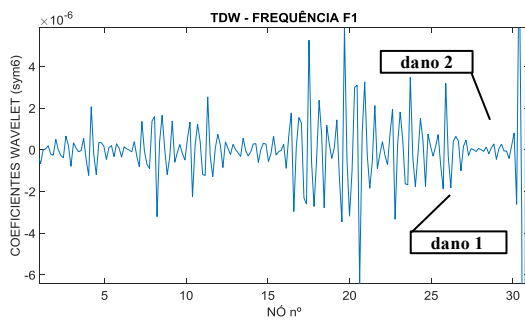
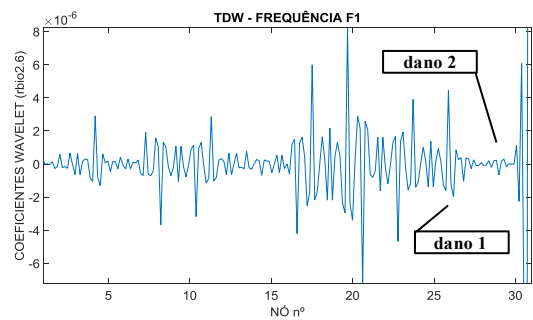


Figura 6.134 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 8 .

A Figura 6.135 e a Figura 6.136, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

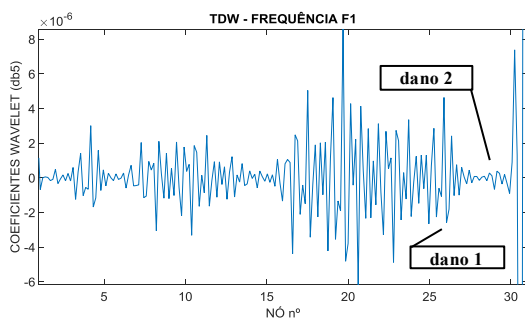


a) Symlet 6

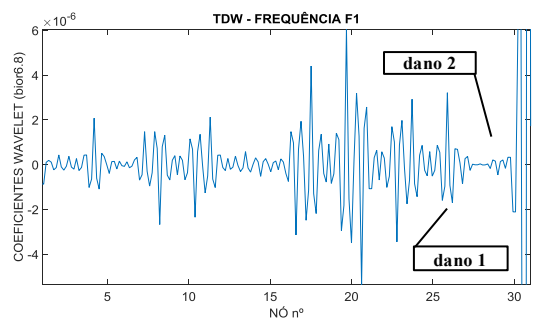


b) rbio2.6

Figura 6.135 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.136 - Caso 8 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.135 e Figura 6.136), observa-se uma perturbação maior entre os nós 17 e 27, devida a presença do dano nos nós 26 e 28.

6.13.8.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.137 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

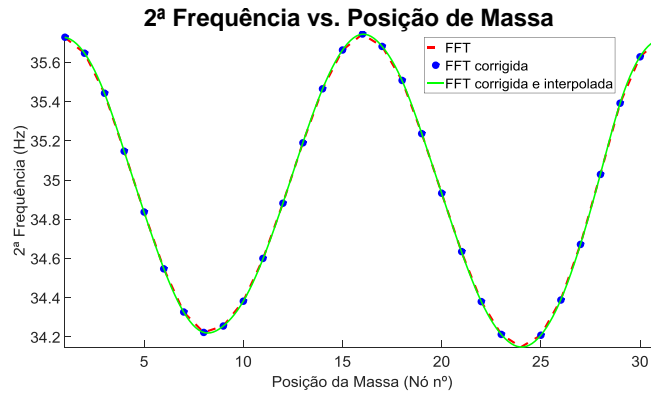
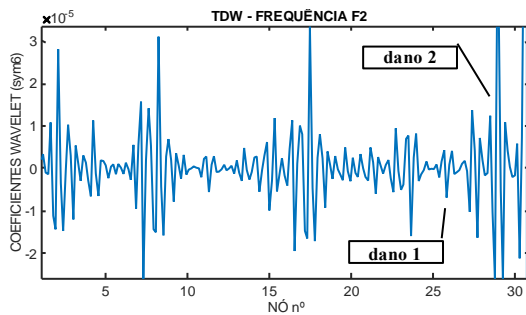
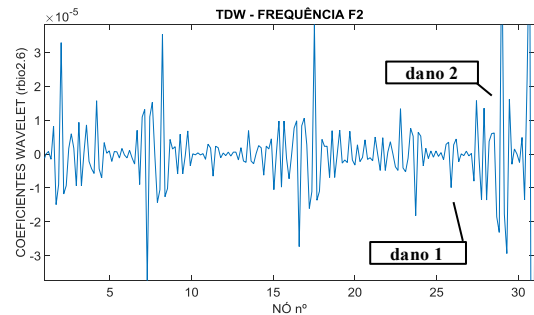


Figura 6.137 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 8.

A Figura 6.138 e a Figura 6.139, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

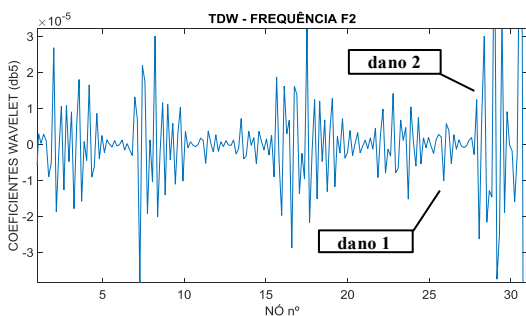


a) Symlet 6

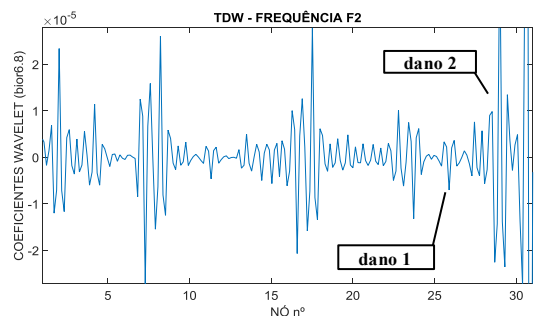


b) rbio2.6

Figura 6.138 - Caso 8 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.139 - Caso 8 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.138 e Figura 6.139) não foi possível nenhum dos dois danos, localizados nos nós 26 e 28 respectivamente.

6.13.8.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.140 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

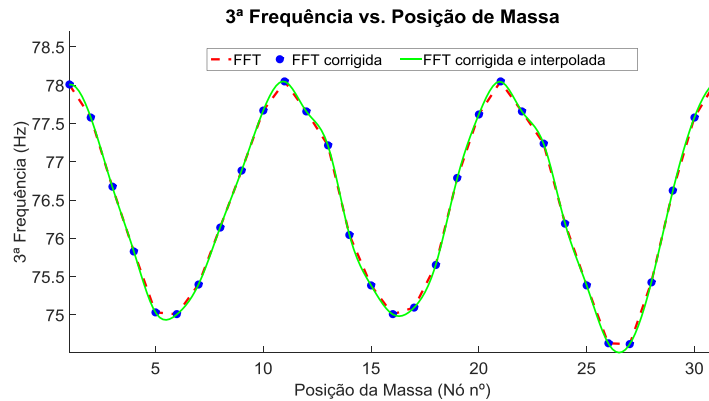
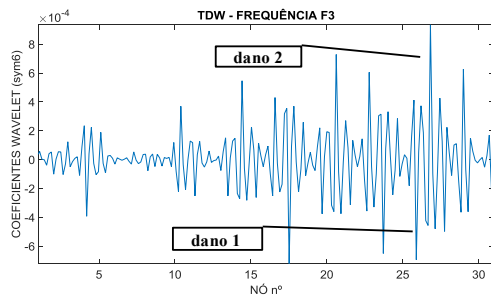
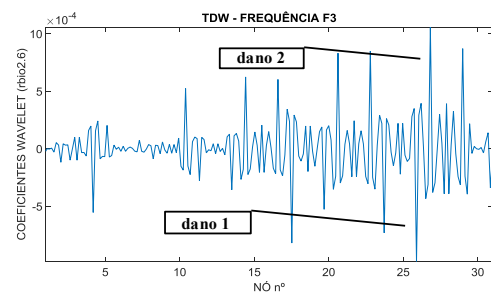


Figura 6.140 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 8.

A Figura 6.141 e a Figura 6.142, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

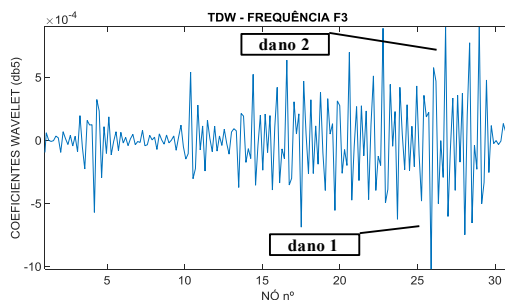


a) Symlet 6

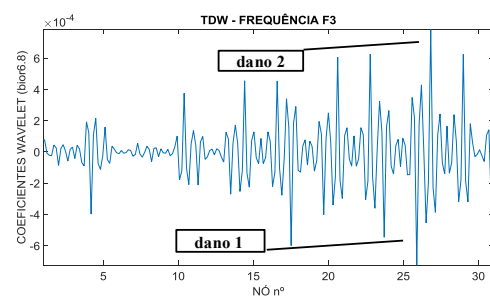


b) rbio2.6

Figura 6.141 - Caso 8 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.142 - Caso 8 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.141 e Figura 6.142), observa-se a maior perturbação gerada entre os nós 15 e 28 devido a presença dos danos (nós 26 e 28).

6.13.9 – Caso 9 (dano 1 a 5,0 m com 2 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

No caso 9 foram consideradas duas posições de dano (Figura 6.143), compostos por 3 entalhes no nó 28 e dois entalhes no nó 26. Os danos geraram uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2%.

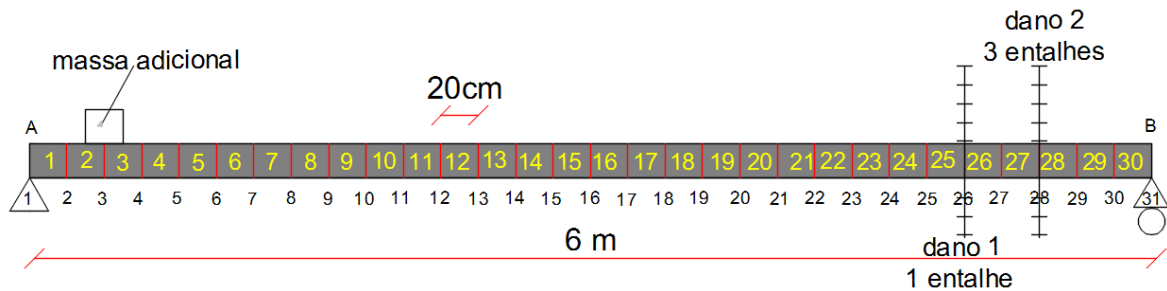


Figura 6.143 - Discretização da viga - Caso 9.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.9.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.144 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

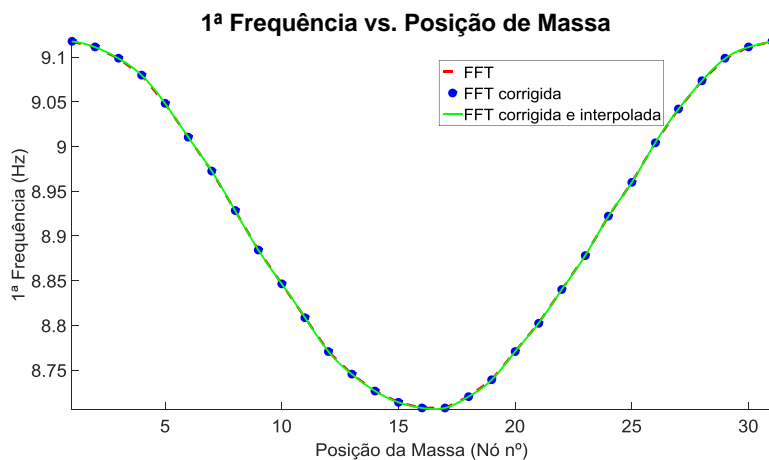
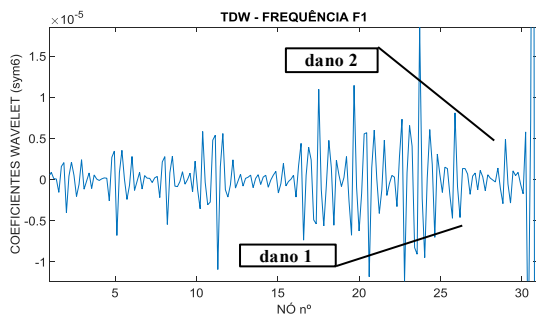
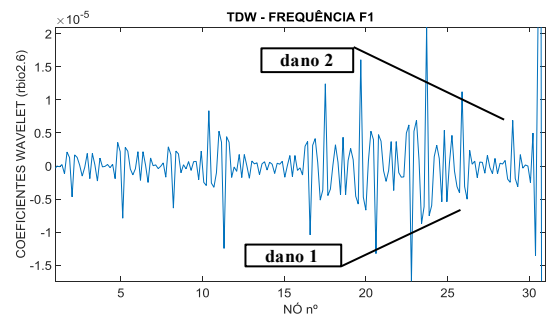


Figura 6.144 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 9.

A Figura 6.145 e a Figura 6.146, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

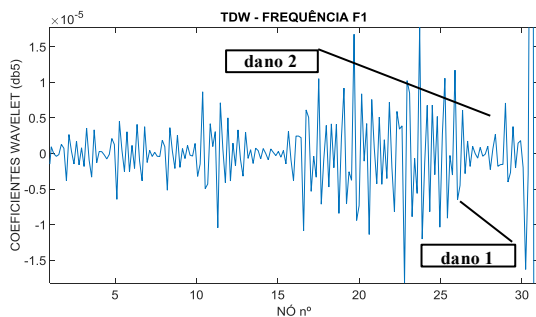


a) Symlet 6

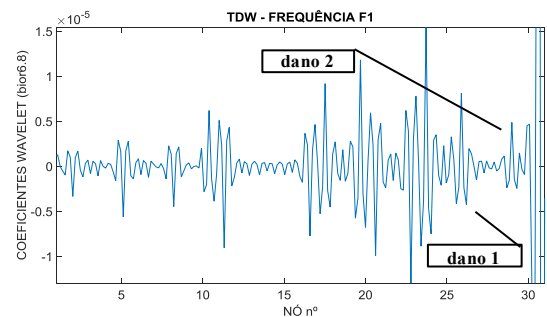


b) rbio2.6

Figura 6.145 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.146 - Caso 9 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.145 e Figura 6.146), observa-se uma perturbação maior entre os nós 17 e 27, devida a presença do dano no nó 26.

6.13.9.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.147 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

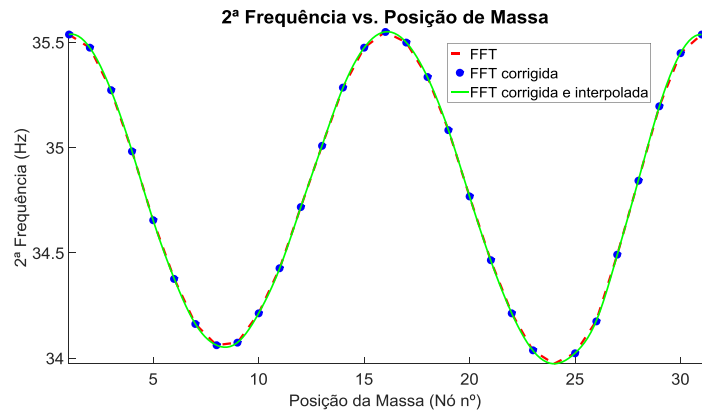
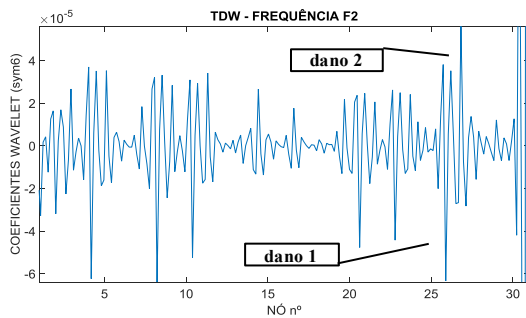
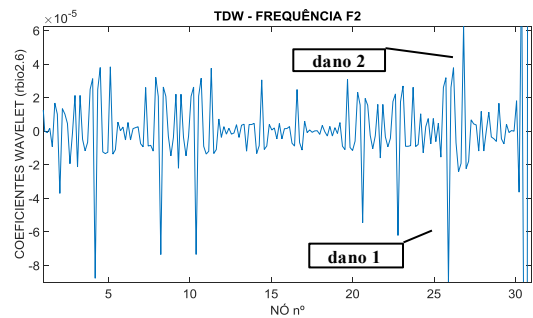


Figura 6.147 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2)-Caso 9.

A Figura 6.148 e a Figura 6.149, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

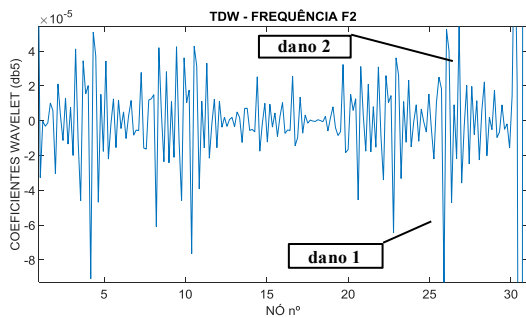


a) Symlet 6

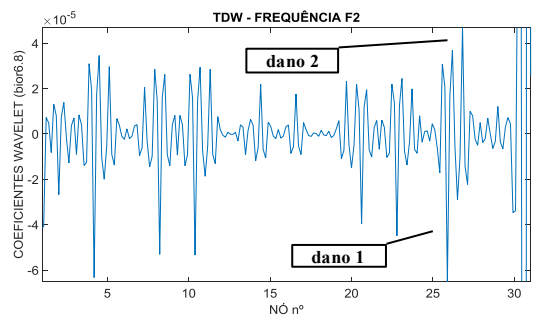


b) rbio2.6

Figura 6.148 - Caso 9 – TDW – Segunda Frequência (F2) .



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.149 - Caso 9 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.148 e Figura 6.149) não foi possível identificar os danos (nós 26 e 28), devido as perturbações geradas pelo ruído presente no sinal.

6.13.9.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.150 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

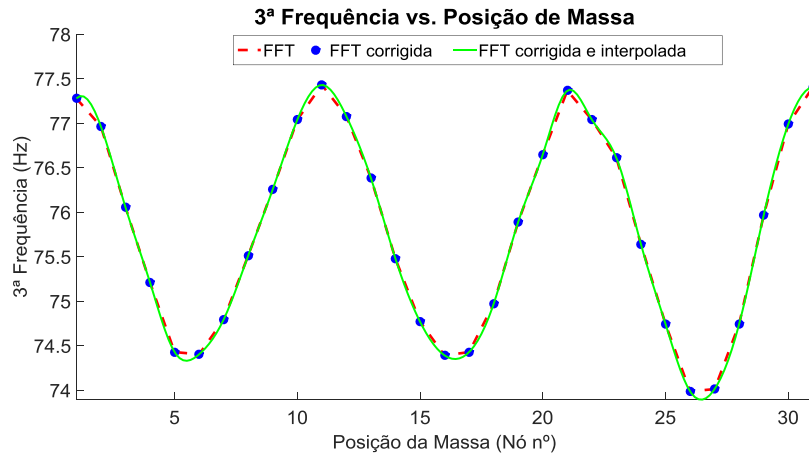
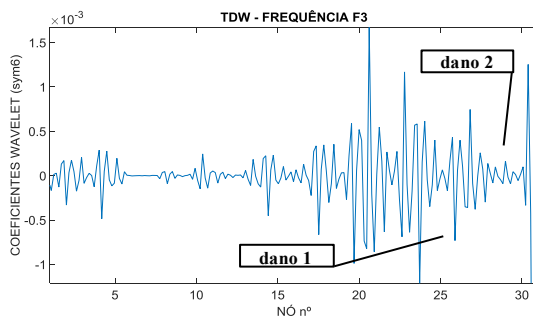
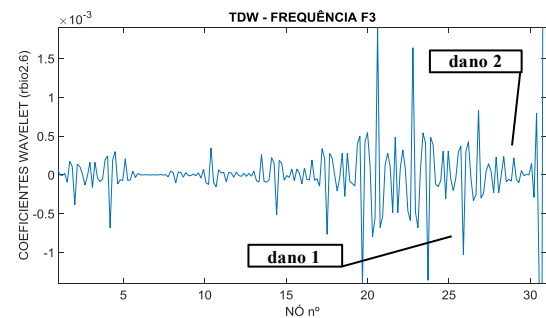


Figura 6.150 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 9.

A Figura 6.151 e a Figura 6.152, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

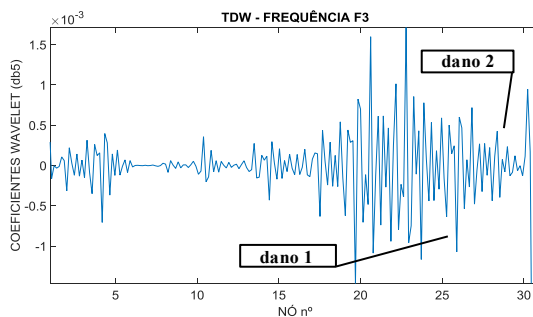


a) Symlet 6

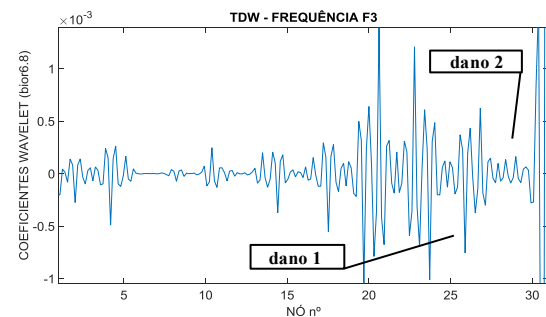


b) rbio2.6

Figura 6.151 - Caso 9 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.152 - Caso 9 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.151 e Figura 6.152), observa-se a maior perturbação gerada entre os nós 15 e 28 devido a presença dos dois danos nos nós 26 e 28 respectivamente.

6.13.10 – Caso 10 (dano 1 a 5,0 m com 3 entalhes e dano 2 a 5,6 m com 3 entalhes)

No caso 10 foram consideradas duas posições de dano (Figura 6.153), compostos por 3 entalhes no nó 28 e três entalhes no nó 26. Os danos geraram uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2%.

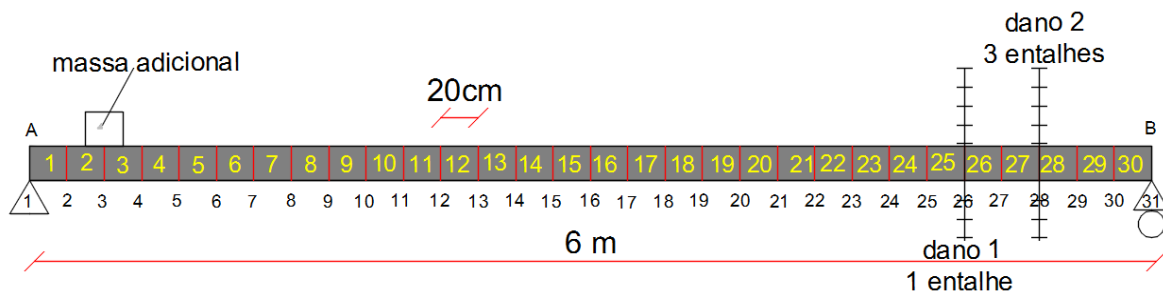


Figura 6.153 - Discretização da viga - Caso 10.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1% e massa adicional $M = 3,266$ kg.

6.13.10.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) $M=3,266$ kg ; ruído 1%

Na Figura 6.154 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

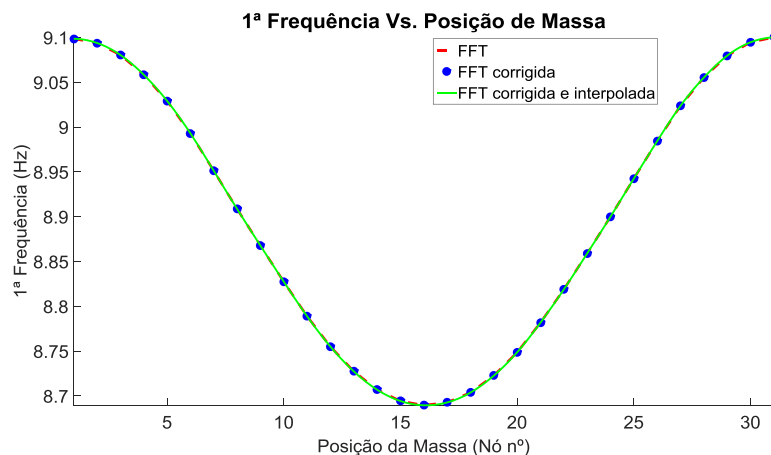
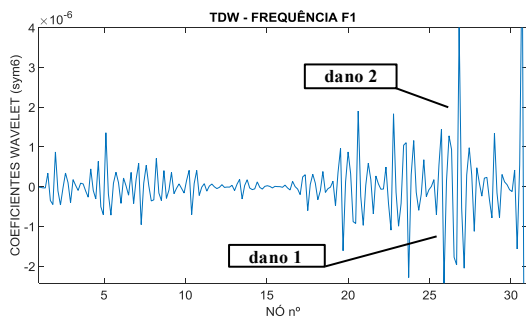
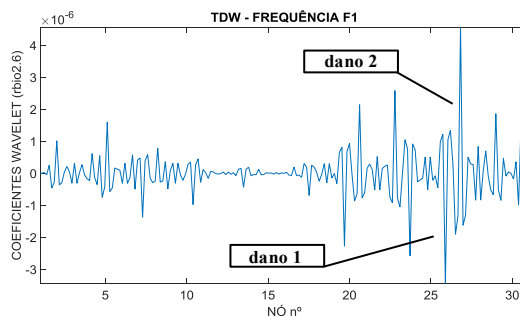


Figura 6.154 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

A Figura 6.155 e a Figura 6.156, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

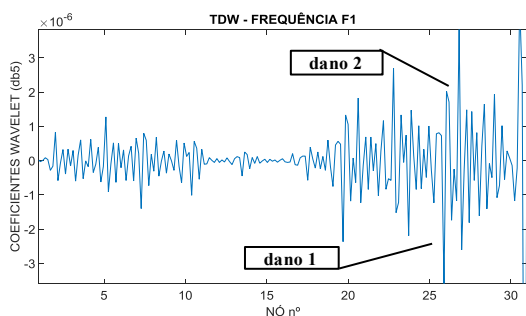


a) Symlet 6

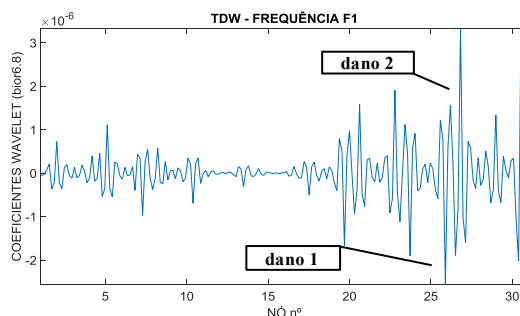


b) rbio2.6

Figura 6.155 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.156 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.155 e Figura 6.156), observa-se uma perturbação maior entre os nós 17 e 27, isto, devido a presença do dano no nó 26.

6.13.10.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) $M=3,266\text{kg}$; ruído 1%

Na Figura 6.157 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

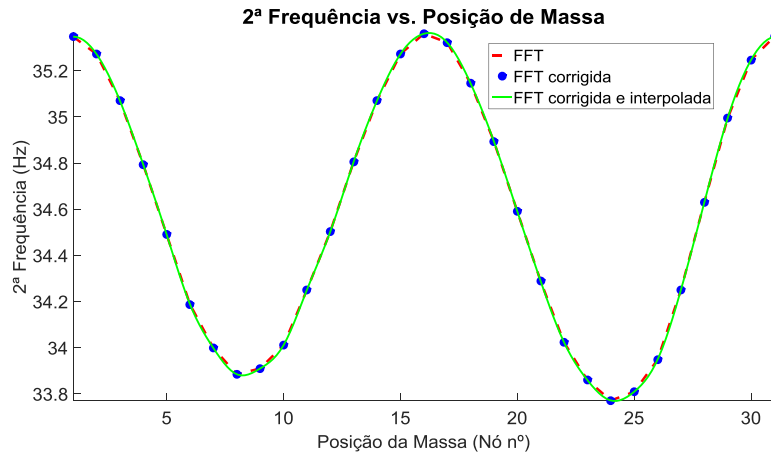
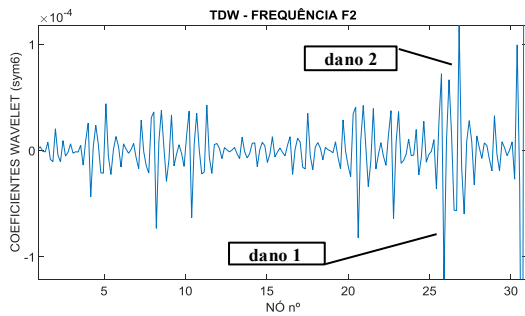
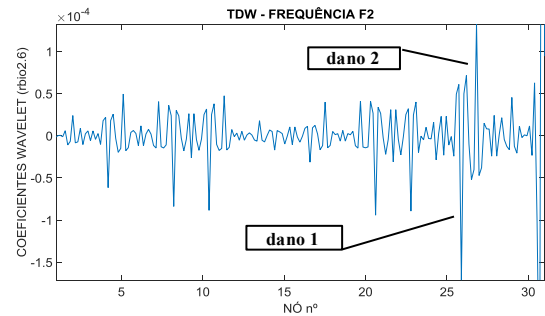


Figura 6.157 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 10.

A Figura 6.158 e a Figura 6.159, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

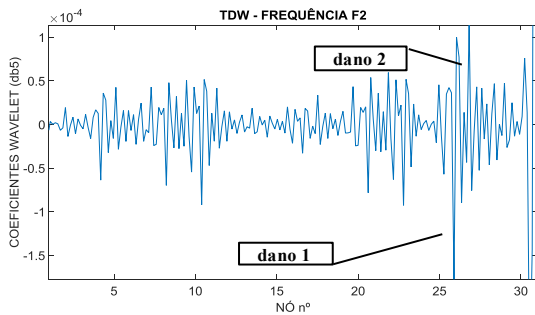


a) Symlet 6

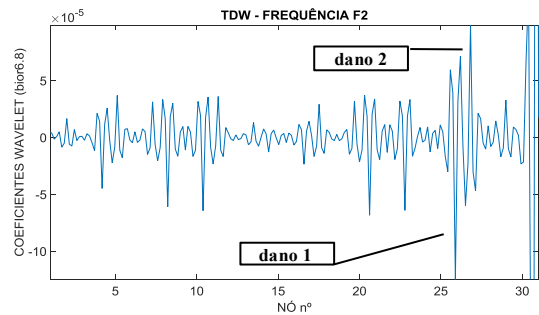


b) rbio2.6

Figura 6.158 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.159 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.158 e Figura 6.159), foram geradas perturbações em volta dos locais danificados, mas não é possível determinar se existe verdadeiramente uma dano (nós 26 e 28).

6.13.10.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) $M=3,266\text{kg}$; ruído 1%

Na Figura 6.160 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

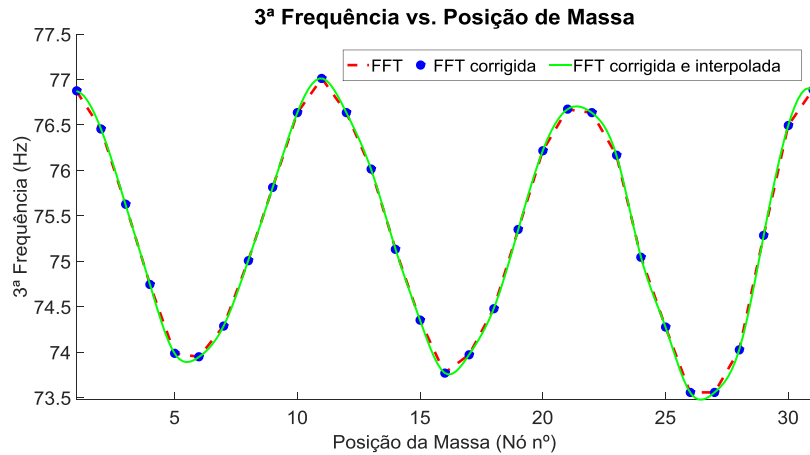
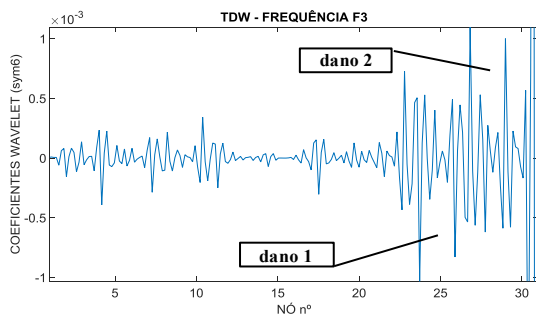
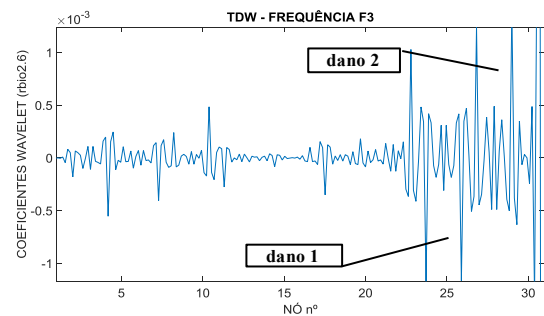


Figura 6.160 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 10.

