



JOÃO PEDRO GOMES FRANCO DE MEDEIROS
Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

DETEÇÃO DE DANO ESTRUTURAL EM
VIGAS UTILIZANDO AS REPOSTAS
DINÂMICAS MEDIDAS COM
ACELERÓMETROS E EXTENSÓMETROS

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Universidade NOVA de Lisboa
Abril, 2022



DETEÇÃO DE DANO ESTRUTURAL EM VIGAS UTILIZANDO AS RESPOSTAS DINÂMICAS MEDIDAS COM ACELERÓMETROS E EXTENSÓMETROS

JOÃO PEDRO GOMES FRANCO DE MEDEIROS

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Orientadora: Raquel Albuquerque Soares Brás de Almeida,
Professora auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientadores: Hugo Filipe Diniz Policarpo,
Professor Auxiliar, Escola Naval Marinha Portuguesa

Júri:

Presidente: João Mário Burguete Botelho Cardoso,
Professor auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Tiago Alexandre Narciso da Silva,
Professor auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Orientador: Raquel Albuquerque Soares Brás de Almeida,
Professora auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Deteção de dano estrutural em vigas utilizando as respostas dinâmicas medidas com acelerómetros e extensómetros

Copyright © João Pedro Gomes Franco de Medeiros, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, à professora Raquel Almeida e ao professor Hugo Policarpo pela dedicação, pelo apoio e motivação que demonstraram ao longo deste trabalho, mesmo durante esta difícil fase pandémica que enfrentamos.

À minha família, especialmente aos meus pais pelo apoio demonstrado durante todos estes anos, pois sem eles nada disto seria possível. Um obrigado muito grande pela educação, pela confiança e pelas possibilidades que me ofereceram e que me permitiram seguir o meu percurso académico.

Aos meus avós, sendo que alguns deles infelizmente não tiveram a oportunidade de me ver formado, mas pelo menos tiveram a oportunidade de estar presentes no início deste percurso académico. Sei com toda a certeza que ficariam muito orgulhosos de mim.

Aos meus inicialmente colegas de curso, mas agora amigos que com certeza levarei para a vida, por todos os momentos passados ao longo destes anos, que com certeza tornaram este percurso muito mais fácil e agradável. Um obrigado especial ao Jorge Bento e ao Miguel Batista.

Ao João Berardo pela sua disponibilidade incansável ao longo deste trabalho, ajudando-me a ultrapassar diversas dificuldades.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial.

Resumo

O aumento da dimensão e da complexidade das estruturas tem suscitado um crescente interesse na área de detecção de dano. Com isto, têm-se vindo a desenvolver novas metodologias que permitam detetar o dano o mais precocemente possível, permitindo evitar catástrofes.

Este trabalho tem como objetivo detetar, localizar e quantificar relativamente o dano, utilizando respostas dinâmicas como as funções de resposta em frequência (FRFs), as Strain FRFs (SFRFs) e as transmissibilidades. O interesse de utilizar as SFRFs e as transmissibilidades tem por base as vantagens que estas apresentam quando comparadas com as FRFs. As SFRFs são obtidas através da utilização de extensómetros em vez de acelerómetros, que apresentam um custo elevado e modificam a massa e rigidez local. As transmissibilidades apresentam a vantagem de não ser necessário conhecer a força aplicada.

Foi desenvolvida uma metodologia para a detecção de dano, que tem por base a utilização de diferentes indicadores para correlacionar as respostas dinâmicas de uma mesma estrutura intacta e danificada. Para testar a sua aplicabilidade, foi inicialmente realizada uma simulação numérica de uma viga de apoio livre-livre, na qual foram introduzidos danos por redução da espessura de um elemento. Foi também realizado um trabalho experimental, no qual apenas foram analisadas as FRFs de translação e as transmissibilidades obtidas em termos de translação.

Estudou-se a influência que fatores como a severidade do dano, a gama de frequências e o ruído tinham na correta detecção e localização do dano.

Palavras chave: Detecção e localização de dano, Funções de resposta em frequência, Strain FRF, Transmissibilidades, Ruído

Abstract

The increase in the size and complexity of structures has sparked a growing interest in the area of damage detection. With this, new methodologies have been developed that allow for the detection of damage as early as possible, making it feasible to avoid catastrophes.

The aim of this work is to detect, locate and relatively quantify the damage, using dynamic responses such as Frequency response functions (FRFs), Strain FRFs and transmissibilities. The interest in using SFRFs and transmissibilities is based on the advantages they present when compared to FRFs. SFRFs are obtained by using strain gauges instead of accelerometers, which have a high cost and modify local mass and stiffness. Transmissibilities have the advantage of not being necessary to know the applied force.

A methodology for damage detection was developed, which is based on the use of different indicators to correlate the dynamic responses of the same intact and damaged structure. To test its applicability, a numerical simulation of a free-standing beam was initially performed, in which damages were introduced by reducing the thickness of an element. An experimental work was also carried out, in which only the translational FRFs and the transmissibilities obtained in terms of translation were analyzed.

It was also studied the influence that factors such as percentage of damage, frequency range and noise had on the correct detection and location of damage.

Keywords: Damage detection and location, Frequency Response Functions, Strain FRF, Transmissibilities, Noise

Índice

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract.....	xi
Nomenclatura.....	xxi
Siglas e Acrónimos.....	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Estrutura da dissertação.....	2
2 Revisão bibliográfica.....	5
2.1 Introdução	5
2.2 Evolução e classificação dos métodos de detecção de dano que utilizam vibrações mecânicas.....	7
2.3 Métodos tradicionais.....	8
2.3.1 Frequências naturais	8
2.3.2 Modos de vibração	10
2.3.3 Funções de resposta em frequência	15
2.3.4 Strain FRFs.....	20
2.3.5 Transmissibilidade	25
2.4 Métodos modernos	26
2.4.1 Wavelet Analysis.....	27
2.4.2 Redes Neurais Artificiais	27
2.4.3 Algoritmos Genéticos	27
3 Fundamentos teóricos.....	29
3.1 Equação de Equilíbrio.....	29
3.2 Strain FRFs	30
3.3 Conceito de Transmissibilidade.....	33
3.4 Amortecimento.....	34
3.5 Indicadores de detecção de dano.....	35
3.6 Método dos elementos finitos.....	36
4 Metodologia.....	37

4.1 Metodologia numérica.....	37
4.1.1 Aplicação do Método dos elementos finitos.....	37
4.1.2 Implementação do dano.....	39
4.1.3 Propriedades modais da estrutura.....	42
4.1.4 Escolha da malha.....	43
4.1.5 Metodologia aplicada.....	44
4.1.6 Implementação do ruído.....	51
4.2 Medição experimental das FRFs.....	51
5 Resultados numéricos.....	55
5.1 Análise dos resultados utilizando como input as FRFs e SFRs.....	55
5.1.1 Eficácia dos indicadores.....	55
5.1.2 Gama de frequências.....	59
5.1.3 Percentagem de dano.....	66
5.1.4 Ruído.....	68
5.2 Análise dos resultados utilizando como input as Transmissibilidades.....	73
5.2.1 Eficácia dos indicadores.....	74
5.2.2 Gama de frequências.....	75
5.2.3 Percentagem de dano.....	78
5.2.4 Ruído.....	81
6 Resultados experimentais.....	85
6.1 Análise de resultados.....	86
7 Conclusão.....	91
7.1 Trabalhos futuros.....	93
8 Bibliografia.....	95
9 Anexos.....	99
Anexo 1.....	99
Anexo 2.....	100
Anexo 3.....	101
Anexo 4.....	103
Anexo 5.....	105
Anexo 6.....	107
Anexo 7.....	109
Anexo 8.....	115
Anexo 9.....	121

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Acidente da plataforma Alexander Kielland.....	6
Figura 3.1 - Comportamento do sistema para os diferentes tipos de amortecimento [59]	35
Figura 4.1 - Modelo da viga	37
Figura 4.2 - Deslocamentos generalizados [62].....	39
Figura 4.3 - Forças generalizadas [62]	39
Figura 4.4 - Demonstração da implementação do dano	40
Figura 4.5 - Segundo momento de área de uma secção retangular.....	40
Figura 4.6 - Figura representativa da influência da redução da espessura sob os eixos que passam no C.M.....	41
Figura 4.7 - Modos de flexão da viga.....	43
Figura 4.8 - Malha refinada.....	44
Figura 4.9 - Malha escolhida	44
Figura 4.10 - Esquema da metodologia referente à localização de dano por meio de FRFs e SFRFs	47
Figura 4.11 - Esquema da metodologia referente à localização do dano com a utilização das transmissibilidades	50
Figura 4.12 - Modelo da viga experimental	52
Figura 4.13 - Montagem experimental	52
Figura 4.14 - Procedimento experimental.....	53
Figura 4.15 - Introdução do dano na viga experimental.....	54
Figura 5.1 - Representação dos diferentes casos de dano.....	56
Figura 5.2 - Exemplo para o caso de dano D4	57
Figura 5.3 - Exemplo para o caso de dano D1	57
Figura 5.4 - Gráfico relativo ao caso D3 para a malha com 1 mm.....	59
Figura 5.5 - Estudo do caso de dano D5 utilizando o indicador Razão e as extensões para quatro gamas de frequência em estudo	61
Figura 5.6 - Estudo do caso de dano D5 utilizando o indicador Razão e as rotações para quatro gamas de frequência em estudo	61
Figura 5.7 - Estudo do caso de dano D5 utilizando o indicador Razão e as translações para quatro gamas de frequência em estudo	62
Figura 5.8 - Estudo do caso de dano D2 utilizando o indicador Erro e as translações para quatro gamas de frequência em estudo	63
Figura 5.9 - Estudo do caso de dano D2 utilizando o indicador Erro e as rotações para quatro gamas de frequência em estudo	63
Figura 5.10 - Estudo do caso de dano D2 utilizando o indicador Erro e as extensões para quatro gamas de frequência em estudo	64
Figura 5.11 - Estudo do caso de dano D1 utilizando o indicador Coe e as translações para quatro gamas de frequência em estudo	65
Figura 5.12 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as extensões para diferentes reduções de espessura e o indicador razão.....	67
Figura 5.13 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as rotações para diferentes reduções de espessura e o indicador Razão.....	67

Figura 5.14 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as translações para diferentes reduções de espessura e o indicador Razão.....	68
Figura 5.15 - Gráficos correspondentes ao caso de dano D6 para um ruído de 0.5%.....	70
Figura 5.16 - Gráficos correspondentes ao caso de dano D6 para um ruído de 1%.....	70
Figura 5.17 - Gráficos correspondentes ao caso de dano D6 para um ruído de 2%.....	70
Figura 5.18 - Estudo do caso de dano D8 utilizando o indicador Razão e as extensões para quatro gamas de frequência em estudo	76
Figura 5.19 - Estudo do caso de dano D6 utilizando o indicador Razão e as rotações para quatro gamas de frequência em estudo	76
Figura 5.20 - Estudo do caso de dano D6 utilizando o indicador Razão e as translações para quatro gamas de frequência em estudo	77
Figura 5.21 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as translações para diferentes reduções de espessura e o indicador Razão.....	79
Figura 5.22 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as extensões para diferentes reduções de espessura e o indicador Razão.....	80
Figura 5.23 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as rotações para diferentes reduções de espessura e o indicador Razão.....	80
Figura 6.1 - Representação dos diferentes casos de dano.....	85
Figura 6.2 - FRFs experimentais H1,2 com e sem dano	86
Figura 6.3 - FRFs experimentais H2,2 com e sem dano	87
Figura 6.4 - Representação gráfica do caso de dano 6 utilizando as FRFs de translação e as transmissibilidades de translação	87
Figura 6.5 - Gráfico correspondente ao caso de dano D1, utilizando as FRFs de translação e o indicador Razão.....	88
Figura 6.6 - Gráfico correspondente ao caso de dano D2, utilizando as FRFs de translação e o indicador Razão.....	88
Figura 6.7 - Gráfico correspondente ao caso de dano D3, utilizando as FRFs de translação e o indicador Razão.....	89
Figura 6.8 - Gráfico correspondente ao caso de dano D4, utilizando as FRFs de translação e o indicador Razão.....	89
Figura 6.9 - Gráfico correspondente ao caso de dano D5, utilizando as FRFs de translação e o indicador Razão.....	90
Figura 9.1 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Razão para um dano de 10%	102
Figura 9.2 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Erro para um dano de 10%	104
Figura 9.3 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Coe para um dano de 10%	106
Figura 9.4 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador CSF para um dano de 10%	108
Figura 9.5 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Razão para uma gama de 0-250 Hz	110
Figura 9.6 - Gráficos correspondentes ao uso dos indicadores Erro e Coe para uma gama de 0-250 Hz	113
Figura 9.7 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador CSF para uma gama de 0-250 Hz	114

Figura 9.8 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Razão para uma gama de 0-500 Hz	116
Figura 9.9 - Gráficos correspondentes ao uso dos indicadores Erro e CSF para uma gama de 0-500 Hz	119
Figura 9.10 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador CSF para uma gama de 0-500 Hz	120
Figura 9.11 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Razão para uma gama de 0-750 Hz	122
Figura 9.12 - Gráficos correspondentes ao uso dos indicadores Erro e Coe para uma gama de 0-750 Hz	125
Figura 9.13 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador CSF para uma gama de 0-750 Hz	126

Índice de tabelas

Tabela 4.1 - Propriedades geométricas da viga.....	38
Tabela 4.2 - Propriedades do material da viga.....	38
Tabela 4.3 - Frequências naturais da viga	42
Tabela 4.4 - Localização dos pontos de medição e excitação	48
Tabela 4.5 - Distribuição dos pontos de medição na viga experimental	53
Tabela 5.1 - Localização dos diferentes casos de dano.....	56
Tabela 5.2 - Resumo da eficácia do indicador Razão para 10 % de dano.....	58
Tabela 5.3 - Resumo da eficácia do indicador Erro para 10 % de dano.....	58
Tabela 5.4 - Resumo da eficácia do indicador CSF para 10 % de dano.....	58
Tabela 5.5 - Resumo da eficácia do indicador Coe para 10 % de dano.....	58
Tabela 5.6 - Gama de frequências consideradas para o estudo	59
Tabela 5.7 - Resumo do estudo da eficácia do indicador Razão para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência	60
Tabela 5.8 - Resumo do estudo da eficácia do indicador Erro para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência	62
Tabela 5.9 - Resumo do estudo da eficácia do indicador CSF para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência	64
Tabela 5.10 - Resumo do estudo da eficácia do indicador Coe para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência	65
Tabela 5.11 - Resumo da eficácia do indicador Razão para um dano de 5%.....	66
Tabela 5.12 - resumo da eficácia do indicador Razão para um dano de 2%.....	66
Tabela 5.13 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as extensões e um dano de 10%.....	69
Tabela 5.14 - Legenda	69
Tabela 5.15 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as rotações e um dano de 10%.....	71
Tabela 5.16 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as translações e um dano de 10%.....	71
Tabela 5.17 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as extensões e um dano de 5%.....	72
Tabela 5.18 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as rotações e um dano de 5%.....	72
Tabela 5.19 - resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as translações e um dano de 5%.....	73
Tabela 5.20 - Resumo da eficácia do indicador Razão para 10 % de dano.....	74
Tabela 5.21 - Resumo da eficácia do indicador Erro para 10 % de dano.....	74
Tabela 5.22 - Resumo da eficácia do indicador Coe para 10 % de dano.....	74
Tabela 5.23 - Resumo da eficácia do indicador CSF para 10 % de dano.....	74
Tabela 5.24 - resumo do estudo da eficácia do indicador Razão para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência	75
Tabela 5.25 - Resumo do estudo da eficácia do indicador Erro para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência	77
Tabela 5.26 - Resumo do estudo da eficácia do indicador Coe para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência	78

Tabela 5.27 - Resumo do estudo da eficácia do indicador CSF para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência	78
Tabela 5.28 - Resumo da eficácia do indicador Razão para um dano de 5%.....	79
Tabela 5.29 - Resumo da eficácia do indicador Razão para um dano de 2%.....	79
Tabela 5.30 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as extensões e um dano de 10%.....	81
Tabela 5.31 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as rotações e um dano de 10%.....	82
Tabela 5.32 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as translações e um dano de 10%.....	82
Tabela 5.33 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as extensões e um dano de 5%.....	83
Tabela 5.34 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as rotações e um dano de 5%.....	83
Tabela 5.35 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as translações e um dano de 5%.....	83
Tabela 6.1 - Casos de dano	85
Tabela 6.2 - Quadro resumo dos resultados experimentais para uma gama de 0-500 Hz	86
Tabela 9.1 - Convergência da malha.....	99
Tabela 9.2 - Erro relativo correspondente à variação do número de elementos	99
Tabela 9.3 - Estudo de convergência da malha rigorosa.....	100
Tabela 9.4 - Erro relativo correspondente à variação do número de elementos da zona rigorosa	100

Nomenclatura

ω	Frequência
K	Rigidez
M	Massa
C	Amortecimento
x	Deslocamento
\dot{x}	Velocidade
\ddot{x}	Aceleração
T	Transmissibilidade
Z	Rigidez dinâmica
ε	Extensão
q	Coordenada modal generalizada
$\Delta\omega_A$	Variação da frequência no ponto A
S	Sensibilidades
ϕ	Modo de vibração
*	Complexo conjugado
d	dano
ψ	Modo de vibração por meio de extensões
δ	Critério Laplaciano
ϕ''	2º derivada espacial do modo de vibração
Nm	Número de medições efetuadas
i	Ponto de medição
j	Ponto de aplicação da força
FI	Amplitude da FRF sem dano