A Figura 6.161 e a Figura 6.162, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

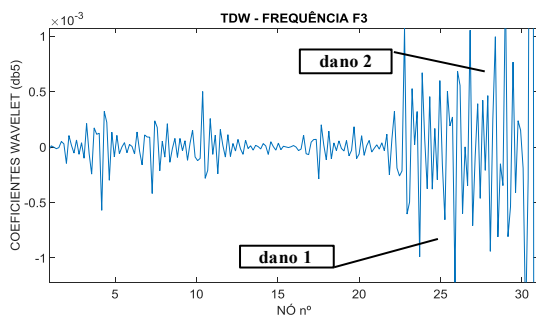


a) Symlet 6

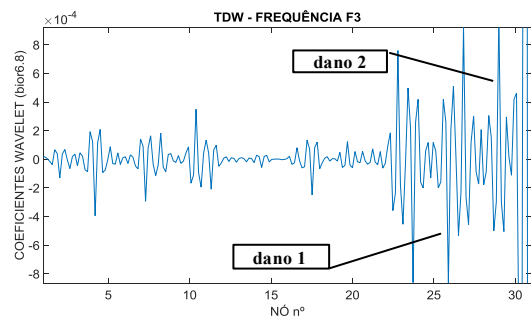


b) rbio2.6

Figura 6.161 - Caso 10 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.162 - Caso 10 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.161 e Figura 6.162), observa-se a maior perturbação gerada entre os nós 15 e 28 devida a presença dos danos (nós 26 e 28).

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1% e massa adicional $M = 24,718$ kg.

6.13.10.4 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) $M=24,718$ kg ; ruído 1%

Na Figura 6.163 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 24,718 kg.

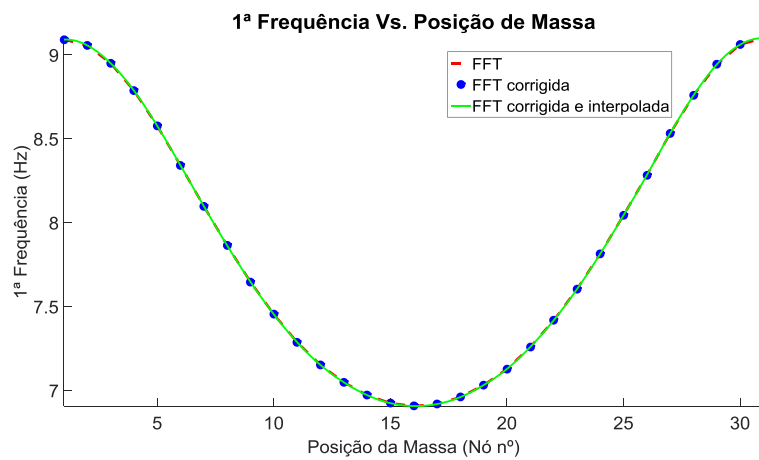
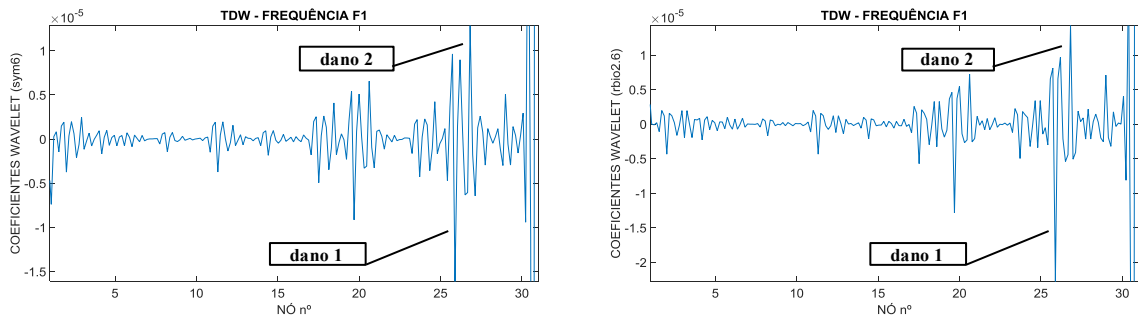


Figura 6.163 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 10.

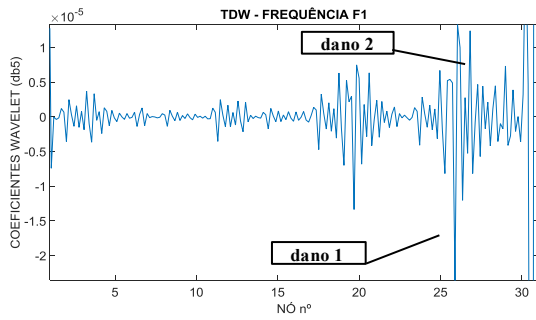
A Figura 6.164 e a Figura 6.165, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.



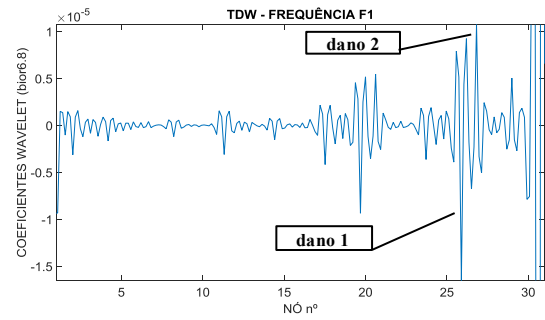
a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 6.164 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.165 - Caso 10 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.164 e Figura 6.165), observa-se uma perturbação maior entre os nós 25 e 28, devida a presença dos danos nos nós 26 e 28.

6.13.10.5 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) $M = 24,718 \text{ kg}$; ruído 1%

Na Figura 6.166 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

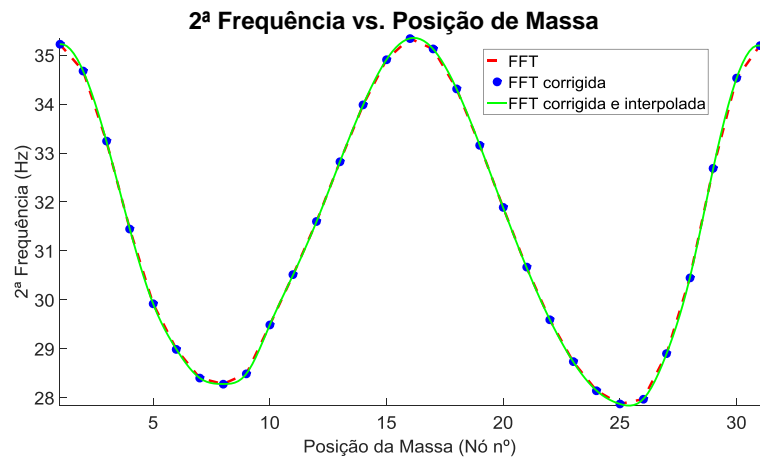
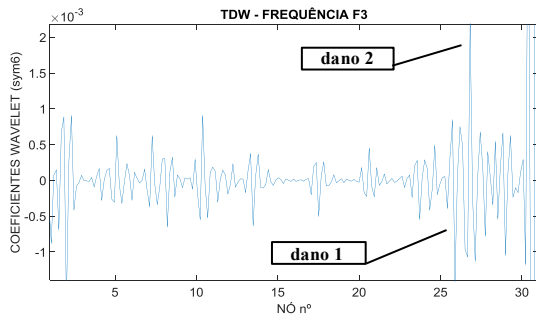
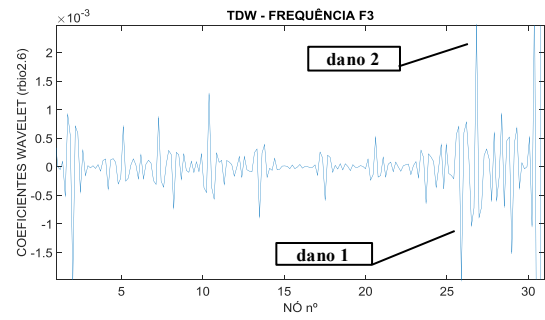


Figura 6.166 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 10.

A Figura 6.167 e a Figura 6.168, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

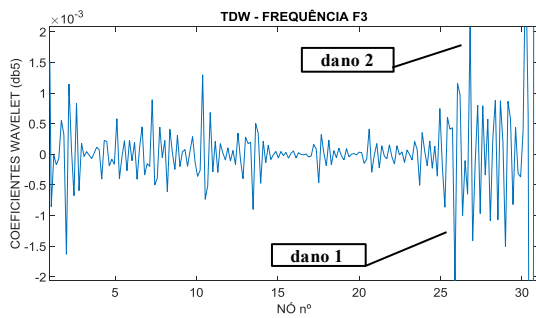


a) Symlet 6

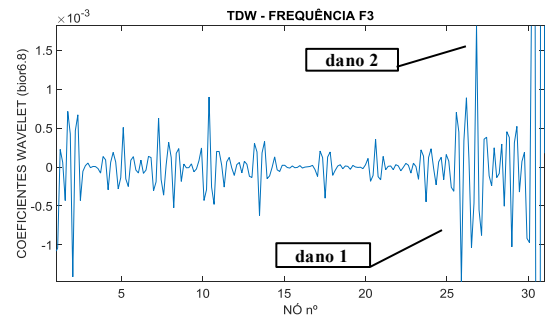


b) rbio2.6

Figura 6.167 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.168 - Caso 10 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.167 e Figura 6.168), observa-se uma perturbação maior entre os nós 25 e 28, devida a presença dos danos nos nós 26 e 28.

6.13.10.6 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) $M=24,718$ kg ; ruído 1%

Na Figura 6.169 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

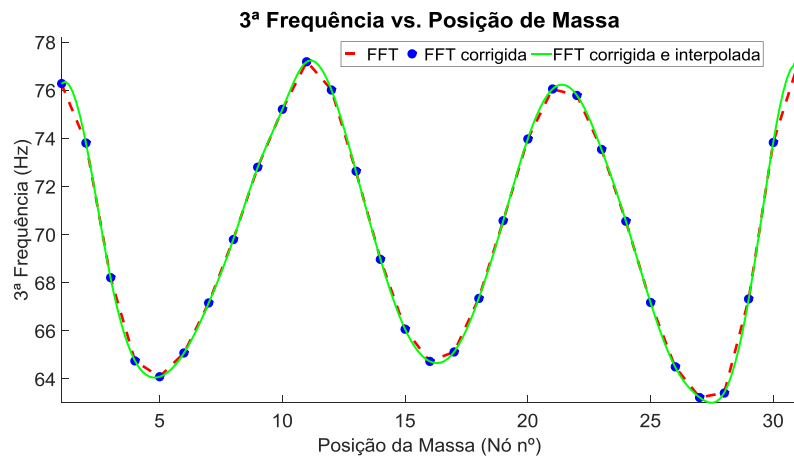
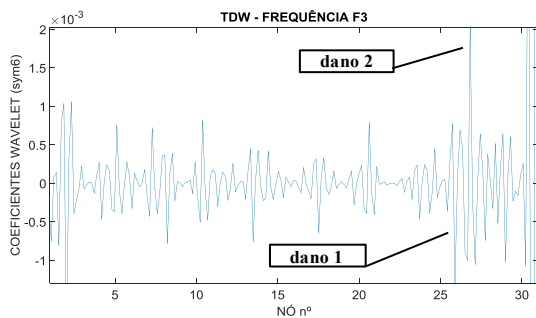
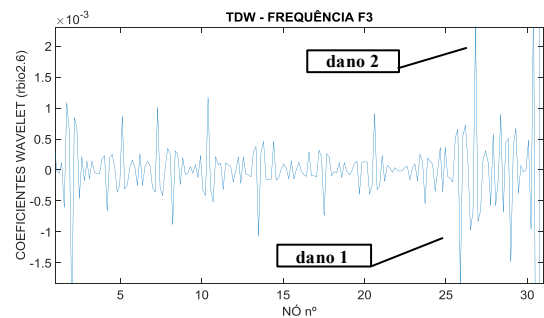


Figura 6.169 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 10 .

A Figura 6.170 e a Figura 6.171, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

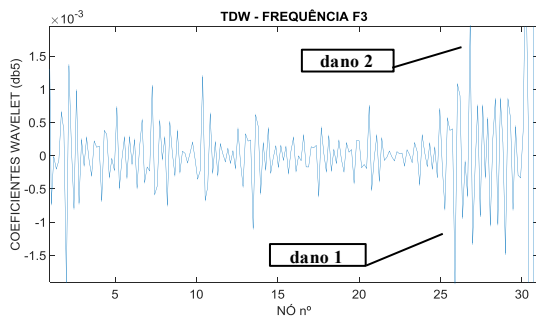


a) Symlet 6

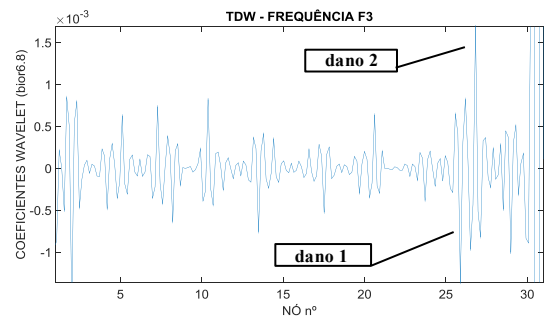


b) rbio2.6

Figura 6.170 - Caso 10 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.171 - Caso 10 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.170 e Figura 6.171), observa-se uma perturbação maior entre os nós 25 e 28, devida a presença do dano nos nós 26 e 28.

6.13.11 – Caso 11 (Viga intacta)

O caso 11 corresponde a viga intacta de 5 m de comprimento (Figura 6.172), discretizada em 30 elementos (31 nós) e submetida a uma massa de 3,266 kg.

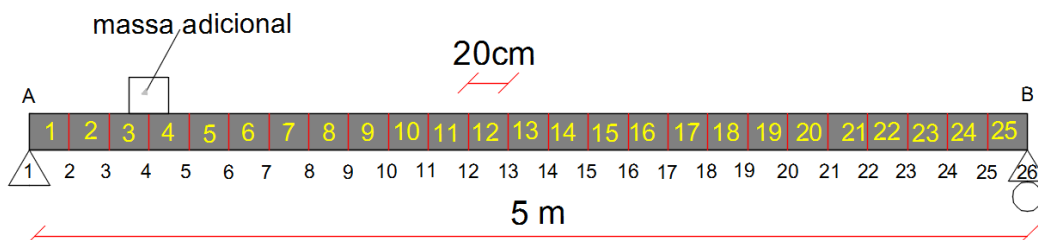


Figura 6.172 - Discretização da viga – Caso 11.

6.13.11.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1)

Na Figura 6.173 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

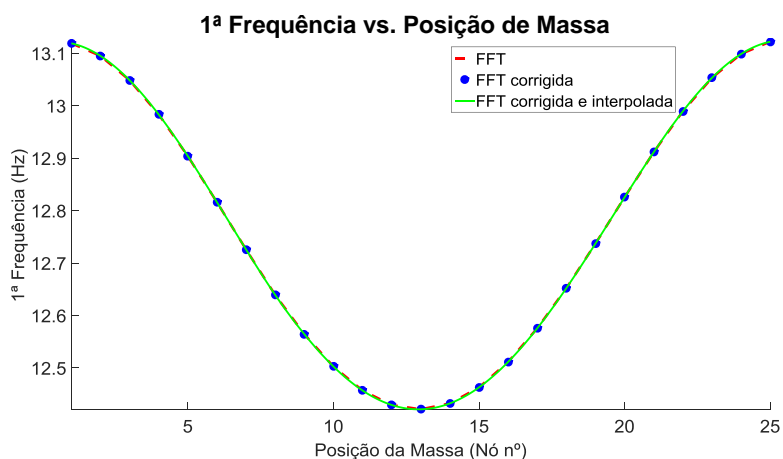


Figura 6.173 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1)-Caso 11.

6.13.11.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2)

Na Figura 6.174 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

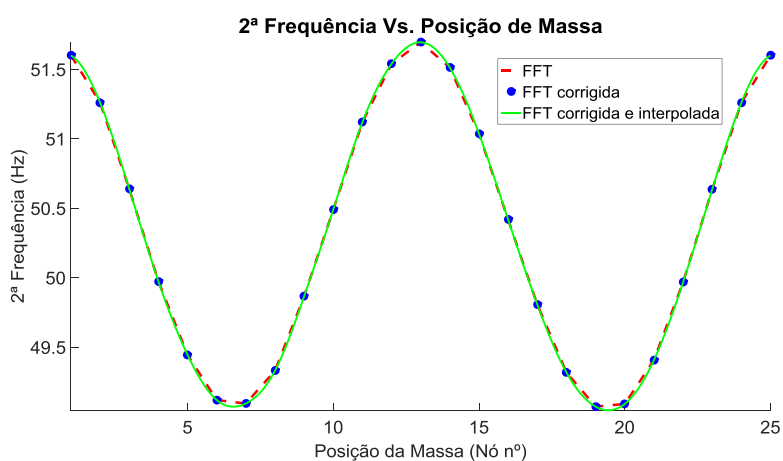


Figura 6.174 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 11.

6.13.11.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3)

Na Figura 6.175 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. Posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

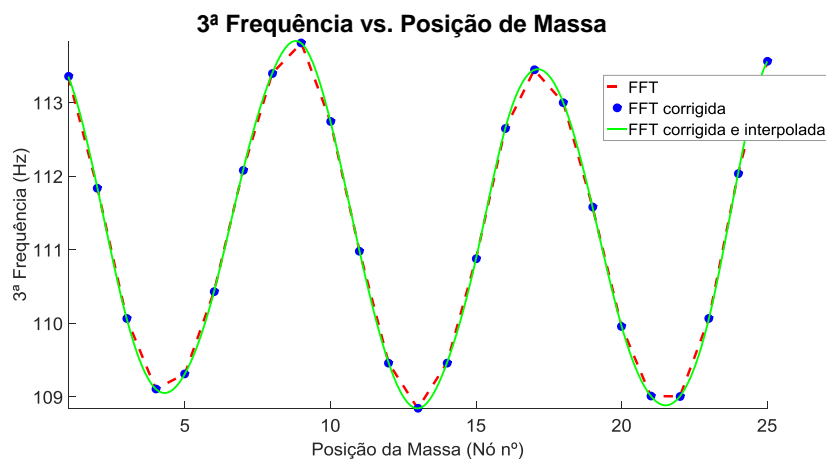


Figura 6.175 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 11.

6.13.12–Caso 12 (dano 1 a 1,5 m com 1 entalhe)

O caso 12 corresponde a uma posição de dano representado por um entalhe simétrico na mesa superior e inferior localizado a 1,5 m (nó 8) do apoio esquerdo. O dano gerou uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2%.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.12.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.176 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

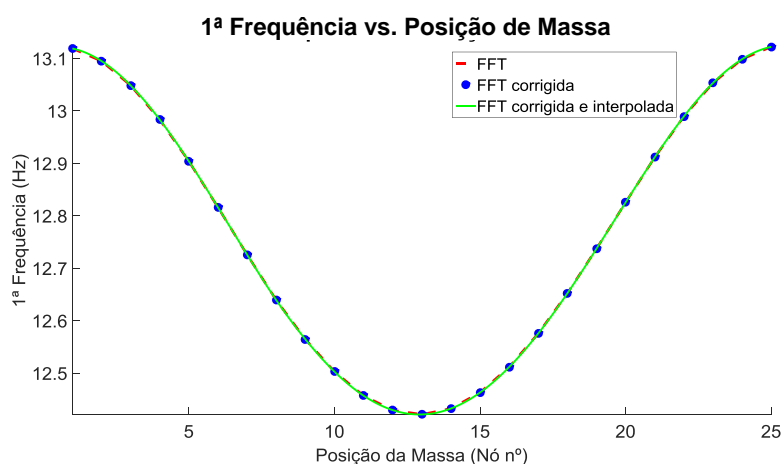
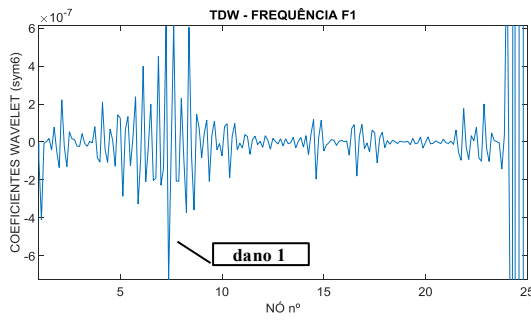
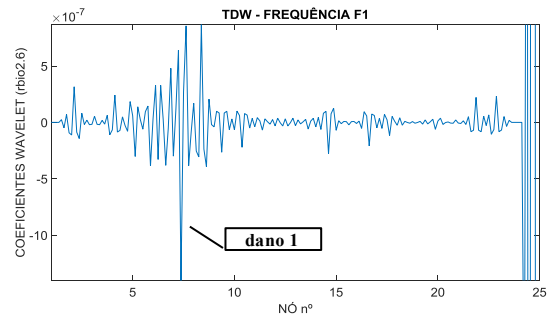


Figura 6.176 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 12.

A Figura 6.177 e a Figura 6.178, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

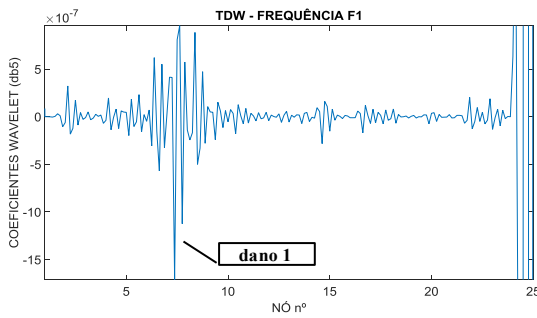


a) Symlet 6

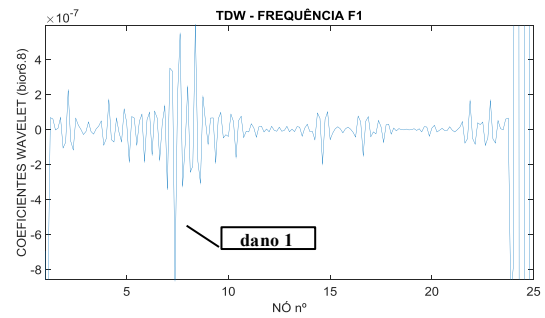


b) rbio2.6

Figura 6.177 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.178 - Caso 12 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.177 e Figura 6.178), pode-se observar a perturbação gerada em volta do nó 8 (dano 1) localizado a 1,5m do apoio esquerdo.

6.13.12.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.179 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

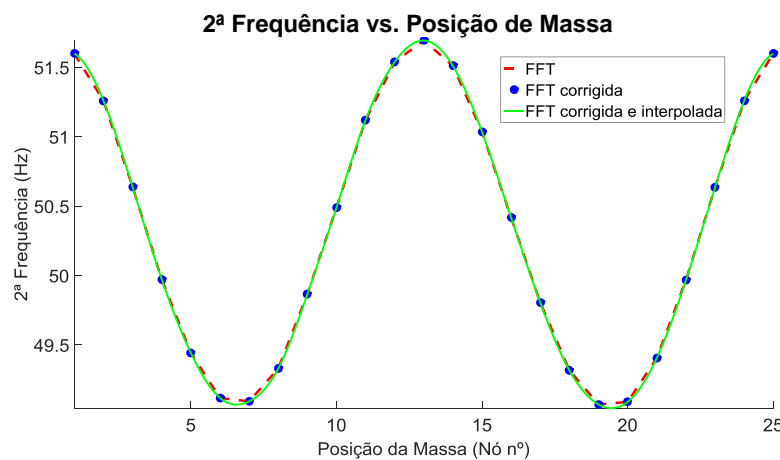


Figura 6.179 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 2.

A Figura 6.180 e a Figura 6.181, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

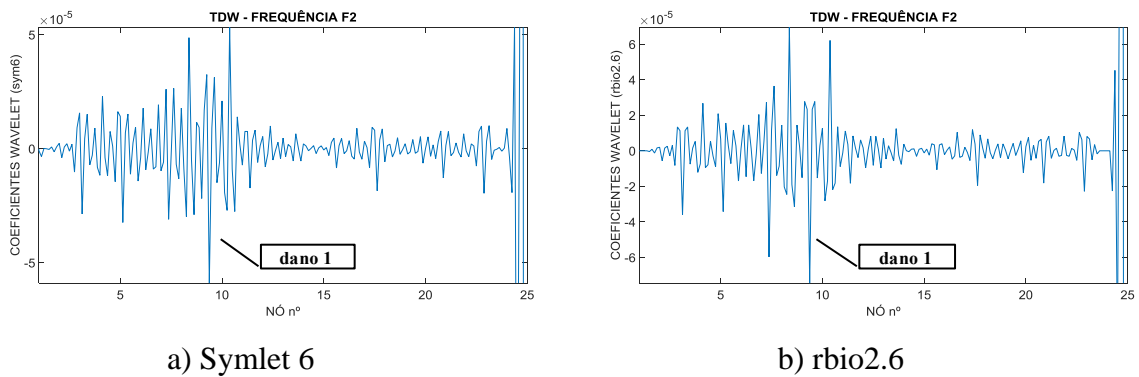


Figura 6.180 - Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2).

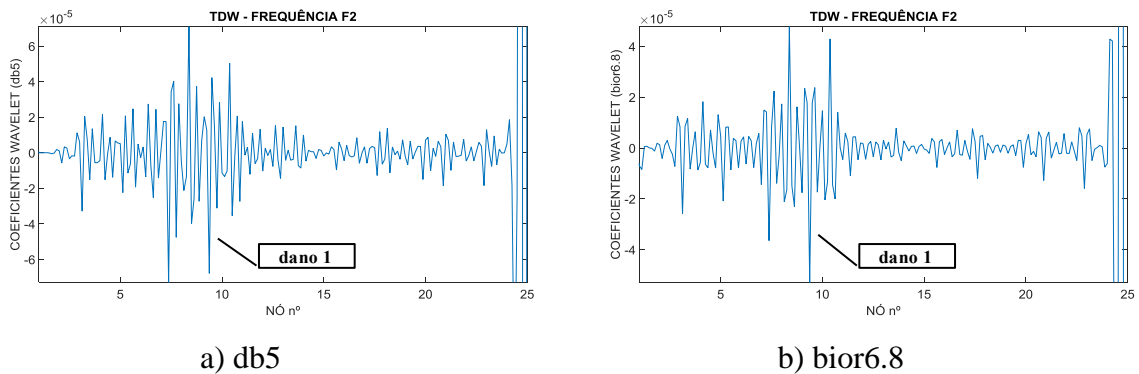


Figura 6.181- Caso 12 – TDW – Segunda Frequência (F2) .

Nas figuras anteriores (Figura 6.180 e Figura 6.181) foi possível identificar o dano com a perturbação gerada por volta do nó 8.

6.13.12.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.182 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

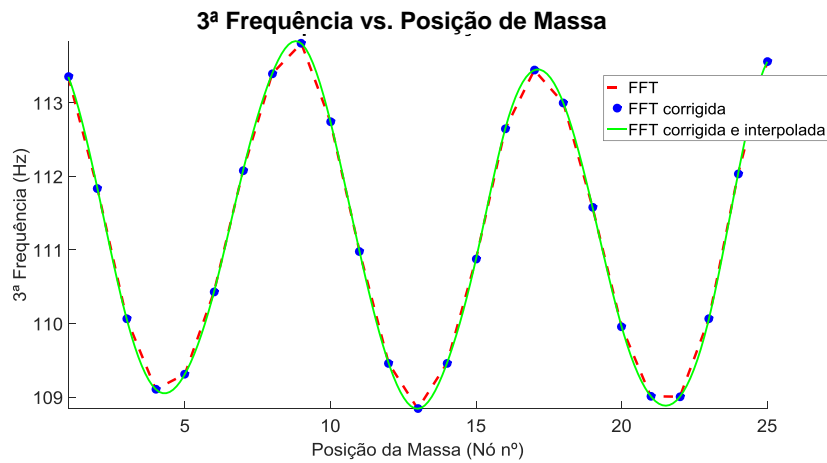
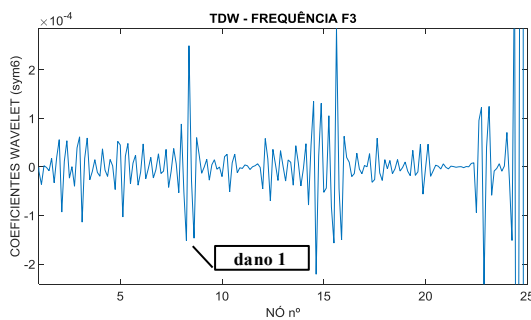
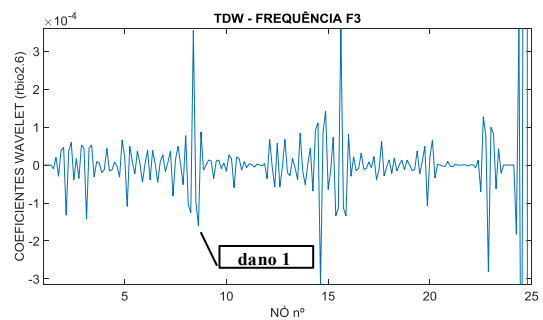


Figura 6.182 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 2.

A Figura 6.183 e a Figura 6.184, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

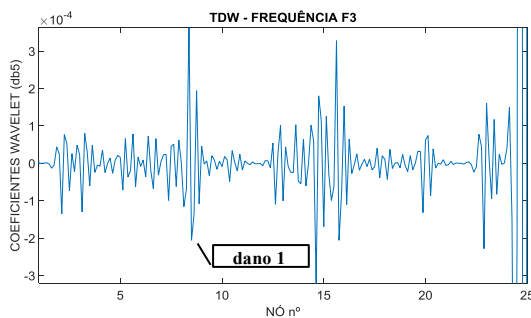


a) Symlet 6

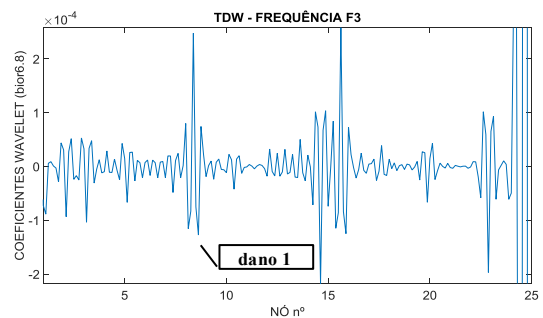


b) rbio2.6

Figura 6.183 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.184 - Caso 12 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.183 e Figura 6.184), não foi possível identificar a posição do dano.

6.13.13 – Caso 13 (dano 1 a 1,5 m com 2 entalhes)

O Caso 13 corresponde a uma posição de dano representada por dois entalhes simétricos na mesa superior e inferior localizados a 1,5 m (nó 8) do apoio esquerdo, espaçados a cada 2,5 cm. O dano gerou uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2% da seção transversal.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.13.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.185 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes a primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

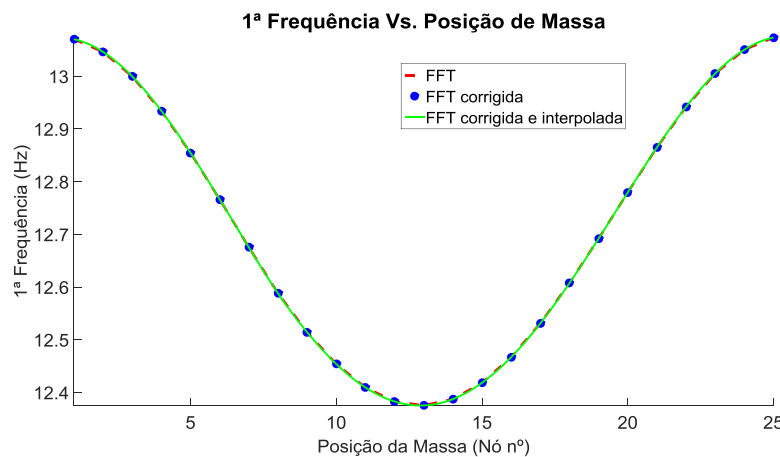


Figura 6.185 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 13.

A Figura 6.186 e a Figura 6.187, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

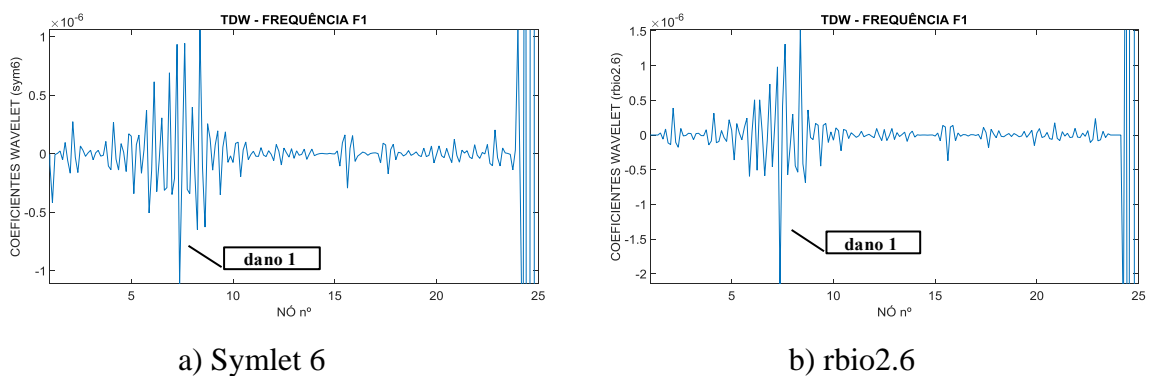
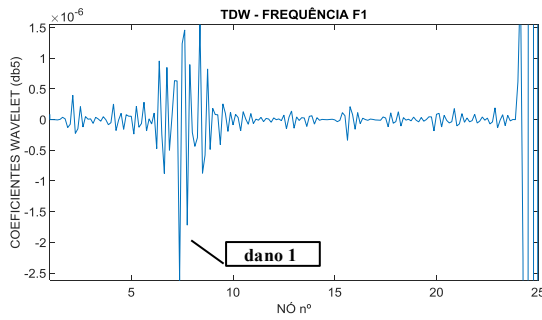
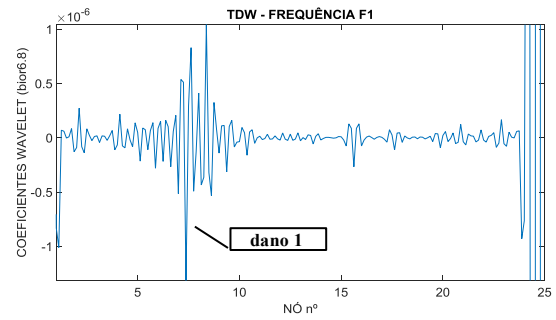


Figura 6.186 - Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.187- Caso 13 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.186 e Figura 6.187), pode-se observar a perturbação gerada por volta do nó 8 (dano 1) localizado a 1,5m do apoio esquerdo.

6.13.13.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.188 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

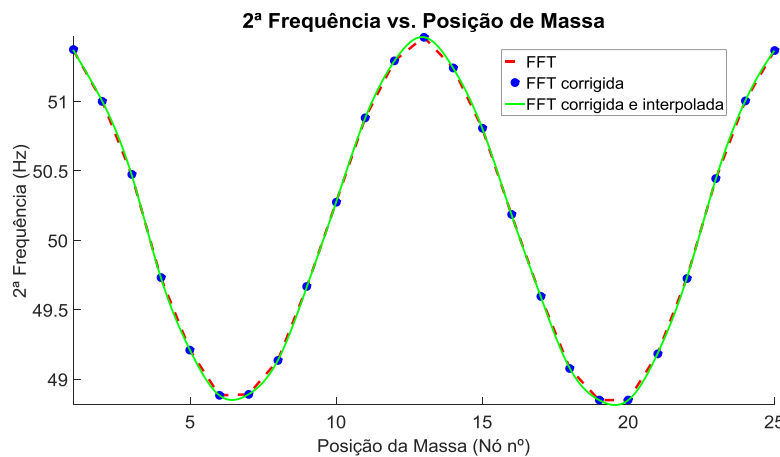
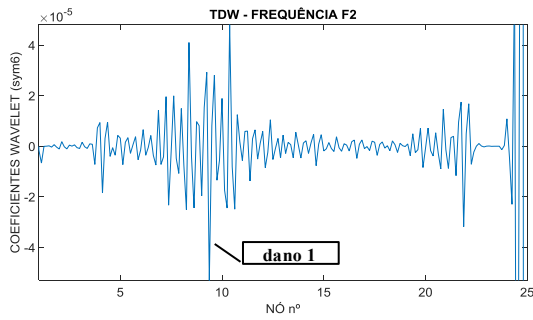
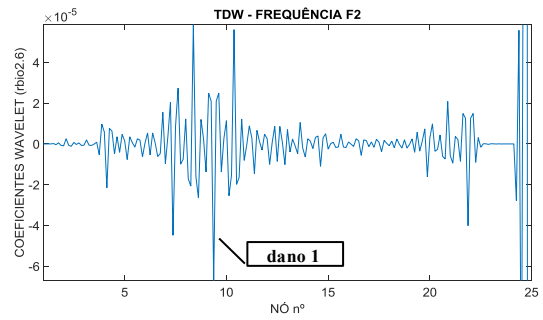


Figura 6.188 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 13.

A Figura 6.189 e a Figura 6.190, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

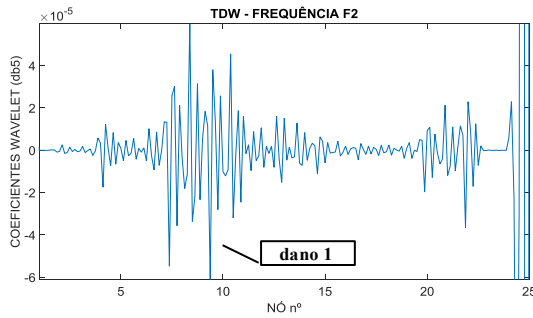


a) Symlet 6

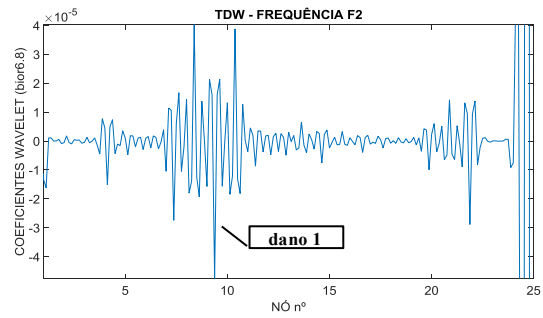


b) rbio2.6

Figura 6.189 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.190 - Caso 13 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.189 e Figura 6.190) foi possível identificar o dano, como o pico localizado por volta do nó 8.

6.13.13.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.191 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

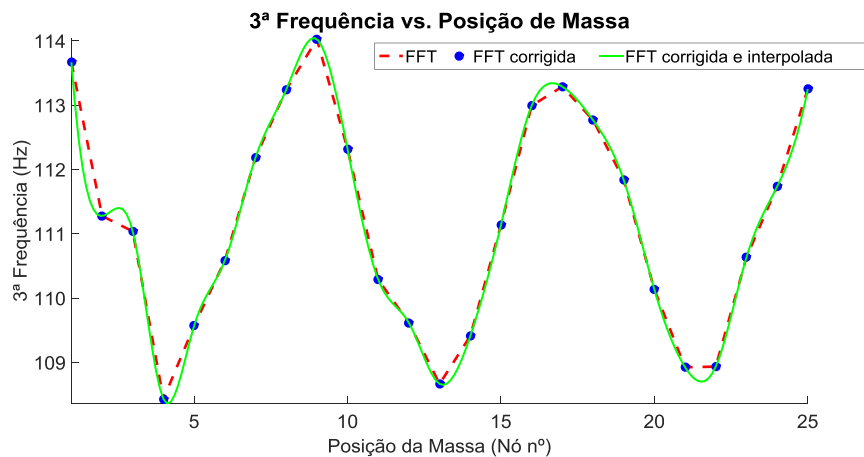
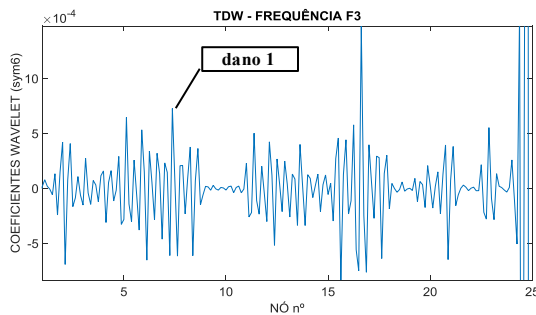
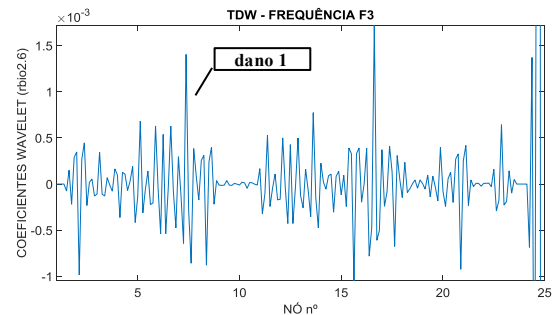


Figura 6.191 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 13.

A Figura 6.192 e a Figura 6.193, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

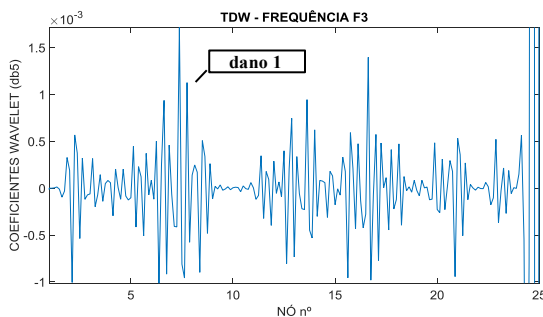


a) Symlet 6

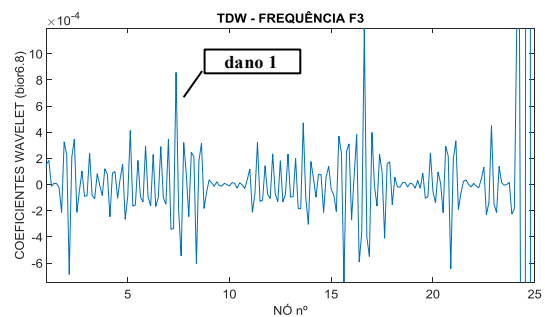


b) rbio2.6

Figura 6.192 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.193 - Caso 13 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.192 e Figura 6.193), não foi possível estabelecer a região danificada, devido a maioria dos picos apresentarem a mesma amplitude ao longo do comprimento total da viga.

6.13.14 – Caso 14 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes)

O caso 14 corresponde a uma posição de dano representada por três entalhes simétricos na mesa superior e inferior localizados a 1,5m (nó 8) do apoio esquerdo, espaçados a cada 2,5cm. O dano gerou uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 52,2% da seção transversal.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.14.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.194 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

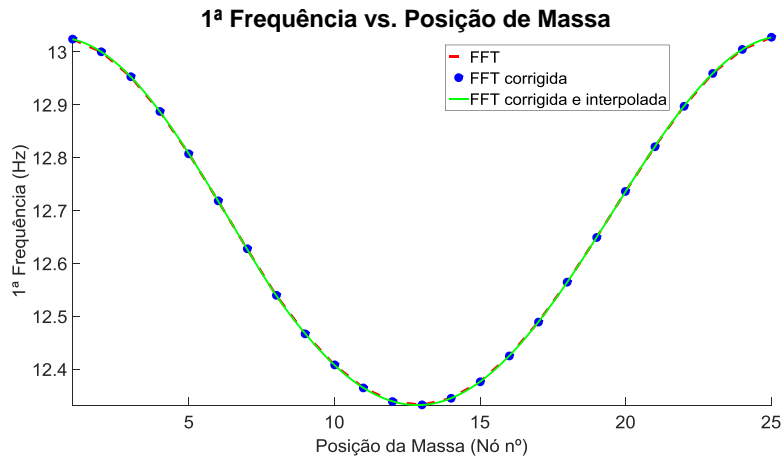
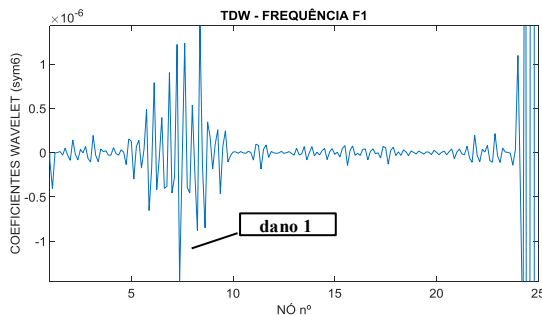
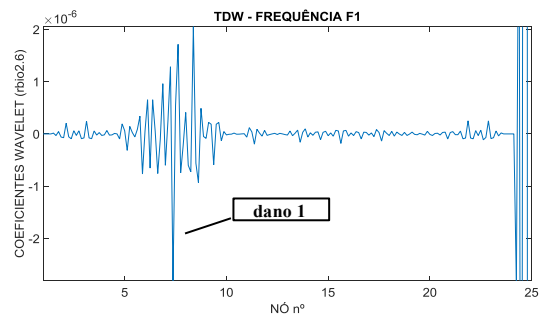


Figura 6.194 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 14.

A Figura 6.195 e a Figura 6.196, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

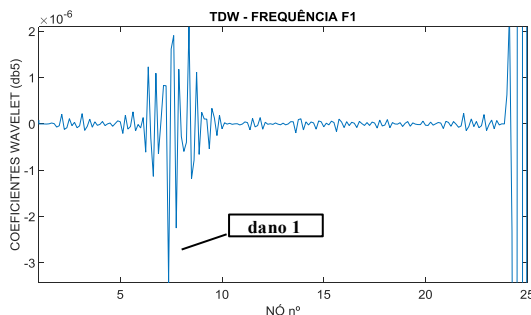


a) Symlet 6

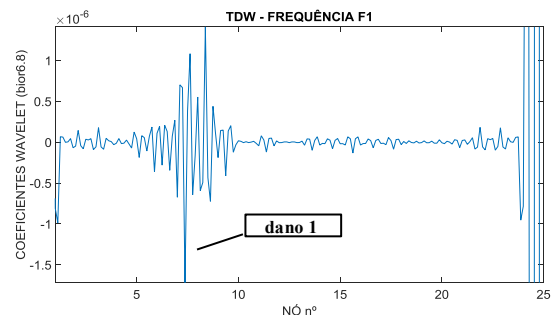


b) rbo2.6

Figura 6.195 - Caso 14 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.196 - Caso 14 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.195 e Figura 6.196), pode-se observar a perturbação gerada por volta do nó 8 (dano 1) localizado a 1,5m do apoio esquerdo.

6.13.14.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.197 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

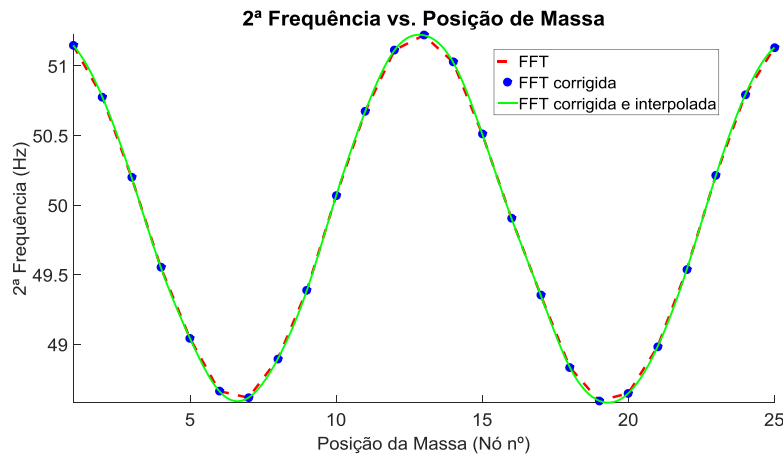
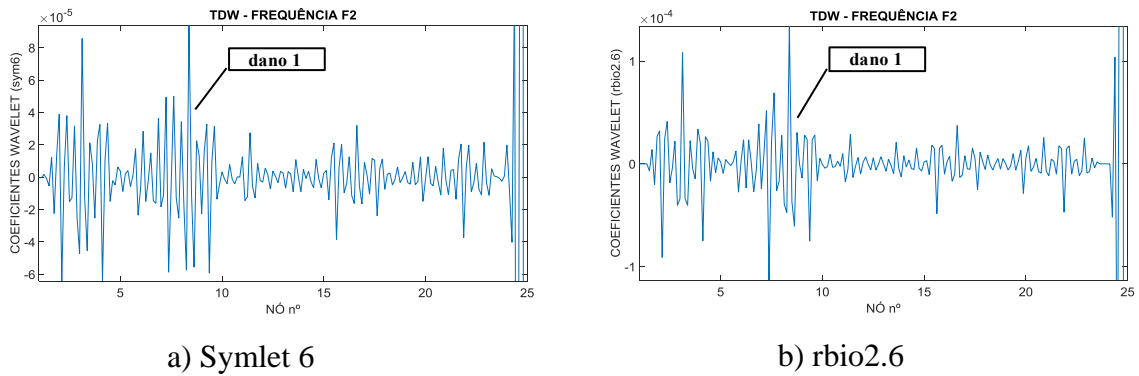


Figura 6.197 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 14.

A Figura 6.198 e a Figura 6.199, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.



a) Symlet 6

b) rbio2.6

Figura 6.198 - Caso 14 – TDW – Segunda Frequência (F2).

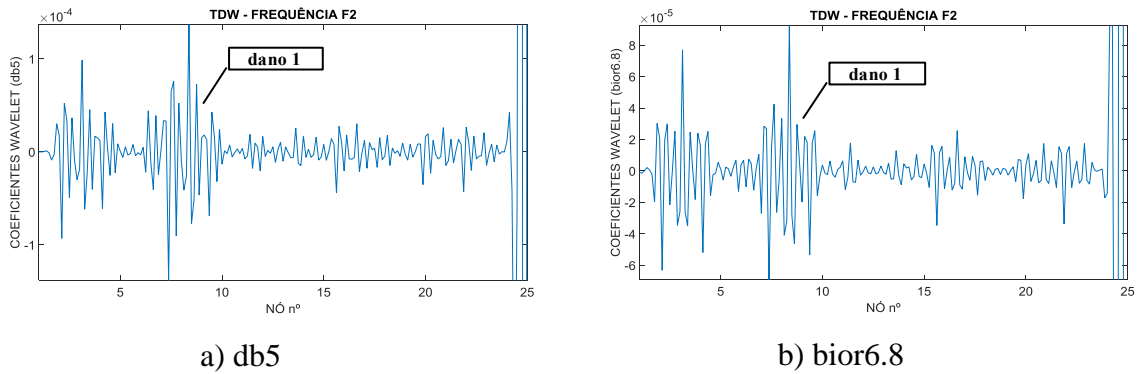


Figura 6.199 - Caso 14 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.198 e Figura 6.199) foi possível identificar o dano, com o pico localizado no nó 8.

6.13.14.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.200 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 25 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

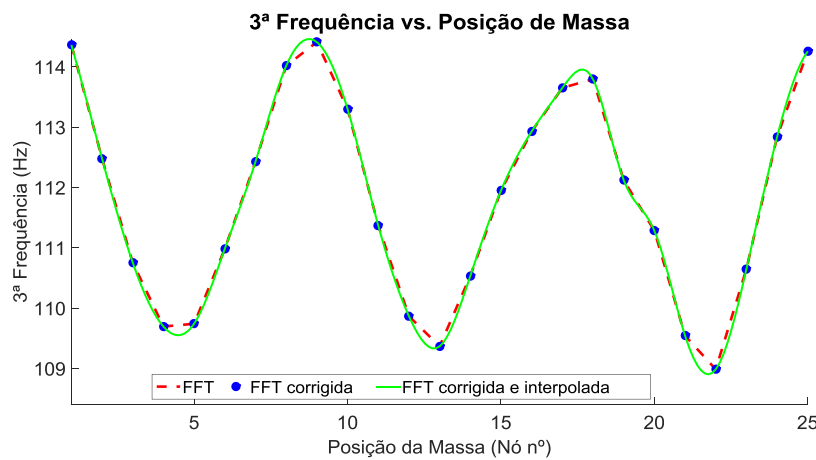
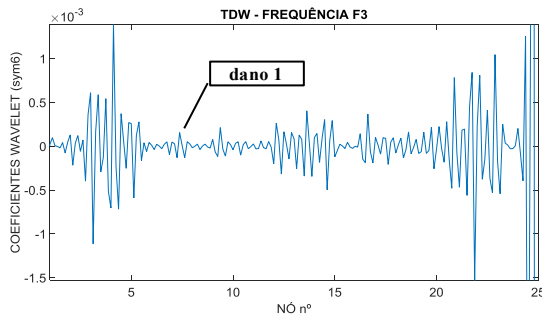
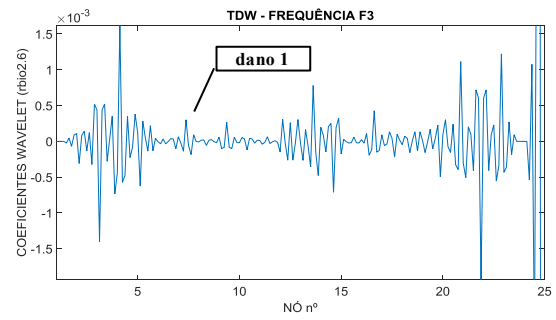


Figura 6.200 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 14.

A Figura 6.201 e a Figura 6.202, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

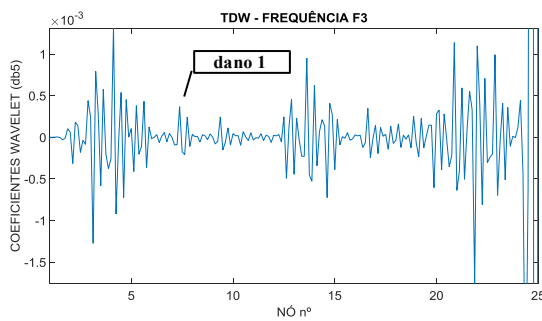


a) Symlet 6

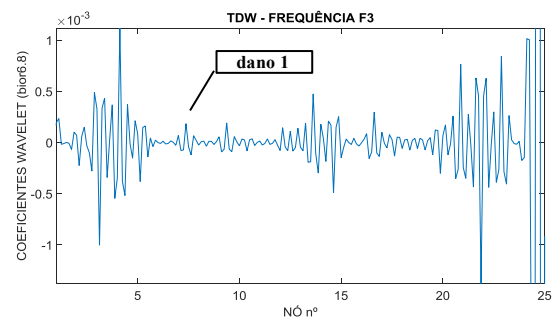


b) rbio2.6

Figura 6.201 - Caso 14 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.202 - Caso 14 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.201 e Figura 6.202), não foi possível estabelecer a região danificada.

6.13.15–Caso 15 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 2 entalhes)

O caso 15 é igual ao caso 2 apresentado anteriormente.

6.13.16–Caso 16 (dano 1 a 1,5 m com 3 entalhes e dano 2 a 4,5 m com 3 entalhes)

O caso 16 é igual ao caso 3 apresentado anteriormente.

6.13.17–Caso 17 (dano a 3,0 m com 1 entalhe)

No caso 17 foi considerada uma posição de dano ($L/2$) na viga de 6 m de comprimento (Figura 6.203), compostos por 1 entalhe no nó 16. O dano gerou uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 65,6%.

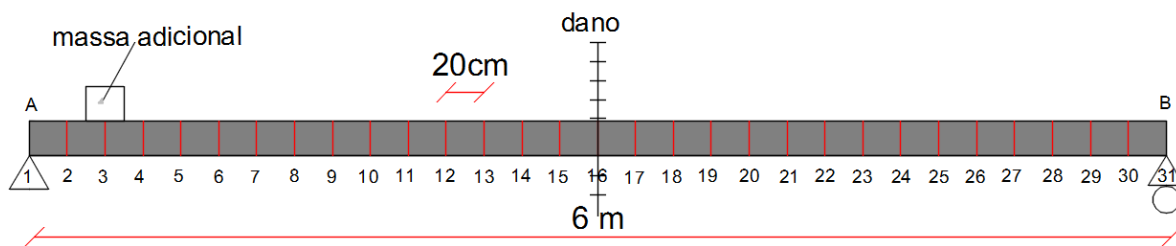


Figura 6.203 - Discretização da viga - Caso 17.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.17.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.204 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

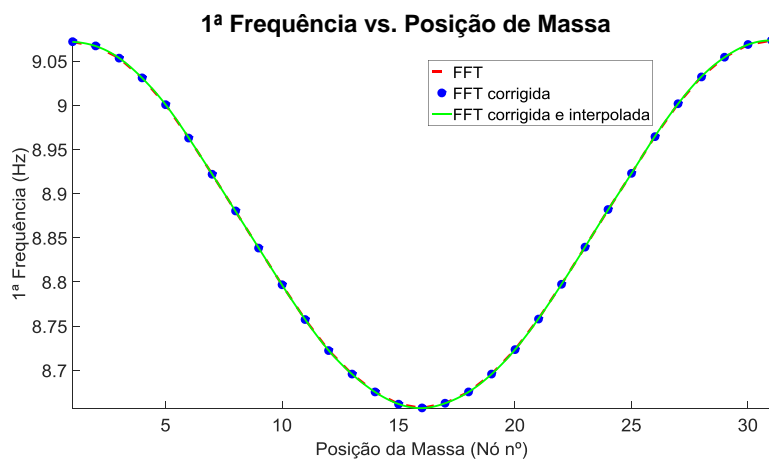
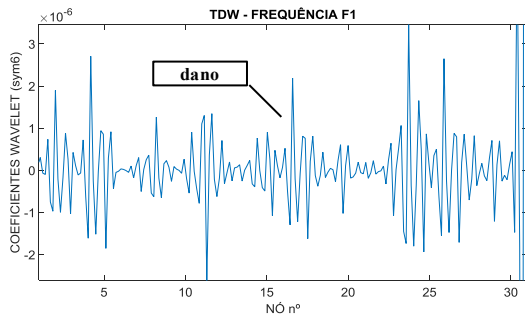
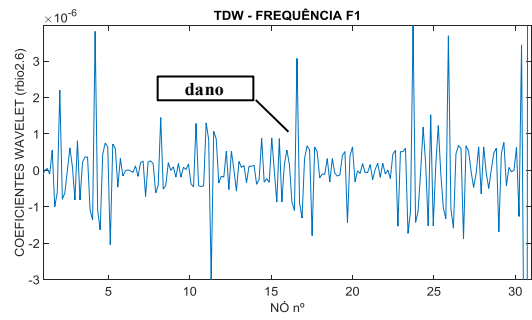


Figura 6.204 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso 17.

A Figura 6.205 e a Figura 6.206, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

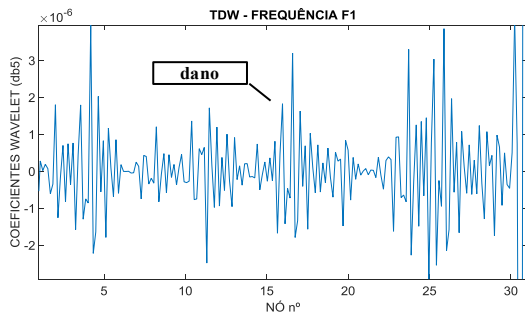


a) Symlet 6

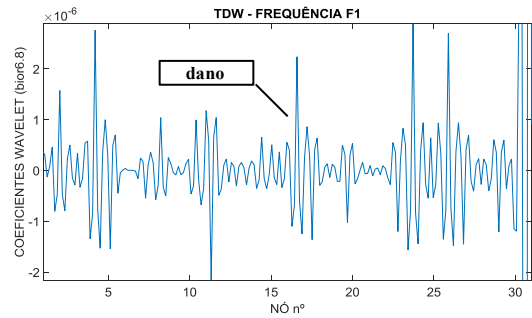


b) rbio2.6

Figura 6.205 - Caso 17 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.206 - Caso 17 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.205 e Figura 6.206), não foi possível a identificação do dano.

6.13.17.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.207 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

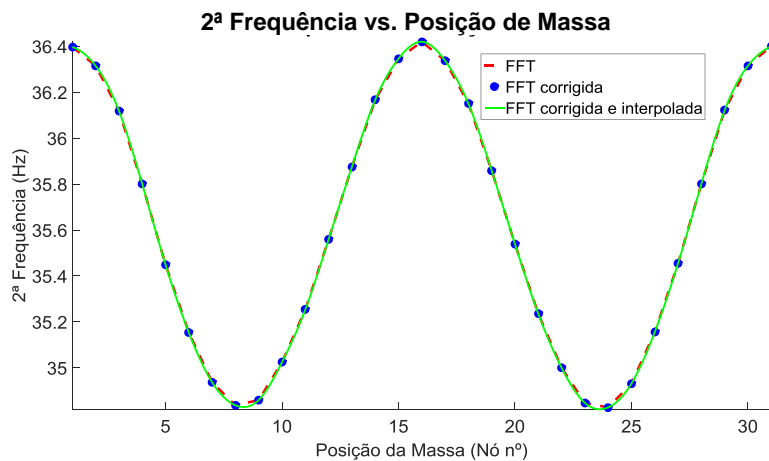
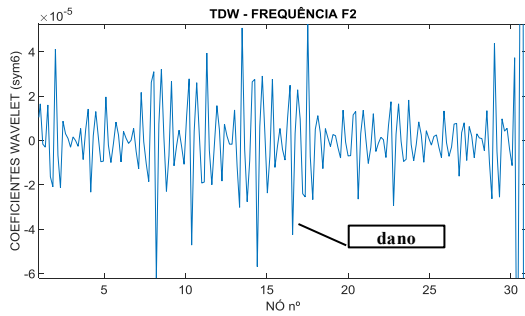
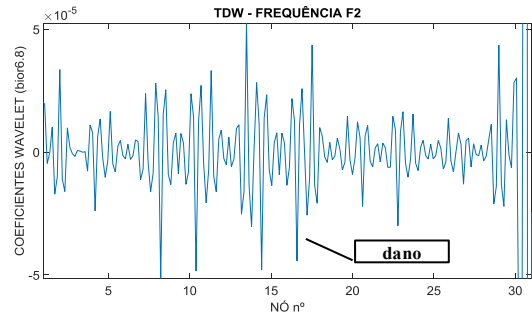


Figura 6.207 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 18.

A Figura 6.208 e a Figura 6.209, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

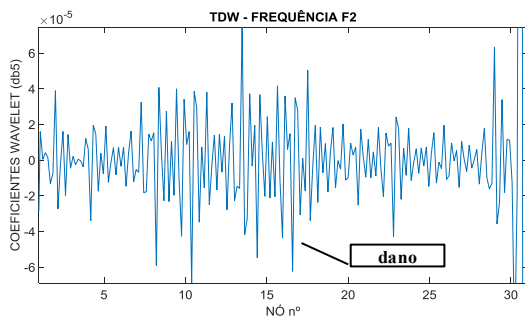


a) Symlet 6

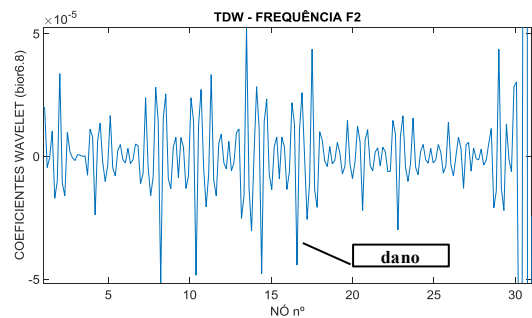


b) rbio2.6

Figura 6.208 - Caso 17 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.209 - Caso 17 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.208 e Figura 6.209) não foi possível identificar os dois danos (nó 16).