FD	Amplitude da FRF com dano
H	Recetância
n	Número de coordenadas
N	Número de frequências
H''	2º derivada da recetância
h	Distância entre dois pontos
u_{norm}	Normalização à unidade
$\bar{\delta}_{mir}$	<i>Modal macrostain</i>
H^ε	<i>Strain frequency response function</i>
h_m	Distância do elemento ao eixo de inércia
$\phi_{\Delta i}^\varepsilon$	Diferença entre os modos com e sem dano
T	Transmissibilidade
A_t	Área da secção transversal
$I_{x'}$	Segundo momento de área
E	Módulo de Young
G	Módulo de elasticidade transversal
ρ	Densidade
ν	Coeficiente de Poisson
ω_n	Frequência natural

Siglas e Acrónimos

AG	Algoritmos Genéticos
ASDM	<i>Absolute Difference Strain ModeShape</i>
Coe	Coerência
COMAC	<i>Co-ordinate Modal Assurance Criterion</i>
CSF	<i>Cross Signature Scale Factor</i>
DI	<i>Damage Index</i>
DLAC	<i>Damage location Assurance criterion</i>
DRQ	<i>Detection and Relative damage Quantification indicator</i>
ESMS	<i>Enhanced Strain Mode Shape</i>
ESMS-P	<i>Enhanced Strain Mode Shape-Possibility</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FDAC	<i>Frequency Domain Assurance Criterion</i>
FI	<i>Flexibility Index</i>
FRAC	<i>Frequency Response Assurance Criterion</i>
FRF	Função de resposta em frequência
FRF_MSC	<i>FRF Based Mode Shaped Curvature</i>
FRF_MSCS	<i>FRF Based Model Shaped Curvature Square</i>
FRF_MSS	<i>FRF_BASED MODE SHAPE SLOPE</i>
GSM	<i>Gapped Smoothing Method</i>
IDBV	Métodos de Identificação de Dano Baseados em Vibrações
IDDM	<i>Interpolation Damage Detection Method</i>
MAC	<i>Modal Assurance Criterion</i>
MDLAC	<i>Multi Damage Location Assurance Criterion</i>

MEF	Método dos Elementos Finitos
MLO	<i>Modified Laplacian Operator</i>
MMS	<i>Modal Macrostrain</i>
MOV	Modos Operacionais de Vibração
MSA	<i>Mode Shape Amplitude</i>
MSC	<i>Mode Shape Curvature</i>
MSCS	<i>Mode Shape Curvature Square</i>
MSE	<i>Modal Strain Energy</i>
MSEC	<i>Modal Strain Energy Change Ratio</i>
MSS	<i>Mode Shape Slope</i>
NFN	Normalização das Frequências Naturais
NFV	<i>Natural Frequency Vector</i>
NFVAC	<i>Natural Frequency Vector Assurance Criterion</i>
NME	Núcleo de Mecânica Estrutural
NMMS	<i>Normalized MMS</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
RVAC	<i>Response Vector Assurance Criterion</i>
SDF	<i>Strain Damage Factor</i>
SDFS	<i>Strain Damage Factor Squared</i>
SEDI	<i>Strain Energy Damage Index</i>
SFRF	Strain FRF
SMS-C	<i>Strain Mode Shape-Change</i>
SMSC	<i>Stacked Mode Shape Correlation</i>
STF	<i>Strain Transmissibility Function</i>
TC	Transmissibility Coherence

TDI	Transmissibility Damage Indicator
TMAC	Transmissibility Modal Assurance Criterion
WDI	Weighted Damage Indicator

1 Introdução

1.1 Contexto e motivação

Devido ao avanço tecnológico, deu-se um aumento do número, da dimensão e da complexidade de novos equipamentos e estruturas. Com isto, torna-se importante detetar o dano o mais cedo possível, de modo a evitar catástrofes, garantindo assim a segurança humana, a fiabilidade das estruturas e as perdas económicas associadas a estas. No entanto, atualmente existem várias regras e regulamentos relativos à segurança e manutenção destas mesmas estruturas, porém este aumento da complexidade dificulta algumas destas técnicas de inspeção, tendo como destaque a visual. Todos estes fatores contribuíram para um crescente interesse relativamente à deteção precoce de dano na área da mecânica estrutural.

Associado muitas vezes aos colapsos de estruturas está o fenómeno da fadiga. Por sua vez, o mesmo encontra-se correlacionado com o efeito das vibrações mecânicas nas estruturas. O estudo de métodos associados a estas vibrações poderá trazer inúmeras vantagens, sendo uma delas a monitorização contínua da estrutura, tornando-se possível detetar e localizar o dano numa fase precoce.

O foco desta dissertação incide no estudo da identificação de dano (deteção, localização e quantificação) aplicando metodologias que utilizam respostas dinâmicas, nomeadamente as funções de resposta em frequência (FRFs), as Strain FRFs (SFRFs) e transmissibilidades.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho passará por avaliar a utilização das FRFs, SFRFs e Transmissibilidades na deteção, localização e quantificação de dano numa estrutura.

Esta dissertação surge na continuação de outras duas realizadas no Núcleo de Mecânica Estrutural (NME), nomeadamente as dos estudantes Pedro Fernandes [1] e Raquel Rodrigues [2]. Nestas foi desenvolvida uma nova metodologia de deteção, localização e quantificação relativa do dano, que pode utilizar como inputs as FRFs e SFRFs, de uma estrutura com e sem dano. Nesta metodologia foram utilizados vários indicadores que permitem comparar as respostas dinâmicas obtidas, na situação da

estrutura com e sem dano, para assim perceber quais as diferenças existentes entre elas e desta forma ser capaz de identificar o dano. Para testar a metodologia foram desenvolvidos modelos numéricos de uma viga, com base no Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o software de programação *Matlab* e *Ansys*. Este trabalho tem como objetivo “validar” (tendo esta validação como base a diferença obtida entre os resultados numéricos e experimentais) as conclusões retiradas das dissertações anteriormente mencionadas, utilizando dados obtidos pela via numérica e experimental.

Muitos dos métodos de detecção de dano utilizam as respostas dinâmicas da estrutura utilizando acelerómetros (FRFs), no entanto, estes têm o inconveniente de terem um custo elevado e modificarem a massa e a rigidez local da estrutura, pelo que foi considerada a utilização não de FRFs mas de SFRs, medidas através da utilização de extensómetros.

Neste trabalho, pretende-se ainda estudar o efeito que têm na identificação do dano, a severidade e a localização deste, o ruído presente nas medições, a gama de frequências consideradas e o indicador utilizado.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação em questão será dividida em 6 capítulos distintos, descritos em seguida:

Capítulo 1: **Introdução** – Contextualização do tema e apresentação da motivação e dos objetivos a cumprir com o trabalho.

Capítulo 2: **Revisão bibliográfica** – Pequena introdução ao conceito de dano, seguida de uma apresentação dos métodos de detecção deste, os quais se dividem em métodos tradicionais e modernos.

Capítulo 3: **Fundamentos teóricos** – Apresentação de conceitos teóricos fundamentais tal como o conceito de FRF, SFRF e de transmissibilidade, melhorando desse modo a perceção sobre o trabalho.

Capítulo 4: **Metodologia** – Descrição dos métodos utilizados, nomeadamente numérico e experimental. Relativamente à metodologia numérica, inicialmente é feita uma introdução do modo como o dano é introduzido na viga, seguindo-se a explicação

da escolha da malha, a apresentação das propriedades modais da viga e o modo como o ruído foi introduzido nos dados.

Capítulo 5: **Resultados numéricos** – São inicialmente apresentados os casos de estudo, assim como os fatores cuja influência será estudada, tal como o indicador em uso, a gama de frequência escolhida, a severidade e a localização do dano e a introdução de ruído. Por fim são apresentados os resultados e as conclusões a retirar dos mesmos.

Capítulo 6: **Resultados experimentais** – São apresentados os casos de estudo assim como os resultados e as conclusões a retirar destes.

Capítulo 7: **Conclusão** – São apresentadas as conclusões a retirar do trabalho realizado e as propostas para trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Introdução

Segundo o que Wang *et al.* [3] referem, do ponto de vista estrutural diz-se que há dano quando uma das situações que se seguem ocorre:

- Falha estrutural do material (fadiga, fissuras, fenómenos de delaminação, entre outros);
- Variação da rigidez de elementos de ligação (parafusos, juntas coladas, rebites, entre outros);
- Perda de elementos de ligação;
- Falhas, fissuras, vazios, etc., causados durante o funcionamento;

Por sua vez, de acordo com Doebling [4], os efeitos do dano numa estrutura podem ser classificados como lineares e não lineares. O primeiro caso é caracterizado pela estrutura que inicialmente apresenta um comportamento linear-elástico e mantém esse mesmo comportamento após o dano. Contrariamente, para o dano não linear, a estrutura que inicialmente apresenta um comportamento linear-elástico, após a introdução do dano, passa a apresentar um comportamento não linear.

Segundo Fernandes [1] o dano pode ser causado por inúmeras razões, sendo que as principais têm origem no material, nos processos de fabrico e no serviço.

Definido o dano, é de extrema importância monitorizar e inspecionar as estruturas de modo a detetá-lo numa fase mais precoce, evitando assim o seu colapso e promovendo a segurança social e económica, que é uma questão de grande destaque para algumas indústrias como a aeroespacial, a mecânica e a civil.

A figura 2.1 faz referência ao acidente da plataforma semi-submersível Alexander Kielland, que ocorreu a 27 de março de 1980. Esta virou inesperadamente durante uma tempestade, após o colapso de uma das cinco colunas que a suportavam. Este incidente deu-se devido a fissuras causadas por fadiga, que não haviam sido detetadas anteriormente, reforçando, assim, a importância do objetivo deste trabalho.



Figura 2.1 - Acidente da plataforma Alexander Kielland

Atualmente, existem várias tecnologias para a detecção de dano, nomeadamente as técnicas de detecção de dano não destrutivas [5] de aplicação local como: as correntes induzidas, termografia, ultra sons, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, raios X e inspeção visual. Apesar da sua existência, continuam a ocorrer catástrofes, como a referida anteriormente, isto deve-se ao facto de serem técnicas localizadas que requerem um conhecimento prévio das zonas danificadas, sendo simultaneamente necessário que estas sejam de fácil acesso, o que torna o processo de examinação longo e dispendioso [6]. Devido às desvantagens anteriormente referidas, muitos componentes não são inspecionados levando a que o dano se propague a níveis críticos entre a realização de inspeções [7].

Com isto, surgiu a necessidade que levou os engenheiros a encontrarem novos métodos de monitorização contínua e global para a avaliação de estruturas [7]. Assim surgiram os métodos de Identificação de Dano Baseados em Vibrações (IDBV). Estes permitem detetar dano em locais inacessíveis, através da monitorização das propriedades dinâmicas da estrutura, podendo esta estar em serviço ou não. O dano provoca alterações nas propriedades físicas, como: a massa, a rigidez ou o amortecimento, que por sua vez modificam as tais características dinâmicas (frequências naturais, modos de vibração, FRFs e a transmissibilidade). A deteção e localização do dano baseia-se nestas alterações.

Nos IDBV, destaque-se o uso das frequências naturais, modos de vibração, funções de resposta em frequência e das transmissibilidades, como as propriedades dinâmicas mais utilizadas para o desenvolvimento de indicadores [8].

2.2 Evolução e classificação dos métodos de detecção de dano que utilizam vibrações mecânicas

Os primeiros desenvolvimentos nesta área resultam de estudos realizados no início da década de 70 na área da manutenção da indústria petrolífera e espacial [9].

Rytter [10] sugere quatros níveis para alcançar uma completa caracterização do dano em questão, sendo estes:

Nível 1 – detecção da presença de dano na estrutura;

Nível 2 – localização do dano;

Nível 3- quantificação do dano;

Nível 4 - previsão da vida útil da estrutura.

Park *et al* [11] dividem os métodos de detecção de dano por meio de vibrações em dois grupos:

Métodos de referência - necessitam de um modelo teórico fiável da estrutura. É constatado que este tipo de modelos está associado a um elevado grau de dificuldade.

Métodos experimentais - não utilizam qualquer modelo de referência, utilizam apenas os dados obtidos experimentalmente. No entanto, a obtenção destes dados está associada a diversas dificuldades experimentais (como o ruído) adicionando-se, ainda, a sua aplicabilidade limitada.

Yan *et al* [12] fazem ainda uma distinção dentro dos métodos baseados em vibrações, separando-os em dois grupos:

Métodos tradicionais – apenas utilizam as características dinâmicas da própria estrutura (frequências naturais, modos de vibração, entre outras), comparando-as com e sem dano.

Métodos modernos – também denominados por métodos de diagnóstico de dano inteligentes, utilizam ferramentas de tratamento de sinal avançadas ou inteligência artificial [9].

2.3 Métodos tradicionais

Como havia sido referido anteriormente, a detecção de dano é feita por uma alteração nas características dinâmicas da estrutura. Dentro destas, destacam-se as frequências naturais, modos de vibração, as FRFs, SFRFs e a transmissibilidade.

2.3.1 Frequências naturais

Tal como é referido anteriormente, a presença de dano numa estrutura irá alterar as suas propriedades físicas, nomeadamente a rigidez ou a massa. Através da equação (2.1), é facilmente perceptível que a ocorrência de dano levará a uma modificação das frequências naturais:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.1)$$

onde ω_n corresponde à frequência natural, k à rigidez e m à massa.

Tanto Doebling [4] como Sinou [13] afirmam que o primeiro artigo relativo à investigação da detecção de dano por meio de comparação de frequências naturais de uma dada estrutura, com e sem dano, foi apresentado por Lifshitz e Rotem [14]. Estes verificaram se era possível a detecção de dano, desenvolvendo um método que tinha como base as alterações do módulo dinâmico e do amortecimento interno. O módulo dinâmico era obtido através das frequências naturais, utilizando a relação elástica para sistemas com um grau de liberdade, dado que o amortecimento era suficientemente pequeno.

Cawley e Adams [15] conduziram um estudo para avaliar a integridade estrutural através das frequências naturais, sendo que estes demonstram ser possível detetar, localizar e quantificar o dano, com base em medições retiradas de um único ponto.

Salawu [16] apresenta um artigo de revisão onde indica as dificuldades encontradas pelos métodos existentes com base em frequências naturais. Entres estas, o autor destaca a incapacidade que estes têm de detetar e localizar, simultaneamente, o dano, a importância que os fatores ambientais (temperatura e humidade) apresentam nas variações das características dinâmicas e inabilidade de perceber se as alterações das frequências se deram devido a um ou mais danos.

Sinou [13] refere o critério de Normalização das Frequências Naturais (NFN), que define o rácio entre a i -enésima frequência natural danificada e intacta, como é demonstrado na equação 2.2:

$$NFN = \frac{\omega_i^{danificada}}{\omega_i^{intacta}} \quad (2.2)$$

Este sugere, ainda, a variação da percentagem entre a i -enésima frequência natural danificada e intacta, representada na equação 2.3:

$$\%C_i = \frac{\omega_i^{intacta} - \omega_i^{danificada}}{\omega_i^{intacta}} \times 100 \quad (2.3)$$

Messina [17] sugere a utilização de dois critérios de deteção de dano, qn base o mesmo princípio, sendo que o primeiro considera apenas a presença de um dano (DLAC), enquanto o segundo considera vários danos (MDLAC).

-Damage location Assurance criterion (DLAC)

$$DLAC_i = \frac{|\Delta\omega_A^T \times \Delta\omega_B(i)|^2}{(\Delta\omega_A^T \times \Delta\omega_A) \times [(\Delta\omega_B(i)^T) \times \Delta\omega_B(i)]} \times 100 \quad (2.4)$$

Onde $\Delta\omega_A$ corresponde ao vetor com a variação das frequências correspondentes a uma estrutura com um único dano e $\Delta\omega_B$ ao vetor teórico da variação de frequências para um dado local i quando existe dano. O DLAC varia entre 0 e 1, sendo que ao valor 0 corresponde uma ausência de correlação e ao valor 1 uma correlação perfeita nos padrões de variação de frequência, identificando-se desse modo o dano no local i .

-Multi Damage Location Assurance Criterion (MDLAC)

$$MDLAC_i = \frac{|\Delta\omega_A^T \times S\delta x_i|^2}{(\Delta\omega_A^T \times \Delta\omega_A) \times [(S\delta x_i^T) \times S\delta x_i]} \times 100 \quad (2.5)$$

Sendo S a matriz de sensibilidades que contém as derivadas de primeira ordem das n frequências naturais em relação às m variáveis de dano x. Tal com o indicador anterior, o objetivo passará por maximizar o valor de MDLAC de modo a localizar o dano. A matriz S é apresentada na equação 2.6:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{\partial\omega_1}{\partial x_1} & \frac{\partial\omega_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial\omega_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial\omega_2}{\partial x_1} & \frac{\partial\omega_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial\omega_2}{\partial x_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial\omega_n}{\partial x_1} & \frac{\partial\omega_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial\omega_n}{\partial x_m} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Yang e Wang [18] basearam-se no novo conceito de “natural frequency vector” (NFV) e “natural frequency vector assurance criterion” (NFVAC). Os NFVs correspondem a uma base de dados, onde a estrutura é simulada num modelo de elementos finitos e submetida a vários danos. O NFVAC corresponde a uma relação entre o NFV medido na estrutura atual e os NFVs da base de dados, sendo este o índice de deteção de dano.

2.3.2 Modos de vibração

No subcapítulo anterior, é referido que a introdução de dano produzirá alterações nas frequências naturais, o mesmo acontece relativamente aos modos de vibração, o que conduziu a que diversos autores procedessem à sua investigação e ao desenvolvimento de métodos de deteção. Os modos de vibração são uma característica especial que uma estrutura adquire quando vibra a uma das suas frequências naturais.

No entanto, estes métodos apresentam a desvantagem de necessitarem de um grande número de pontos de medição experimentais para conseguir recriar os modos de vibração com precisão, nomeadamente os modos relativos a altas frequências. Outra desvantagem está relacionada com a necessidade de se realizar uma análise modal, de

modo a obter os modos de vibração, sendo estes de elevada dificuldade de realização [8].

Relativamente aos métodos com base nos modos de vibração, estes dividem-se de acordo com o seu princípio, sendo que uns apresentam como objetivo o estudo da alteração dos modos de vibração, outros focam-se nas curvaturas destes, no indicador Modal Strain Energy (MSE) e nas sensibilidades.

Começando pelas metodologias que têm por base a alteração nos modos de vibração, salientam-se as seguintes [8]:

- Modal Assurance Criterion (MAC) – Desenvolvido por R. J. Allemang [19] em 1982, este critério determina o nível de correlação entre os modos de vibração anteriores e posteriores ao dano. Este faz uso das propriedades de ortogonalidade dos modos para proceder à sua comparação [13]. Os seus valores variam entre 0 e 1, correspondendo o 1 a uma correlação perfeita, ou seja, à não deteção de dano.

$$MAC(\phi_i, \phi_j) = \frac{|\sum_{k=1}^n (\phi_j)_k (\phi_i)_k^*|^2}{(\sum_{k=1}^n (\phi_j)_k (\phi_j)_k^*) (\sum_{k=1}^n (\phi_i)_k (\phi_i)_k^*)} \quad (2.7)$$

Sendo que ϕ representam os modos da estrutura sem e com dano, * o complexo conjugado, k o elemento vetor do modo de vibração e n o número de modos.

Sinou [13] afirma que o MAC apesar de ser um bom indicador de dano, não permite a localização do mesmo.

-Co-ordinate Modal Assurance Criterion (COMAC) – é proposto a partir do MAC e permite a identificação de uma coordenada em que os modos de vibração não coincidem [20]. O fator COMAC de um ponto i entre dois modos de vibração é dado por:

$$COMAC(i) = \frac{(\sum_{j=1}^n |(\phi_A)_{ij} (\phi_B^*)_{ij}|)^2}{\sum_{j=1}^n |(\phi_A)_{ij}|^2 \sum_{j=1}^n |(\phi_B)_{ij}|^2} \quad (2.8)$$

Radzien'ski *et al* [21] defendem que tanto o MAC como o COMAC são demasiado dependentes da geometria da estrutura e da localização do dano, pelo que não apresentam a capacidade de o detetar nos iniciais estágios de crescimento. É de salientar que em ambos os critérios os modos de vibração são obtidos por meio de acelerómetros.

-Absolute Difference Strain ModeShape (ASDM) – Yoo *et al* [22] obtiveram os modos de vibração por meio de extensões medidas por extensómetros. Os autores utilizaram a diferença absoluta dos modos de vibração (intacto e danificado) para localizar o dano. O valor 0 representa uma correlação perfeita, ou seja, a não existência de dano, pelo que a presença deste é dada pelo aumento do indicador referido.

$$ASDM = |\Psi_i - \Psi_D| \quad (2.9)$$

Sendo que Ψ_D e Ψ_i se referem aos modos da estrutura com e sem dano.

-New Method – Neste método é feita a diferença absoluta dos valores absolutos dos modos de vibração e não apenas a diferença absoluta dos valores dos modos como era feito no método anterior, conseguindo desse modo aumentar o número de identificações de dano por modo [22].

$$New\ Method = ||\Psi_i| - |\Psi_D|| \quad (2.10)$$

-Modified Laplacian Operator (MLO) – A presença de dano causa alterações localizadas na matriz de rigidez, o que causa uma variação no declive do modo de vibração. Este método é também conhecido como Gapped Smoothing Method (GSM). Dado que uma viga pode ser analisada como uma estrutura unidimensional, o critério Laplaciano (δ_i) correspondente ao modo de vibração (ϕ) é dado por [21]:

$$\delta_i = (\phi_{i+1} + \phi_{i-1}) - 2\phi_i \quad (2.11)$$

-Stacked Mode Shape Correlation (SMSC) – Em vez de individualizar um valor do MAC para cada modo de vibração é utilizado um único vetor que contém todos os modos, permitindo a realização de uma correlação linear [23], possibilitando a localização do dano.

$$SMSC_j = \frac{\{\Delta\phi\}^T\{\delta\phi_j\}}{|\{\Delta\phi\}||\{\delta\phi_j\}|} \quad (2.12)$$

Sendo que $\{\Delta\phi\}$ e $\{\delta\phi_j\}$ correspondem, respetivamente, aos vetores da variação identificada e prevista dos modos de vibração.

Curvatura dos modos de vibração

Passando agora para os métodos que têm por base a curvatura dos modos de vibração, este conceito foi desenvolvido por Pandley *et al* [24] em 1991. Estes propuseram o uso da segunda derivada dos modos de vibração como uma ferramenta de deteção de dano, dado que a presença desta causava alterações nas mesmas. Neste artigo, a curvatura de um dado ponto i é dada da seguinte forma:

$$\phi_{i,j}'' = \frac{\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j}}{h^2} \quad (2.13)$$

Sendo h a distância entre os pontos de medição $i-1$ e $i+1$.

A presença de dano causa uma redução da rigidez, o que provoca um aumento da curvatura $\phi_{i,j}$. Será com base nestas alterações que se irá detetar e quantificar o dano [13]. Assim é definido por Pandey *et al* [24] o critério Mode Shape Curvature (MSC):

$$MSC_i = \sum_{j=1}^{Nm} |\phi_{i,j}''^{Danificado} - \phi_{i,j}''^{Intacto}| \quad (2.14)$$

Onde $\phi_{i,j}''$ correspondem as segundas derivadas dos modos de vibração com e sem dano e Nm ao número de medições efetuadas.

Ho e Ewins [25] desenvolveram diversos critérios relacionados com a curvatura dos modos de vibração, entre os quais o Mode Shape Amplitude (MSA), Flexibility Index (FI), o Mode Shape Slope (MSS) e o Mode Shape Curvature Square (MSCS) o qual irá ser destacado. Este resulta da diferença absoluta dos quadrados das segundas derivadas dos modos de vibração com e sem dano.

$$MSCS_i = \sum_{j=1}^{Nm} \left| (\phi_{i,j}^{''Danificado})^2 - (\phi_{i,j}^{''intacto})^2 \right| \quad (2.15)$$

Por fim, Stubbs e Kim [26] apresentaram outro critério, também com base nas curvaturas, denominado Damage Index (DI), que é definido na equação 2.16.

$$DI_i = \frac{\sum_{j=1}^{Nm} \left((\phi_{i,j}^{''Danificado})^2 + \sum_{i=1}^N (\phi_{i,j}^{''danificado})^2 \right) \sum_{i=1}^N (\phi_{i,j}^{''Intacto})^2}{(\phi_{i,j}^{''intacto})^2 + \sum_{i=1}^N (\phi_{i,j}^{''intacto})^2 \sum_{i=1}^N (\phi_{i,j}^{''danificado})^2} \quad (2.16)$$

Modal Strain Energy (MSE)

Dong *et al* [27] propuseram um método que é baseado nas alterações da MSE e das frequências de ressonância. As diferenças entre as estruturas com e sem dano são dadas pelo índice $\Delta\phi_i$, definido da seguinte forma:

$$\Delta\phi_i = \left(\frac{\omega_i^{intacto}}{\omega_i^{danificado}} \right)^2 \phi_i^{danificado} - \phi_i^{intacto} \quad (2.17)$$

Onde $\omega_i^{intacto}$ e $\omega_i^{danificado}$ correspondem, respetivamente, às frequências naturais do i-énésimo modo de vibração para a estrutura intacta e danificada e $\phi_i^{danificado}$ e $\phi_i^{intacto}$ ao i-énésimo "strain mode shape" para a estrutura com e sem dano.

Strain Energy Damage Index (SEDI) desenvolvido por Cornwell, permite avaliar a o estado de saúde de uma estrutura, uma vez que o índice expressa a degradação da rigidez em uma determinada zona [28]. Este tem em conta as alterações no MSE da estrutura, quando esta se deforma de acordo de acordo com um modo de deformação específico. Se houver dano na estrutura, as alterações na rigidez de uma determinada área são utilizadas para localizar esse dano.

Destaca-se ,ainda, o Modal Strain Energy Change Ratio (MSEC) proposto por Shi *et al* [29], sendo este um indicador baseado na alteração da MSE em cada ponto de medição, antes e após a ocorrência de dano.

Sensibilidades

Parloo *et al* [30] apresentaram um indicador com base nas alterações, na rigidez e na massa do sistema. No entanto, são necessários os modos de vibração anteriores e posteriores ao dano assim como as frequências naturais. A ideia base passa por localizar o dano por meio das sensibilidades dos modos de vibração relativamente às alterações previamente referidas.

2.3.3 Funções de resposta em frequência

Os Modos Operacionais de Vibração (MOV), por meio de FRFs, permitem caracterizar o comportamento funcional da estrutura quando excitada a qualquer frequência de excitação ω pretendida, o mesmo não acontece nos métodos anteriormente referidos, que apenas utilizam os modos de vibração nas frequências naturais. Os MOV apresentam a vantagem de não requerem a realização de uma identificação modal, nem da criação do modelo numérico da estrutura, dado que apenas utilizam os dados fornecidos pelas FRFs [31].

Wang *et al* [3] começam por referir algumas das desvantagens do uso de parâmetros modais, estes afirmam que os dados obtidos por estes últimos são limitados e podem ser contaminados, quer por erros de medição, quer por erros de extração modal. Os autores indicam, como vantagens do uso das FRFs, a capacidade que estas têm de providenciar um maior número de informação numa dada gama de frequências desejada. No entanto, estes ainda chamam à atenção que a presença de ruído prejudica enormemente a deteção de danos reduzidos.

Wang *et al* [3] desenvolveram um algoritmo baseado nas equações de perturbações não lineares através da análise de dados fornecidos por FRFs anteriores e posteriores à introdução de dano. Os autores tinham como foco a obtenção de um vetor que indicasse, localizasse e quantificasse o dano.

Lee e shin [32] elaboram um artigo no qual apresentam um método que consiste na redução do domínio do problema, por meio de um processo iterativo através do qual se procede a eliminação das zonas intactas, ficando apenas para análise as zonas suspeitas de dano. No entanto, para além das FRFs medidas experimentalmente da viga danificada, é necessário o conhecimento das frequências naturais e os modos de vibração

da viga intacta. Os autores indicam ainda que o processo da redução do domínio apenas é válido para a presença de ruído não superior a 9%.

Araújo dos Santos *et al* [33] sugerem um método de detecção de dano baseado nas sensibilidades das FRFs. Neste artigo, os autores aplicaram este mesmo método a uma estrutura laminada e verificaram que a gama de frequências e o ponto da excitação na estrutura são fatores fundamentais para a detecção de dano, sendo que obtiveram melhores resultados para gamas de frequências mais reduzidas e para excitações em que o ponto de aplicação da força não correspondesse a um ponto nodal.

Bovio *et al* [34] desenvolveram um indicador nomeado Damage Index, baseado na comparação de FRFs para uma estrutura intacta e danificada, com o objetivo de detetar, localizar e quantificar o dano. Este é dado por:

$$Index = \frac{\sum_{i=1}^n |FI_i - FD_i|}{\sum_{i=1}^n FI_i} \quad (2.18)$$

Sendo que FI e FD correspondem respetivamente à amplitude da FRF para a estrutura intacta e danificada a uma dada frequência i . O indicador é caracterizado pelo rácio entre o valor absoluto da média aritmética da diferença das FRFs da estrutura com e sem dano, e a média aritmética das FRFs da estrutura intacta.

Como já havia sido referido, diversos fatores ambientais afetam os dados extraídos por meio de FRFs. Limongelli [35] desenvolveu um indicador denominado Interpolation Damage Detection Method (IDDM), de modo a estudar a influência que a temperatura e o ruído teriam na extração de dados experimentais. O IDDM verifica a presença de dano através da diferença entre o deslocamento medido num ponto e o deslocamento calculado por meio de uma função de interpolação para esse mesmo ponto. A verificação da influência dos fatores anteriormente referidos é feita num estudo experimental na ponte I40 no Novo México, sendo que o autor concluiu que a temperatura não tem qualquer interferência nos resultados, quando o nível de ruído presente é reduzido.

Neste artigo, [36] os autores Nozarian e Esfandiari propõem um método de detecção de dano através do uso de FRFs e da medição das frequências naturais da estrutura danificada. Este afirmam que as alterações nas FRFs devido há presença de dano estão correlacionadas com as variações na rigidez e na massa da estrutura por meio de equações de sensibilidade a dano que por sua vez foram derivadas através das mudanças nos vetores próprios. As equações de dano são resolvidas utilizando o método

dos mínimos quadrados, de modo a verificar alterações nos parâmetros estruturais, podendo assim localizar o dano.

Segundo Sinou [13], foram desenvolvidos alguns métodos que resultaram de uma extensão do critério MAC às funções de resposta em frequência. Estes baseiam-se no correlacionamento de duas curvas, sendo que o primeiro a ser desenvolvido foi o Frequency Response Assurance Criterion (FRAC) com autoria de Heylen e Lammens [37], definido por:

$$FRAC_{ij}(\omega) = \frac{|H_{i,j}^d(\omega)(H_{i,j}^i(\omega))^*|^2}{(H_{i,j}^i(\omega)(H_{i,j}^i(\omega))^*)(H_{i,j}^d(\omega)(H_{i,j}^i(\omega))^*)} \quad (2.19)$$

Onde $H_{i,j}^d$ e $H_{i,j}^i$ correspondem, respetivamente, às matrizes de receptância para a estrutura danificada e intacta, * ao complexo conjugado, j ao ponto de aplicação da excitação e i a coordenada onde é obtida a resposta. O indicador FRAC toma valores entre 0 e 1, sendo que para o valor 1 não é detetado qualquer dano, pelo que o decréscimo do indicador aponta para a presença deste.

Pascual *et al*[38] sugerem um método que quantifica a correlação entre dois modos operacionais de vibração (MOV) ao qual denominaram Frequency Domain Assurance Criterion (FDAC). Na sequência é desenvolvida uma simplificação deste método, o critério Response Vector Assurance Criterion (RVAC) [39], baseado na medição da correlação dos MOVs, na presença e na ausência de dano para estruturas à mesma frequência e para a aplicação de uma única força. Este é definido por:

$$RVAC_i(\omega) = \frac{|\sum_{i=1}^n H_i^d(\omega)(H_i^i(\omega))^*|^2}{\sum_{i=1}^n H_i^i(\omega)(H_i^i(\omega))^* \sum_{i=1}^n H_i^d(\omega)(H_i^d(\omega))^*} \quad (2.20)$$

Sendo n o número de coordenadas e * o complexo conjugado.

Sampaio *et al* [40] propuseram o Detection and Relative damage Quantification indicator (DRQ), que resulta de uma adaptação do RVAC. Este indicador varia entre os valores 0 e 1, sendo que o 1 indica uma correlação perfeita, logo não deteta qualquer

dano. Assim sendo, quanto maior for o dano, menor é a correlação. Esta relação é dada por:

$$DRQ(\omega) = \frac{\sum_{\omega} RVAC(\omega)}{N} \quad (2.21)$$

Sendo que N define o número de frequências.

Maia *et al* [41], baseados nas suposições de métodos já existentes, nomeadamente as alterações nos modos de vibração, sugeriram a sua generalização a todo o domínio das frequências, afirmando que o ponto onde o dano se encontra será o ponto onde a alteração no modo for maior.

Com isto, Maia *et al* [41] sugerem o uso do indicador FRF-Based Mode Shape (FRF_MS), que utiliza a diferença absoluta entre as receptâncias das FRFs da estrutura danificada e intacta. Este método é caracterizado da seguinte forma:

$$\Delta H_{i,j}(\omega) = |H_{i,j}^d(\omega) - H_{i,j}^i(\omega)| \quad (2.22)$$

Se mais do que uma frequência ou força forem consideradas o indicador é dado por:

$$FRF_MS_i = \sum_{\omega} \sum_j \Delta H_{i,j}(\omega) \quad (2.23)$$

Surge ainda o FRF_BASED MODE SHAPE SLOPE (FRF_MSS), que utiliza a diferença absoluta do quadrado da derivada de primeira ordem, que é definido pela equação 2.24:

$$\Delta H_{i,j}'^2(\omega) = |H_{i,j}^{d'2}(\omega) - H_{i,j}^{i'2}(\omega)| \quad (2.24)$$

Analogamente ao indicador anterior, se mais do que uma frequência ou força forem consideradas este é dado por:

$$FRF_MSS_i = \sum_{\omega} \sum_j \Delta H_{i,j}{}'^2(\omega) \quad (2.25)$$

O conceito de análise de curvaturas de FRFs foi introduzido por Sampaio *et al*[42], sendo que este resulta de uma adaptação do método apresentado por Pandey. A curvatura para uma dada frequência ω é dada por:

$$H_{i,j}''(\omega) = \frac{H_{i+1,j}(\omega) - 2H_{i,j}(\omega) + H_{i-1,j}(\omega)}{h^2} \quad (2.26)$$

Sendo h a distância entre os pontos $i+1$ e $i-1$.