6.13.17.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.210 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

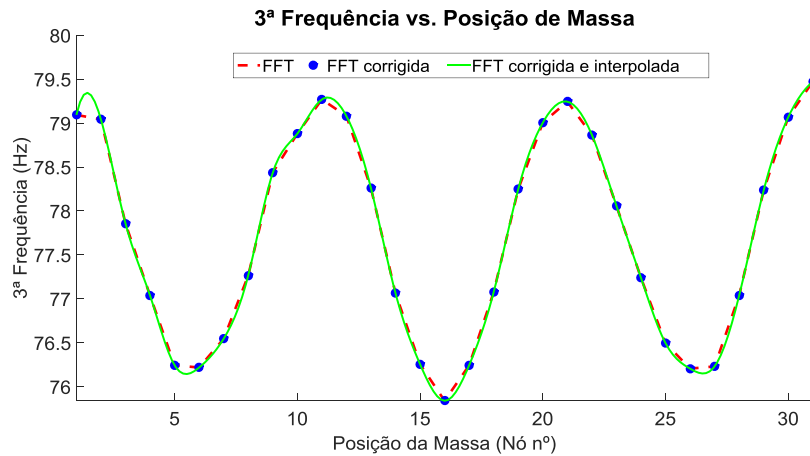
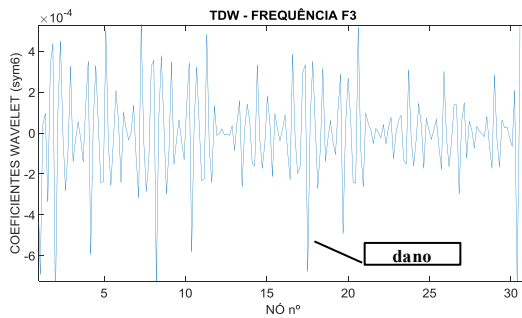
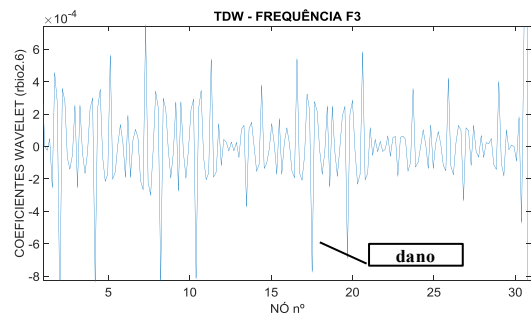


Figura 6.210 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 17.

A Figura 6.211 e a Figura 6.212, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

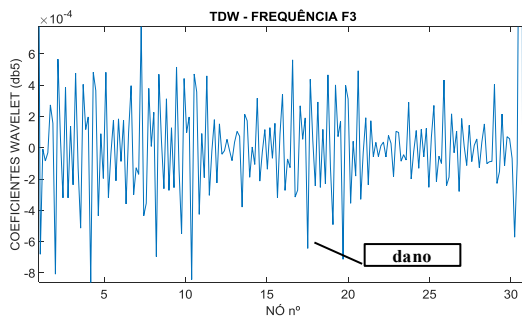


a) Symlet 6

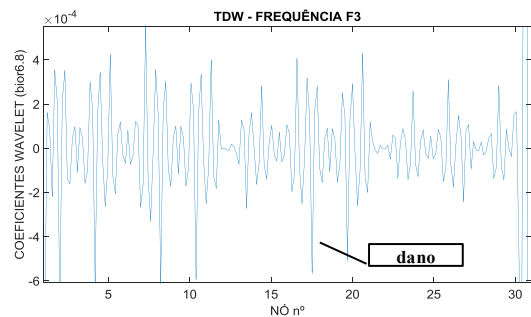


b) rbio2.6

Figura 6.211 - Caso 17 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.212 - Caso 17 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.211 e Figura 6.212), não foi possível identificar o dano.

6.13.18–Caso 18 (dano a 3,0 m com 3 entalhes)

No caso 18 foi considerada uma posição de dano ($L/2$) na viga de 6 m de comprimento (Figura 6.213), composto por 3 entalhes no nó 16. O dano gerou uma diminuição do momento de inércia (I_x) de 65,6%.

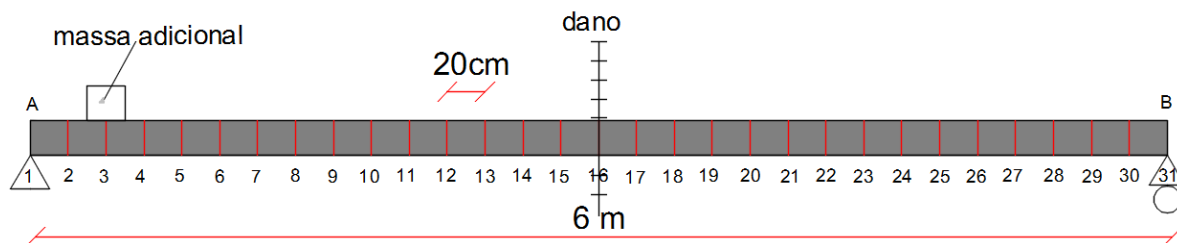


Figura 6.213 - Discretização da viga - Caso 18.

A seguir são apresentados os resultados para o primeiro caso considerando um nível de ruído de 1%.

6.13.18.1 Posição de massa vs. Primeira Frequência (F1) – ruído 1%

Na Figura 6.214 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à primeira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm). A massa utilizada foi de 3,266 kg.

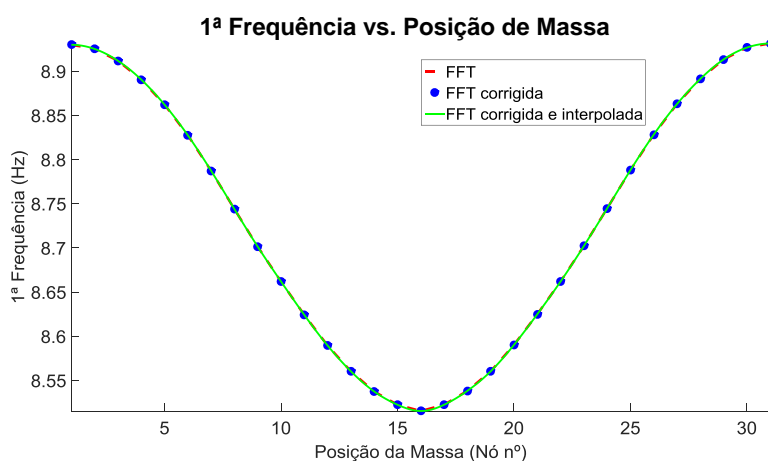
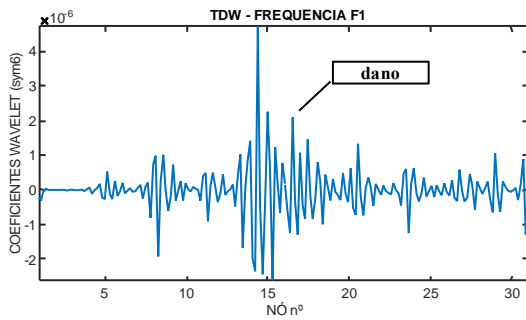
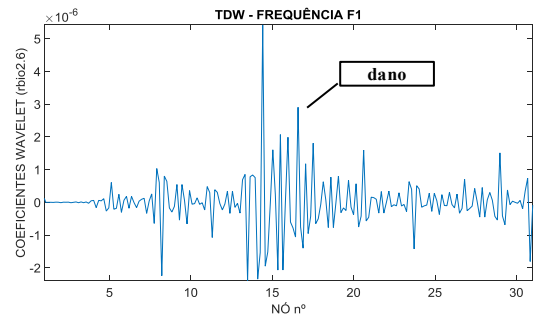


Figura 6.214- Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1)-Caso 18 .

A Figura 6.215 e a Figura 6.216 apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

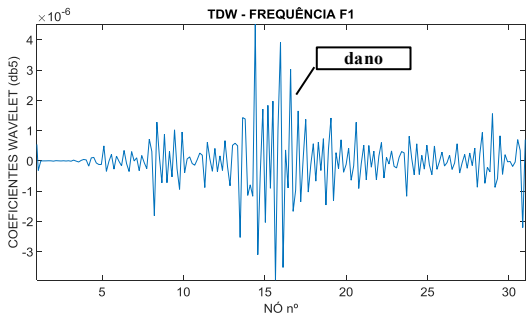


a) Symlet 6

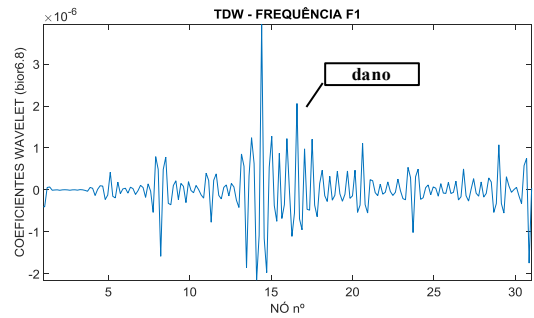


b) rbio2.6

Figura 6.215 - Caso 18 – TDW – Primeira Frequência (F1).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.216 - Caso 18 – TDW – Primeira Frequência (F1).

Nas figuras anteriores (Figura 6.215 e Figura 6.216), observa-se a perturbação maior por volta do nó 16, correspondente a posição do dano.

6.13.18.2 Posição de massa vs. Segunda Frequência (F2) – ruído 1%

Na Figura 6.217 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à segunda frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

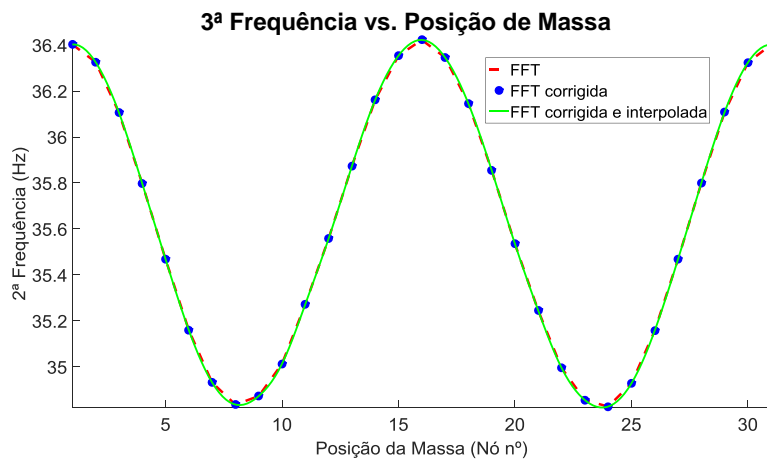
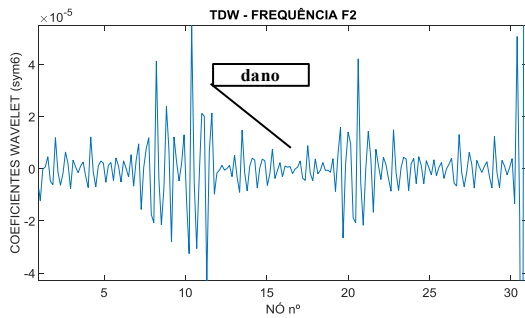
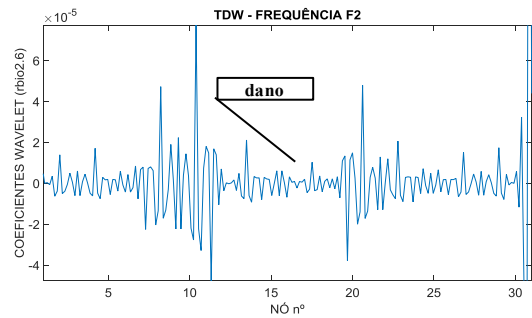


Figura 6.217 - Posição de Massa (M) vs. Segunda Frequência (F2) - Caso 18.

A Figura 6.218 e a Figura 6.219, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

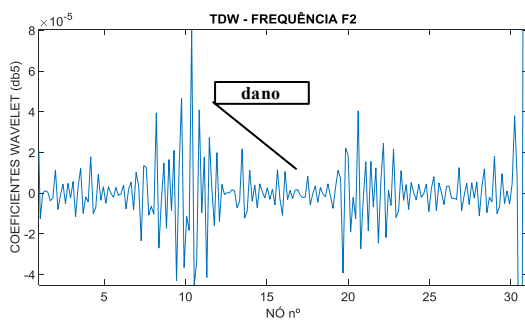


a) Symlet 6

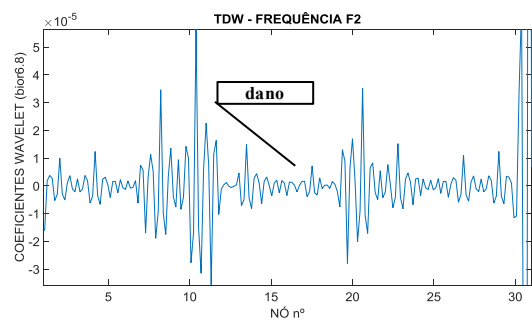


b) rbio2.6

Figura 6.218 - Caso 18 – TDW – Segunda Frequência (F2).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.219 - Caso 18 – TDW – Segunda Frequência (F2).

Nas figuras anteriores (Figura 6.218 e Figura 6.219) não foi possível identificar os danos localizados no nó 16.

6.13.18.3 Posição de massa vs. Terceira Frequência (F3) – ruído 1%

Na Figura 6.220 é apresentado o gráfico dos dados correspondentes à terceira frequência da viga vs. posição da massa, ao longo dos 31 nós da viga (discretização feita a cada 20 cm).

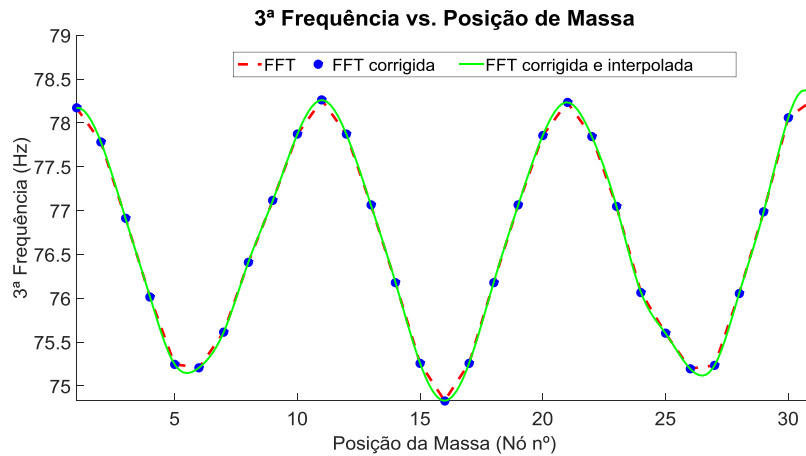
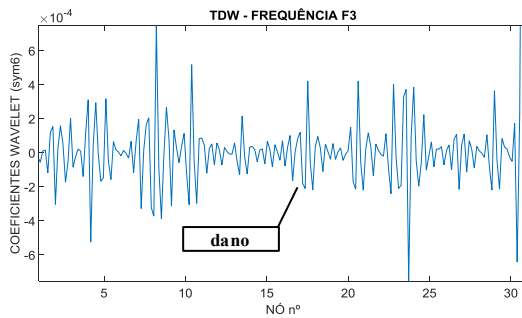
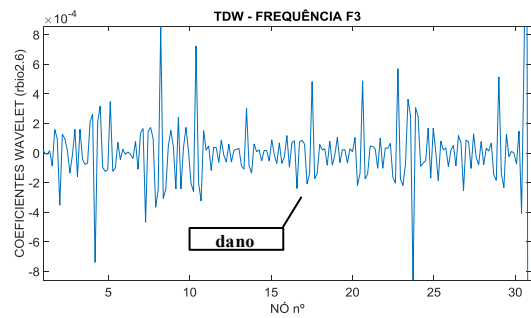


Figura 6.220 - Posição de Massa (M) vs. Terceira Frequência (F3) - Caso 18.

A Figura 6.221 e a Figura 6.222, apresentam os gráficos correspondentes à TDW aplicada ao sinal anterior.

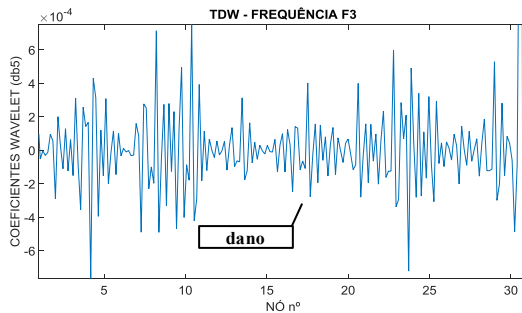


a) Symlet 6

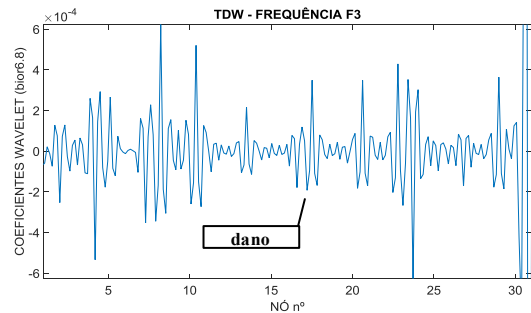


b) rbio2.6

Figura 6.221 - Caso 18 – TDW – Terceira Frequência (F3).



a) db5



b) bior6.8

Figura 6.222 - Caso 18 – TDW – Terceira Frequência (F3).

Nas figuras anteriores (Figura 6.221 e Figura 6.222), não foi possível identificar o dano.

6.13.19 –Resumo e observações análise numérica.

Da mesma forma como foram classificados os resultados na análise experimental, na seguinte tabela são apresentados e classificados os resultados obtidos na modelagem numérica.

Os três níveis de identificação são :

- Excelente (**E**): a identificação do dano é claramente visível com a localização do maior pico e com pouca interferência das demais perturbações.
- Regular (**R**): é possível a localização do dano, mas as demais perturbações presentes ao longo do sinal apresentam amplitudes consideráveis, indicando falsos danos.
- Deficiente (**D**): não é possível a identificação do dano devido as perturbações presentes no sinal.
- Viga Intacta (**VI**)

Tabela 6.11 - Avaliação resultados análise numérica.

Identificação do dano (E: Excelente; R: Regular; D: Deficiente; VI: Viga Intacta) - Análise Numérica																	
Caso	Massa adicional (Kg)	Viga L=5m						Viga L=6m									
		Dano 1 (1,5m)			Dano 2 (4,5m)			Dano 1 (3m)			Dano 2 (5m)			Dano 3 (5,4m)			
		F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	
1	3,266	E	E	R	R	D	E										
2	3,266	E	E	E	R	E	E										
3	3,266	E	E	E	E	R	D										
4	3,266	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	
5	3,266													R	D	R	
6	3,266													R	D	D	
7	3,266													D	D	D	
8	3,266											R	D	E	R	D	E
9	3,266											E	D	E	D	D	E
10	3,266											E	E	E	E	E	E
10	24,718											E	E	R	E	E	R
11	3,266	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI
12	3,266	E	E	D													
13	3,266	E	E	D													
14	3,266	E	E	D													
15=2	3,266	E	E	E	R	E	E										
16=3	3,266	E	E	E	E	R	D										
17	3,266							D	D	D							
18	3,266							E	D	D							

Nas Figura 6.223 a Figura 6.225, são apresentadas as curvas da primeira, segunda e terceira frequência para os casos de dano: 1, 2, 3, 13, 14 e da viga intacta de 5 m de comprimento.

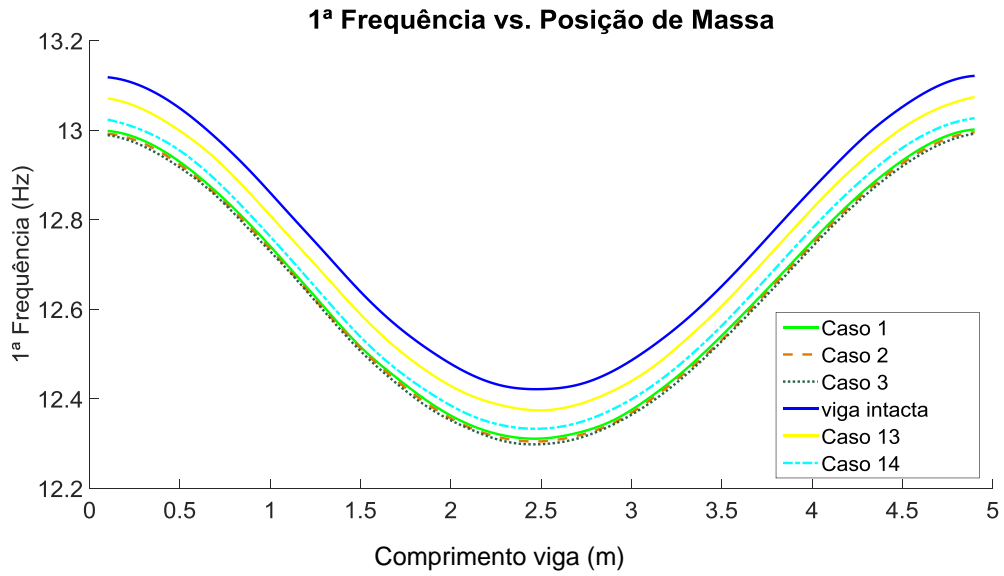


Figura 6.223 – Resumo Primeira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 5 m).

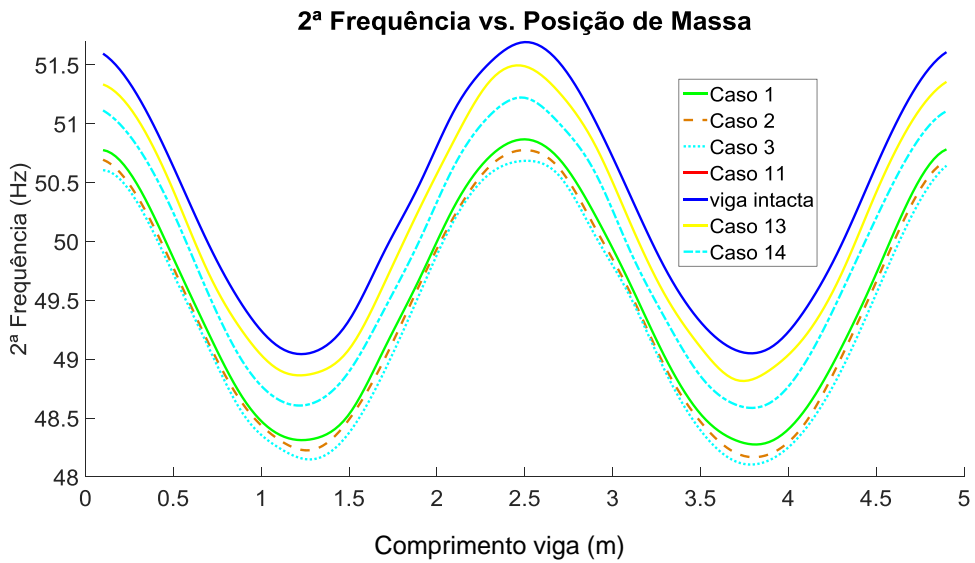


Figura 6.224 – Resumo Segunda Frequência vs. Posição da Massa (viga de 5 m).

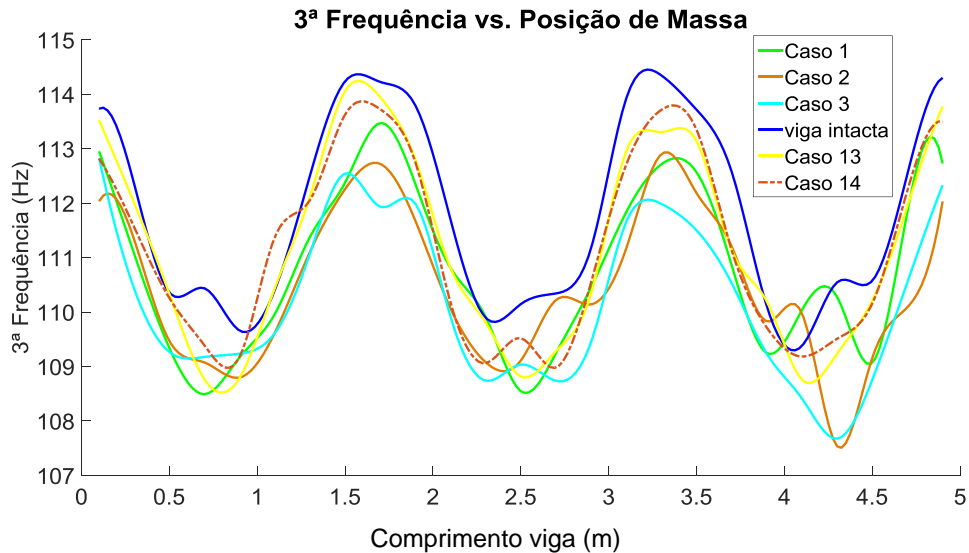


Figura 6.225 – Resumo terceira Frequência vs. Posição da Massa (viga de 5 m).

Na Figura 6.223 e a Figura 6.224, observa-se uma clara diminuição das frequências devido ao incremento do dano em relação a viga intacta. A terceira frequência apresentou o mesmo comportamento dos ensaios experimentais com perturbações que inviabiliza a utilização desta como parâmetro de identificação de dano (Figura 6.225).

Em todos os casos de dano propostos nas duas análises (numérica e experimental) as curvas de Frequência vs. Posição da massa (Figura 6.226) apresentaram diferenças. Sendo assim, os resultados experimentais ficaram sempre com valores maiores do que os numéricos.

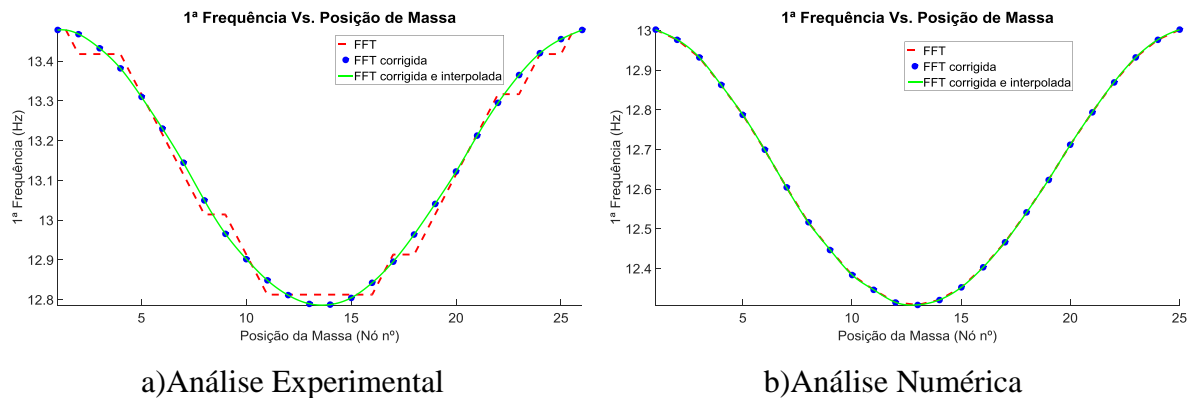


Figura 6.226 - Posição de Massa (M) vs. Primeira Frequência (F1) - Caso1.

Na Figura 6.227 são apresentados os resultados da análise experimental e numérica para os casos de dano 12, 13 e 14 na viga de 5 m de comprimento. Observa-se que, a diferença entre os dois resultados foi em torno de 4% a menos em relação à análise numérica.

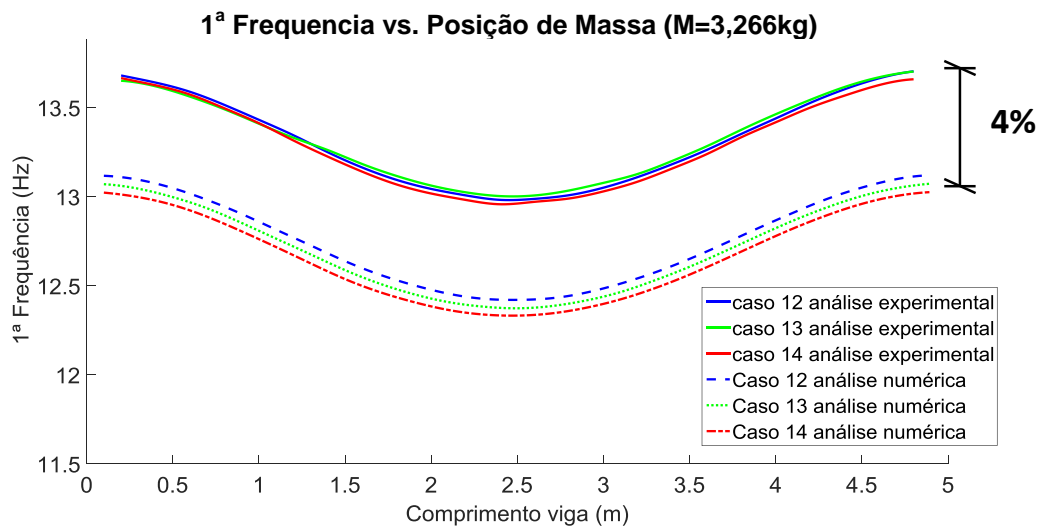


Figura 6.227 - Comparação análise numérica vs. análise experimental

Esta diferença é devido ao fato de ser considerada na análise numérica uma seção transversal aproximada da real como mostrado na Figura 6.228. Gerando uma área e momentos de inércia com valores um pouco diferentes.

Neste trabalho não foi considerada a geometria real da viga (Figura 6.228) devido ao aumento excessivo no gasto computacional e a dificuldade na simulação do dano.

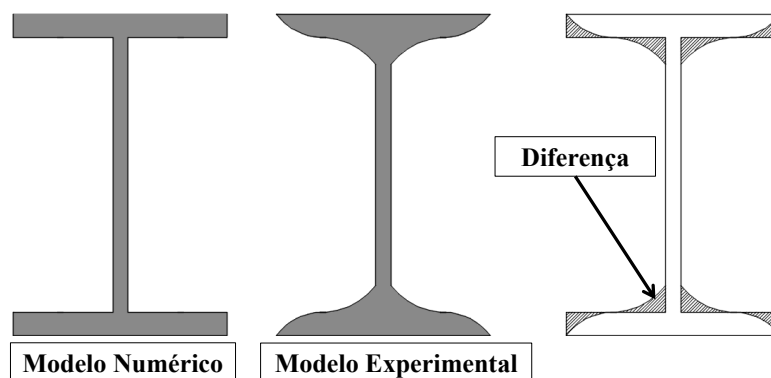


Figura 6.228 – Seção transversal aproximada.

A diferença de área da seção transversal (A) foi de 0.827% e do momento de inércia (I_x) de 1.467 % em relação aos dados obtidos experimentalmente da seção transversal da viga (Tabela 6.12).

Tabela 6.12 – Diferença seção transversal.

	Análise Numérica	Análise Experimental	Diferença %
Área (cm ²)	14.20	14.32	0.827
Inércia Ix (cm ⁴)	248.73	245.13	1.467

Outro aspecto que deve ser considerado na avaliação dos resultados numéricos é que, os modelos numéricos foram desenvolvidos com coeficientes de amortecimento ξ obtidos experimentalmente. Estes coeficientes foram calculados através de uma análise modal utilizando o software ARTeMIS para o processamento dos ensaios de uma viga intacta e sem massa adicional (Figura 6.229), sendo que, na realidade o amortecimento da estrutura muda de acordo com a posição do dano e da massa adicional.

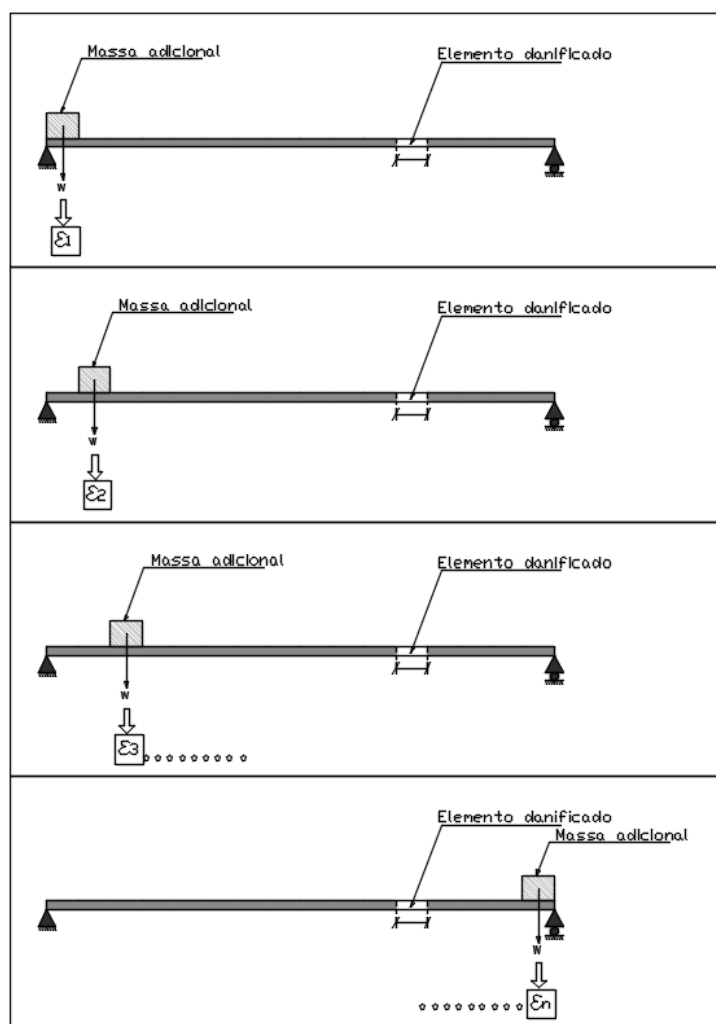


Figura 6.229 – Variação do amortecimento com a posição de massa.