Dois indicadores com base neste conceito são apresentados por Maia *et al* [41]. Sendo o primeiro baseado na diferença absoluta entre as curvaturas das FRFs para a estrutura com e sem dano, dada pela seguinte equação:

$$\Delta H_{i,j}''(\omega) = |H_{i,j}^{d''}(\omega) - H_{i,j}^{i''}(\omega)| \quad (2.27)$$

O critério FRF Based Mode Shaped Curvature (FRF_MSC) aquando da aplicação de diversas forças, a diferentes frequências, é dado por:

$$FRF_MSC_i = \sum_{\omega} \sum_j \Delta H_{i,j}''(\omega) \quad (2.28)$$

O segundo, denominado FRF Based Model Shaped Curvature Square (FRF_MSCS), é dado pela diferença absoluta dos quadrados das curvaturas, com o intuito de detetar danos de dimensões reduzidas. Este é dado por:

$$\Delta H_{i,j}''^2(\omega) = |H_{i,j}^{d''^2}(\omega) - H_{i,j}^{i''^2}(\omega)| \quad (2.29)$$

Utilizando a mesma metodologia, vem que para diferentes frequências e forças aplicadas:

$$FRF_MSCS_i = \sum_{\omega} \sum_j \Delta H_{i,j}''(\omega) \quad (2.30)$$

Contrariamente aos métodos anteriormente apresentados, Liu et al [43] recomendam a utilização exclusiva da parte imaginária das FRFs para a detecção e localização de dano. Estes sugerem o critério Residual Imag FRF Shapes que consiste na comparação das partes imaginárias das FRFs com e sem dano, com o intuito de calcular a sua diferença máxima, dada por:

Sendo u_{norm} a normalização à unidade.

$$\Delta imag_FRF_{i,j}(\omega, u_{norm}) = imag_FRF_{i,j}(\omega, u_{norm}) - imag_FRF_{i,j}^{dano}(\omega, u_{norm}) \quad (2.31)$$

2.3.4 Strain FRFs

A utilização dos acelerómetros apresenta algumas desvantagens, dado que estes alteram as propriedades dinâmicas da estrutura, uma vez que alteram localmente a massa e a rigidez no ponto onde estão colocados, para além disso apresentam algumas limitações na sua colocação e são mais dispendiosos quando comparados com os extensómetros. Dado isto, alguns autores procuraram investigar a utilização das SFRFs na detecção de dano.

Uma grande contribuição nesta área foi a introdução dos sensores de fibra ótica ou sensores Fiber Bragg Grating (FBG). Estes quando comparados com sensores mecânicos apresentam a vantagem de serem mais leves, compactos, flexíveis, imunes a interferências magnéticas, fáceis de instalar e de se interligarem em grande escala [41].

Adeuyi e Wu [44] propuseram métodos para identificação de dano com base nos vetores “Modal Macrostrain” (MMS) normalizados. Apontam como vantagem da utilização dos MMS a sua simplicidade, capacidade de detetar danos de dimensões reduzidas, capacidade de detetar múltiplos danos utilizando medições com um número reduzido de sensores e serem menos afetados por ruído. Os autores apresentam dois índices baseados nas alterações na normalização dos MMS, apresentados em seguida:

- Normalized MMS (NMMS)

$$NMMS_i = \sum_r \Delta(\bar{\delta}_{mir}) = \sum_r |(\bar{\delta}_{mir}^d) - (\bar{\delta}_{mir})| \quad (2.32)$$

- Normalized MMS Squared (NMMS)

$$NMMS_i = \sum_r \Delta(\bar{\delta}_{mir})^2 = \sum_r |(\bar{\delta}_{mir}^d)^2 - (\bar{\delta}_{mir})^2| \quad (2.33)$$

Sendo que $\bar{\delta}_{mir}$ e $\bar{\delta}_{mir}^d$ correspondem respetivamente aos MMs da estrutura intacta e danificada.

No mesmo artigo, [41] são ainda apresentados outros dois critérios, nos quais a diferença dos MMS normalizados para todos os modos é descrita por um número para cada ponto de medição. Os mesmos são apresentados nas equações 2.34 e 2.35:

-Strain Damage Factor (SDF)

$$SDF_i = \frac{1}{nm} \sum_{r=1}^{nm} \Delta(\bar{\delta}_{mir}) = \frac{1}{nm} \sum_{r=1}^{nm} |(\bar{\delta}_{mir}^d) - \bar{\delta}_{mir}| \quad (2.34)$$

-Strain Damage Factor Squared (SDFS)

$$SSDF_i = \frac{1}{nm} \sum_{r=1}^{nm} \Delta(\bar{\delta}_{mir})^2 = \frac{1}{nm} \sum_{r=1}^{nm} |(\bar{\delta}_{mir}^d)^2 - (\bar{\delta}_{mir})^2| \quad (2.35)$$

Onde nm corresponde ao número de modos utilizados

Adewuyi *et al* [45] apresentam alguns métodos com base nas alterações nas curvaturas das SFRFs. Os autores do artigo elaboraram uma extensão dos critérios MSC de Pandey [21] e MSCS de Ho e Ewins [22], descritos anteriormente.

$$MSC_i = \frac{1}{h_m} \sum_j \Delta(\delta_{mi})_{ij} = \frac{1}{h_m} \sum_j |(\delta_{mi}^d)_{ij} - (\delta_{mi})_{ij}| \quad (2.36)$$

$$MSCS_i = \frac{1}{h_m} \sum_j \Delta(\delta_{mi})_{ij}^2 = \frac{1}{h_m} \sum_j |(\delta_{mi}^d)_{ij}^2 - (\delta_{mi})_{ij}^2| \quad (2.37)$$

Sendo δ_{mi} e δ_{mi}^d as extensões para a estrutura intacta e danificada e h_m a distância de cada elemento ao eixo de inércia.

Li e Wu [46] propuseram para a detecção de dano, o MMSV-based Damage Index Method, que utiliza um vetor β_{mr} que é definido pela percentagem relativa entre as MMSV normalizadas para a estrutura intacta e danificada.

$$\beta_{mr} = \frac{\psi_{mr}^* - \psi_{mr}}{\psi_{mr}} \times 100\% \quad (2.38)$$

Sendo que os MMSV normalizados são dados por:

$$\{\psi_{1r}, \psi_{2r}, \psi_{3r}\} = \left\{ \frac{\delta_{1r}}{\delta_{br}}, \frac{\delta_{2r}}{\delta_{br}}, \frac{\delta_{3r}}{\delta_{br}} \right\} \quad (2.39)$$

Shang *et al* [47] apresentam o critério Damage Identification Index que utiliza as variações nas amplitudes das SFRFs para detetar danos introduzidos por fissuras. Os autores afirmam que para localizações mais afastadas das fissuras as alterações nas amplitudes não são tão evidentes, pelo que desenvolveram o critério em seguida caracterizado:

$$\alpha_{sfrf} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \frac{\widetilde{H}^\varepsilon(\omega_{k+n}) - H^\varepsilon(\omega_k)}{H^\varepsilon(\omega_k)}} \quad (2.40)$$

Onde ω_k e ω_{k+n} correspondem, respetivamente, às frequências naturais antes e depois do dano, $\widetilde{H}^\varepsilon(\omega_{k+n})$ e $H^\varepsilon(\omega_k)$ aos valores de SFRF para a estrutura danificada e intacta e L ao número de frequências testadas.

Quando a fissura se propaga, as extremidades superiores da amplitude das SFRFs da estrutura, movem-se com ela, pelo que este critério pode ser usado para detetar a propagação de fissuras.

H. Cui *et al*[48] procuram melhorar a eficácia na deteção de dano para estruturas de grandes dimensões, tirando proveito da capacidade de bloquear o ruído. Estes propuseram três novos índices baseados nos modos de vibração:

- Enhanced Strain Mode Shape (ESMS)

$$ESMS(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi_{\Delta i}^{\varepsilon *}(j) \quad (2.41)$$

Onde $\phi_{\Delta i}^{\varepsilon}$ corresponde à diferença dos modos com e sem dano e N ao número de modos. Vem que $\phi_{\Delta i}^{\varepsilon}$ é dado por:

$$\phi_{\Delta i}^{\varepsilon}(j) = \text{sgn}(\phi_{ui}^{\varepsilon}(j))(\phi_{di}^{\varepsilon}(j) - \phi_{ui}^{\varepsilon}(j)) \quad (2.42)$$

Onde $\phi_{ui}^{\varepsilon}(j)$ e $\phi_{di}^{\varepsilon}(j)$ correspondem respetivamente ao modo j para a estrutura intacta e danificada e sgn à função degrau, quando $\phi_{ui}^{\varepsilon}(j) \geq 0$, $\text{sgn} = 1$ e $\phi_{ui}^{\varepsilon}(j) < 0$, $\text{sgn} = -1$.

Vem ainda que $\phi_{\Delta i}^{\varepsilon *}(j)$ corresponde à normalização de $\phi_{\Delta i}^{\varepsilon}$ para um valor máximo de 1, dado por:

$$\phi_{\Delta i}^{\varepsilon *}(j) = \frac{\phi_{\Delta i}^{\varepsilon}(j)}{\max[\phi_{\Delta i}^{\varepsilon}]} \quad (2.43)$$

Este método permite a localização e a quantificação do dano.

A identificação do dano é feita através do cálculo do limite, dado por:

$$\text{elemento danificado} = \{j: ESMS(j) > \sigma\} \quad (2.44)$$

- Enhanced Strain Mode Shape-Possibility (ESMS-P)

$$ESMS - P(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H\{ESMS(j)\} \quad (2.45)$$

Onde H é a função degrau para $H\{ESMS(j)\} = 1$ quando $ESMS(j) \geq \sigma$.

Seguindo a metodologia apresentada anteriormente, a detecção do dano é dada por:

$$\text{elemento danificado} = \{j: ESMS - P(j) > \sigma\} \quad (2.46)$$

- Strain Mode Shape-Change (SMS-C)

$$SMS - C(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\phi_{di}^\varepsilon(j) - \phi_{ui}^\varepsilon(j)}{\phi_{ui}^\varepsilon(j)} \quad (2.47)$$

Onde $\phi_{di}^\varepsilon(j)$ e $\phi_{ui}^\varepsilon(j)$ se referem ao i-ésimo modo para a estrutura com e sem dano e j ao número do elemento danificado. Este índice calcula a taxa de alteração dos modos de vibração num ponto danificado após esse ser localizado, permitindo, assim, avaliar o grau de dano das estruturas.

Cheng *et al* [49] apresentam um método que utiliza os dados obtidos por meio de SFRFs como base para a construção de uma nova função de transmissibilidade, à qual os autores denominaram de *Strain Transmissibility Function* (STF). A STF entre um ponto de carga K e o ponto de medição i é dada por:

$$H^\varepsilon_{ik}(\omega) = \frac{X_i^\varepsilon(\omega)}{F_k^\varepsilon(\omega)} = \sum_{r=1}^N \frac{\delta_{ir} \varphi_{kr}}{M_r(\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r\omega_r\omega)} \quad (2.48)$$

Sendo δ_{ir} e φ_{kr} os modos de vibração “strain” e “displacement” e ω_r a frequência de ressonância. A STF entre dois pontos i e j é dada por:

$$T^\varepsilon_{ik}(\omega) = \frac{H^\varepsilon_{ik}(\omega)}{H^\varepsilon_{jk}(\omega)} \quad (2.49)$$

2.3.5 Transmissibilidade

Em anos recentes, o conceito de transmissibilidade para um grau de liberdade foi generalizado para sistemas com múltiplos graus de liberdade[50]. Esta generalização permitiu abrir novas perspectivas e possíveis aplicações, sendo uma delas a detecção de dano.

Inicialmente, o conceito de utilizar a transmissibilidade para a detecção de dano, residia no facto de a transmissibilidade entre dois deslocamentos, medidos em locais diferentes, se alterar na presença de dano [50]. Uma possível alternativa a este método consiste em relacionar cada resposta a todas as outras, permitindo assim melhorar a capacidade de localizar o dano [51].

Maia *et al* [52] propõem para a detecção de dano, uma reformulação do critério RVAC aplicado às transmissibilidades, com o objetivo de obter um indicador mais sensível. Este indicador permite a comparação das transmissibilidades para a estrutura com e sem dano, sendo este caracterizado por:

$$RVAC(\omega) = \frac{\left| \sum_{r=1}^{N-1} d_{\tau_{rs}}(\omega) \overline{\tau_{rs}(\omega)} \right|^2}{\sum_{r=1}^{N-1} [d_{\tau_{rs}}(\omega) \overline{d_{\tau_{rs}}(\omega)}] \sum_{r=1}^{N-1} [\tau_{rs}(\omega) \overline{\tau_{rs}(\omega)}]}, s = r + 1 \quad (2.50)$$

Onde τ_{rs} e $d_{\tau_{rs}}$ correspondem respetivamente às transmissibilidades da estrutura intacta e danificada e $\bar{}$ ao complexo conjugado.

Maia *et al* [52] propõem também o critério *Transmissibility Damage Indicator* (TDI) para o caso de se efetuarem várias medições, variando a posição j da força aplicada (em M posições). Este baseia-se na correlação entre as transmissibilidades de pares de coordenadas para uma dada gama de frequências.

$$TDI = \frac{1}{N_{\omega}} \sum_{\omega} \frac{\left| \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M d_{\tau_{rs}}^{(j)} \overline{\tau_{rs}^{(j)}} \right|^2}{\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M (d_{\tau_{rs}}^{(j)} \overline{d_{\tau_{rs}}^{(j)}}) \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M (\tau_{rs}^{(j)} \overline{\tau_{rs}^{(j)}})}, s = r + 1 \quad (2.51)$$

Devido às limitações relacionadas com a detecção de danos reduzidos, apresentadas pelo TDI, na sequência deste, Almeida *et al* sugere o *Weighted Damage Indicator* (WDI).

Zhou *et al* [53] apresentam o conceito de “ *transmissibility coherence* (TC)” e apresentam outro critério o *Transmissibility Modal Assurance Criterion* (TMAC), que resulta de uma extensão do critério MAC às transmissibilidades. Para a aplicação deste, é necessário definir um vetor que agrupe os valores de TC para cada linha do espectro. O TMAC é definido por:

$$TMAC = \frac{|(TC(\omega)^d)^T (TC(\omega))^u|^2}{(((TC(\omega))^d)^T (TC(\omega))^d) ((TC(\omega))^u)^T (TC(\omega))^u)} \quad (2.52)$$

Onde os índices *d* e *u* representam os vetores com e sem dano e *T* a transposta do vetor. Os valores do TMAC variam entre 0 e 1, sendo que o valor 1 indica uma correlação perfeita, indicando assim a não presença de dano. Por outro lado, a detecção do dano é dada pelo decréscimo deste valor, pelo que a sua aproximação de 0 indica a presença de danos severos.

Chesné e Deraemaeker [54] sugerem um indicador de detecção de dano que resulta num valor escalar, que quantifica as alterações nas funções de transmissibilidade entre os pontos de medição *i* e *j*, para uma dada gama de frequências que varia entre ω_1 e ω_2 . Este é definido por:

$$D_{ij}(\omega_1, \omega_2) = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |T_{ij}^h(\omega) - T_{ij}^d(\omega)| d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |T_{ij}^h(\omega)| d\omega} \quad (2.53)$$

Sendo que T_{ij}^h e T_{ij}^d correspondem respetivamente às funções de transmissibilidade para a estrutura intacta e danificada. A escolha de uma gama de frequência apropriada é um dos parâmetros chave para a detecção do dano.

2.4 Métodos modernos

Com os avanços tecnológicos e perante a incapacidade dos métodos tradicionais de satisfazerem simultaneamente os quatro níveis sugeridos por Rytter [8], surgiram os métodos modernos que utilizam ferramentas de tratamento de sinal avançadas ou inteligência artificial. Dentro destes, destacam-se a wavelet analysis, as redes neuronais artificiais e os algoritmos genéticos, sendo estes descritos em seguida.

2.4.1 Wavelet Analysis

A Wavelet Analysis é uma análise tempo-frequência, que contrariamente à análise de Fourier, tem uma capacidade de fornecer informações mais detalhadas para sinais não estacionários [55]. Esta característica levou à sua aplicação em diversas áreas, entre as quais a detecção de dano. Este método consiste em decompor um sinal nos seus componentes, ganhando assim a capacidade de encontrar singularidades nas funções consideradas. Assim sendo, uma alteração nos coeficientes de funções wavelet pode ser utilizada para detetar dano [21].

2.4.2 Redes Neurais Artificiais

As redes neuronais artificiais (RNA) utilizam algoritmos avançados que permitem a sua adaptação às estruturas em questão, através da sua grande capacidade de reconhecimento de padrões e de análise [1]. Segundo Rhim e Lee, [56] esta metodologia está associada a uma fase de treino e a uma fase de reconhecimento. Na fase de treino, são elaborados modelos da estrutura com diferentes tipos de dano, os quais são designados por padrões. Estes padrões são organizados em classes de acordo com a localização e a severidade do dano. Na fase do reconhecimento, uma estrutura com dano desconhecido é classificada perante a classe mais próxima resultante do “treino”, sendo o dano da estrutura identificado como o dessa mesma classe.

2.4.3 Algoritmos Genéticos

Segundo Gomes e Silva [57], os algoritmos genéticos (AG) são técnicas baseadas na “Teoria da Evolução”, estes simulam o processo evolutivo numericamente e representam os parâmetros de um dado problema, codificando-os num vetor. Por sua vez, os vetores dos parâmetros são simplificados em “bits” (sequências de uns e zeros). Esse vetor de “bits” pode ser decodificado no respetivo valor do parâmetro do problema, possibilitando a sua avaliação mediante uma função de aptidão representativa das características.

Um algoritmo genético possui alta eficiência a nível de cálculos de danos, conseguindo em simultâneo reduzir os tempos de computação para a detecção dano em estruturas complexas.

3 Fundamentos teóricos

3.1 Equação de Equilíbrio

A equação de equilíbrio dinâmico de um sistema complexo com um dado número de graus de liberdade e com a presença de amortecimento viscoso é dada por:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (3.1)$$

Onde $[M]$, $[K]$ e $[C]$ correspondem, respetivamente, às matrizes de massa, rigidez e amortecimento, $\{x(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$ e $\{\ddot{x}(t)\}$ aos vetores de deslocamento, velocidade e aceleração para o instante t e $\{f(t)\}$ ao vetor de forças exteriores aplicadas no sistema.