Nos modelos numéricos foi adotado um coeficiente de amortecimento ξ para cada frequência natural como uma aproximação ao amortecimento real em cada posição de massa e de dano em todos os casos de danos propostos.

De acordo com os resultados apresentados anteriormente, algumas observações da metodologia para identificação de danos proposta serão citadas a seguir:

1. Danos localizados a 1,5 m nas vigas de 5 m de comprimento, e os danos localizados a 3m nas vigas de 6 m de comprimento, apresentara os melhores resultados utilizando apenas primeira frequência.
2. Danos localizados próximos aos apoios são difíceis de identificar devido as perturbações geradas nos suportes o que confunde e indica aparecimento de falsos danos.
3. A localização dos danos próximos aos apoios nas vigas de 5 m (10% de L) não ficou claramente visível. As perturbações geradas se confundem com as perturbações geradas nos outros pontos de medição. Para o caso 10 (3 entalhes a 5 m e 3 entalhes a 5,6 m) a localização do dano ficou mais clara, apresentando picos na posição do dano com o aumento significativo da massa adicional.
4. Um dos principais objetivos da análise numérica é reproduzir o comportamento do objeto em estudo. Assim, para esta pesquisa optou-se pela utilização do elemento SOLID45 (3-D) ao invés do elemento BEAM3 (2D), devido a facilidade de simulação do dano, aplicação das cargas, aplicação da força de excitação.

Com o elemento SOLID45 o gasto computacional aumenta, mas em compensação o modelo desenvolvido consegue capturar todas as características e parâmetros utilizados nos ensaios experimentais.

5. No Caso 1 foi feita uma análise do nível de ruído para fazer a escolha do valor que seria utilizado nas demais modelagens. Nos gráficos é possível identificar que a primeira frequência apresenta bons resultados em todos os níveis de ruído, já a segunda e terceira frequências são perturbadas a partir da adição de mais de 1% de ruído no sinal.

7 -DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO VIGA INTACTA SOB AÇÃO DE UMA MASSA CONCENTRADA.

Para ter um parâmetro de referência nos ensaios experimentais e nos modelos numéricos, foi desenvolvida uma equação que representa o comportamento da viga intacta sob a adição de uma massa móvel, baseada na equação do movimento da viga de Euler Bernoulli. Para isto, foi utilizado o método dos resíduos ponderados de Galerkin na obtenção de uma solução aproximada.

Na equação de Euler Bernoulli (Equação (7.1)) foi considerada a parcela correspondente a rigidez e massa, o amortecimento e a força externa foram desconsideradas, já que o objetivo deste trabalho é o estudo da variação das frequências naturais da estrutura (análise vibração livre sem amortecimento).

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (7.1)$$

Onde:

EI : rigidez à flexão.

\bar{m} : massa por unidade de comprimento.

A solução da Equação (7.1) é o produto de $\varphi(x)$ em função da posição x e de $q(t)$ em função da variável tempo t .

$$y(x, t) = \varphi(x)q(t) \quad (7.2)$$

Dentro da fórmula anteriormente apresentada foi considerada uma massa adicional M , utilizando a função Delta de Dirac ($\delta(x)$), para expressar a posição da massa x_0 ao longo de todo o comprimento da viga L , da seguinte forma:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + (\bar{m} + M\delta(x - x_0)) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (7.3)$$

Onde:

M : massa concentrada adicional.

x_0 : posição da massa, dentro do domínio da solução $[0, L]$.

7.1 Método de Galerkin

O método de Galerkin classificado como um método de resíduos ponderados, é uma poderosa ferramenta matemática capaz de formular uma solução aproximada, pelo método dos elementos finitos em equações diferenciais ordinárias, equações diferenciais parciais e condições de contorno para os casos mais gerais (Zienkiewicz et al. (2013)).

A ideia básica do resíduo ponderado é construir uma função de peso $\varphi(x)$ adequada, onde, a integração em todo o domínio da solução entre a função de peso e o erro residual seja igual a zero. O erro residual é obtido substituindo a função $\varphi(x)$ na Equação (7.4).

$$\int_{\Omega} W_i R d\Omega = 0 \quad (7.4)$$

Onde:

$\varphi(x)$: solução adotada.

Ω : é o domínio de um elemento finito.

R : resíduo gerado pela substituição da solução aproximada $\varphi(x)$ equação diferencial.

W_i : função de peso.

No método de Galerkin é considerada a função $\varphi(x)$ igual a W_i .

Aplicando este método na Equação (7.3), e adotando a solução numérica da equação diferencial como o primeiro modo de vibração de uma viga biapoada, tem-se:

$$\varphi(x) = \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (7.5)$$

Substituindo a função $\varphi(x)$ na equação (7.4) e aplicando o método de Galerkin:

$$\int_0^L \varphi(x) \left[EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + (\bar{m} + M\delta(x - x_0)) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right] dx = 0 \quad (7.6)$$

Derivando a solução da Equação (7.5), temos:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \varphi(x)^{IV} q(t) = \left(\frac{\pi x}{L}\right)^4 \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right) q(t) \quad (7.7)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \varphi(x) \ddot{q}(t) = \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right) \ddot{q}(t) \quad (7.8)$$

Substituindo as Equações (7.7) e (7.8) na Equação (7.6):

$$\int_0^L \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right) \left\{ EI \left[\left(\frac{\pi x}{L}\right)^4 \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right) q(t) \right] + (\bar{m} + M\delta(x - x_0)) \left[\text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right) q''(t) \right] \right\} dx = 0 \quad (7.9)$$

$$\int_0^L \left\{ EI \left[\left(\frac{\pi x}{L}\right)^4 \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right)^2 q(t) \right] + \bar{m} \left[\text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right)^2 q''(t) \right] + M\delta(x - x_0) \left[\text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right)^2 q''(t) \right] \right\} dx = 0 \quad (7.10)$$

Considerando que a massa adicional M , aparece quando $x = x_0$, valor para o qual a função Delta de Dirac é igual a 1, para valores diferentes a função é zero.

$$\int_a^b \delta(x_0 - x_0) dx = \begin{cases} 1 & \text{se } a < x_0 < b \\ 0 & \text{se } x_0 < a \text{ ou } x_0 > b \end{cases} \quad (a < b) \quad (7.11)$$

A parcela correspondente à massa M da Equação (7.6) resulta:

$$\int_0^L \left\{ M\delta(x_0 - x_0) \text{sen}\left(\frac{\pi x_0}{L}\right)^2 q''(t) \right\} dx = M \text{sen}^2\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) q''(t) \quad (7.12)$$

A Equação (7.6) se apresenta da seguinte forma:

$$EI \left(\frac{\pi x}{L}\right)^4 \int_0^L \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right)^2 q(t) dx + \bar{m} \int_0^L \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right)^2 q''(t) dx + M \text{sen}^2\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) q''(t) = 0 \quad (7.13)$$

$$EI \left(\frac{\pi^4}{2L^3}\right) q(t) + \left(M \text{sen}^2\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) + \frac{1}{2} L \bar{m} \right) q''(t) = 0 \quad (7.14)$$

O sistema contínuo pode ser reduzido para um sistema discreto sem amortecimento e em vibração livre da seguinte forma:

$$[K]q(t) + [M]q''(t) = 0 \quad (7.15)$$

Onde:

K : é a parcela correspondente a rigidez a flexão da viga.

M : é a parcela correspondente a massa do sistema.

Calculando os autovalores (w) da Equação (7.15):

$$|K - w^2 M| = 0 \quad (7.16)$$

$$\left| \left[EI \left(\frac{\pi^4}{2L^3} \right) \right] - w^2 \left[M \operatorname{sen} \left(\frac{\pi x_0}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} L \bar{m} \right] \right| = 0 \quad (7.17)$$

$$w_1 = \frac{\pi \sqrt{EI \left(2M - 2M \cos \left(\frac{\pi x_0}{L} \right)^2 + L \bar{m} \right)}}{L^2 \left(2M - 2M \cos \left(\frac{\pi x_0}{L} \right)^2 + L \bar{m} \right)} \quad (7.18)$$

$$w_1 = \frac{2\pi \sqrt{EI \left(2M - 2M \cos \left(\frac{2\pi x_0}{L} \right)^2 + L \bar{m} \right)}}{L^2 \left(2M - 2M \cos \left(\frac{2\pi x_0}{L} \right)^2 + L \bar{m} \right)} \quad (7.19)$$

$$w_1 = \frac{9\pi \sqrt{EI \left(2M - 2M \cos \left(\frac{3\pi x_0}{L} \right)^2 + L \bar{m} \right)}}{L^2 \left(2M - 2M \cos \left(\frac{3\pi x_0}{L} \right)^2 + L \bar{m} \right)} \quad (7.20)$$

Onde, w_1 , w_2 e w_3 representam as primeiras três frequências naturais da estrutura sob a ação de uma massa concentrada, localizada na posição x_0 de comprimento L , massa por unidade de comprimento \bar{m} , rigidez a flexão EI e uma massa adicional M posicionada em x_0 , obtidas pelo método de Galerkin.

Na Figura 7.1 a Figura 7.3, são apresentadas as curvas de frequência, obtidas analiticamente com as Equações (7.18) a (7.20), isto, para a viga de 5 m de comprimento com as mesmas características da viga utilizada nas análises experimentais e numéricas.

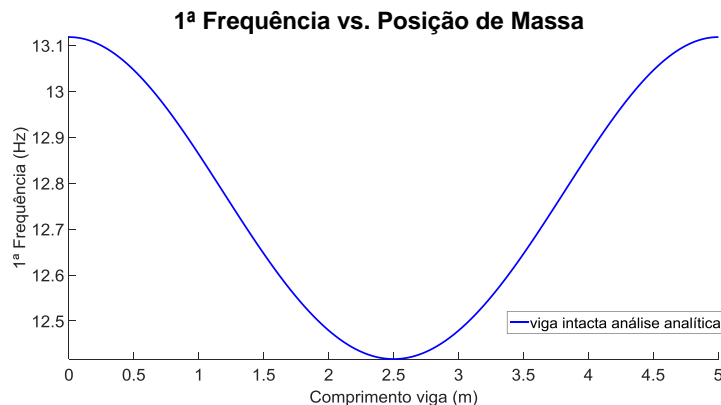


Figura 7.1 – 1ª frequência vs. posição de massa análise analítica ($M = 3,266$ kg).

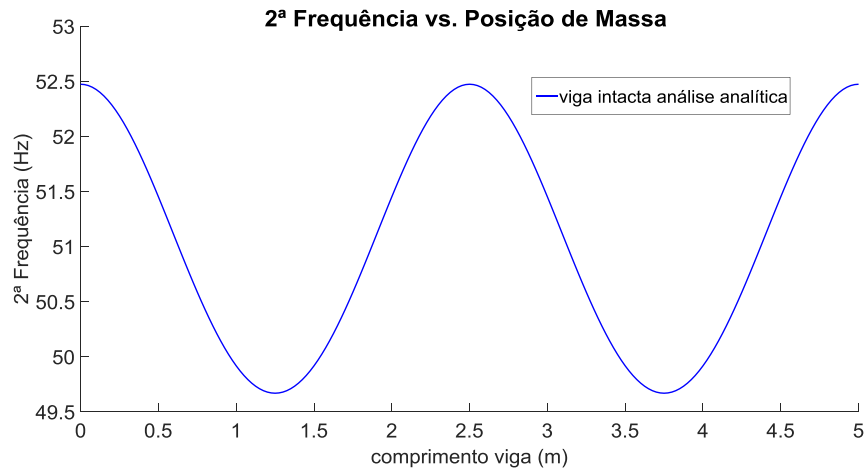


Figura 7.2 – 2ª frequência vs. posição de massa análise analítica ($M = 3,266$ kg).

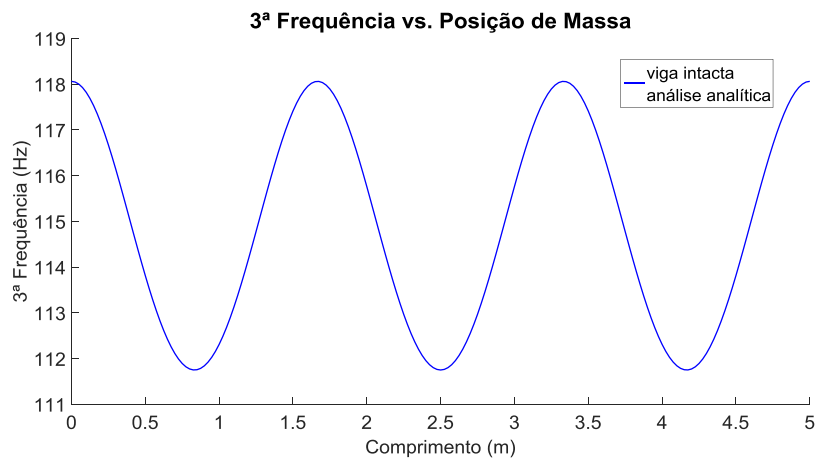


Figura 7.3 – 3ª frequência vs. posição de massa análise analítica ($M = 3,266$ kg).

As curvas apresentadas anteriormente foram sobrepostas às obtidas nas análises experimentais e numéricas. Os resultados são apresentados nas Figura 7.4 e Figura 7.5.

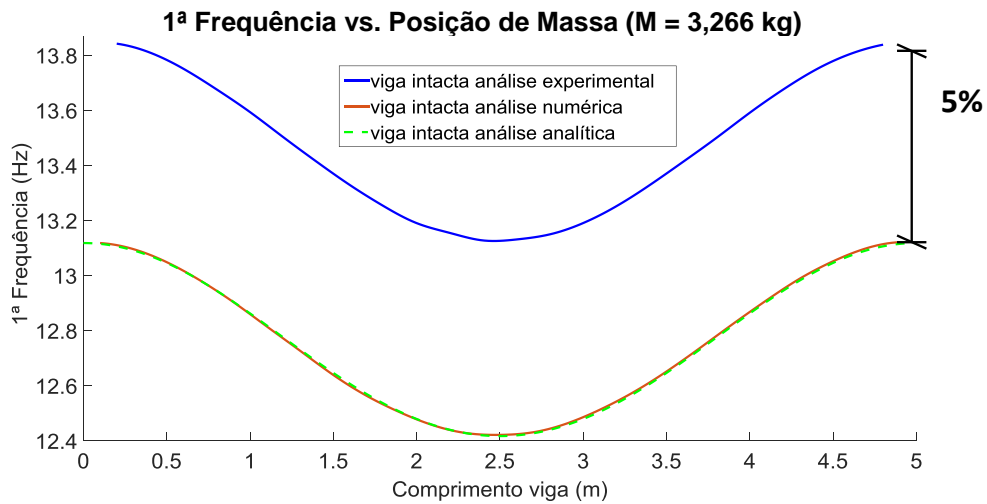


Figura 7.4 – 1ª frequência vs. Posição de Massa análise numérica, experimental e analítica (M = 3,266 kg).

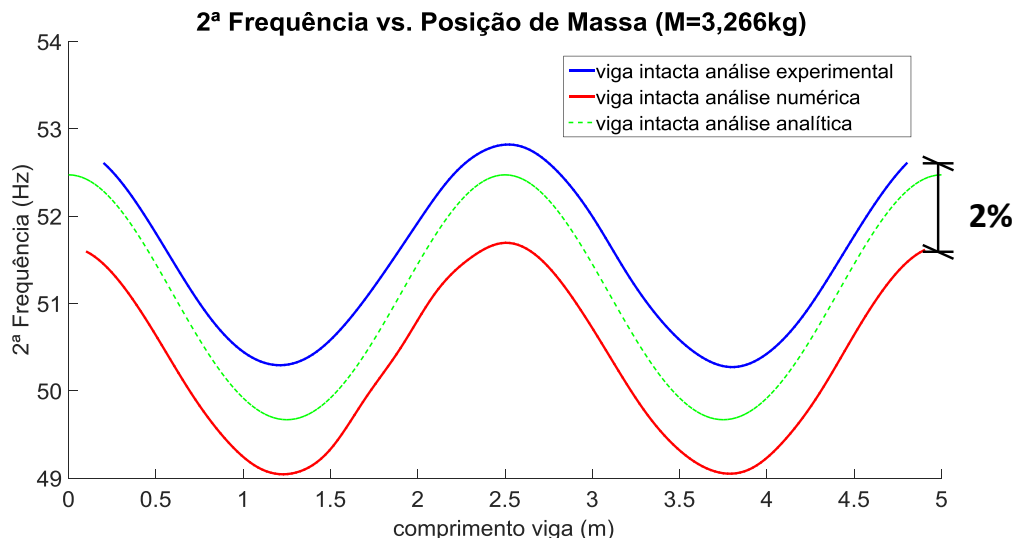


Figura 7.5 – 2ª frequência vs. Posição de Massa análise numérica, experimental e analítica (M = 3,266 kg).

Na Figura 7.4 a curva obtida numericamente se aproxima bastante da curva obtida analiticamente, já a curva experimental apresentou uma diferença por volta de 4% em relação as outras duas curvas.

A curva obtida numericamente com a segunda frequência (Figura 7.5) apresentou diferenças por volta de 2% em relação a análise experimental e a obtida analiticamente ficou mais próxima da experimental com diferenças de menos de 1%.

Segundo Blevins (1979) a frequência fundamental e o modo de vibração correspondente a essa frequência para uma viga com uma massa concentrada biapoada (Figura 7.6) é apresentada nas Equações (7.21) a (7.23). Estas fórmulas foram obtidas

derivando e usando a técnica da energia de Rayleigh, e nelas é desconsiderado o efeito da inércia rotacional provocada pela massa adicional no sistema (Blevins, (1979)).

Off-Center Mass, Pinned-Pinned Beam

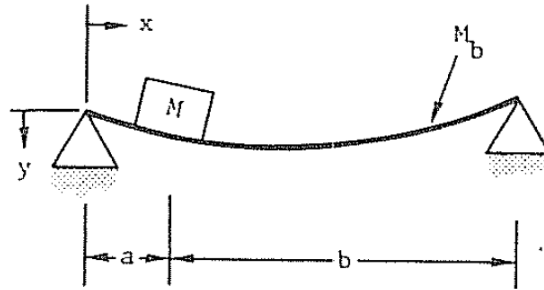


Figura 7.6 - Frequência Fundamental viga biapoiada (Blevins, (1979)).

$$F1 = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{3EI(a+b)}{a^2b^2[M + (\alpha + \beta)M_b]} \right\}^{1/2} \quad (7.21)$$

$$\alpha = \frac{a}{a+b} \left[\frac{(2b+a)^2}{12b^2} + \frac{a^2}{28b^2} - \frac{a(2b+a)}{10b^2} \right] \quad (7.22)$$

$$\beta = \frac{b}{a+b} \left[\frac{(2a+b)^2}{12a^2} + \frac{b^2}{28a^2} - \frac{b(2a+b)}{10a^2} \right] \quad (7.23)$$

Foram utilizadas as Equações (7.21) a (7.23), para traçar a curva Frequência Fundamental (Hz) vs. Posição de massa ($M = 3,266 \text{ kg}$). Os dados de geometria e propriedades do material utilizados neste cálculo foram os obtidos experimentalmente (Área (A), Densidade (ρ), Módulo de Elasticidade (E), Massa por unidade de comprimento (\bar{m}) e Momento de Inércia (I_x)).

Na Figura 7.7 é apresentado o gráfico correspondente à Primeira frequência vs. Posição de Massa utilizando a fórmula proposta por Blevins (1979) e a curva obtida com a Equação (7.19) proposta neste trabalho.

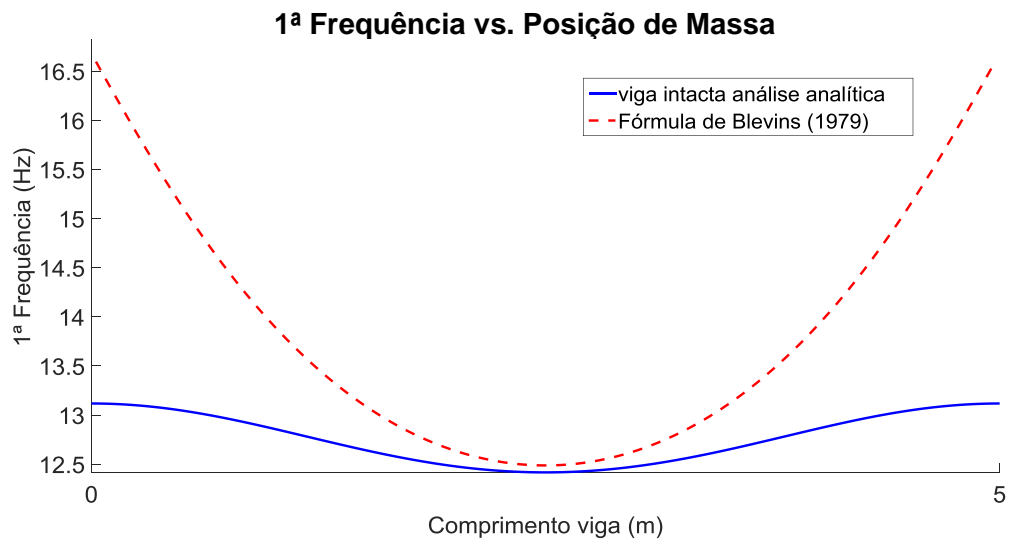


Figura 7.7- Frequência Fundamental viga biapoiada.

A Figura 7.7 apresenta um comportamento diferente, afastado dos resultados obtidos analiticamente, experimentalmente e numericamente deste trabalho.

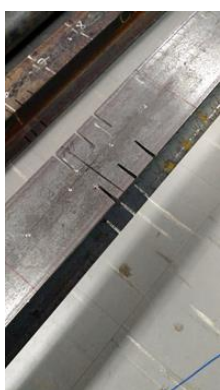
8 - CONCLUSÕES

No presente capítulo foram avaliados os resultados obtidos nas análises numéricas e experimentais.

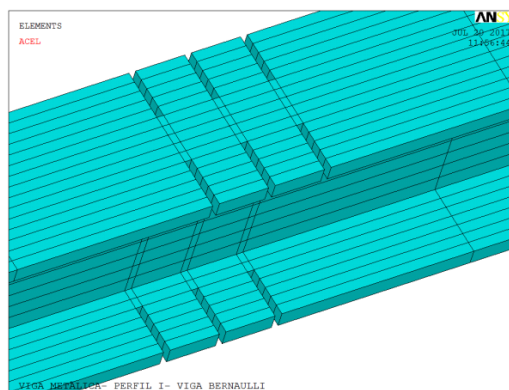
8.1 - Eficácia do método proposto

Os melhores resultados na identificação do dano foram obtidos para o dano 1, composto de 3 entalhes espaçados a 2.5 cm (Figura 8.1), localizado no trecho central da viga (Figura 8.2). Foi possível identificar claramente o dano utilizando a primeira frequência devido ao fato do primeiro modo de vibração apresentar amplitudes maiores naquele ponto, portanto a energia para capturar esta frequência é maior.

Como resultado conclui-se que a primeira frequência resulta mais sensível a qualquer enfraquecimento da estrutura quando a massa adicional estiver passando na região danificada, gerando grandes perturbações nos gráficos dos coeficientes wavelets para danos localizados no trecho central, isto é entre $L/3$ e $2L/3$.



a) Dano análise experimental.



b) Dano análise numérica.

Figura 8.1 – Dano 3 entalhes.

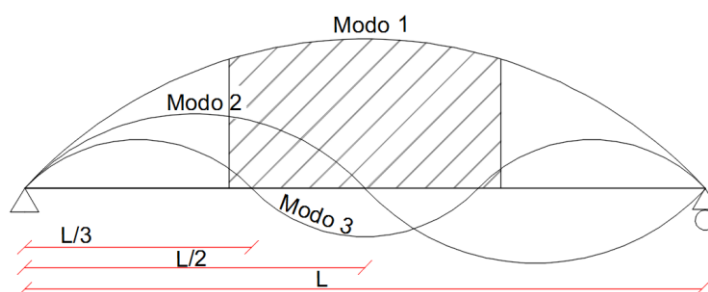


Figura 8.2 – Danos localizados no trecho central.

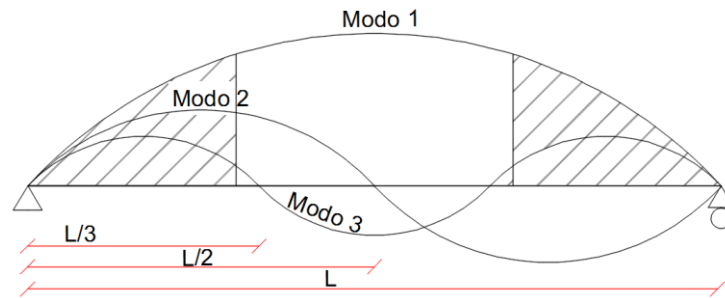


Figura 8.3 – Danos localizados próximo aos apoios.

Os resultados da metodologia proposta usando a terceira frequência nas vigas de 5 m, não apresentaram bons resultados, devido a falta de energia na terceira frequência, já nas vigas de 6 m com um valor menor da terceira frequência, foi possível identificar os danos próximos aos apoios (Figura 8.3), com um incremento de massa adicional. Este fato é devido a que, um valor maior de massa adicional presente no sistema concentra mais energia na terceira frequência, tornando possível a sua utilização para identificação de danos.

8.2 - Análise do ruído no sinal

A metodologia proposta nesta pesquisa baseia-se no cálculo da variação das frequências naturais da estrutura em faixas de frequência muito pequenas. Estas frequências são parâmetros muito sensíveis à presença de ruído no sinal, fato representado nos resultados experimentais e numéricos. Considerando isto, foram testados vários níveis de ruído (0%, 1%, 2%, 5% e 10%) nas análises numéricas, ficando claramente visível a influência do ruído presente no sinal. De acordo com isto, esta metodologia somente obteve resultados para a primeira e segunda frequências com um nível máximo de ruído de 1%, demonstrando-se que a presença do ruído e o tratamento deste, é de grande importância no processo de identificação de danos.

Para ruídos maiores do que 2% e utilizando as segunda e terceira frequências, o método não apresenta bons resultados.

8.3 Análise da Massa adicional

Os melhores resultados foram obtidos com a massa de 3,266 kg o que representa 5,8% do peso total da viga de 5 m de comprimento (Peso total = 56,25 kg), apresentado perturbações na primeira frequência e conseguindo uma clara identificação dos entalhes

localizados a 1,5 m. Para danos localizados próximos dos apoios, somente foi possível a identificação utilizando uma massa maior.

Valores de massa muito grandes conseguem gerar uma curva mais suave de Frequência vs. Posição de Massa, mas, torna impossível a identificação dos danos localizados no trecho central.

Como resultado desta análise e de acordo com os diferentes valores de massa adicional testados, a massa adicional de 3,266 kg em vigas de 5 m conseguiu gerar as perturbações necessárias para identificar danos no trecho central (entre $L/3$ e $2L/3$), e os valores de massa adicional relativamente grandes (24,718 kg) em vigas de 6 m conseguiram gerar picos nos coeficiente wavelets utilizando a terceira frequência, isto, para danos localizados em regiões próximas aos apoios (aproximadamente 10% do comprimento L).

A terceira frequência é mais fácil de excitar nas vigas de 6 m do que nas vigas de 5 m, devido as vigas de 6 m terem uma maior flexibilidade, portanto, a energia introduzida no sistema consegue incitar mais facilmente as altas frequências.

A primeira frequência consegue concentrar mais energia do que as demais frequências, por isto, resulta mais fácil a identificação do dano além de sofrer um menor impacto por causa do ruído presente no sinal.

De acordo com as observações anteriormente expostas, é necessário esclarecer que o objetivo deste trabalho não é extrapolar as condições e aplicabilidade do método em estruturas diferentes a vigas metálicas biapoiadas objeto deste estudo. Isto, porque esta pesquisa é pioneira e o desenvolvimento, está ainda nas fases iniciais, limitando-se ao estudo do comportamento de uma estrutura simplificada.

8.4 - Diferença análise experimental e numérica

Nas curvas de Frequência vs. Posição de massa, os resultados das análises experimentais e numéricas tiveram uma diferença de aproximadamente 4%, isto, devido a aproximação da geometria na seção transversal e a discretização da malha que limitou o refinamento por causa do excessivo gasto computacional. Em ambas as análises foi demonstrada a eficácia do método para danos localizados no trecho central (entre $L/3$ e $2L/3$) com uma massa relativamente pequena (5,8%) em relação ao peso total da viga.

Para danos localizados próximos aos apoios, foi impossível estabelecer se o método identificaria qualquer enfraquecimento, além disso, foram obtidos alguns resultados com um aumento exagerado da massa, fato que inviabilizaria o método em uma futura aplicação prática em pontes, passarelas e viadutos.

8.5 - Aplicabilidade do método proposto

Uma das principais vantagens deste método é a facilidade da aquisição dos dados, bastando simplesmente dois acelerômetros, um sistema de obtenção de dados e um sistema de excitação.

8.6 - Considerações finais

Os sinais de resposta obtidos na análise numérica simuladas no programa ANSYS para uma viga danificada, têm sido utilizados para demonstrar a praticidade deste método de identificação de danos. Verificou-se que os danos podem causar pequenas perturbações na resposta estrutural, especificamente nas frequências. Essas perturbações ocorrem perto das regiões danificadas com características intrínsecas.

Nas extremidades dos gráficos dos coeficientes wavelets, apresentaram perturbações devidas a descontinuidade geométrica dos apoios, motivo pelo qual foram testadas vigas contínuas com extremos em balanço, verificando-se que, além da descontinuidade geométrica da viga, existem alterações pela presença e o tipo de apoio utilizado.

Nesta pesquisa a medição experimental e o cálculo numérico das frequências foi um tópico muito importante, portanto a metodologia de correção do espectro de frequências que foi utilizada conseguiu diminuir o erro apresentado nas medições, alcançando resultados muito próximos dos analíticos, mesmo considerando a presença do ruído no sinal.

A Transformada de Wavelet é uma alternativa às técnicas de análise baseadas na Transformada de Fourier. O principal conceito por trás do método baseado nas wavelets é a capacidade de gerar perturbações nos sinais de resposta induzida pela presença de danos.

Os métodos clássicos, tais como aqueles baseados na transformada de Fourier e a análise modal, extraem informações sobre a variação das frequências naturais ou modos de vibração que, ao serem comparados com os dados obtidos da estrutura intacta (não danificada), podem determinar a localização do dano. Com base nos resultados obtidos, a partir da análise experimental e análise numérica, o método baseado no uso das wavelets associadas a posição de uma massa adicional, pode proporcionar uma alternativa aos métodos clássicos na detecção de danos, especialmente em situações em que os métodos tradicionais são difíceis de serem aplicados pela dificuldade de se obter a resposta da estrutura intacta.

Algumas das limitações do método de identificação de danos utilizando as wavelets são as seguintes:

- Não é possível determinar o tamanho do dano;
- Somente é possível determinar a localização da região danificada;
- Para danos localizados perto dos apoios é difícil determinar a posição do mesmo, devido as descontinuidades geométricas e o ruído presente no sinal.

8.7 - Sugestões para trabalhos futuros

A busca contínua por critérios práticos e eficazes para a determinação e localização de danos torna-se um aspecto muito importante ao longo do desenvolvimento de uma pesquisa. Isto serve de motivação para aqueles que querem contribuir nas diversas áreas do conhecimento. Visando contribuir para a busca de tais critérios, foram listadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar ensaios em tubos metálicos para determinar a influência da perda de rigidez em seções circulares.
- Aplicar a metodologia proposta neste trabalho para avaliar a eficácia em placas metálicas.
- Realizar ensaios sob vigas biapoiadas em condições de apoio perfeito e compará-las com vigas biapoiadas em condições reais, para avaliar a influência do ruído gerado nos suportes.
- Aplicar a metodologia proposta em uma ponte em escala real.
- Avaliar a influência das diferentes condições de apoio na metodologia proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKTAN, A. E.; FARHEY, D. N.; HELMICKI, A. J.; et al. Structural Identification for Condition Assessment: Experimental Arts. **Journal of Structural Engineering**, v. 123, n. 12, p. 1674–1684, 1997.

ALLEMANG, R. J. The Modal Assurance Criterion - Twenty Years of Use and Abuse. **Journal of Sound and Vibration**, v. 1, n. August, p. 14–21, 2003.

ANDRADE, A. O.; SOARES, A. B. **Técnicas de Janelamento de Sinais**. .

ANDREAUS, U.; BARAGATTI, P.; CASINI, P.; IACOVIELLO, D. Experimental damage evaluation of open and fatigue cracks of multi-cracked beams by using wavelet transform of static response via image analysis. **Structural control and health monitoring**, v. 24, n. June 2016, p. 1–16, 2017.

ANSYS. ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide. **ANSYS, Inc.**, v. 3304, n. October, p. 724–746, 2012.

ASHA, C. L. P. Amortecimento: classificação e métodos de determinação. **Informativo Técnico-Científico ITC04-Amortecimento/ATCP**, p. 1–14, 2010.