Na presença de uma força de excitação do tipo harmónica de amplitude F , o vetor de forças é dado por:

$$\{f(t)\} = F e^{i\omega t} \quad (3.2)$$

Pelo que, a resposta também harmónica do sistema no domínio da frequência é traduzida da seguinte forma:

$$\{x(t)\} = \bar{X} e^{i\omega t} \quad (3.3)$$

Procedendo à substituição das equações 3.2 e 3.3 na equação de equilíbrio dinâmico (3.1), esta pode ser reescrita do seguinte modo:

$$(-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])\{X(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (3.4)$$

Assim sendo, a relação entre a resposta $X(\omega)$ e a excitação $F(\omega)$ para cada frequência ω é dada por:

$$\{X(\omega)\} = [H(\omega)] \{F(\omega)\} \quad (3.5)$$

Onde $[H(\omega)]$ é a matriz de recetâncias que contém toda a informação sobre as características dinâmicas do sistema. Esta corresponde ao inverso da matriz de rigidez dinâmica $[Z(\omega)]$, como é demonstrado na equação 3.6:

$$[H(\omega)] = [Z(\omega)]^{-1} = (-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])^{-1} \quad (3.6)$$

Cada elemento da matriz $H_{i,j}(\omega)$ corresponde a uma FRF individual que estabelece uma relação entre a resposta de uma coordenada i , devida a uma força de excitação aplicada no ponto j .

$$H_{i,j}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{F_j(\omega)} \quad (3.7)$$

As FRFs são funções complexas no domínio da frequência, caracterizadas por uma parte real e uma parte imaginária. Estas podem ser definidas através do deslocamento, da velocidade e da aceleração, resultando respetivamente a Recetância $H(\omega)$, Mobilidade $Y(\omega)$ e a Acelerância $A(\omega)$.

$$H(\omega) = \frac{\textit{Deslocamento}}{\textit{Força de excitação}} \quad (3.8)$$

$$Y(\omega) = \frac{\textit{Velocidade}}{\textit{Força de excitação}} \quad (3.9)$$

$$A(\omega) = \frac{\textit{Aceleração}}{\textit{Força de excitação}} \quad (3.10)$$

3.2 Strain FRFs

Para obter a formulação modal em termos de extensão, importa lembrar a teoria fundamental da análise modal. A teoria modal afirma que o deslocamento numa determinada coordenada pode ser aproximado pela soma de um número n de modos [58].

$$u(t) = \sum^n \phi_i q_i(t) \quad (3.11)$$

Sendo que, u corresponde à resposta em termos de deslocamentos na direção x , ϕ_i ao i -enésimo modo de vibração, q_i à coordenada modal generalizada e t ao tempo.

Segundo a teoria da elasticidade, para pequenos deslocamentos, a relação extensão (strain)/deslocamento é dada por:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial}{\partial x} u \quad (3.12)$$

Similarmente, existe a mesma relação entre os modos de vibração devidos à extensão e os modos de vibração devidos ao deslocamento:

$$\psi_x = \frac{\partial}{\partial x} \phi_i \quad (3.13)$$

Dadas estas relações, a expressão 3.11 pode ser reescrita do seguinte modo:

$$\varepsilon(t) = \sum^n \psi_i q_i(t) \quad (3.14)$$

A relação entre a coordenada modal generalizada q e uma força introduzida F é caracterizada por:

$$q_i = \Lambda_i^{-1} \phi_i F \quad (3.15)$$

Com:

$$\Lambda_i = (-\omega^2 m_i + j\omega c_i + k_i) \quad (3.16)$$

Onde m_i , c_i e k_i correspondem respetivamente à i -enésima massa modal, amortecimento modal e rigidez modal e ω à frequência de excitação.

Substituindo a equação 3.15 na 3.14, resulta que:

$$\varepsilon_i = \sum_{i=1}^n \psi_i \Lambda_i^{-1} \phi_i F \quad (3.17)$$

Assim sendo, a matriz das SFRFs pode ser definida pela seguinte expressão:

$$[H^\varepsilon] = \sum_{i=1}^n \Lambda_i^{-1} \{\psi_i\} \{\phi_i\} = [\psi_i][\Lambda^{-1}][\phi]^T \quad (3.18)$$

Pelo que

$$\begin{bmatrix} H_{11}^\varepsilon & H_{12}^\varepsilon & \cdots & H_{1N_i}^\varepsilon \\ H_{21}^\varepsilon & H_{22}^\varepsilon & \cdots & H_{2N_i}^\varepsilon \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{N_o1}^\varepsilon & H_{N_o2}^\varepsilon & \cdots & H_{N_oN_i}^\varepsilon \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \Lambda_i^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{1i} \phi_{1i} & \psi_{1i} \phi_{2i} & \cdots & \psi_{1i} \phi_{N_i i} \\ \psi_{2i} \phi_{1i} & \psi_{2i} \phi_{2i} & \cdots & \psi_{2i} \phi_{N_i i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \psi_{N_o i} \phi_{1i} & \psi_{N_o i} \phi_{2i} & \cdots & \psi_{N_o i} \phi_{N_i i} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Sendo que N_o e N_i correspondem respetivamente ao número de extensómetros e ao número de pontos de excitação.

Contrariamente às FRFs, a matriz das SFRFs não é simétrica pelo que H_{21}^ε pode diferir de H_{12}^ε . Isto demonstra que a reciprocidade não é garantida, dado que excitar o ponto A e medir no ponto B, poderá ser diferente de excitar o ponto B e medir no ponto A.

Importa ainda referir que qualquer coluna da matriz das SFRF contém todas as informações relativas aos modos de vibração em termos de extensão (ψ), enquanto qualquer linha da matriz das SFRF contém informações sobre os modos de deslocamento (ϕ). Esta propriedade em particular leva a aplicações práticas - para obter as formas dos modos de extensão, é preciso excitar a estrutura num ponto e medir as respostas em termos de extensão nos pontos de medição considerados. As formas dos modos em termos de deslocamento podem ser determinadas utilizando um extensómetro como sensor de referência fixo e movendo o ponto de excitação (como no teste de impacto).

3.3 Conceito de Transmissibilidade

Para melhor entender o conceito de transmissibilidade, é em seguida apresentada uma pequena introdução teórica.

Definindo H como a matriz de receptância, a relação entre as amplitudes de resposta e a força aplicada é dada por:

$$\{X\} = [H]\{F\} \quad (3.20)$$

Escolhendo U e K como as amplitudes do conjunto de coordenadas desconhecidas e conhecidas e A o conjunto de coordenadas onde são aplicadas as forças, estes podem-se relacionar da seguinte forma:

$$\{X_U\} = [H_{UA}]\{F_A\} \quad (3.21)$$

$$\{X_K\} = [H_{KA}]\{F_A\} \quad (3.22)$$

A relação entre as respostas das coordenadas U e K é dada através da substituição de F_A , sendo esta definida por:

$$\{X_U\} = [H_{UA}][H_{KA}]^{-1}\{X_K\} \quad (3.23)$$

Sendo a matriz de transmissibilidade dada por:

$$[T_{AKU}] = [H_{UA}][H_{KA}]^{-1} \quad (3.24)$$

Pelo que resulta:

$$\{X_U\} = [T_{AKU}]\{X_K\} \quad (3.25)$$

Note-se que para a inversão da matriz $[H_{KA}]$ é necessário que o número de coordenadas K seja igual ao de A ($\#K=\#A$). Caso $\#K<\#A$ a inversão não é possível, no

entanto se $\#K > \#A$ realiza-se uma pseudo-inversão. Conclui-se, então, que a inversão é possível sempre que $\#K \geq \#A$ [59].

3.4 Amortecimento

O amortecimento consiste na perda de energia do sistema. Esta energia é transmitida para fora do sistema por algum mecanismo de radiação, ou dissipada dentro do mesmo [60].

Como é demonstrado anteriormente, na equação de equilíbrio dinâmico de um sistema, o amortecimento viscoso, sendo uma propriedade deste, está relacionado diretamente com a velocidade $\dot{x}(t)$.

Existindo amortecimento, é possível definir novas propriedades do sistema, tal como o coeficiente de amortecimento, c , que traduz o valor real do amortecimento de um sistema, o coeficiente de amortecimento crítico, $c_{critico}$, definido pelo valor de c para o qual o sistema minora a oscilação provocada e o coeficiente de amortecimento, definido em seguida na equação 3.26:

$$\xi = \frac{c}{c_{critico}} \quad (3.26)$$

De acordo com o valor do fator de amortecimento, o sistema é caracterizado da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \textit{Subamortecido}; & \xi < 1 \\ \textit{Críticamente amortecido}; & \xi = 1 \\ \textit{Super amortecido}; & \xi > 1 \end{array} \right.$$

Na figura 3.1 é demonstrada a resposta do sistema para os três tipos de amortecimento

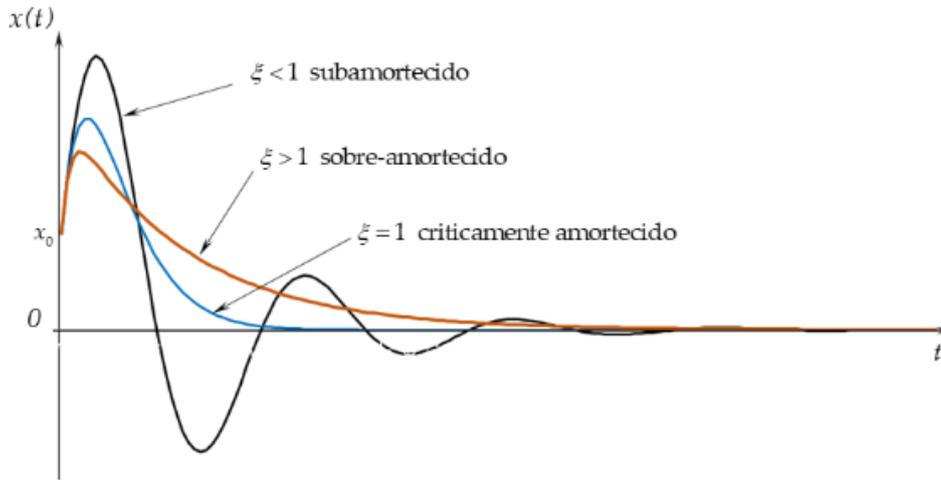


Figura 3.1 - Comportamento do sistema para os diferentes tipos de amortecimento

3.5 Indicadores de detecção de dano

Será por meio dos indicadores que irá ser feita a comparação das respostas obtidas por meio de FRFs e SFRFs (translação, rotação e extensão), com e sem dano, de modo a avaliar a sua capacidade, de simultaneamente detetar, localizar e quantificar relativamente o dano. Os indicadores propostos para este trabalho são apresentados e descritos em seguida:

- Razão: este indicador, demonstrado na equação 3.27, consiste no módulo do quociente entre as FRFs com (H_{ij}^{CD}) e sem dano (H_{ij}^{SD}), para cada frequência (ω) da gama estudada. A não presença de dano é traduzida por uma correlação perfeita entre as duas curvas, pelo que o indicador irá apresentar o valor de 1, para aquela frequência.

$$Razão(\omega) = \left| \frac{H_{ij}^{CD}(\omega)}{H_{ij}^{SD}(\omega)} \right| \quad (3.27)$$

-Erro relativo: Este é dado pelo módulo do erro relativo, como é demonstrado na equação 3.28 e difere do anteriormente apresentado, na medida em que, a não presença de dano é demonstrada pelo valor 0.

$$Erro(\omega) = \left| \frac{H_{ij}^{CD}(\omega) - H_{ij}^{SD}(\omega)}{H_{ij}^{SD}(\omega)} \right| \quad (3.28)$$

-Cross Signature Scale Factor (CSF): Caracterizado por ser um método muito sensível ao amortecimento, este analisa as discrepâncias entre as amplitudes de duas FRFs, com e sem dano, para uma dada frequência. O valor 1 indica a ausência de discrepâncias, o que se reflete na ausência de dano.

$$CSF(\omega) = \frac{2 \cdot |(H_{ij}^{CD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{SD}(\omega)|}{[(H_{ij}^{CD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{CD}(\omega) + ((H_{ij}^{SD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{SD}(\omega))]} \quad (3.29)$$

Sendo que * representa o complexo conjugado.

-Coerência (Coe): Este indicador permite correlacionar duas curvas, por meio da equação 3.30 Tal como o CSF, a correlação perfeita entre as curvas, ou seja, a não existência de dano, aponta para um valor de Coe igual a 1.

$$Coe(\omega) = \frac{(H_{ij}^{CD}(\omega) + H_{ij}^{SD}(\omega)) \cdot ((H_{ij}^{CD}(\omega))^* + (H_{ij}^{SD}(\omega))^*)}{2 \cdot [(H_{ij}^{CD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{CD}(\omega) + ((H_{ij}^{SD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{SD}(\omega))]} \quad (3.30)$$

3.6 Método dos elementos finitos

O MEF é um método geral e poderoso, devido à sua capacidade de resolver problemas concretos de engenharia, que envolvem geometrias, comportamentos físicos ou condições fronteira complexas. Neste método, o domínio do problema é decomposto em vários subdomínios mais simples, sendo que em cada um é feita uma aproximação das equações que regem o fenómeno, por meio de um método variacional. Isto permite representar uma função complexa como uma composição de funções polinomiais simples. Esta divisão resulta num erro que poderá ser diminuído com o aumento de subdomínios [61].

4 Metodologia

A metodologia utilizada para a realização do presente trabalho foi desenvolvida por Pedro Fernandes[1]. Esta tem como objetivo detetar, localizar e quantificar relativamente o dano de uma viga, aplicando diferentes indicadores. Para testar a sua aplicabilidade, foram inicialmente obtidos os dados por via numérica e posteriormente por via experimental, sendo as suas metodologias descritas neste capítulo.

4.1 Metodologia numérica

Para corretamente detetar e localizar o dano, é realizada uma simulação numérica de uma viga livre-livre, com base no método dos elementos finitos (MEF), com o intuito de obter as respostas dinâmicas de translação, rotação e extensão para a viga excitada. Estas respostas, são obtidas por meio da simulação efetuada no programa *Ansys Mechanical APDL* e posteriormente analisadas e tratadas no programa *MATLAB*.

4.1.1 Aplicação do Método dos elementos finitos

Como já havia sido referido anteriormente, a estrutura estudada por via numérica neste trabalho corresponde a uma viga livre-livre, cujas características são apresentadas na figura 4.1 e nas tabelas 4.1 e 4.2.

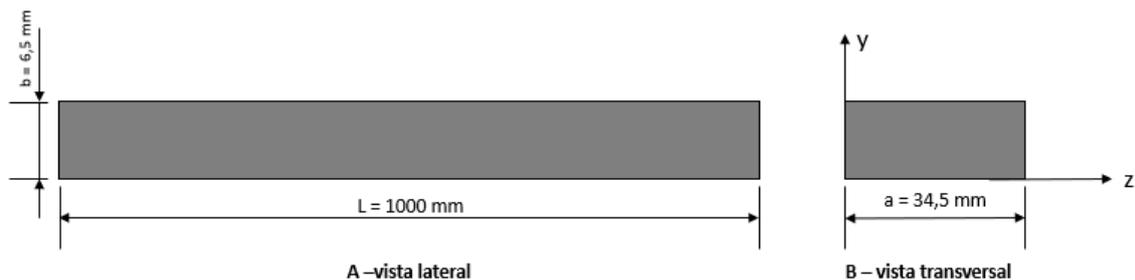


Figura 4.1 - Modelo da viga

Tabela 4.1 - Propriedades geométricas da viga

Comprimento da viga (L)	1000 mm
Largura da viga (a)	34,5 mm
Espessura (b)	6,5 mm
Área da secção transversal (A_t)	224,25 mm ²
Segundo momento de área ($I_{x'}$)	7,90 × 10 ⁻¹⁰ mm ⁴

Tabela 4.2 - Propriedades do material da viga

Módulo de Young (E)	210 GPa
Módulo de elasticidade transversal (G)	80 GPa
Densidade (ρ)	7850 kg/m ³
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3

Na modelação da viga foi considerada a teoria de vigas de Euler-Bernoulli. Esta teoria adota a premissa de pequenas deformações, a ausência dos efeitos dos esforços cortantes sobre a deflexão lateral e um material constituinte com comportamento linear elástico [62].

O MEF como foi anteriormente referido, divide a viga em diversos elementos finitos. A cada um destes corresponde um elemento de viga tridimensional que possui dois nós, cada um definido por seis graus de liberdade (três de deslocamento e três de rotação) representados na figura 4.2 [63].

$$\underline{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$$

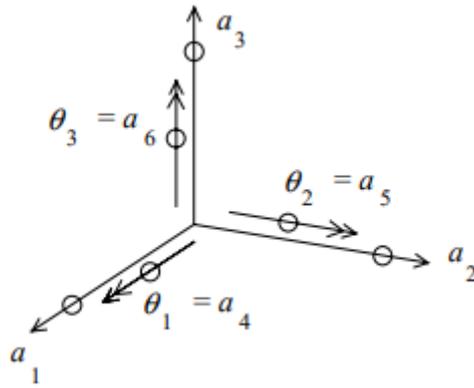


Figura 4.2 - Deslocamentos generalizados [62]

A cada um dos seis deslocamentos generalizados correspondem seis forças generalizadas, três forças associadas aos deslocamentos e três momentos associados à rotação (figura 4.3).

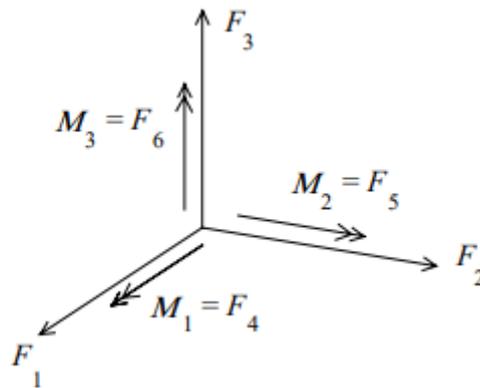


Figura 4.3 - Forças generalizadas [62]

4.1.2 Implementação do dano

Para o presente trabalho, o dano considerado foi sob a forma de fissura, para tal é feita uma redução da espessura de um elemento através da remoção de uma parcela do material.