BAGHERI, A.; RIZZO, P.; LI, K. Ultrasonic imaging algorithm for the health monitoring of pipes. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 7, n. 1, p. 99–121, 2017. Springer Berlin Heidelberg.

BEZERRA, L. M.; SAIGAL, S. A boundary element formulation for the inverse elastostatics problem (IESP) of flaw detection. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 36, n. July 2015, p. 2189–2202, 1993.

BLEVINS, D. R. **Formulas For Natural Frequency and Mode Shape**. New York, 1979.

BOLZAN, M. J. A. Transformada em ondeleta: uma necessidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 4, p. 563–567, 2006.

BRINCKER, R.; VENTURA, C. **Introduction to Operational Modal Analysis**. 2015.

BRITO, M. A. N. **Análise de Assinaturas Elastostáticas e Elastodinâmicas na Solução do Problema Inverso de Identificação de Danos em Treliça Via Método dos Elementos Finitos.**, 2008. Universidade de Brasília.

BRUEL & KJAER. **Measuring Vibration**. 1982.

CALDEIRA, M. M. **Procedimentos Numéricos para Solução do Problema Inverso de Localização de Danos em Estruturas Aperticadas.**, 2009. Universidade de Brasília.

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

DOEBLING, S. W.; FARRAR, C. R.; PRIME, M. B.; SHEVITZ, D. . **Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics**. California: Los Alamos National Laboratory, 1996.

ESTRADA, R. S. **Damage Detection Methods in Bridges through Vibration Monitoring : Evaluation and Application**, 2008. University of Minho.

EUN, H.; PARK, S.; KIM, R. Damage Detection using the Variation in the FRF Data Depending on Mass Addition. , v. 47, p. 15–20, 2014.

FLADUNG, B. Windows used for impact testing. **Proceedings of the XV IMAC**, p. 1662–1666, 1997.

GILLICH, G. R.; NTAKPE, J. L.; ABDEL WAHAB, M.; PRAISACH, Z. I.; MIMIS, M. C. Damage detection in multi-span beams based on the analysis of frequency changes. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 842, n. May, p. 012033, 2017.

INSTRUMENT, N. Understanding FFTs and Windowing. , 2015.

KIM, J.-T.; STUBBS, N. Model-Uncertainty Impact and Damage-Detection Accuracy in Plate Girder. **Journal of Structural Engineering**, v. 121, n. 10, p. 1409–1417, 1995.

LAUSANNE. CEB-FIP model code 1990. , 1990.

LI, H.; YI, T.; GU, M.; HUO, L. Evaluation of earthquake-induced structural damages by wavelet transform. **Progress in Natural Science**, v. 19, n. 4, p. 461–470, 2009. National Natural Science Foundation of China and Chinese Academy of Sciences.

MAECK, J.; ABDEL WAHAB, M. M.; PEETERS, B.; et al. Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination. **Engineering Structures**, v. 22, n. 10, p. 1339–1349, 2000.

MING, X.; KANG, D. Corrections for Frequency, Amplitude and Phase in a Fast Fourier Transform of a Harmonic Signal. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 10, n. 2, p. 211–221, 1996.

MISITI, M.; POGGI, J. **Wavelet Toolbox For Use with MATLAB**. Natick, Massachusetts, 2001.

NASROLLAHI, A.; DENG, W.; RIZZO, P. Multimodal structural health monitoring based on active and passive sensing. **Structural Health Monitoring**, p. 1–15, 2017.

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

NBR-6118. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. , 2003. Rio de Janeiro.

NDAMBI, J. M.; VANTOMME, J.; HARRI, K. Damage assessment in reinforced concrete beams using eigenfrequencies and mode shape derivatives. **Engineering Structures**, v. 24, n. 4, p. 501–515, 2002.

NORTON, M. P.; KARCZUB, D. G. **Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers, 2nd Edition**. 2007.

OPPENHEIM, A. V. Discrete-Time Signal Processing. **Electronics and Power**. v. 1, p.468, 1999.

OVANESOVA, A. V.; SUÁREZ, L. E. Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures. **Engineering Structures**, v. 26, n. 1, p. 39–49, 2004.

OVANESOVA, A. V. **Applications of Wavelets to Crack Detection in Frame Structures.**, 2000. University of Puerto Rico.

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

PALECHOR, E. U. L.; MACHADO, M. R.; MORAIS, M. V. G. DE; BEZERRA, L. M. Dynamic analysis of a beam with additional auxiliary mass spatial via spectral element method. *Dynamical Systems Theory and Applications DST-2017*. **Anais...** , 2017.

PALECHOR, E. U. L.; SILVA, R. S. .; BEZERRA, L.; GIRÃO, M. V. Método de identificação de danos em estruturas, baseado na variação das frequências naturais causadas pela aplicação de uma massa adicional usando as Transformadas de Wavelet. XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE 2015. **Anais...** , 2015.

PALECHOR, E. U. L.; SILVA, R. S. Y. C.; BEZERRA, L. M.; BITTENCOURT, T. N. Damage Identification in Beams Using Experimental Data. **Key Engineering Materials**, v. 607, p. 21–29, 2014.

PANDEY, A. K.; BISWAS, M.; SAMMAN, M. M. Damage detection from changes in curvature mode shapes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 145, n. 2, p. 321–332, 1991.

PAPATHEOU, E.; MANSON, G.; BARTHORPE, R. J.; WORDEN, K. Damage location using added masses in a Piper Toma- hawk aircraft wing. **Proceedings of Isma**, p. 1015–1028, 2010.

PENG, X.-L.; HAO, H.; LI, Z.-X.; FAN, K.-Q. Experimental study on subsea pipeline bedding condition assessment using wavelet packet transform. **Engineering Structures**, v. 48, p. 81–97, 2013.

PFEIL, W. P. M. **Estruturas de Aço**. 8^a edição ed.2009.

RADZIENSKI, M.; KRAWCZUK, M.; PALACZ, M. Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, n. 6, p. 2169–2190, 2011.

RÊGO, E. M. F. **Modelagem de conexão e parafuso em ponte ferroviária para análise de fadiga**, 2013. Universidade de Brasília.

REN, W.; ROECK, G. DE. Structural Damage Identification using Modal Data . II : Test Verification. **Journal of structural engineering**, v. 128, p. 96–104, 2002.

RUCKA, M.; WILDE, K. Crack identification using wavelets on experimental static deflection profiles. **Engineering Structures**, v. 28, n. 2, p. 279–288, 2006.

RYTTER, A. **Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures.**, 1993. Aalborg University.

SALAWU, O. S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. **Engineering Structures**, v. 19, n. 9, p. 718–723, 1997.

SILVA, R. S. R. C. **Monitoramento e identificação Numérico e Experimental de Danos em Vigas e Pontes de Aço e Concreto Utilizando Transformadas de Wavelet.**, 2015. Universidade de Brasília.

SILVA, R. S. Y. R. C. **Determinação de Patologias Estruturais usando Modelagem Numérica e Transformadas de Wavelet.**, 2011. Universidade de Brasília.

SORIANO, H. L. **Introdução à Dinâmica das Estruturas.** 2014.

DE SOUZA, F. M.; PAGAMISSE, A.; MONICO, J. F. G.; POLEZEL, W. G. C. Comparação das Bases de Wavelets Ortonormais e Biortogonais: Implementação, Vantagens e Desvantagens no Posicionamento com GPS. **TEMA - Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, v. 8, n. 1, p. 149–158, 2007.

TAIK, E.; HEE, L.; EUN, C. Damage identification of a frame structure model based on the response variation depending on additional mass. **Engineering with Computers**, 2014.

VAHIT MERMERTAS, H. E. Effect of Mass Attachment on the Free Vibration of Cracked Beam. The 8th International Congress on Sound and Vibration 2-6 July, Hong Kong, China. **Anais...** . p.2803–2810, 2001.

WANG, S.-Q.; LI, H.-J. Assessment of structural damage using natural frequency changes. **Acta Mechanica Sinica**, v. 28, n. 1, p. 118–127, 2012.

WU, N.; WANG, Q. Experimental studies on damage detection of beam structures with wavelet transform. **International Journal of Engineering Science**, v. 49, n. 3, p. 253–261, 2011.

ZHICHUN, Y.; LE, W. Structural Damage Detection by Changes in Natural Frequencies. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 21, n. 3, p. 309–319, 2010.

ZHONG, S.; OYADIJI, S. O. Analytical predictions of natural frequencies of cracked simply supported beams with a stationary roving mass. **Journal of Sound and Vibration**, v. 311, n. 1-2, p. 328–352, 2008.

ZHONG, S.; OYADIJI, S. O.; DING, K. Response-only method for damage detection of beam-like structures using high accuracy frequencies with auxiliary mass spatial probing. **Journal of Sound and Vibration**, v. 311, n. 3-5, p. 1075–1099, 2008.

ZHOU, Z. **Vibration-Based Damage Detecton of Simple Bridge Superstructures**, 2006. University of Saskatchewan.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals. **The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals**, p. 493–543, 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE A. -DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO DA VIGA DE EULLER BERNOULLI.

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento analítico e obtenção as frequências da equação diferencial da viga de Euler Bernoulli.

O tratamento da viga apresentado neste capítulo está baseado na teoria simples de flexão conhecida como teoria de Bernoulli-Euler, a qual considera as seguintes características:

- A viga tem uma seção transversal uniforme ao longo do seu eixo longitudinal.
- A viga é composta de material linear, homogêneo, isotrópico e elástico.
- As dimensões da seção transversal da viga são consideravelmente pequenas em relação ao comprimento total da viga.
- Inércia rotacional e deformação por cisalhamento não são consideradas.
- Não existem solicitações axiais.
- O centro de cortante coincide com o centro de massa.
- O plano de vibração (vertical), é simétrico em relação a viga.
- A seção transversal plana da viga permanece plana durante as deformações por flexão.

Para o desenvolvimento analítico e a correspondente obtenção das frequências foi utilizada a equação da viga de Euler Bernoulli (equação 7.1) considerando apenas as parcelas correspondentes a rigidez e a massa, não é considerada a parcela do amortecimento nem a força externa, já que o objetivo é determinar a frequência fundamental (vibração livre).

Solução da equação de movimento em vibração livre.

$$EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^4} = 0 \quad (\text{A.1})$$

$EI = \text{rigidez a flexão}$

$y(x, t) = \text{posição}$

$\bar{m} = \text{massa por unidade de comprimento}$

As condições de contorno para uma viga em condição biapoiada são:

$$\begin{aligned} y(x = 0, t) &= 0 \\ y(x = L, t) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

$$M(x = 0, t) = 0$$

$$M(x = L, t) = 0$$

ETAPA 1: separação de variáveis.

$$y(x, t) = \phi(x)f(t) \quad (\text{A.3})$$

Derivando duas vezes em relação a x e t:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \phi(x)\dot{f}(t) \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \phi(x)\ddot{f}(t) \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \phi(x)'f(t) \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \phi(x)''f(t) \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = \phi(x)'''f(t) \quad (\text{A.8})$$

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \phi(x)''''f(t) \quad (\text{A.9})$$

Substituindo as equações (A.5) e (A.9) na equação (A.1):

$$EI \phi(x)''''f(t) + \bar{m}(x)\ddot{f}(t) = 0 \quad (\text{A.10})$$

Dividindo a equação anterior por: $\phi(x)f(t)$

$$EI \frac{\phi(x)''''f(t)}{\phi(x)f(t)} + \bar{m} \frac{\phi(x)\ddot{f}(t)}{\phi(x)f(t)} = 0 \quad (\text{A.11})$$

$$EI \frac{\phi(x)''''}{\phi(x)} + \bar{m} \frac{\ddot{f}(t)}{f(t)} = 0 \quad (\text{A.12})$$

As duas parcelas da equação anterior devem ser iguais a uma constante w^2

$$EI \frac{\phi(x)^{IV}}{\phi(x)} = -\bar{m} \frac{f(\ddot{t})}{f(t)} = w^2 \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{EI}{\bar{m}} \frac{\phi(x)^{IV}}{\phi(x)} = \frac{f(\ddot{t})}{f(t)} = w^2 \quad (\text{A.14})$$

Da equação (A.14) podem ser obtidas duas equações:

$$\frac{EI}{\bar{m}} \frac{\phi(x)^{IV}}{\phi(x)} = w^2 \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{f(\ddot{t})}{f(t)} = w^2 \quad (\text{A.16})$$

Dividindo por EI a equação (A.15)

$$\phi(x)^{IV} - \frac{w^2 \bar{m}}{EI} \phi(x) = 0 \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{w^2 \bar{m}}{EI} = \text{Constante} = a^4 \quad (\text{A.18})$$

Isolando w

$$w^2 = a^4 \frac{EI}{\bar{m}} \quad (\text{A.19})$$

$$w = \sqrt{\frac{a^4 EI}{\bar{m}}} \quad (\text{A.20})$$

Multiplicando e dividindo por L^4

$$w = \sqrt{\frac{a^4 EIL^4}{\bar{m}L^4}} \quad (\text{A.21})$$

$$w = (aL)^2 \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}L^4}} ; \quad c = (aL)^2 \quad (\text{A.22})$$

Voltando na equação (A.17)

$$\phi(x)^{IV} - a^4\phi(x) = 0 \quad (\text{A.23})$$

Adotamos uma solução do tipo:

$$\phi(x) = e^{rx} \quad (\text{A.24})$$

Derivando 4 vezes:

$$\phi(x)^{IV} = r^4 e^{rx} \quad (\text{A.25})$$

Substituindo (A.24) em (A.23):

$$r^4 e^{rx} - a^4 e^{rx} = 0 \quad (\text{A.26})$$

$$e^{rx}(r^4 - a^4) = 0 \quad (\text{A.27})$$

$$(r^4 - a^4) = 0 \quad (\text{A.28})$$

$$r_1 = -a ; r_2 = +a ; r_3 = -ai ; r_4 = +ai \quad (\text{A.29})$$

Lembrando que:

$$e^{\pm ax} = \cosh(ax) \pm \sinh(ax) \quad (\text{A.30})$$

$$e^{\pm iax} = \cos(ax) \pm \sin(ax) \quad (\text{A.31})$$

$$\phi(x) = C_1 e^{ax} + C_2 e^{-ax} + C_3 e^{aix} + C_4 e^{-aix} \quad (\text{A.32})$$

Substituindo as equações (A.31) e (A.32) em (A.30)

$$\phi(x) = [C_1 + C_2](\cosh(ax) + \sinh(ax)) + [C_3 + C_4](\cos(ax) + \sin(ax)) \quad (\text{A.33})$$

$$A = C_3 + C_4 ; B = C_3 - C_4 ; C = C_1 - C_2 ; D = C_1 + C_2 \quad (\text{A.34})$$

Agrupando as constantes temos a seguinte equação:

$$\phi(x) = A\sin(ax) + B\cos(ax) + C\sinh(ax) + D\cosh(ax) \quad (\text{A.35})$$

Multiplicando a equação (A.16) por (-1) obtemos uma EDO com coeficientes constantes:

$$f''(t) + w^2 f(t) = 0 \quad (\text{A.36})$$

Adotamos a solução para a equação (A.36) como:

$$f(t) = e^{rt} \quad (\text{A.37})$$

Derivando duas vezes obtemos:

$$f'(t) = r e^{rt} \quad (\text{A.38})$$

$$f''(t) = r^2 e^{rt} \quad (\text{A.39})$$

Substituindo (A.39) na equação (A.16)

$$r^2 e^{rt} + w^2 e^{rt} = 0 \quad (\text{A.40})$$

$$e^{rt}(r^2 + w^2) = 0 \quad (\text{A.41})$$

$$r = \sqrt{-w^2} \quad (\text{A.42})$$

$$r = \pm iw \quad (\text{A.43})$$

Lembrando que:

$$e^{iat} = \cos(at) + i\sin(at) \quad (\text{A.44})$$

O conjunto fundamental de soluções da equação (A.16) é

$$CFS = \{e^{r_1 t}, e^{r_2 t}\} = \{e^{+iw}, e^{-iw}\} \quad (\text{A.45})$$

$$\{C1 \cos(wt) + C2 \text{sen}(wt), C3 \cos(wt) - C4 \text{sen}(wt)\} \quad (\text{A.46})$$

$$f(t) = (C1 + C3) \cos wt + (C2 + C4) \text{sen} wt \quad (\text{A.47})$$

$$A = C1 + C3 ; \quad B = C2 + C4 \quad (\text{A.48})$$

$$f(t) = A \cos wt + B \text{sen} wt \quad (\text{A.49})$$

Aplicando as condições de contorno dadas em (A.2)

$$\begin{aligned} \phi(x = 0) = y(x = 0, t) &= 0 \\ \phi(x = L) = y(x = L, t) &= 0 \\ \phi(x = 0)'' = M(x = 0, t) &= 0 \\ \phi(x = L)'' = M(x = L, t) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.50})$$

Substituindo as condições de contorno para uma viga biapoada na equação (A.35), encontram-se os valores das constantes A, B, C e D da equação (A.35):

$$B = D = 0 \quad (\text{A.51})$$

$$\phi(L) = A \text{sen}(aL) + C \text{senh}(aL) = 0 \quad (\text{A.52})$$

$$\phi''(L) = a^2(-A \text{sen}(aL) + C \text{senh}(aL)) = 0 \quad (\text{A.53})$$

Da equação (A.52):

$$A \text{sen}(aL) = -C \text{senh}(aL) \quad (\text{A.54})$$

Substituindo equação (A.54) em (A.53):

$$a^2(-(-C \text{senh}(aL)) + C \text{senh}(aL)) = 0 \quad (\text{A.55})$$

$$a^2(2C \text{senh}(aL)) = 0 \quad (\text{A.56})$$

$$2C \text{senh}(aL) = 0 \quad (\text{A.57})$$

$$2C\sinh(aL) = 0 \quad (\text{A.58})$$

$$\sinh(aL) = 0 \quad (\text{A.59})$$

$$(aL) = n\pi \quad (\text{A.60})$$

Da equação (A.23) temos o seguinte:

$$(aL)^2 = (n\pi)^2 \quad (\text{A.61})$$

Substituindo na equação (A.23):

$$w = (aL)^2 \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}L^4}} = (n\pi)^2 \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}L^4}} \quad (\text{A.62})$$

Lembrando que:

$$w = 2\pi f \quad (\text{A.63})$$

$$f = \frac{w}{2\pi} \quad (\text{A.64})$$

A fórmula para o cálculo das frequências naturais de uma viga biapoada está dada pela seguinte expressão:

$$f = \frac{(n\pi)^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \quad (\text{A.65})$$

$$\lambda_i = n\pi \quad (\text{A.66})$$

$$\lambda_i^2 = (n\pi)^2 \quad (\text{A.67})$$

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{A.68})$$

f_i : i-ésima frequência natural da de uma viga biapoiada.

Para nosso perfil I- viga biapoiada o cálculo das frequências analíticas para a viga de 6m utilizando a equação (A.68), são apresentadas na Tabela A.1 os valores do Módulo de elasticidade (E), área da seção transversal (A), momento de inércia (Ix) e a densidade (ρ), foram os valores obtidos nos ensaios experimentais, é dizer esses valores são reais e não valores nominais de catálogo.

Tabela A.1- Frequências (Hz) Analíticas viga biapoiada.

APOIADA-APOIADA -V1								
i	λ_i	$m(\frac{kg}{\bar{m}L})$	$\rho(kg/m^3)$	$E(GPa)$	$Ix(m^4)$	$L(m)$	$A(m^2)$	$f(Hz)$
1	3.1415927	11.25	7858.16	200.0474	2.451E-06	6.00	1.432E-03	9.1100
2	6.2831853	11.25	7858.16	200.0474	2.451E-06	6.00	1.432E-03	36.4400
3	9.4247780	11.25	7858.16	200.0474	2.451E-06	6.00	1.432E-03	81.9900
4	12.5663706	11.25	7858.16	200.0474	2.451E-06	6.00	1.432E-03	145.7601
5	15.7079633	11.25	7858.16	200.0474	2.451E-06	6.00	1.432E-03	227.7501

APÊNDICE B. – RESULTADOS DA ANÁLISE MODAL PREVIA

A seguir são apresentados os resultados da análise modal prévia:

8.7.1.1 - Caso 3

O Caso 1 é o correspondente ao dano localizado a 3 m (metade do vão), com um entalhe na mesa inferior causando uma diminuição da rigidez a flexão da viga de 9%, aproximadamente na região do dano.

Nas Figura B.1 e Figura B.2 são apresentados os gráficos dos dados correspondentes as curvas das primeiras 4 Frequências da viga vs. Posição da massa ao longo dos 31 nós. A massa utilizada foi de 2 kg.

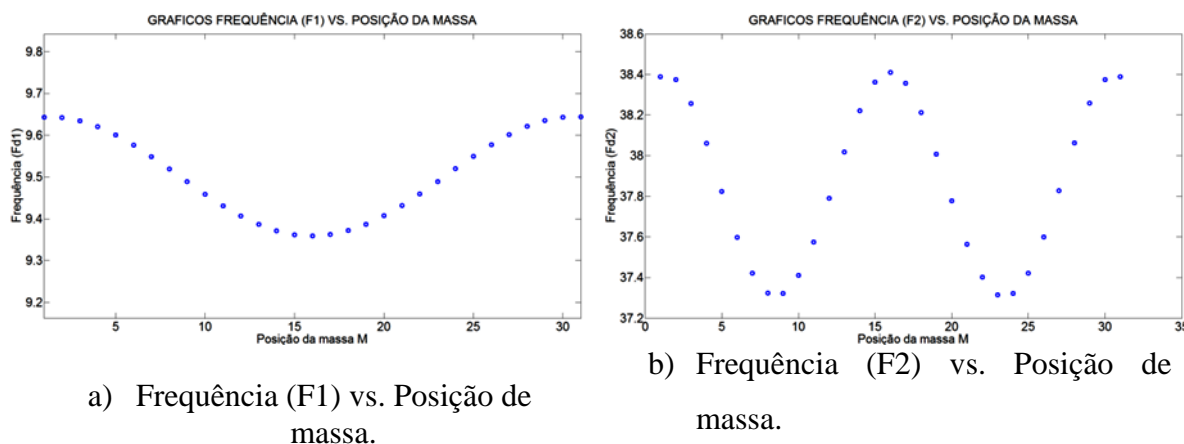


Figura B.1 – Gráficos de Frequência vs. Posição de massa.

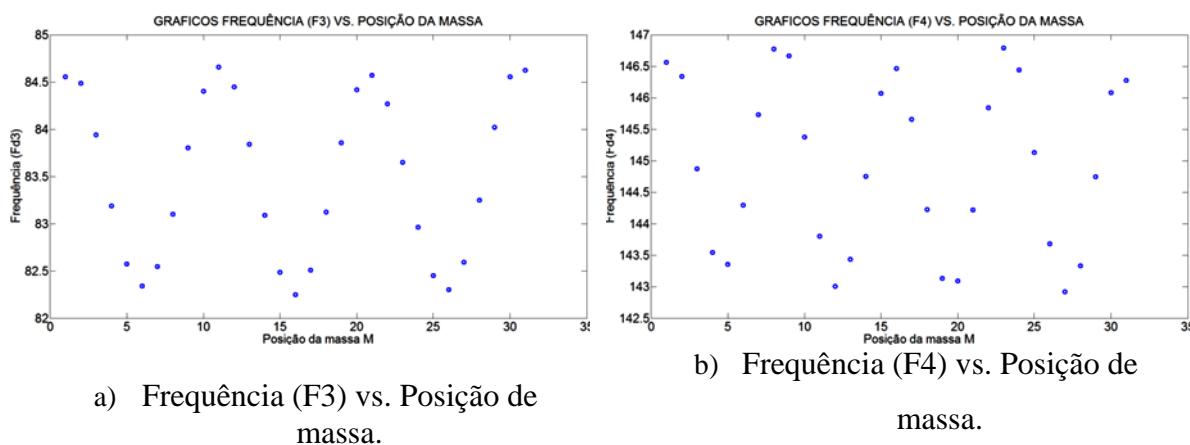


Figura B.2 - Gráficos de Frequências vs. Posição de massa.

Os anteriores gráficos representam funções discretas, pelo que é necessário aplicar métodos de interpolação para incrementar o número de dados analisados e assim, conseguir plotar uma curva contínua que descreva a variação da frequência em função da posição da massa. Neste caso foi aplicado o método de interpolação Cubic Spline que, de acordo com Palechor (2013), apresentou os melhores resultados na análise de identificação de danos. Nas Figura B.3 e Figura B.4 são apresentados os gráficos da Frequência vs. Posição da massa da curva interpolada.

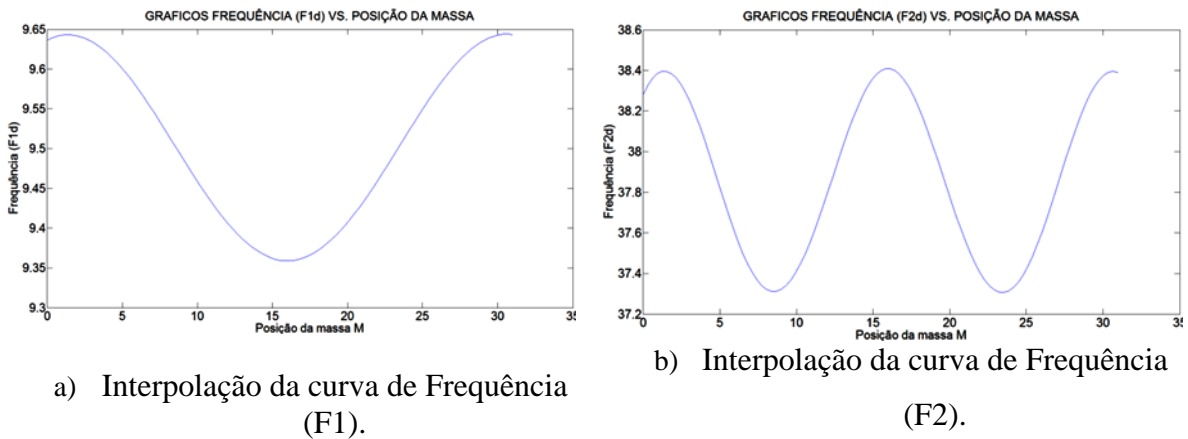


Figura B.3 - Interpolação da curva de frequência pelo método Cubic Spline.

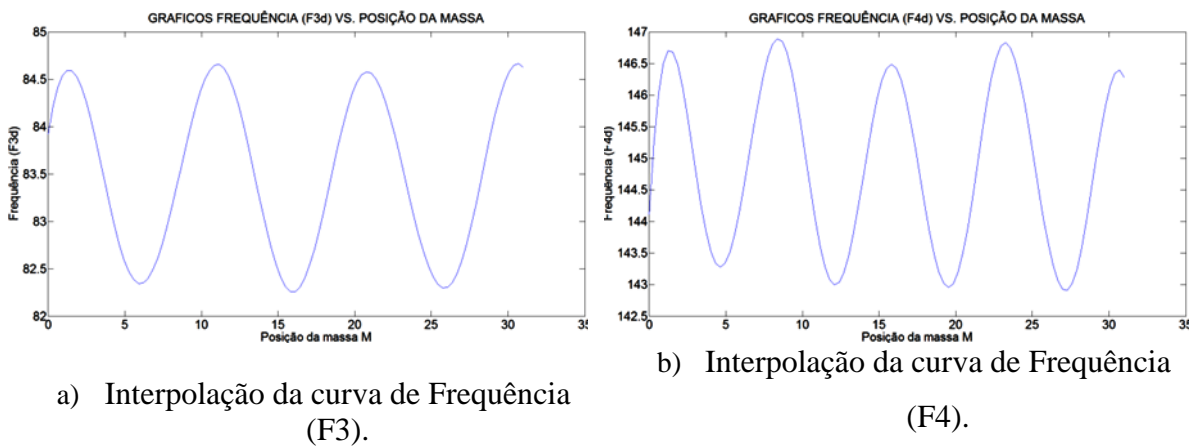
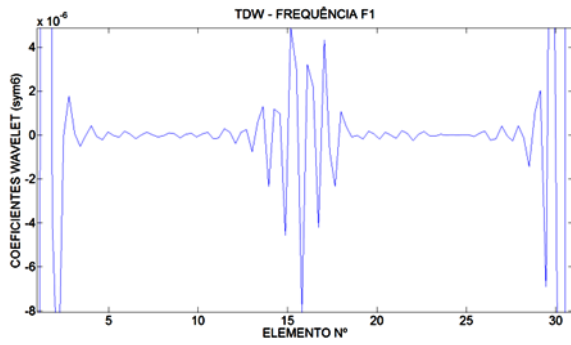


Figura B.4- Interpolação da curva de frequência pelo método Cubic Spline.

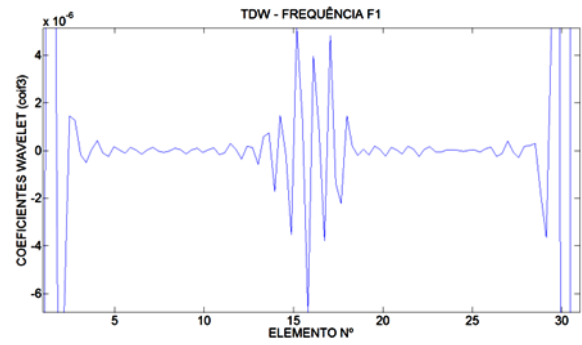
O método para identificação de danos proposto foi aplicado na curva Figura B.3 (Primeira frequência). Os dados foram interpolados para 100 pontos, após, foi aplicada a TDW utilizando as seguintes funções wavelet mãe: rbio2.6, bior6.8, db5, sym6, que, de acordo com Palechor (2013), apresentaram os melhores resultados na localização do dano.

Nas Figura B.5 a Figura B.7 são apresentados os resultados obtidos. Nos 5 gráficos é claramente visível a perturbação gerada pela presença do dano na região próxima ao nó

15 (metade do vão). Esses gráficos apresentam perturbações nos extremos, isto devido a descontinuidade geométrica e a presença do apoio.

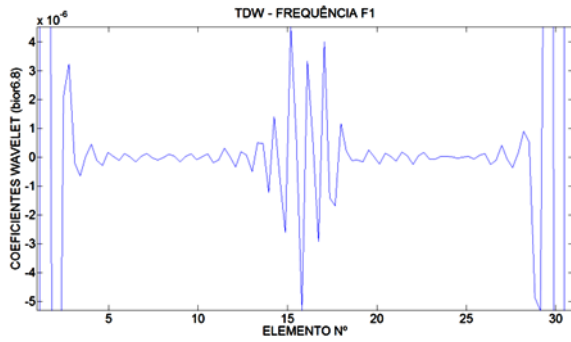


c) TDW (sym6) – Caso 3.

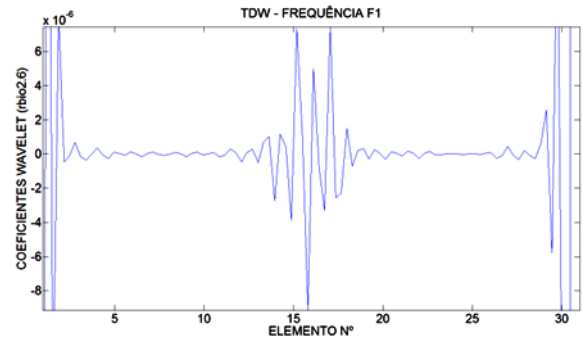


d) TDW (coif3) – Caso 3.

Figura B.5- TDW Caso3.



e) TDW (bior6.8) – Caso 3.



f) TDW (rbio2.6) – Caso 3.

Figura B.6- TDW Caso 3.

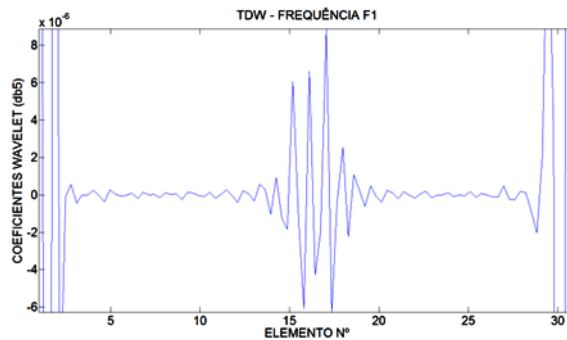
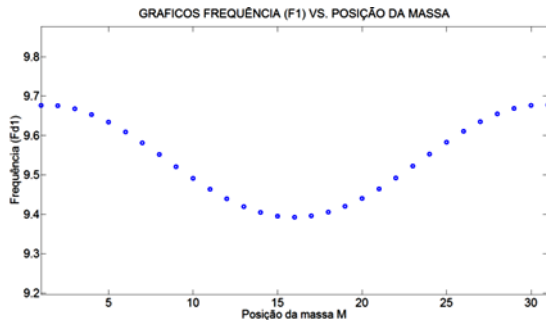


Figura B.7- TDW (db5) – Caso3.