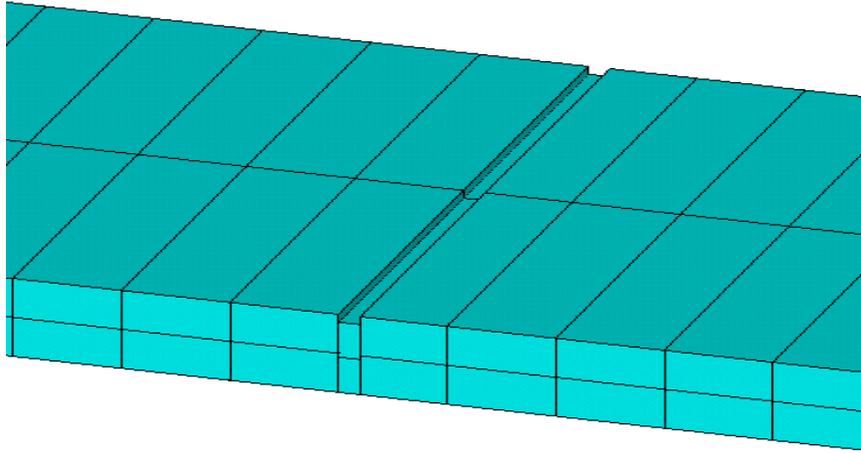


Figura 4.4 - Demonstração da implementação do dano

O dano introduzido é expresso em percentagem relativa à redução da espessura do elemento. Esta é descrita em seguida na equação 4.1

$$\%_{dano} = \frac{b - b'}{b} \times 100 \quad (4.1)$$

Sendo que b e b' correspondem, respetivamente, à espessura inicial do elemento e à nova espessura do elemento danificado.

Em seguida, na figura 4.5 é representado o cálculo dos segundos momentos de área (I_x^{sd} e I_y^{sd}) correspondentes à secção sem dano.

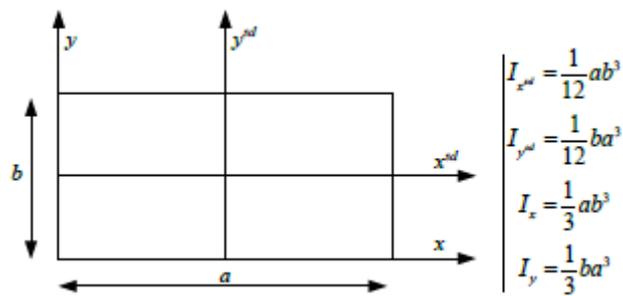


Figura 4.5 - Segundo momento de área de uma secção retangular

A propriedade segundo momento de área é calculada segundo a localização do seu centro de massa (C.M). A redução da espessura causada pela extração do material, leva à alteração da geometria do elemento e por conseguinte à variação do seu C.M em

relação ao eixo y . Com isto torna-se necessário recorrer ao Teorema dos Eixos Paralelos, enunciado na equação 4.2:

$$I = \bar{I} + Ad^2 \quad (4.2)$$

Onde I representa o segundo momento de área do eixo pretendido, \bar{I} o segundo momento de área em relação ao centro de massa, A a área de secção e d a distância entre o C.M e o eixo paralelo pretendido.

Na figura 4.6 é representada a influência da redução da espessura na posição do eixo que passa no C.M.

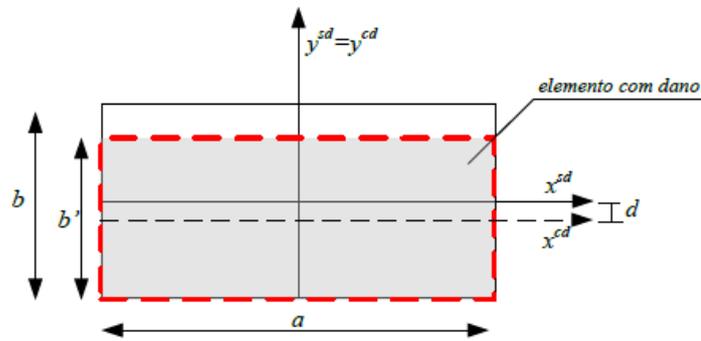


Figura 4.6 - Figura representativa da influência da redução da espessura sob os eixos que passam no C.M.

Sabendo a altura do elemento danificado (b') torna-se possível caracterizar:

- O segundo momento de área do elemento danificado

$$\bar{I}_x^{cd} = \frac{1}{12} a b'^3 \quad (4.3)$$

-A distância d , a qual corresponde à diferença de alturas entre os C.M. do elemento com e sem dano

$$d = \left(\frac{b - b'}{2} \right) \quad (4.4)$$

E a área da secção transversal do elemento com dano (A_d)

$$A_d = b' \times a \quad (4.5)$$

Recorrendo ao Teorema dos Eixos Paralelos, enunciado na equação 4.2 e procedendo-se à substituição com as equações acima enunciadas, torna-se possível calcular o segundo momento de área do elemento danificado relativamente ao eixo do C.M. do elemento sem dano.

$$\bar{I}_x^{sd} = \bar{I}_x^{cd} + A_d d^2 \quad (4.6)$$

4.1.3 Propriedades modais da estrutura

Para iniciar o processo de escolha da malha, moldou-se a viga e procurou-se o número mínimo de elementos necessários para obter as frequências naturais, referentes à gama em estudo (0 a 1000 Hz). Para tal, obtiveram-se as matrizes globais, por meio da assemblagem das matrizes locais, e em seguida foi resolvido um problema de valores e vetores próprios, sendo que aos primeiros correspondem as frequências naturais e aos segundos os modos de vibração. Deste estudo resultou que o número mínimo de elementos necessários para obter as primeiras 7 frequências naturais, representadas na tabela 4.3, seriam 15.

Tabela 4.3 - Frequências naturais da viga

	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª
Frequências Naturais (Hz)	34,55	95,22	186,59	308,27	460,18	642,27	854,12

A cada frequência natural está associado um modo de vibração. As figuras que se seguem representam os modos associados a cada uma das frequências anteriormente representadas.

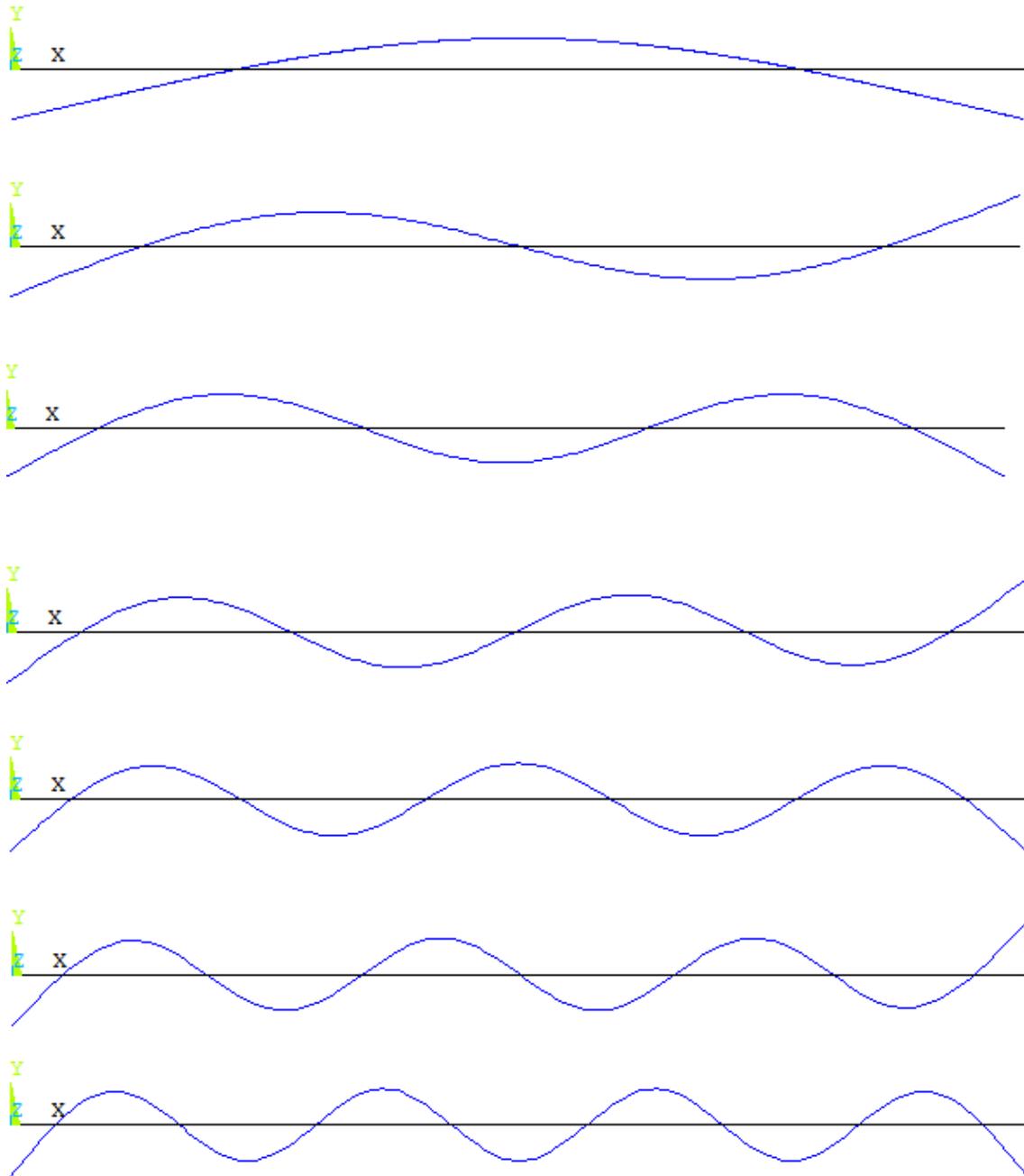


Figura 4.7 - Modos de flexão da viga

4.1.4 Escolha da malha

Inicialmente, optou-se por testar uma malha constituída por elementos de 5 mm, efetuando-se um refinamento desta na zona junto ao dano. Este refinamento consistia em aumentar o número de elementos nesta zona, de modo a facilitar a deteção e a localização do dano. Para esta malha, representada na figura 4.8, foi testada a influência do número de elementos presentes e do comprimento da zona refinada. Este estudo da

influência dos fatores anteriormente referidos, encontra-se representado no anexo 2. Este provou que a malha refinada é tao eficiente quanto uma malha normal, constituída apenas por elementos de 5 mm. Assim sendo e de modo a reduzir o tempo de computação, escolheu-se esta última, evidenciada na figura 4.9.

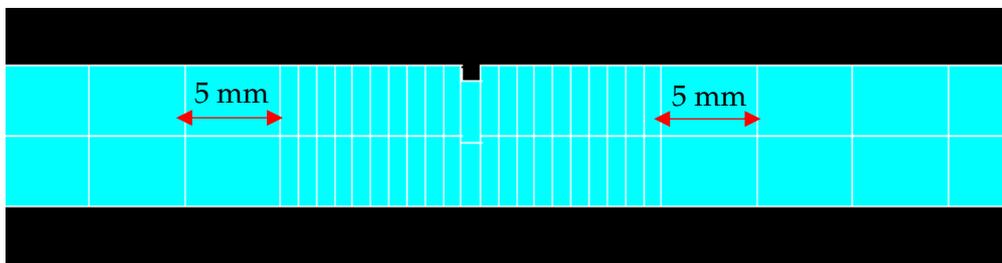


Figura 4.8 - Malha refinada

Para facilitar na modelação e extração dos dados, foi definido que o elemento imediatamente a seguir ao elemento danificado teria 4 mm de comprimento.

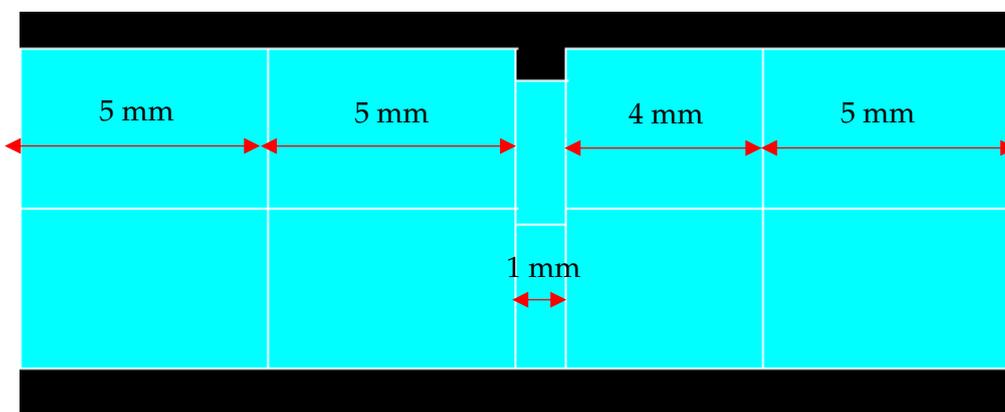


Figura 4.9 - Malha escolhida

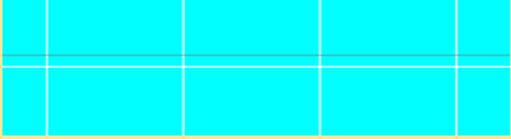
4.1.5 Metodologia aplicada

Como já havia sido referido, a metodologia adotada para a realização deste trabalho surge de uma adaptação da desenvolvida por Pedro Fernandes [1]. Esta tem por base a comparação das FRFs, SFRFs e transmissibilidades da estrutura intacta e danificada, por meio de indicadores (Razão, Erro, COE e CSF), com o objetivo de detetar e localizar o dano. O uso das transmissibilidades, contrariamente ao uso das FRFs e SFRFs, oferece a vantagem de não ser necessário conhecer a força, tendo somente de garantir que esta é aplicada no mesmo ponto na estrutura com e sem dano.

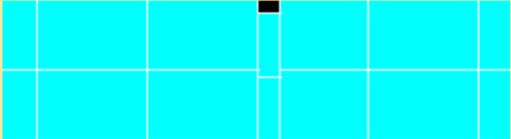
Em seguida, são apresentados dois esquemas que resumem a metodologia numérica utilizada nesta dissertação, sendo o primeiro (figura 4.10) correspondente à utilização de FRFs de rotação e translação e SFRFs. O segundo corresponde (figura 4.11)

à utilização das transmissibilidades. Refere-se ainda que as primeiras 5 etapas são análogas a ambos os esquemas, pelo que o segundo apenas é apresentado a partir da 6ª etapa.

1ª Etapa
Modelação da viga em Ansys



2ª Etapa
Definição do dano



3ª Etapa
Definição dos pontos de leitura e de excitação



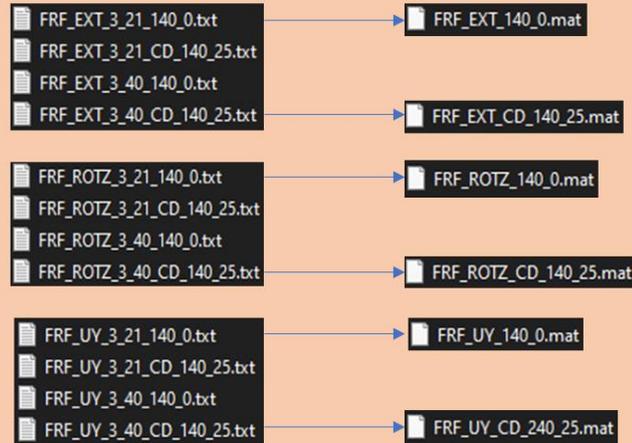
4ª Etapa
Criação das matrizes das FRFs de cada identidade

$$H^{SD}(\omega) = \begin{bmatrix} H_{kp}^{SD}(\omega_i) \\ \vdots \\ H_{kp}^{SD}(\omega_f) \end{bmatrix} \quad H^{CD}(\omega) = \begin{bmatrix} H_{kp}^{CD}(\omega_i) \\ \vdots \\ H_{kp}^{CD}(\omega_f) \end{bmatrix}$$

k - ponto onde se encontra o sensor
P - ponto onde a força é aplicada
 H^{SD} - matriz das FRFs sem dano
 H^{CD} - matriz das FRFs com dano

5ª Etapa

Tratamento de dados



6ª Etapa

Aplicação dos indicadores a cada resposta em frequência na gama de frequências em estudo e determinação da média

$$CSF(\omega) = \frac{2 \cdot |(H_{ij}^{CD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{SD}(\omega)|}{[(H_{ij}^{CD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{CD}(\omega) + (H_{ij}^{SD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{SD}(\omega)]}$$

$$Coe(\omega) = \frac{(H_{ij}^{CD}(\omega) + H_{ij}^{SD}(\omega)) \cdot ((H_{ij}^{CD}(\omega))^* + (H_{ij}^{SD}(\omega))^*)}{2 \cdot [(H_{ij}^{CD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{CD}(\omega) + (H_{ij}^{SD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{SD}(\omega)]}$$

$$MI_{kp} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} I_{11}(\omega)}{\omega_f} & \dots & \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} I_{1p}(\omega)}{\omega_f} \\ \omega_f & & \omega_f \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} I_{k1}(\omega)}{\omega_f} & \dots & \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} I_{kp}(\omega)}{\omega_f} \\ \omega_f & & \omega_f \end{bmatrix}$$

MI refere-se á matriz com a média dos valores resultantes da aplicação do indicador escolhido

7ª Etapa

Contabilização das variações existentes para cada ponto de medição pela aplicação das várias forças na estrutura

$$VS = \begin{bmatrix} \sum_{p=1}^{p=p} MI_{1p} \\ \vdots \\ \sum_{p=k}^{p=p} MI_{kp} \end{bmatrix}$$

8ª Etapa

Normalização dos valores através da divisão do valor máximo

$$NVS = \begin{bmatrix} VS_1 \\ VS_{\max} \\ \vdots \\ VS_p \\ VS_{\max} \end{bmatrix}$$

9ª Etapa

Representação gráfica

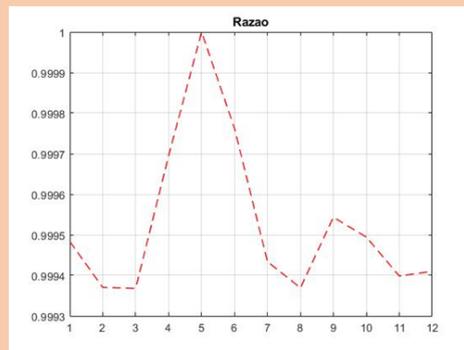


Figura 4.10 - Esquema da metodologia referente à localização de dano por meio de FRFs e SFRFs

As etapas presentes na parte do esquema com o fundo amarelo, correspondem ao processo de simulação, onde foi modelada e excitada a viga, com o intuito de obter as respostas dinâmicas dos diversos pontos de medição, determinando assim as matrizes de Aceleração e Extensão, com (H_{ij}^{CD}) e sem (H_{ij}^{CD}) dano, para a gama de frequências definida. Na terceira etapa são definidos os pontos de medição e de excitação, sendo as localizações destas apresentadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Localização dos pontos de medição e excitação

Sensor	Posição na viga (mm)
1	5
2	95
3	185
4	275
5	365
6	455
7	545
8	635
9	725
10	815
11	905
12	995

Relativamente à parte da metodologia definida na zona a laranja (5^a a 9^a etapa), é inicialmente feito o tratamento dos dados agrupando as FRFs/SFRFs em matrizes 12X12 (12 pontos de medição 12 pontos de excitação) com e sem dano (5^a etapa). Posteriormente, (6^a etapa) são aplicados os vários indicadores a cada uma das FRFs/SFRFs da matriz de Receptâncias/ Extensões, estes indicadores pretendem identificar as variações existentes devido à presença de dano na estrutura, este estudo é realizado numa gama de frequências previamente definida, gama esta que deve excitar vários modos de vibração. Ainda nesta etapa é calculada a média das variações obtidas pela aplicação dos indicadores, a cada FRF/SFRF, para a gama de frequência em análise. Na 7^a etapa é realizado um somatório para cada ponto de medição, que contabiliza os resultados obtidos com a aplicação de cada uma das forças de excitação, forças estas aplicadas em vários pontos ao longo da estrutura. No final deste processo ficamos com o vetor definido por VS. Na 8^a etapa é realizada uma normalização do vetor VS ao valor máximo obtido (NVS), nesta etapa pretende-se conseguir localizar o dano na estrutura, o ponto que obtiver o valor de 1 corresponde ao local onde o dano deve estar posicionado. Na 9^a etapa é apresentada a representação gráfica do vetor NVS, no eixo das ordenadas são apresentados os valores obtidos com o indicador aplicado e no eixo das abcissas são apresentados os pontos de medição.

Passando agora para a metodologia referente à utilização das transmissibilidades obtidas em termos de rotação, translação e extensão, vem que:

6ª Etapa

Cálculo das transmissibilidades para cada ω

$$T_{kp}(\omega) = \begin{bmatrix} \frac{H_{11}}{H_{11}} & \frac{H_{12}}{H_{22}} & \dots & \frac{H_{1p}}{H_{kp}} \\ \frac{H_{11}}{H_{11}} & \frac{H_{22}}{H_{22}} & \dots & \frac{H_{kp}}{H_{kp}} \\ \vdots & \frac{H_{22}}{H_{22}} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \frac{H_{k=p}}{H_{k=p}} & \vdots \\ \frac{H_{k1}}{H_{11}} & \frac{H_{k2}}{H_{12}} & \dots & \frac{H_{kp}}{H_{kp}} \end{bmatrix}$$

7ª Etapa

Aplicação dos indicadores a cada resposta em frequência na gama de frequências em estudo e determinação da média

$$TIM_{kp} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} TI_{11}(\omega)}{\omega f} & \dots & \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} TI_{1p}(\omega)}{\omega f} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} TI_{k1}(\omega)}{\omega f} & \dots & \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} TI_{kp}(\omega)}{\omega f} \end{bmatrix}$$

TIM refere-se á matriz com a média dos valores resultantes da aplicação do indicador escolhido

8ª Etapa

Contabilização das variações existentes para cada ponto de medição pela aplicação das várias forças na estrutura

$$TS = \begin{bmatrix} \sum_{p=1}^{p=p} TIM_{1p} \\ \vdots \\ \sum_{p=k}^{p=p} TIM_{kp} \end{bmatrix}$$

9ª Etapa

Normalização do vetor através da divisão pelo valor máximo

$$NTS = \begin{bmatrix} \frac{TS_1}{TS_{max}} \\ \vdots \\ \frac{TS_p}{TS_{max}} \end{bmatrix}$$

10ª Etapa

Representação gráfica

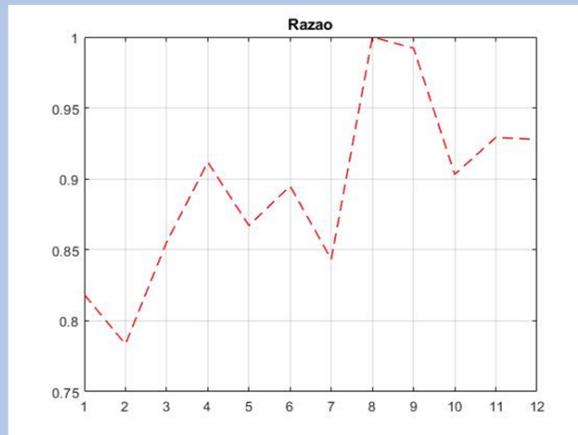


Figura 4.11 - Esquema da metodologia referente à localização do dano com a utilização das transmissibilidades

A 6ª etapa corresponde ao cálculo das transmissibilidades, para tal é feita uma divisão, para cada frequência (ω), das FRFs ou SFRFs de uma dada coluna, pela FRF ou SFRF correspondente a essa mesma coluna com um $k=p$, ou seja, a um número de coluna igual ao de linha, ou por outras palavras, as respostas "medidas" em vários pontos ao longo da estrutura são todas divididas pela resposta referente a uma medição directa, em que o ponto de medição é também de excitação. Isto permite realizar uma normalização das respostas medidas nos vários pontos de medição em relação à resposta directa. O quociente obtido é uma transmissibilidade. Nesta metodologia têm obrigatoriamente de ser aplicadas forças em todos os pontos medição e medidas as respetivas respostas em termos de deslocamento ou extensão.

Os procedimentos efetuados nas etapas de 7 a 10 são semelhantes aos definidos quando são utilizadas as FFRs/SFRFs.

4.1.6 Implementação do ruído

O ruído presente nas respostas medidas experimentalmente prejudica enormemente a detecção e localização do dano, no entanto a sua presença é inevitável. Nesta dissertação pretende-se também perceber até que ponto a sua presença inviabiliza a localização do dano.

Segundo Pedro [1], a poluição dos dados numéricos sugerida por vários autores encontra-se entre os 2-3%. Deste modo, no programa desenvolvido em *MATLAB*, optou-se por introduzir nas FRFs e SFRFs, obtidas a partir do *Ansys*, uma percentagem de ruído aleatório que varia entre 0.5 e 3. Este é caracterizado pela equação 4.7.

$$H_{ij}^{ruído} = H_{ij} \times \left[1 + \left(\frac{\%ruído}{100} \right) \times (2 \times (0.5 - rand(gama\ de\ frequência, 1))) \right] \quad (4.7)$$

Sendo que $H_{ij}^{ruído}$ e H_{ij} correspondem às matrizes de FRFs com e sem ruído e $rand$ à função que atribui x números aleatórios, compreendidos entre 0 e 1, de acordo com a gama de frequências utilizada.

4.2 Medição experimental das FRFs

Um dos objetivos desta dissertação era utilizar dados obtidos através da via experimental, FRFs e SFRFs, na metodologia de localização do dano referida no capítulo anterior, para assim perceber se existia coerência nos resultados obtidos utilizando danos numéricos e experimentais. No entanto, dada a situação pandémica vivida no decorrer da dissertação, foi somente possível obter experimentalmente as respostas dinâmicas em termos de Aceleração, FRFs, não sendo possível medir as SFRFs.

A viga utilizada no estudo experimental tinha as mesmas propriedades mecânicas na estudada numericamente, no entanto apresenta dimensões diferentes, como é demonstrado na figura 4.12

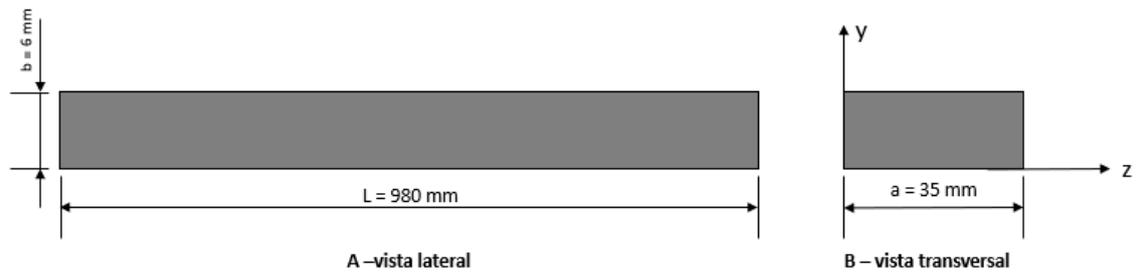


Figura 4.12 - Modelo da viga experimental

A viga foi suspensa por fios de Nylon de modo a simular a situação de apoio livre-livre, como é apresentado na figura 4.13. Nesta montagem, foram utilizados 9 acelerómetros dispostos como apresentado na tabela 4.5. A viga foi excitada na face oposta à face onde foram colocados os acelerómetros. Foram aplicadas 9 forças de excitação em pontos coincidentes com os que estavam localizados os acelerómetros. Foram utilizados acelerómetros cúbicos da marca *Bruel&Kjaer* modelo 4508 e um martelo de impacto piezoelétrico.



Figura 4.13 - Montagem experimental

Tabela 4.5 - Distribuição dos pontos de medição na viga experimental

Pontos de medição	Localização (cm)
1	1
2	8,3
3	16,4
4	24,6
5	32,7
6	49
7	65,4
8	81,8
9	97

As respostas medidas pelos acelerómetros são transmitidas aos dois módulos de entrada multiuso de seis canais *Bruel&Kjaer type 3050-A-060* e analisadas no computador através do programa *Bruel&Kjaer – Pulse LabShop* (figura 4.14), obtendo-se assim as FRFs. Os processos posteriores baseiam-se no tratamento dos dados em *MATLAB*, que coincidem com os apresentados anteriormente, nos esquemas correspondentes às metodologias numéricas utilizadas, nomeadamente a partir do 5º processo.

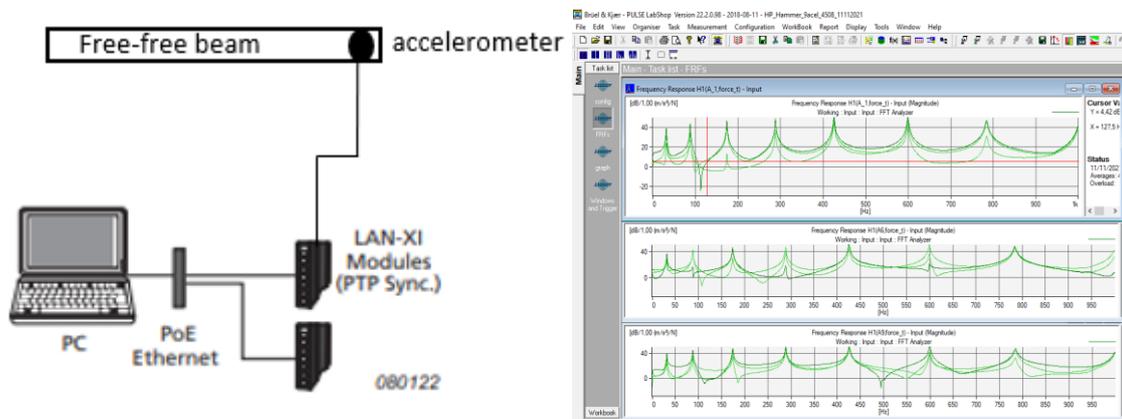


Figura 4.14 - Procedimento experimental

Contrariamente à simulação numérica, a introdução do dano não se dá pela redução da espessura, mas sim pela adição de uma ou mais massas de perfil idêntico ao apresentado na imagem 4.15. No entanto, dado que na parte numérica a introdução do dano baseava-se em retirar uma parte da massa da viga devida à redução da espessura,

considera-se que para a parte experimental o caso sem dano corresponde à viga com a massa adicionada e o caso com dano somente à viga.

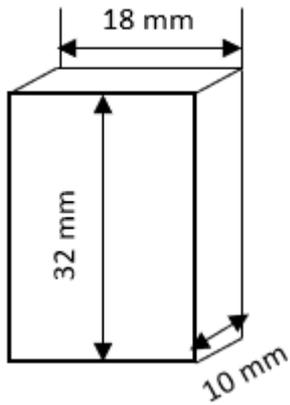


Figura 4.15 - Introdução do dano na viga experimental

5 Resultados numéricos

O principal objetivo deste trabalho passa por localizar corretamente o dano, com base nas respostas dinâmicas de aceleração e extensão obtidas diretamente da viga. Para tal, recorre-se ao uso das metodologias apresentadas no capítulo anterior, de modo a identificar os indicadores mais eficazes.

É necessário também entender a influência que outros fatores possam ter na detecção e localização de dano. Esses fatores são:

- Localização do dano
- Gama de frequências
- Percentagem de dano
- Localização da força aplicada
- Ruído

Em seguida neste capítulo, são apresentados os resultados e as conclusões relativas à influência de cada um desses fatores, para cada uma das metodologias.

5.1 Análise dos resultados utilizando como input as FRFs e SFRs

5.1.1 Eficácia dos indicadores

Para melhor entender a eficácia dos indicadores, é inicialmente aplicado um único dano com 1 mm de largura e com uma redução de 10 % da espessura, em diferentes locais, para uma gama de frequências de 0-1000 Hz. Os diferentes casos de dano em estudo são apresentados na tabela 5.1 e representados na figura 5.1.

Tabela 5.1 - Localização dos diferentes casos de dano

Caso de dano (D)	Posição (mm)	Sensores (S)
1	50	1/2
2	140	2/3
3	240	3/4
4	340	4/5
5	500	6/7
6	660	8/9
7	860	10/11
8	940	11/12

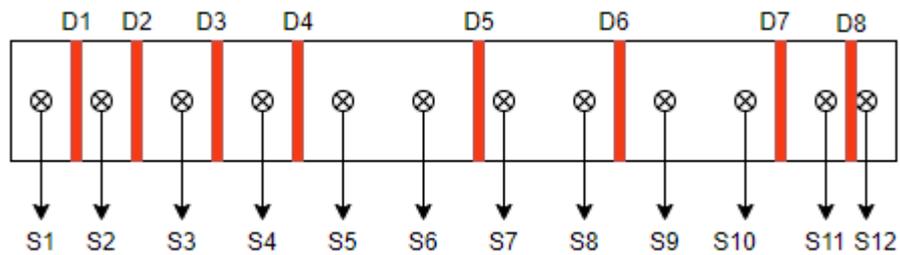


Figura 5.1 - Representação dos diferentes casos de dano

Relativamente à eficácia dos indicadores e respeitando a metodologia anteriormente apresentada, tem-se que a presença de dano é identificada pelo ponto máximo do gráfico, para os indicadores Razão e Erro e pelo ponto mínimo, para os indicadores Coe e CSF. Posto isto, seguem-se dois exemplos que permitem esclarecer a metodologia utilizada:

- O primeiro refere-se ao uso do indicador Razão para a deteção de dano para o caso 4, utilizando as extensões. Para que tal aconteça, é necessário que o ponto máximo do gráfico se encontre no sensor 4 ou 5, como é demonstrado na figura 5.2.

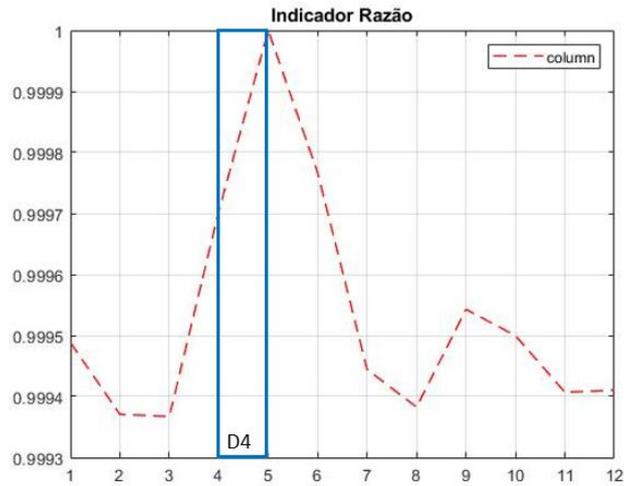


Figura 5.2 - Exemplo para o caso de dano D4

- O segundo, corresponde ao uso do indicador Erro para o caso de dano 1 utilizando as FRFs em termos de rotações. De igual modo ao anterior, a presença de dano é indicada pelo ponto máximo entre o sensor 1 e 2. Como é representado na figura 5.3, este caso em estudo não permite uma correta localização do dano, dado que o ponto máximo não se encontra no sensor 1 ou 2, mas sim no 3.