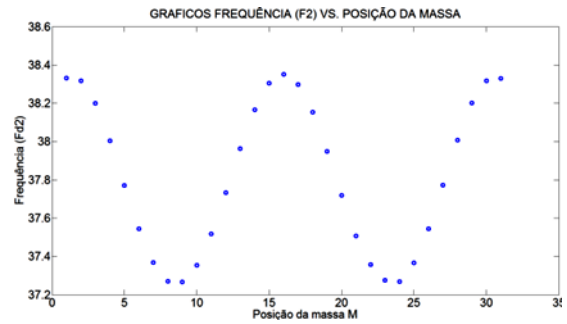
8.7.1.2 - Caso 4

O Caso 4 é o correspondente ao dano localizado a 2 m (1/3 do vão) da viga de 6 m de comprimento, com um entalhe na mesa inferior causando uma diminuição da rigidez a flexão da viga de 9% aproximadamente.

Nas Figura B.8 e Figura B.9 são apresentados os gráficos dos dados correspondentes as curvas das primeiras 4 Frequências da viga vs. Posição da massa ao longo dos 31 nós da viga. A massa utilizada foi de 2kg.

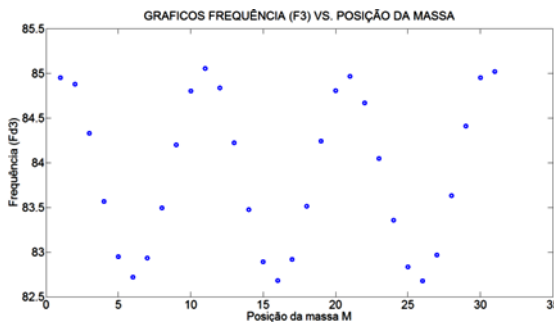


a) Frequência (F1) vs. Posição de massa.

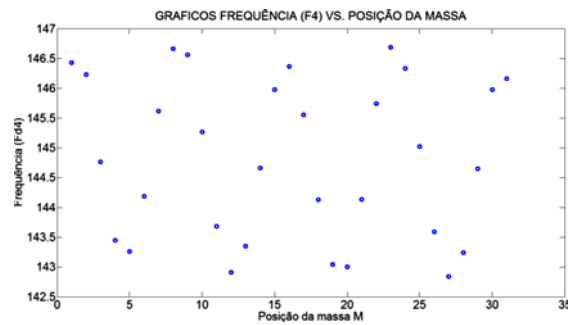


b) Frequência (F2) vs. Posição de massa.

Figura B.8- Gráficos de Frequências vs. Posição de massa.



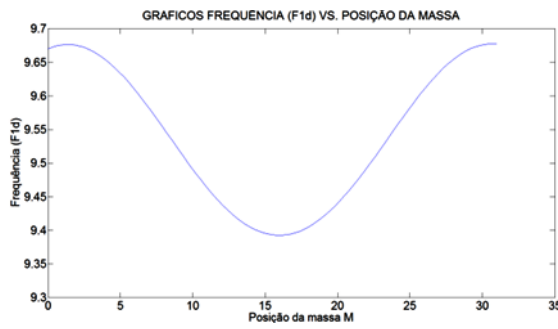
a) Frequência (F3) vs. Posição de massa.



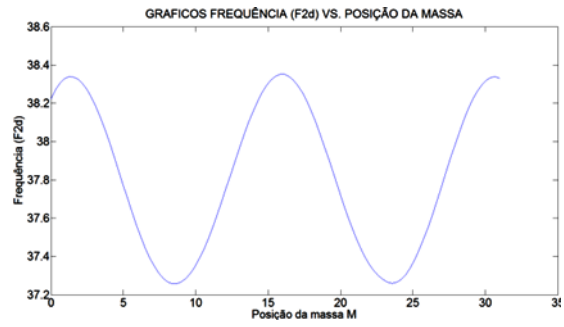
b) Frequência (F4) vs. Posição de massa.

Figura B.9 – Gráficos de Frequências vs. Posição de massa.

Os anteriores gráficos representam funções discretas, pelo que é necessário aplicar métodos de interpolação, para incrementar o número de dados analisados, e conseguir plotar uma curva contínua que descreva a variação da frequência em função a posição da massa. Neste caso foi aplicado o método de interpolação Cubic Spline. De acordo com Palechor (2013), este método de interpolação deu os melhores resultados na análise de identificação de danos. Nas Figura B.10 e Figura B.11 são apresentados os gráficos Frequência vs. Posição da massa, para os dados obtidos anteriormente.

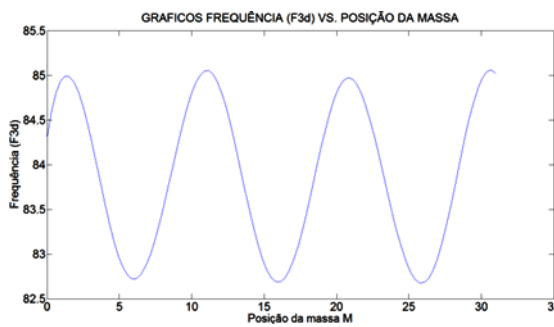


a) Interpolação Frequência F1.

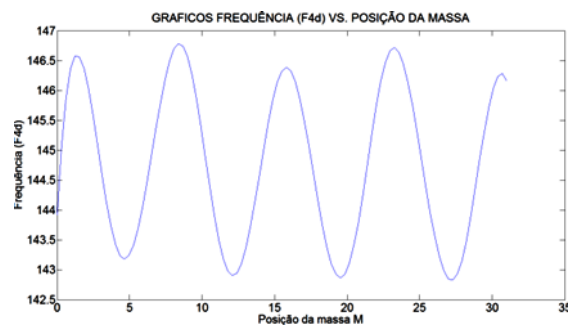


b) Interpolação Frequência F2.

Figura B.10 – Interpolação das curvas pelo método Cubic Spline..



a) Interpolação Frequência F3.

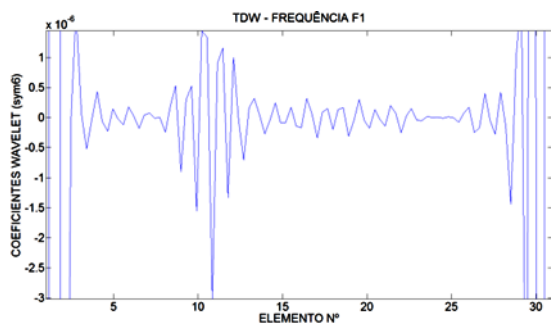


b) Interpolação Frequência F4.

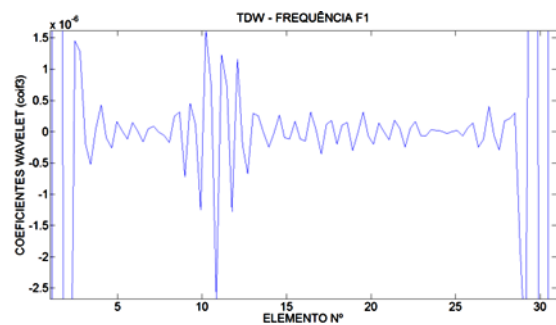
Figura B.11 – Interpolação das curvas pelo método Cubic Spline.

O método para identificação de danos proposto foi aplicado na curva Figura B.10a (Primeira frequência).

Nas Figura B.12 a Figura B.14 são apresentados os resultados obtidos. Nos 5 gráficos é claramente visível a perturbação gerada pela presença do dano na região próxima ao nó 10 (1/3 do vão).

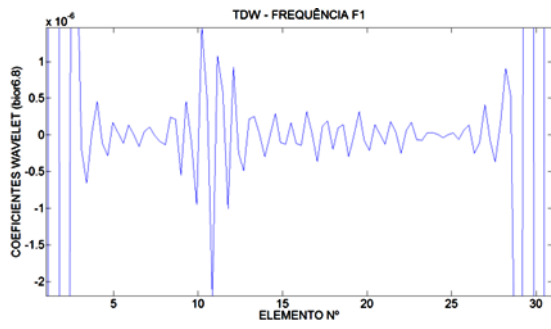


a) TDW (sym6) – Caso 4.

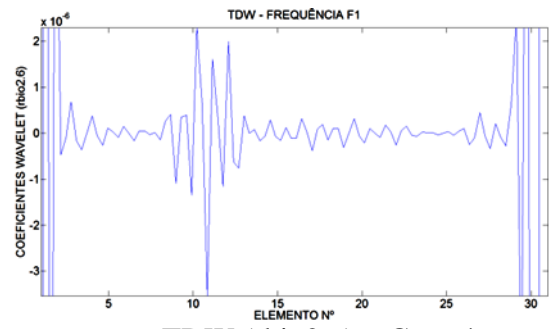


b) TDW (coif3) – Caso 4.

Figura B.12 - TDW Caso 4.



a) TDW (bior6.8) – Caso 4.



b) TDW (rbio2.6) – Caso 4.

Figura B.13- TDW Caso4.

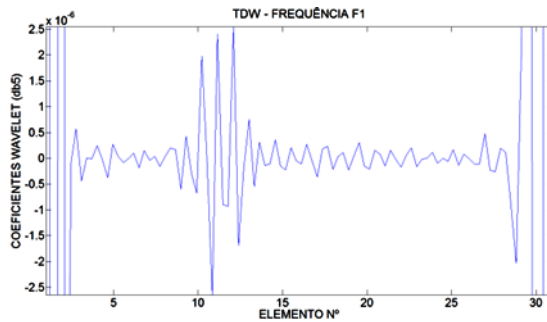
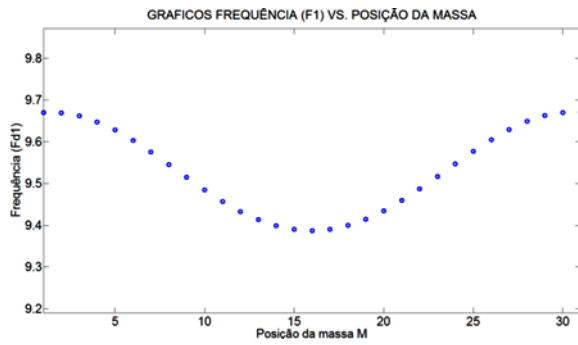


Figura B.14 - TDW (db5) – Caso 4.

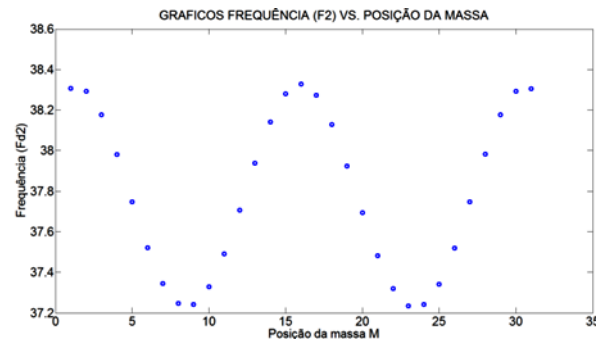
8.7.1.3 - Caso 5

O caso 5 é o correspondente ao dano localizado a 2 m (1/3 do vão), com um entalhe na mesa inferior causando uma diminuição da rigidez a flexão da viga de 17,97%, aproximadamente na região do dano.

Nas Figura B.15 e Figura B.16 são apresentados os gráficos dos dados correspondentes as curvas das primeiras 4 Frequências da viga vs. Posição da massa ao longo dos 31 nós da viga. A massa utilizada foi de 2 kg.

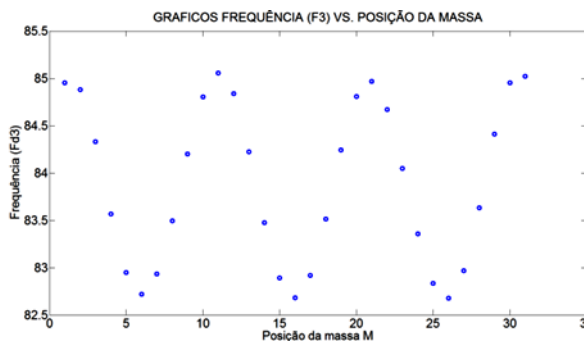


a) Frequência (F1) vs. Posição de massa.

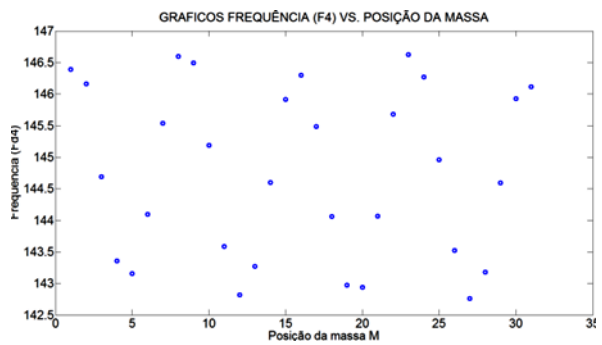


b) Frequência (F2) vs. Posição de massa.

Figura B.15- Gráficos Frequências vs. Posição de massa.



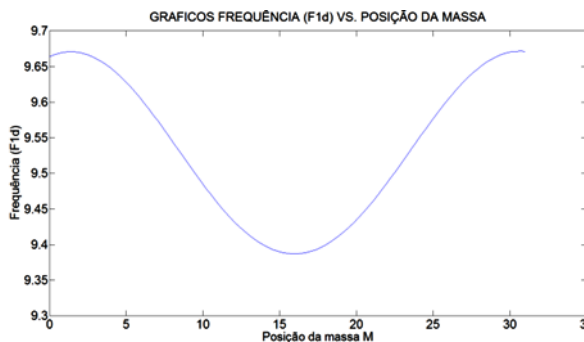
a) Frequência (F3) vs. Posição de massa.



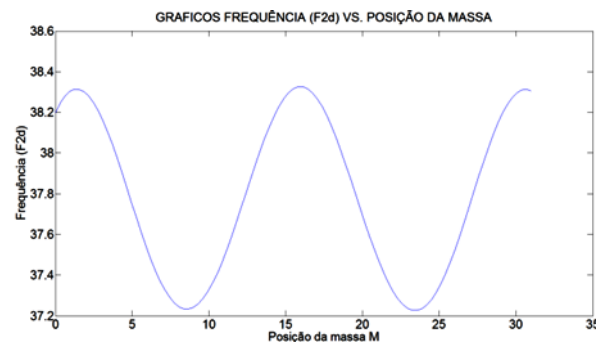
b) Frequência (F4) vs. Posição de massa.

Figura B.16- Gráficos das Frequências vs. Posição de massa.

Nas Figura B.17 e Figura B.18 são apresentadas as curvas interpoladas de Frequência vs. Posição da massa para os dados obtidos anteriormente.



a) Interpolação Frequência F1.



b) Interpolação Frequência F2.

Figura B.17 – Interpolação da curva pelo método Cubic Spline.

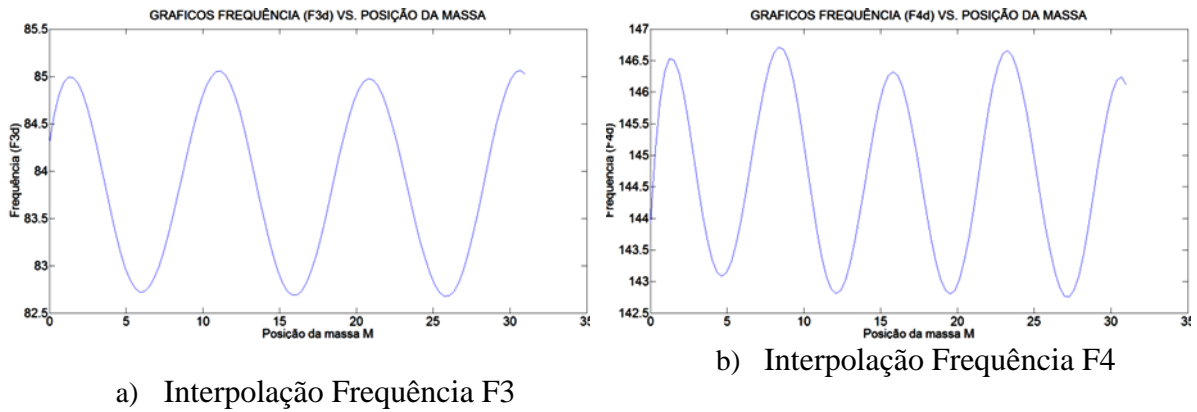


Figura B.18- Interpolação da curva pelo método Cubic Spline.

O método para identificação de danos proposto foi aplicado na curva Figura B.17a (Frequência fundamental).

Nas Figura B.19 a Figura B.21 são apresentados os resultados obtidos. Nos 5 gráficos é claramente visível a perturbação gerada pela presença do dano na região próxima ao nó 10 (1/3 do vão). Esses gráficos também apresentam perturbações nos extremos, isto, devido a descontinuidade geométrica e a presença do apoio.

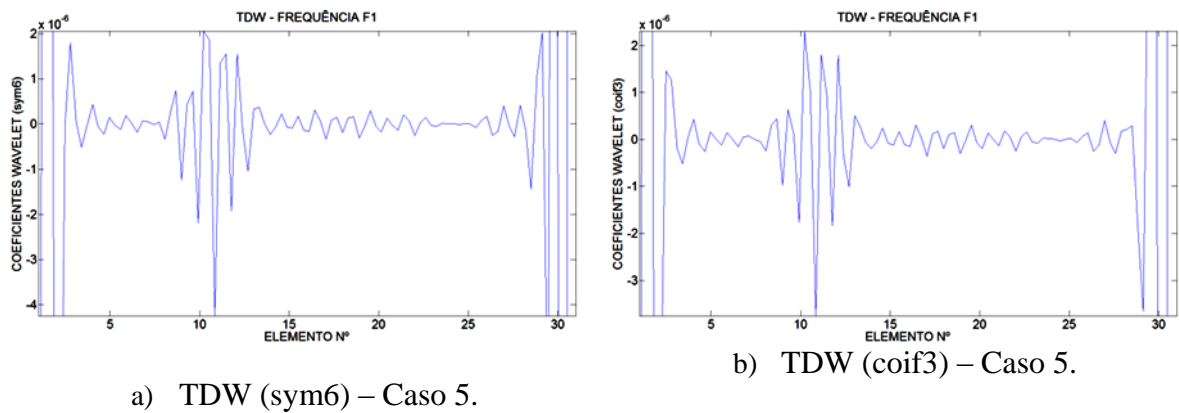
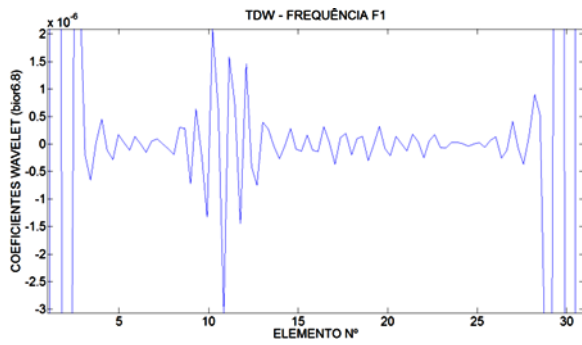
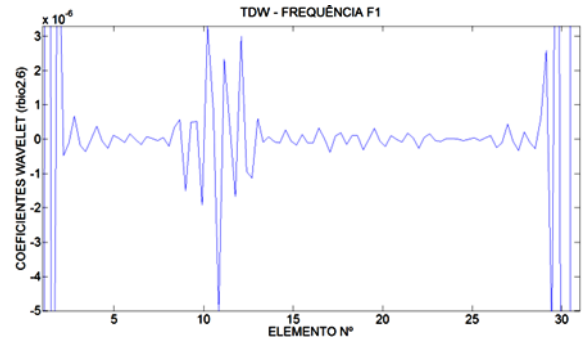


Figura B.19 - TDW Caso 5.



c) TDW (bior6.8) – Caso 5.



d) TDW (rbio2.6) – Caso 5.

Figura B.20 - TDW Caso 5.

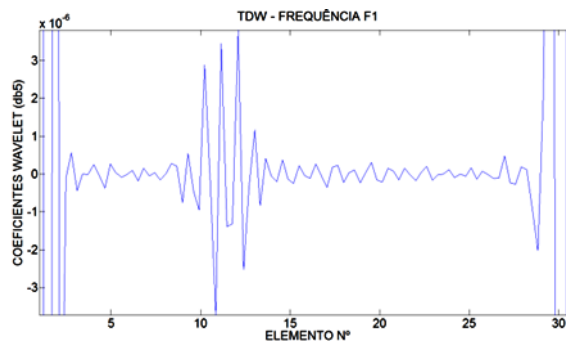
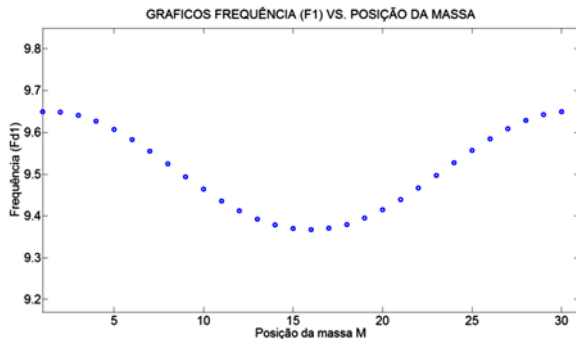


Figura B.21 - TDW (db5) – Caso 5.

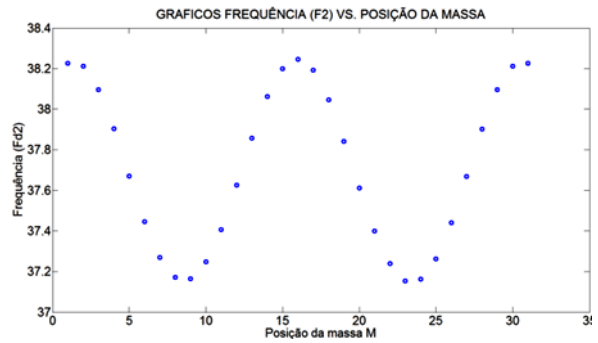
8.7.1.4 - Caso 6

O caso 6 é o correspondente ao dano localizado a 2 m (1/3 do vão), com um entalhe na mesa inferior e superior, causando uma diminuição da rigidez a flexão da viga de 35,84% aproximadamente.

Nas Figura B.22 e Figura B.23 são apresentados os gráficos dos dados correspondentes as curvas das primeiras 4 Frequências da viga vs. Posição da massa ao longo dos 31 nós da viga. A massa utilizada foi de 2k g.

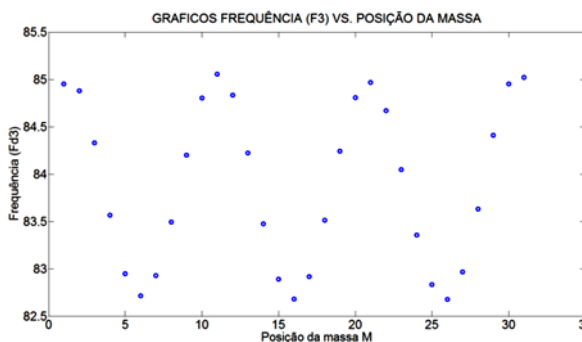


a) Frequência (F1) vs. Posição de massa.

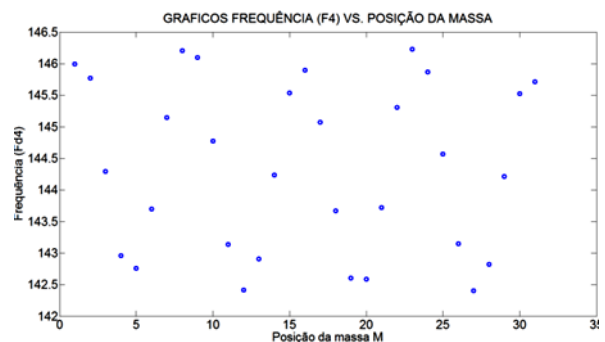


b) Frequência (F2) vs. Posição de massa.

Figura B.22- Gráficos Frequências vs. Posição de massa.



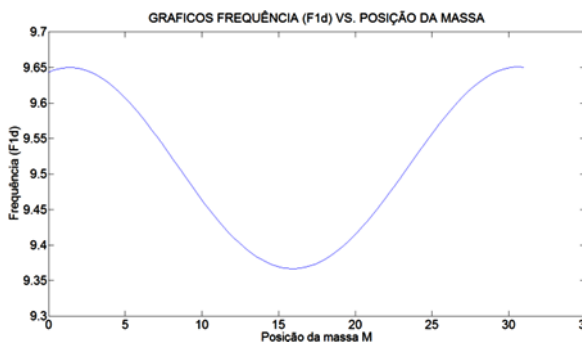
a) Frequência (F3) vs. Posição de massa.



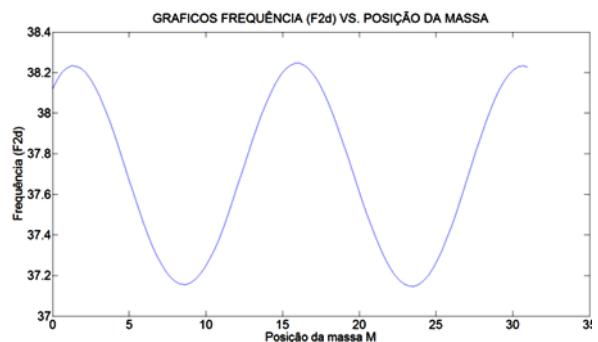
b) Frequência (F4) vs. Posição de massa.

Figura B.23- Gráficos das Frequências vs. Posição de massa.

Nas Figura B.24 e Figura B.25 são apresentados as curvas interpoladas de Frequência vs. Posição da massa para os dados obtidos anteriormente.



a) Interpolação Frequência F1.



b) Interpolação Frequência F2.

Figura B.24-Interpolação da curva pelo método Cubic Spline..

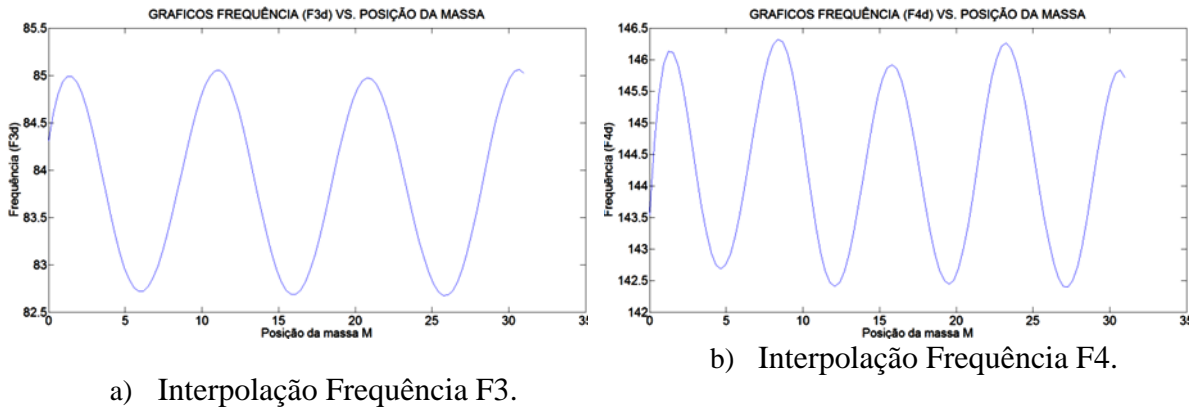


Figura B.25- Interpolação da curva pelo método Cubic Spline.

O método para identificação de danos proposto foi aplicado na curva Figura B.24a (Primeira frequência).

Nas Figura B.26 a Figura B.28 são apresentados os resultados obtidos. Nos 5 gráficos é claramente visível a perturbação gerada pela presença do dano na região próxima ao nó 10 (1/3 do vão).

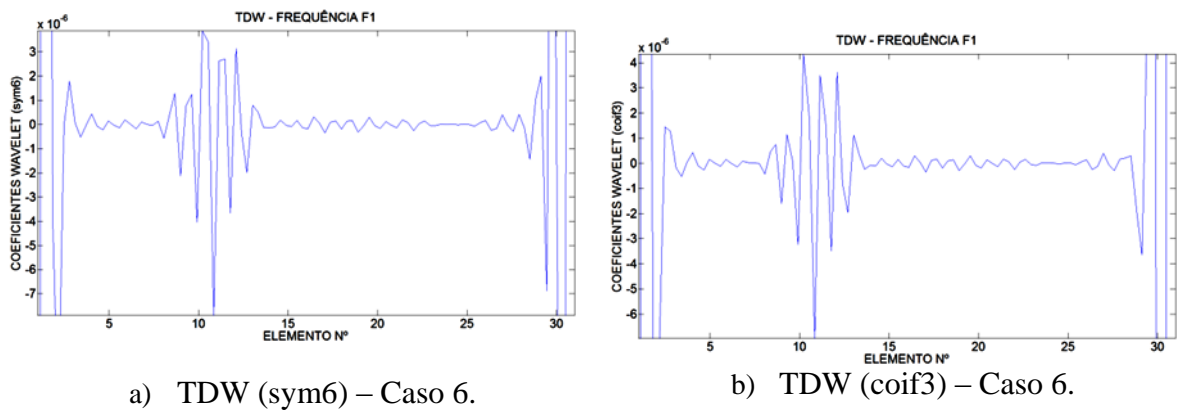


Figura B.26- TDW Caso6.

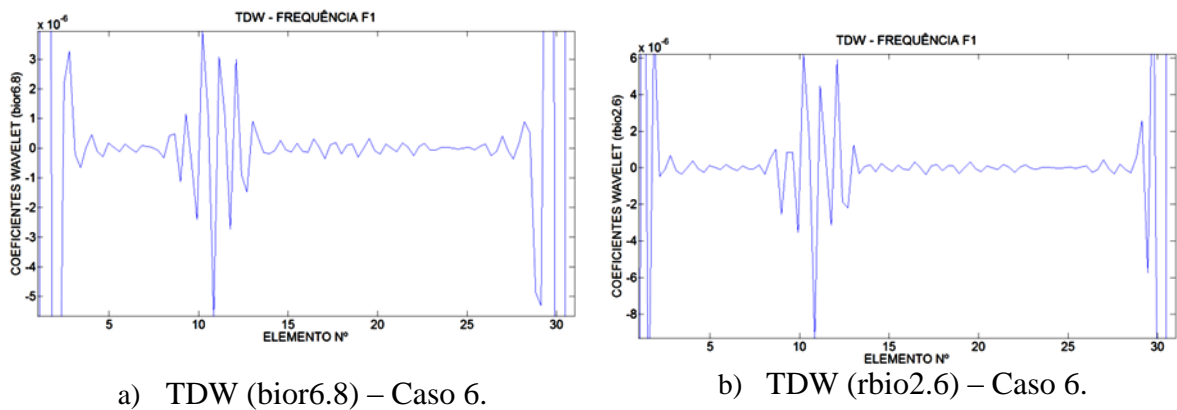


Figura B.27- TDW Caso6.

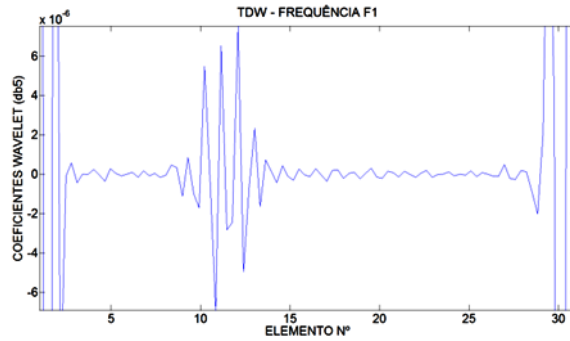
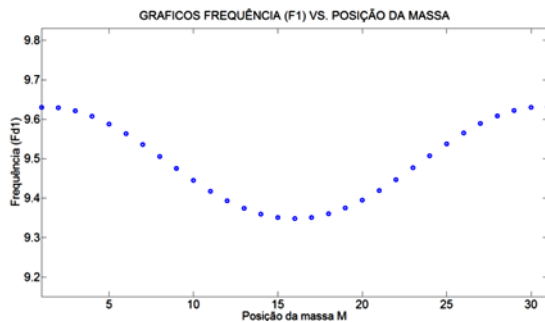


Figura B.28- TDW (db5) – Caso 6.

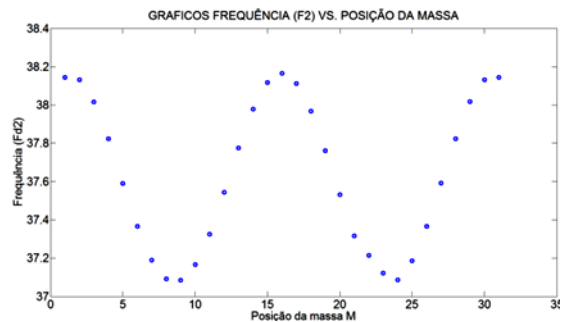
8.7.1.5 - Caso 7

O caso 7 é o correspondente aos danos localizados a 2 m e 4 m respectivamente, com um entalhe na mesa inferior causando uma diminuição da rigidez a flexão da viga de 35,84% e o segundo dano 17,97% respectivamente.

Nas Figura B.29 e Figura B.30 são apresentados os gráficos dos dados correspondentes as curvas das primeiras 4 Frequências da viga vs. Posição da massa ao longo dos 31 nós da viga. A massa utilizada foi de 2 kg.

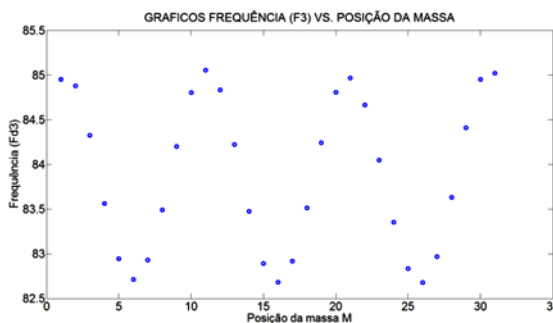


a) Frequência (F1) vs. Posição de massa.

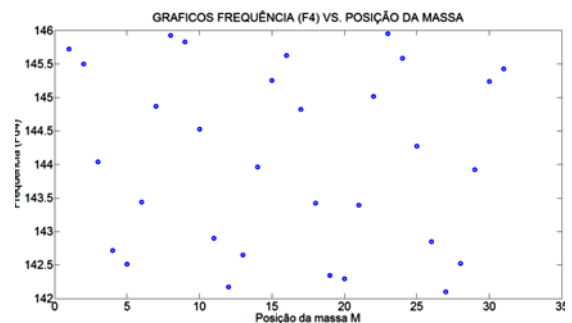


b) Frequência (F2) vs. Posição de massa.

Figura B.29- Gráficos Frequências vs. Posição de massa.



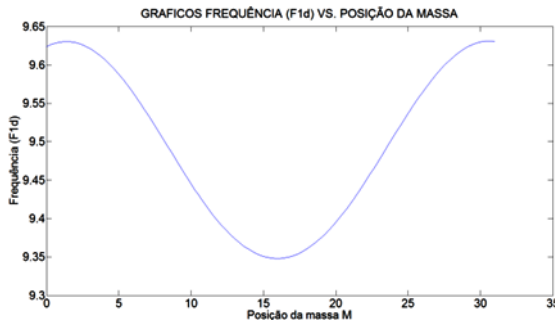
a) Frequência (F3) vs. Posição de massa.



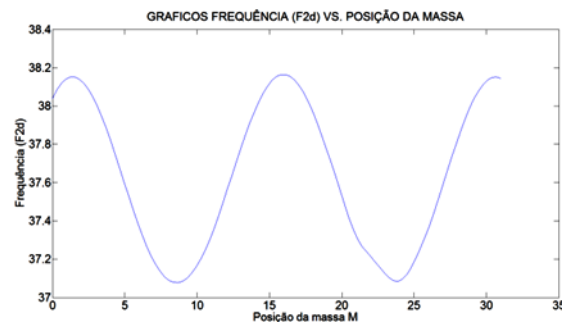
b) Frequência (F4) vs. Posição de massa.

Figura B.30 - Gráficos das Frequências vs. Posição de massa.

Nas Figura B.31 e Figura B.32 são apresentadas as curvas interpoladas da Frequência vs. Posição da massa para os dados obtidos anteriormente.

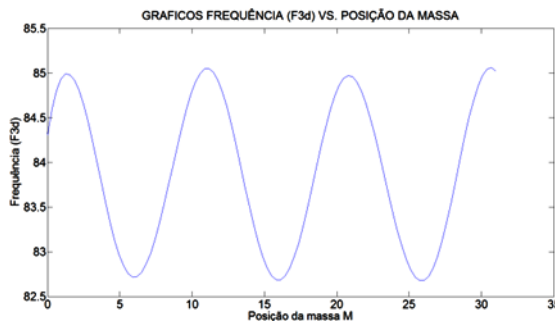


a) Interpolação Frequência F1.

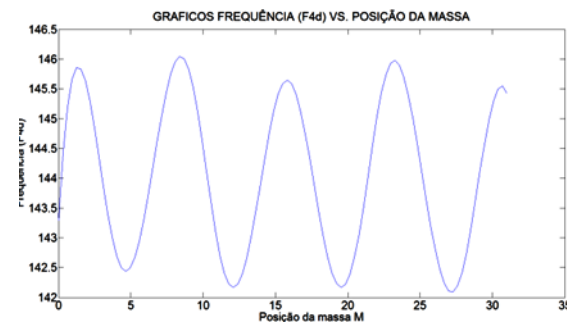


b) Interpolação Frequência F2.

Figura B.31-Interpolação da curva pelo método Cubic Spline..



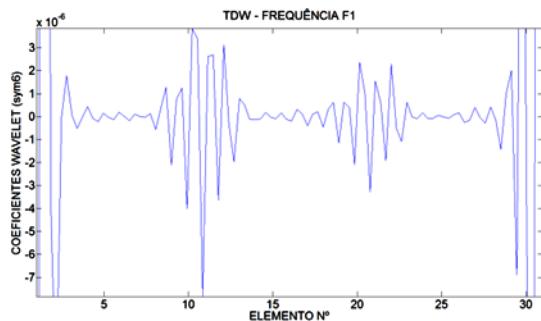
a) Interpolação Frequência F3



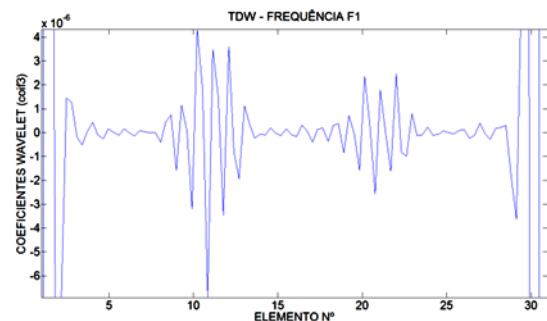
b) Interpolação Frequência F4

Figura B.32 – Interpolação da curva pelo método Cubic Spline.

Nas Figura B.33 a Figura B.35 são apresentados os resultados obtidos. Nos 5 gráficos é claramente visível a perturbação gerada pela presença do dano na região próxima ao nós 10 e 20.

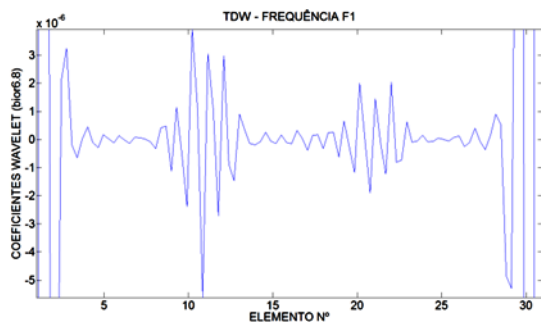


a) TDW (sym6) – Caso 7.

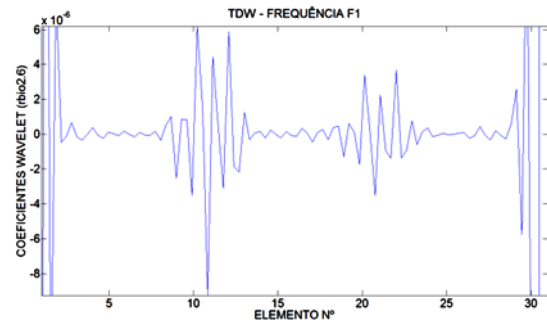


b) TDW (coif3) – Caso 7.

Figura B.33- TDW Caso 7.



c) TDW (bior6.8) – Caso 7.



d) TDW (rbio2.6) – Caso 7.

Figura B.34- TDW Caso 7.

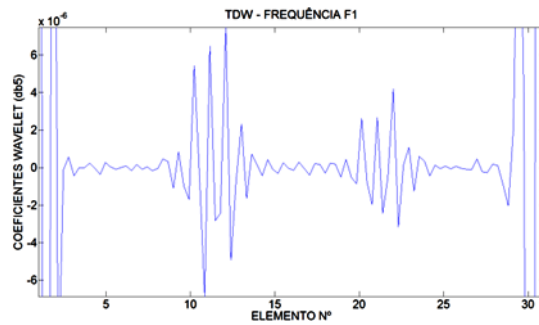
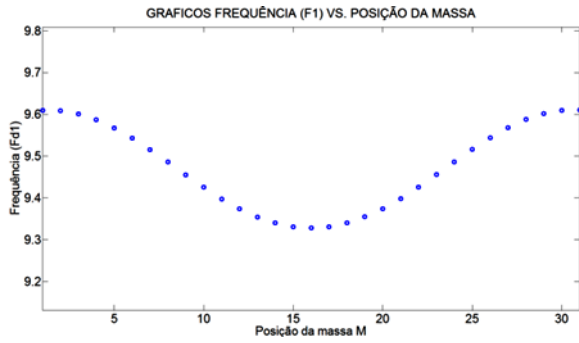


Figura B.35- TDW (db5) – Caso 7.

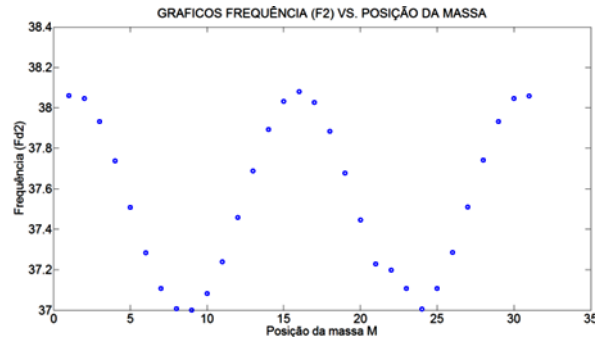
8.7.1.6 - Caso 8

O Caso 8 é o correspondente aos danos localizados a 2 m e 4 m respectivamente, com entalhes na mesa inferior e superior causando uma diminuição da rigidez a flexão da viga de 35,84%.

Nas Figura B.36 e Figura B.37 são apresentados os gráficos dos dados correspondentes as curvas das primeiras 4 Frequências da viga vs. Posição da massa ao longo dos 31 nós da viga. A massa utilizada foi de 2 kg.

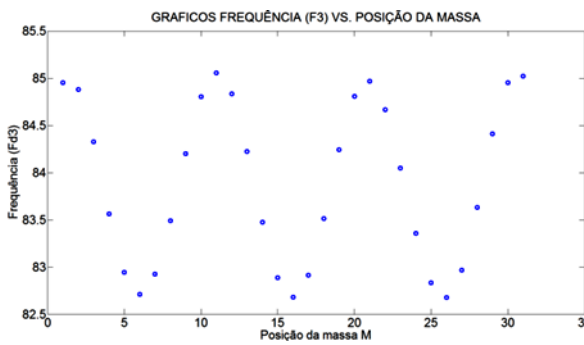


a) Frequência (F1) vs. Posição de massa.

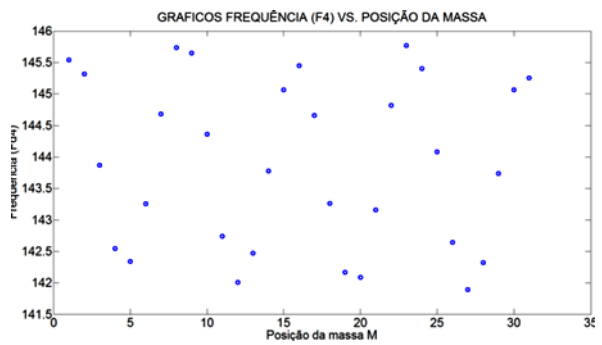


b) Frequência (F2) vs. Posição de massa.

Figura B.36- Gráficos Frequências vs. Posição de massa.



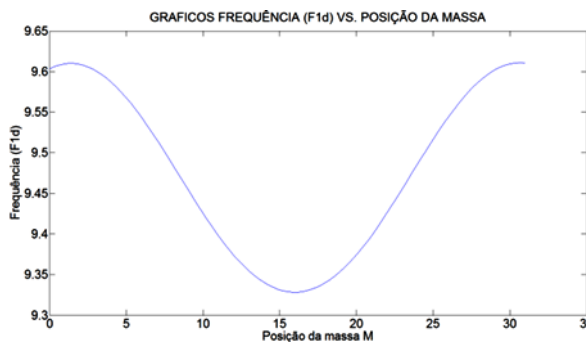
a) Frequência (F3) vs. Posição de massa.



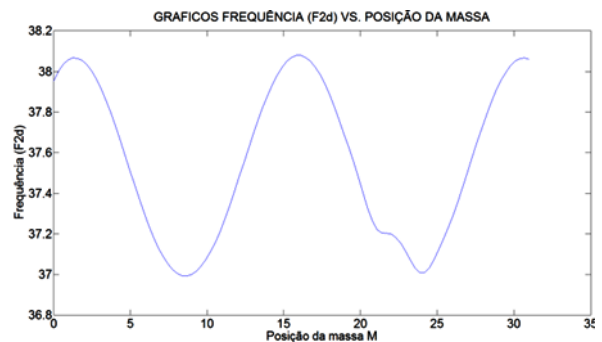
b) Frequência (F4) vs. Posição de massa.

Figura B.37- Gráficos das Frequências vs. Posição de massa.

Nas Figura B.38 e Figura B.39 são apresentadas as curvas interpoladas da Frequência vs. Posição da massa para os dados obtidos anteriormente.

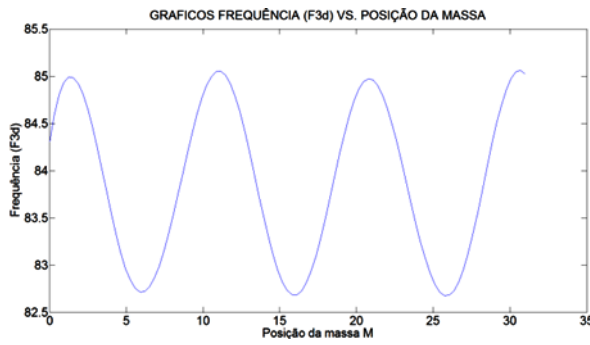


a) Interpolação Frequência F1.

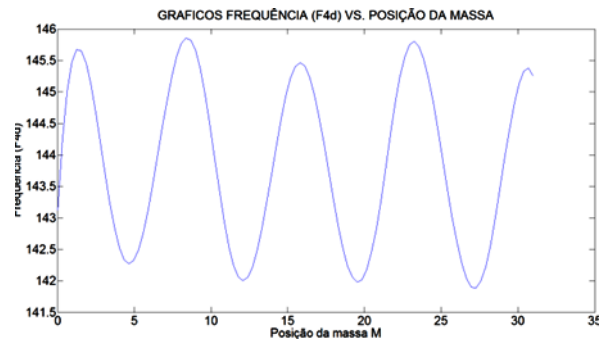


b) Interpolação Frequência F2.

Figura B.38 - Interpolação das curvas pelo método Cubic Spline.



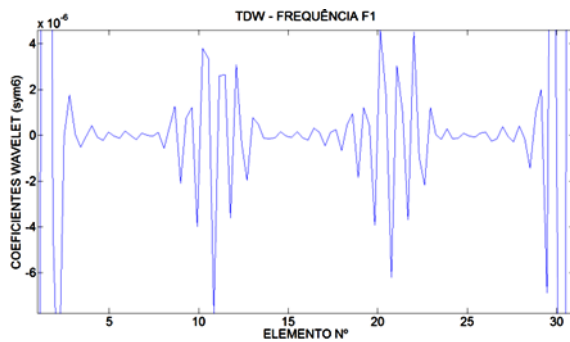
a) Interpolação Frequência F3.



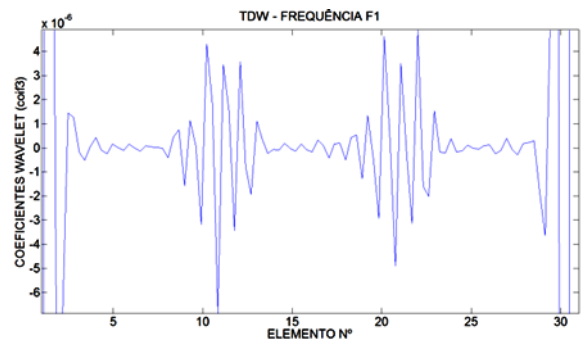
b) Interpolação Frequência F4.

Figura B.39 - Interpolação das curvas pelo método Cubic Spline.

Nas Figura B.40 a Figura B.42 são apresentados os resultados obtidos. Nos 5 gráficos é claramente visível a perturbação gerada pela presença dos danos nas regiões próximas aos nós 10 e 20.

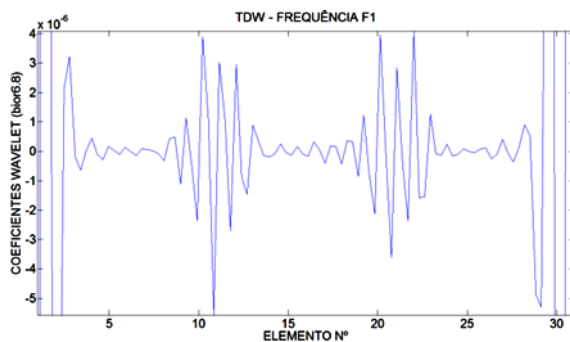


a) TDW (sym6) – Caso 8.

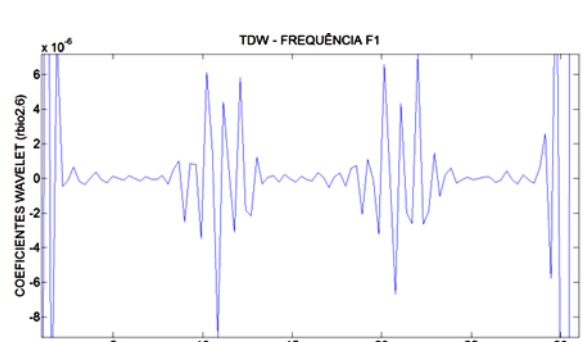


b) TDW (coif3) – Caso 8.

Figura B.40 - TDW Caso 8.



a) TDW (bior6.8) – Caso 8.



b) TDW (rbio2.6) – Caso 8.

Figura B.41 - TDW Caso 8.

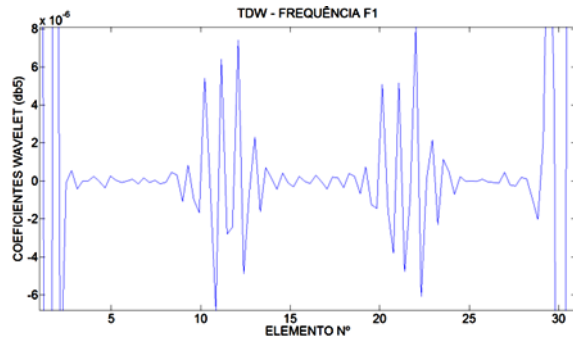


Figura B.42 - TDW (db5) – Caso 8.

**APÊNDICE C. - SCRIPT UTILIZADO PARA GERAÇÃO DOS
MODELOS NUMÉRICOS - ANÁLISE DINAMICA DAS VIGAS
COM O ELEMENTO SOLID45.**

```
FINISH
/CLEAR
/PREP7
/TITLE, VIGA METÁLICA INTACTA- PERFIL I-
Ec = 2e11
vc = 0.3
dc = 7800
b=0.10
M=2
Massadd=M/2
Irot=0.025
K,1,0,0,0
K,2,0.0676,0,0
K,3,0.0676,0.0074,0
K,4,0.036215,0.0074,0
K,5,0.036215,0.0942,0
K,6,0.0676,0.0942,0
K,7,0.0676,0.1016,0
K,8,0,0.1016,0
K,9,0,0.0942,0
K,10,0.0313185,0.0942,0
K,11,0.031385,0.0074,0
K,12,0,0.0074,0

FLST,2,12,3
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,7
FITEM,2,8
FITEM,2,9
FITEM,2,10
FITEM,2,11
FITEM,2,12
A,P51X

FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
VEXT,P51X, , ,0,0,6,,,
```

ET,1,SOLID45
ET,2,MASS21
KEYOPT,2,1,0
KEYOPT,2,2,0
KEYOPT,2,3,0
MP,EX,1,Ec
R,1,0.00743
R,2,0.00483
R,3,Massadd,Massadd,Massadd,Irot,Irot,Irot

FLST,5,12,4,ORDE,2
FITEM,5,25
FITEM,5,-36
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,0.005, , , , , ,1

FLST,5,8,4,ORDE,8
FITEM,5,3
FITEM,5,5
FITEM,5,9
FITEM,5,11
FITEM,5,15
FITEM,5,17
FITEM,5,21
FITEM,5,23
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,7, , , ,1
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,1
FITEM,5,7
FITEM,5,13
FITEM,5,19
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,15, , , , ,1
FLST,5,8,4,ORDE,8
FITEM,5,2
FITEM,5,6
FITEM,5,8
FITEM,5,12

FITEM,5,14
FITEM,5,18
FITEM,5,20
FITEM,5,24
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,1, , , ,1

CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VSWEEP,_Y1

CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

FLST,2,16,1,ORDE,4
FITEM,2,275
FITEM,2,-288
FITEM,2,16894
FITEM,2,18094
/GO
D,P51X, ,0, , , ,UX,UY,UZ, , ,

FLST,2,16,1,ORDE,4
FITEM,2,16655
FITEM,2,-16668
FITEM,2,18064
FITEM,2,19264
/GO
D,P51X, ,0, , , ,UX,UY, , , ,

FLST,5,4,2,ORDE,4
FITEM,5,45001
FITEM,5,43808
FITEM,5,42601
FITEM,5,41401

ESEL,U, , ,P51X

ACEL,0,9.8,0,

cont=0

```

*DO,R,0,31,1
!/PREP7

*IF,R,EQ,1,THEN
type,2
real,3
mat,1
e,31      !NÓ 1
e,32

*ELSEIF,R,EQ,31
type,2
real,3
mat,1
e,64871
e,64872

*ELSEIF,R,LT,31
type,2
real,3
mat,1
e,48631+(R-2)*560
e,48632+(R-2)*560

*ENDIF

FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,2
!*
!*
MODOPT,LANB,30
EQLV,SPAR
MXPAND,0, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
MODOPT,LANB,30,0,0, ,OFF
/STATUS,SOLU
SOLVE

FINISH

/POST26
/FORMAT,,F,,7
FINISH

/POST1

```

```
INRES,BASIC
FILE,'ARQUIVO','rst',''
SET,LAST
FINISH
```

```
/POST26
FILE,'ARQUIVO','rst',''
/UI,COLL,1
NUMVAR,200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
FILLDATA,191,,1,1
REALVAR,191,191
SOLU,2,RESEIG,,RESEIG_2
STORE,MERGE
```

```
!*CREATE,scratch,gui
*DEL,_P26_EXPORT
*DIM,_P26_EXPORT,TABLE,30,1
VGET,_P26_EXPORT(1,0),1
!VGET,_P26_EXPORT(1,1),2
/OUTPUT,'Frequencias_add_mass_no%R%','txt',''
!*****
*VWRITE,_P26_EXPORT(1,0)
%G
/OUTPUT,TERM
!*END
!/INPUT,scratch,gui
! End of time history save
FINISH
```

```
/PREP7
EDELE,45601+cont
EDELE,45602+cont
cont=cont+2
!FINISH
*ENDDO
```

APÊNDICE D. – VERIFICAÇÃO CARGA ESTÁTICA MÁXIMA DA VIGA.

Verificação carga máxima da viga

É necessário conhecer o limite de carga que a viga intacta pode suportar para ter uma ideia da magnitude da massa adicional que pode ser aplicada na viga danificada. Isto com o propósito de estabelecer um limite na escolha da massa que será aplicada nas vigas.

Na seguinte seção é apresentado o cálculo da verificação da carga máxima que pode ser aplicada à viga intacta (sem dano), para evitar a flambagem local.

Verificação da seção quanto à ocorrência de flambagem local.

Foi feita a verificação e o cálculo da carga estática máxima que pode ser aplicada na viga sem correr o risco de provocar flambagem na estrutura. O objetivo desta verificação é ter uma noção do valor de massa adicional máximo que podera ser adicionado na viga.

De acordo com a norma norte-americana (AISC) e brasileira (NBR 8800), as seções das vigas podem ser divididas em três classes, conforme a influência da flambagem local sobre os respectivos momentos fletores resistentes (M_{res}): Seção compacta, semi compacta e esbelta. Apresenta-se a seguir o cálculo do momento resistente de cálculo e conseqüentemente a máxima carga concentrada no meio do vão que a viga pode receber para que atenda aos estados limites exigidos pela NBR8800:2008 (Pfeil, 2009).

Cálculo do módulo plástico (Z_x):

$$Z_x = b_f t_f (h - t_f) + \frac{t_w}{4} (h - 2t_f)^2 \quad (D.1)$$

$$Z_x = 6,76 * 0,74(10,16 - 0,74) + \frac{0,483}{4} (10,16 - 2 * 0,74)^2 = 56,220 \text{ cm}^3 \quad (D.2)$$

De acordo com as características e propriedades geométricas da seção da viga utilizada, mostradas na Tabela 4.2, a verificação por flambagem local da mesa é a seguinte:

-Flambagem local da mesa (FLM).

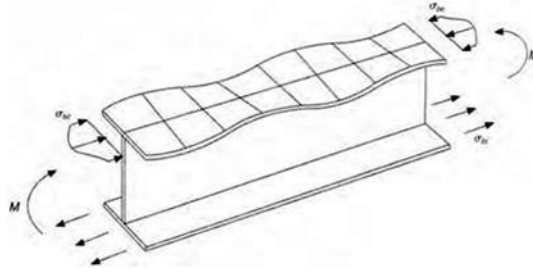


Figura D.1- Flambagem local da mesa (Pfeil, 2009).

λ_b é definida como a esbeltez de placa. Onde b_f largura da mesa, t_f , é a espessura da mesa.

$$\lambda_b = \frac{1}{2} * \frac{b_f}{t_f} = \frac{1}{2} * \frac{6,76}{0,74} = 4,567 \quad (D.3)$$

$$\lambda_p = 0,38 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 10,74 \quad (D.4)$$

$\lambda_b \leq \lambda_p$; A seção é compacta. Para uma seção compacta o momento nominal M_n é definido como:

$$M_n = Z_x f_y \quad (D.5)$$

$$M_n = 56,220 * 25 = 1405,5 \text{ Kn cm} = 14,04 \text{ [kNm]} \quad (D.6)$$

O momento de serviço em função da carga P , e tendo em consideração o peso próprio da viga ($q = 0,1117 \text{ kN/m}$) é mostrado na Equação (D.7):

$$M_s = \frac{PL}{4} + \frac{qL^2}{8} = \frac{6P}{4} + \frac{0,1117 * 6^2}{8} = 1,50P + 0,50265 \text{ [kNm]} \quad (D.7)$$

$$M_s = M_n \quad (D.8)$$

$$1,50P + 0,50265 = 14,04 \quad (D.9)$$

$$P_{max} = 9,0249 \text{ kN} = 9024,9\text{N} \cong 903 \text{ Kg} \quad (\text{D.10})$$

- Flambagem local da alma (FLA)



Figura D.2- Flambagem local da alma (Pfeil, 2009)

$$\lambda_b = \frac{h_w}{t_w} = \frac{10,16 - 2 * 0,74}{0,483} = 17,97 \quad (\text{D.11})$$

$$\lambda_p = D \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 106,34 \quad (\text{D.12})$$

$\lambda_b \leq \lambda_p$; A seção é compacta. Para uma seção compacta, o momento nominal M_n é definido como:

$$M_n = Z_x f_y \quad (\text{D.13})$$

$$M_n = 56,220 * 25 = 1405,5 \text{ Kn cm} = 14,04 \text{ [kN * m]} \quad (\text{D.14})$$

$$M_s = \frac{PL}{4} + \frac{qL^2}{8} = \frac{P * 6}{4} + \frac{0,1117 * 6^2}{8} = 1,50P + 0,50265 \text{ [kN * m]} \quad (\text{D.15})$$

$$M_s = M_n \quad (\text{D.16})$$

$$1,50P + 0,50265 = 14,04 \quad (\text{D.17})$$

$$P_{max} = 9,0249 \text{ kN} = 9024,9\text{N} \cong 903 \text{ Kg} \quad (\text{D.18})$$

-Flambagem lateral por flexo-torção (FLT)

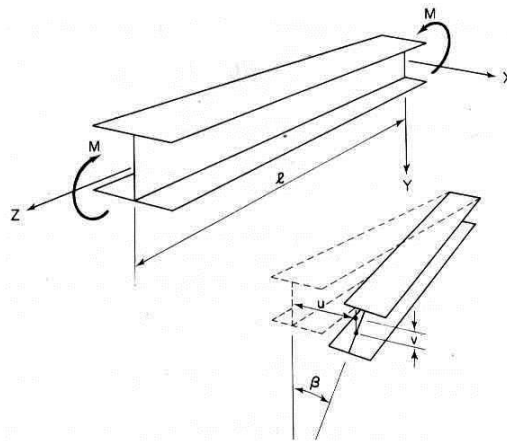


Figura D.3- Flambagem lateral por flexo-torção (Pfeil, 2009)

$$\lambda = \frac{l_b}{r_y} = \frac{600}{1,48} = 405,405 \quad (\text{D.19})$$

$r_y=1.48$ cm; raio de giração da seção intacta em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão.

$l_b= 6 \text{ m}= 600$ cm; distância entre duas seções, contidas a flambagem lateral com torção (comprimento destravado).

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 49,780 \quad (\text{D.20})$$

$\lambda > \lambda_p$; l_{br} tem que ser definido:

$$l_{br} = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (\text{D.21})$$

C_w : constante do empenamento da seção intacta.

I_y : momento de inércia da seção em relação ao eixo da seção intacta, que passa pelo médio da alma.

d : altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão.

t_f : espessura da mesa.

Para um perfil I ou H duplamente simétrico, as constantes J e C_w são expressas por:

$$J = \frac{1}{3}(2b_f t_f^3 + h_0 t_w^3) = \frac{1}{3}(2 * 6,76 * 0,74^3 + (10,16 - 2 * 0,74) * 0,483^3) = 2,152 \text{ cm}^3 \quad (\text{D.22})$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_x}{EJ} = \frac{(25 - 0,3 * 25) 49,7}{20000 * 2,152} = 0,0202 \quad (\text{D.23})$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} = \frac{31,7 (10,16 - 0,74)^2}{4} = 703,23 \text{ cm}^6 \quad (\text{D.24})$$

$$l_{br} = \frac{1,38 \sqrt{31,7 * 2,152}}{1,48 * 2,152 * 0,0202} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 * 703,23 * 0,0202^2}{31,7}}} = 177,1 \quad (\text{D.25})$$

$$l_b > l_{br} \quad \therefore \text{Viga longa } M_n = M_{cr} \quad (\text{D.26})$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{l_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + \frac{0,039 J l_b^2}{C_w}\right)} \quad (\text{D.27})$$

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \quad Rm \leq 3,0 ; Rm = 1 \quad (\text{D.28})$$

$$M_A \left(\frac{l}{4}\right) = 0,3769 + 0,75P ; \quad M_B \left(\frac{l}{2}\right) = 0,50265 + 1,50P ; [kN * m] \quad (\text{D.29})$$

$$M_C \left(\frac{3l}{4}\right) = 0,3769 + 0,75P ; [kN * m] \quad (\text{D.30})$$

Substituindo os valores dos momentos dados nas Equações (D.29) e (D.30), temos o valor para C_b :

$$C_b = \frac{12,5(1,50P + 0,50265)}{2,5(1,50P + 0,50265) + 3(0,75P + 0,3769) + 4(1,50P + 0,50265) + 3(0,75P + 0,3769)} \quad (\text{D.31})$$

O momento de serviço M_s :

$q = 0,1117 \text{ kN/cm}$; peso próprio da viga.

$$M_s = \frac{PL}{4} + \frac{qL^2}{8} = \frac{P * 600}{4} + \frac{0,1117 * 600^2}{8} = 1,50P + 0,50265 \text{ [kN * m]} \quad (\text{D.32})$$

Igualando a Equação (D.27) com a Equação (D.32); isolando P , temos o seguinte resultado:

$$M_s = M_{cr} \quad (\text{D.33})$$

$$1,50P + 0,50265 = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{l_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + \frac{0,039 J l_b^2}{C_w} \right)} \quad (\text{D.34})$$

Isolando a variável P :

$$P_{max} = 4,3735 \text{ Kn} = 4373 \text{ N} \cong 438 \text{ Kg} \quad (\text{D.35})$$

Resumo:

Tabela D.1- Carga máxima que pode ser aplicada na viga intacta.

FLA	$P_{max} = 903 \text{ kg}$
FLM	$P_{max} = 903 \text{ kg}$
FLT	$P_{max} = 438 \text{ kg} = 4373 \text{ N}$

A carga máxima que pode ser aplicada à **viga intacta (sem dano)** no meio do vão é de **438kg** para a viga não sofrer flambagem local.

É importante ressaltar que o cálculo do carregamento estático máximo, foi desenvolvido com os dados da viga intacta, porque, no problema inverso de identificação, não se conhecem nem a localização e nem o tamanho do dano.