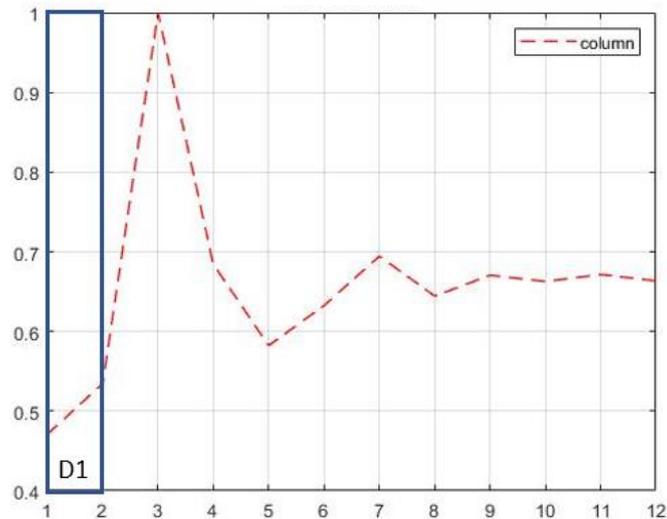


Figura 5.3 - Exemplo para o caso de dano D1

Seguindo esta mesma lógica e aplicando-a para os diferentes indicadores, utilizando FRFs em termos de rotação e translação e SFRFs, obtiveram-se os restantes resultados apresentados nas tabelas 5.2 a 5.5, onde os espaços preenchidos a verde correspondem aos danos detetados e os vermelhos aos não detetados. Os gráficos relativos aos resultados apresentados nas tabelas, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, encontram-se registados nos anexos 3, 4, 5 e 6.

Tabela 5.2 - Resumo da eficácia do indicador Razão para 10 % de dano

Razão	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão								
rotação								
translação								

Tabela 5.3 - Resumo da eficácia do indicador Erro para 10 % de dano

Erro	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão								
rotação								
translação								

Tabela 5.4 - Resumo da eficácia do indicador CSF para 10 % de dano

CSF	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão								
rotação								
translação								

Tabela 5.5 - Resumo da eficácia do indicador Coe para 10 % de dano

Coe	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão								
rotação								
translação								

Analisando os resultados obtidos nas tabelas anteriormente apresentadas e considerando que o indicador com maior eficácia é o que identifica e localiza um maior número de casos de dano, constata-se que o indicador mais eficaz é o indicador Razão. Este conseguiu localizar quase todos os casos de dano, com exceção do caso de dano D5 aquando foram utilizados dados relativos à extensão e o caso D3 quando foram utilizados dados relativos à rotação. Para melhorar a deteção desses casos de dano, foi posteriormente utilizada uma malha mais rigorosa, constituída apenas por elementos de 1 mm. Com isto, foi possível identificar corretamente o caso D3, como é demonstrado na figura 5.4. Relativamente ao D5, este encontra-se na zona central da viga, sendo esta uma das mais difíceis de detetar quando utilizados dados em termos de extensão.

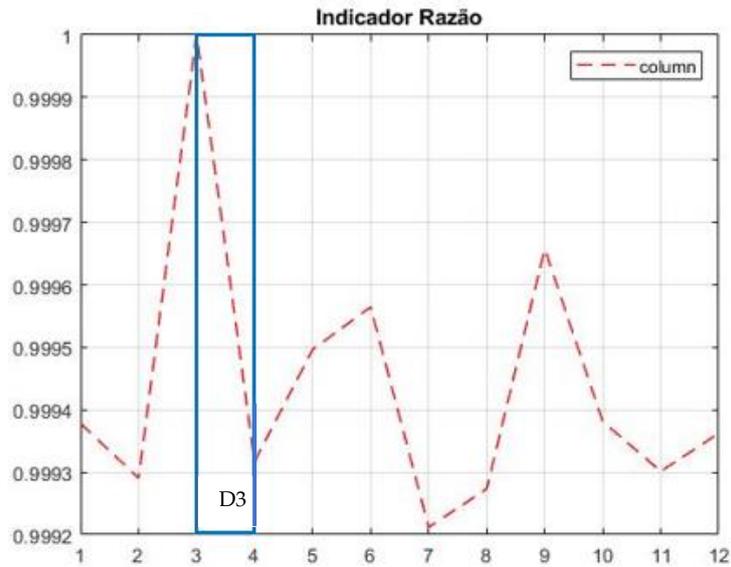


Figura 5.4 - Gráfico relativo ao caso D3 para a malha com 1 mm

Observa-se também que os indicadores que demonstraram menor eficácia foram o indicador Erro e o Coe, sendo que o CSF embora ligeiramente mais eficaz que os anteriores, não apresenta resultados viáveis o suficiente para futuramente optar pela sua utilização. Retira-se também a importante conclusão de que os dados provenientes das extensões apresentam uma boa capacidade de localização de dano, pelo que estas poderão ser importantes em futuros projetos de monitorização de estruturas, dadas as vantagens anteriormente enunciadas.

5.1.2 Gama de frequências

Neste subcapítulo, pretende-se perceber a influência que a gama de frequências escolhida tem na correta deteção de dano. Para tal, são considerados diferentes intervalos de frequências, intervalos estes apresentados na tabela 5.6, os quais abrangem diferente número de modos de vibração. Assim sendo, pretende-se estudar o efeito que a variação do número de modos produz nos resultados obtidos pelos indicadores.

Tabela 5.6 - Gama de frequências consideradas para o estudo

Gama de frequências (Hz)	0-250	0-500	0-750	0-1000
Nº de modos de vibração	3	5	6	7

De modo a evidenciar a influência destas na capacidade de deteção dos indicadores, são apresentadas, em seguida nas tabelas 5.7 a 5.10, os resultados correspondentes às gamas de frequência anteriormente apresentadas, para os diferentes indicadores, utilizando, considerando tal como no subcapítulo anterior, que o elemento

considerado com dano sofre uma redução da espessura de 10%. Do mesmo modo, a verde estão assinalados os casos de dano localizados corretamente e a vermelho os localizados de forma incorreta. Os gráficos correspondentes aos resultados apresentados nas tabelas encontram-se nos anexos 7, 8 e 9.

Tabela 5.7 - Resumo do estudo da eficácia do indicador Razão para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência

Razão	Gama de frequências (Hz)											
	Extensão				Rotação				Translação			
Localização do dano (mm)	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000
50	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
140	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
240	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde	Verde	Vermelho	Verde
340	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
500	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
660	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
860	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
940	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

Analisando os resultados da tabela 5.7, conclui-se que a escolha de um menor intervalo de frequências irá traduzir-se numa maior eficácia geral do indicador, evidenciando-se o intervalo de 0-500 Hz, que permitiu localizar corretamente todos os casos de dano, utilizando dados em termos de translação, rotação e extensão. Um dos exemplos da vantagem de utilizar intervalos mais reduzidos, corresponde ao caso de dano D5 (dano a 500 mm) utilizando as extensões e ao caso de dano D3 (dano a 240mm) utilizando as translações e rotações, dado que o aumento da gama de frequências impossibilitou a sua correta deteção. As figuras 5.5, 5.6 e 5.7, mostram o aumento da dificuldade na deteção do dano, no caso de dano D5 com o alargamento da gama considerada, não só para a extensão, como também para a rotação e translação. No entanto, para estes últimos o aumento do intervalo não impossibilitou a deteção do dano, mas tornou a sua identificação menos clara. Constatou-se também, a dificuldade em detetar o o caso de dano D3 para os diferentes intervalos de frequência considerados, que se pensa ficar a dever-se à influência dos diferentes modos e os seus respetivos comportamentos nesta zona da viga.

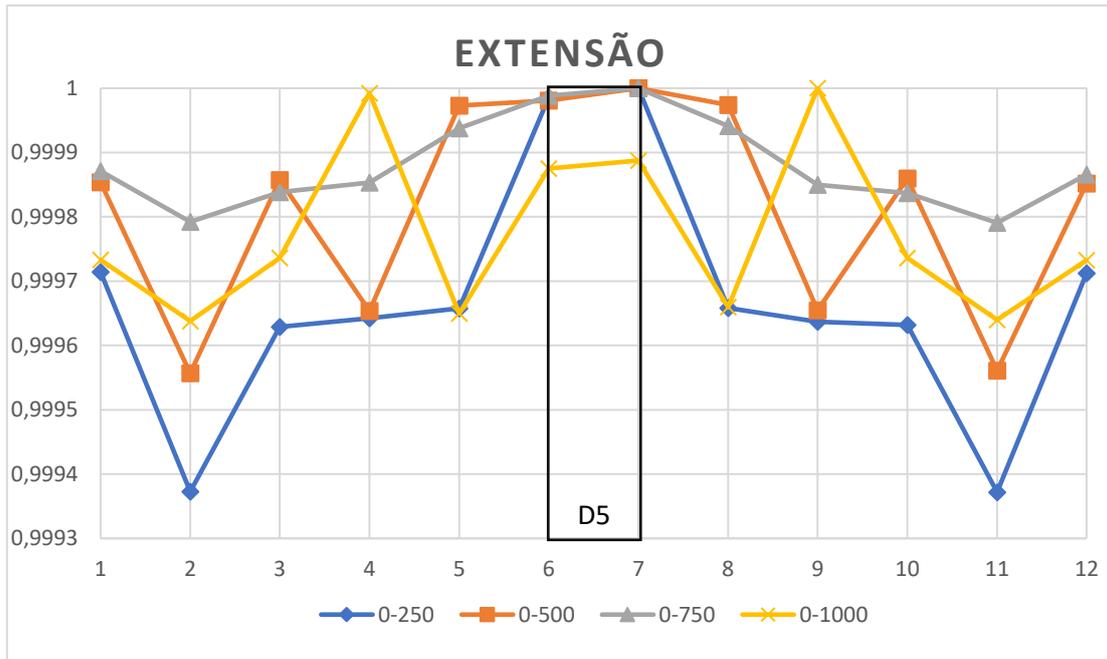


Figura 5.5 - Estudo do caso de dano D5 utilizando o indicador Razão e as extensões para quatro gamas de frequência em estudo

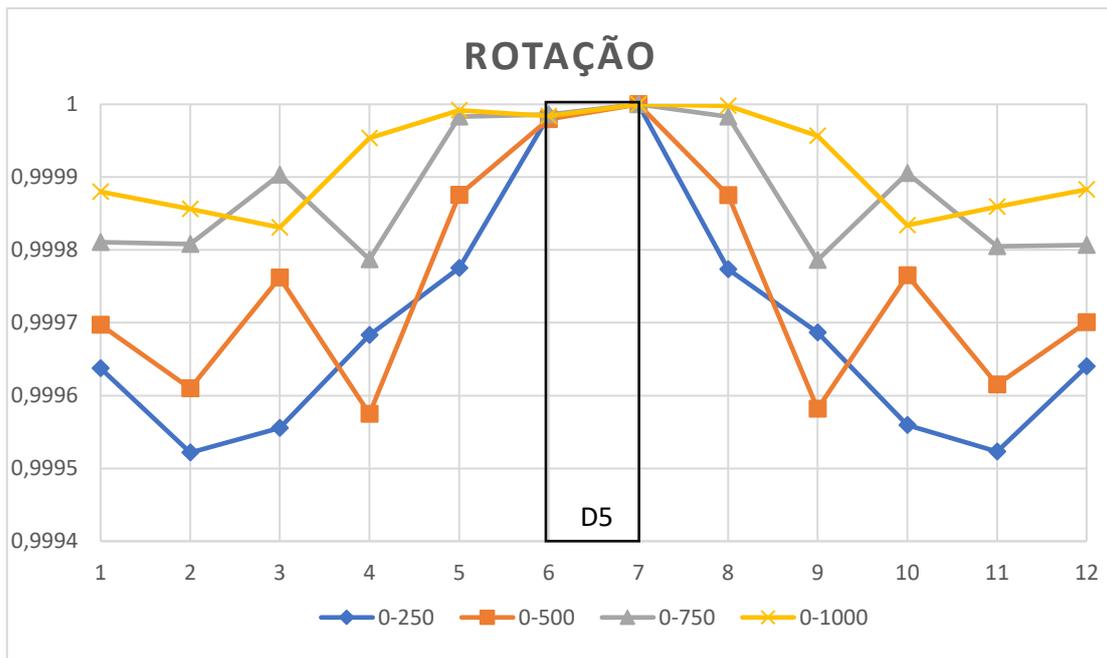


Figura 5.6 - Estudo do caso de dano D5 utilizando o indicador Razão e as rotações para quatro gamas de frequência em estudo

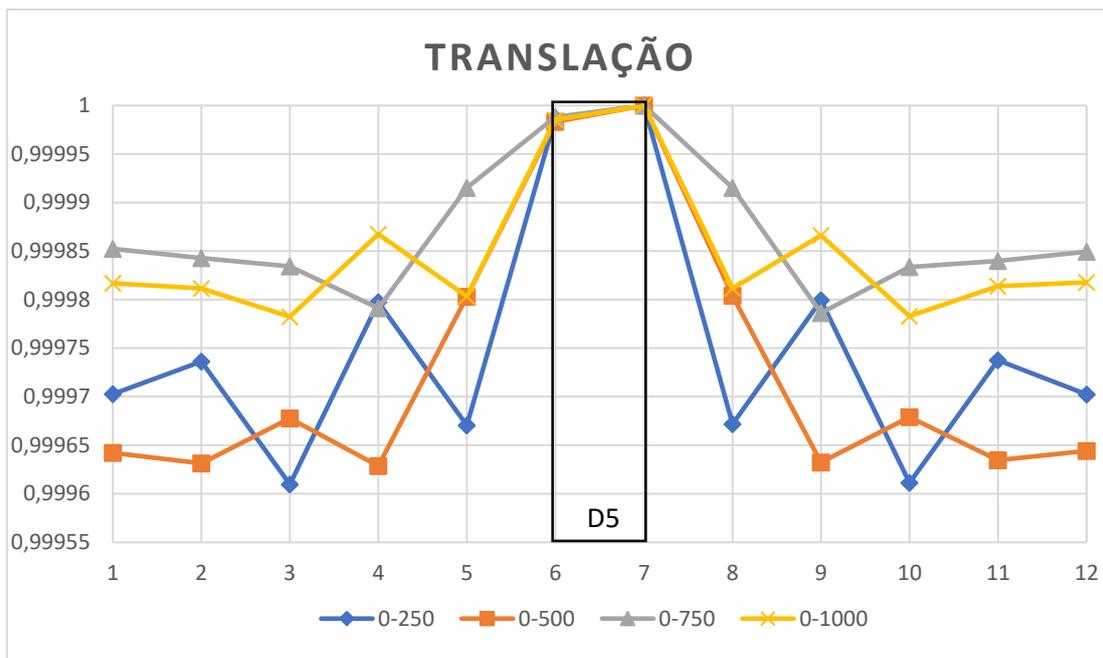


Figura 5.7 - Estudo do caso de dano D5 utilizando o indicador Razão e as translações para quatro gamas de frequência em estudo

A tabela 5.8 apresenta os resultados correspondentes ao estudo da influência da gama de frequências no indicador Erro:

Tabela 5.8 - Resumo do estudo da eficácia do indicador Erro para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência

Erro	Gama de frequências (Hz)											
	Extensão				Rotação				Translação			
Localização do dano (mm)	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000
50	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
140	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
240	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
340	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
500	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
660	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
860	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
940	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

Relativamente ao indicador Erro, conclui-se que uma menor gama de frequências (0-250 e 0-500 Hz) permite a obtenção de resultados significativamente melhores, quando comparados com os obtidos para gamas maiores (0-1000 Hz). Evidencia-se ainda, que os melhores resultados foram os obtidos quando foram utilizados dados em termos de translação, para a gama de frequências de 0-250 Hz, que apenas não conseguiu localizar o caso de dano D3, localizado a 240mm. As figuras 5.8 a 5.10, evidenciam a maior eficácia do indicador Erro para uma menor gama de frequências, através do estudo do caso de dano D2.

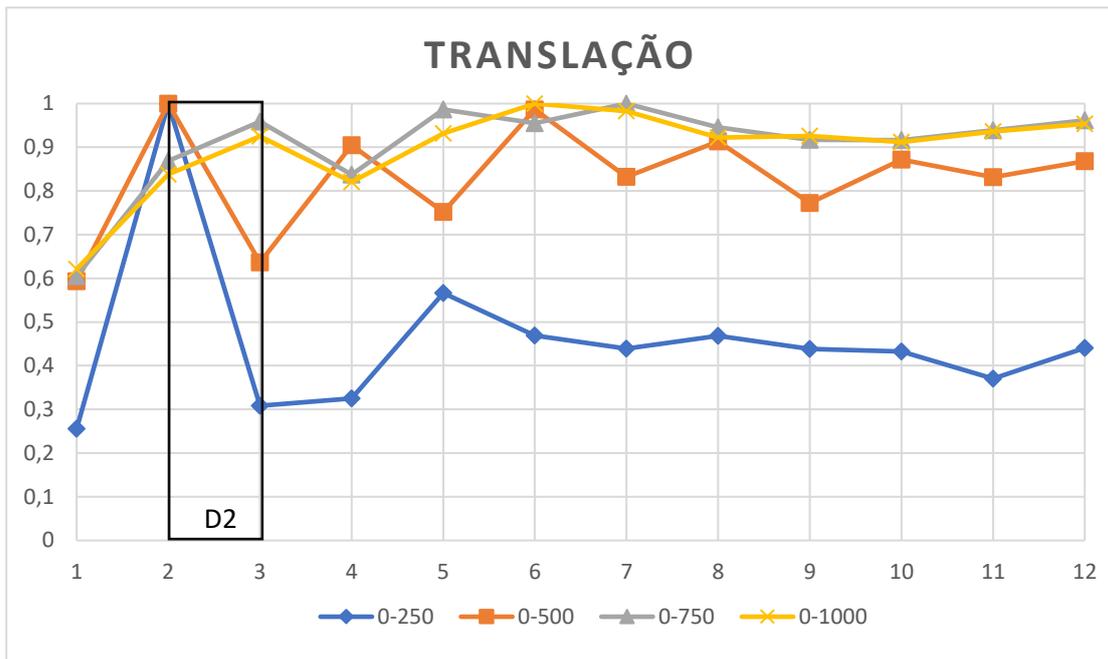


Figura 5.8 - Estudo do caso de dano D2 utilizando o indicador Erro e as translações para quatro gamas de freqüência em estudo

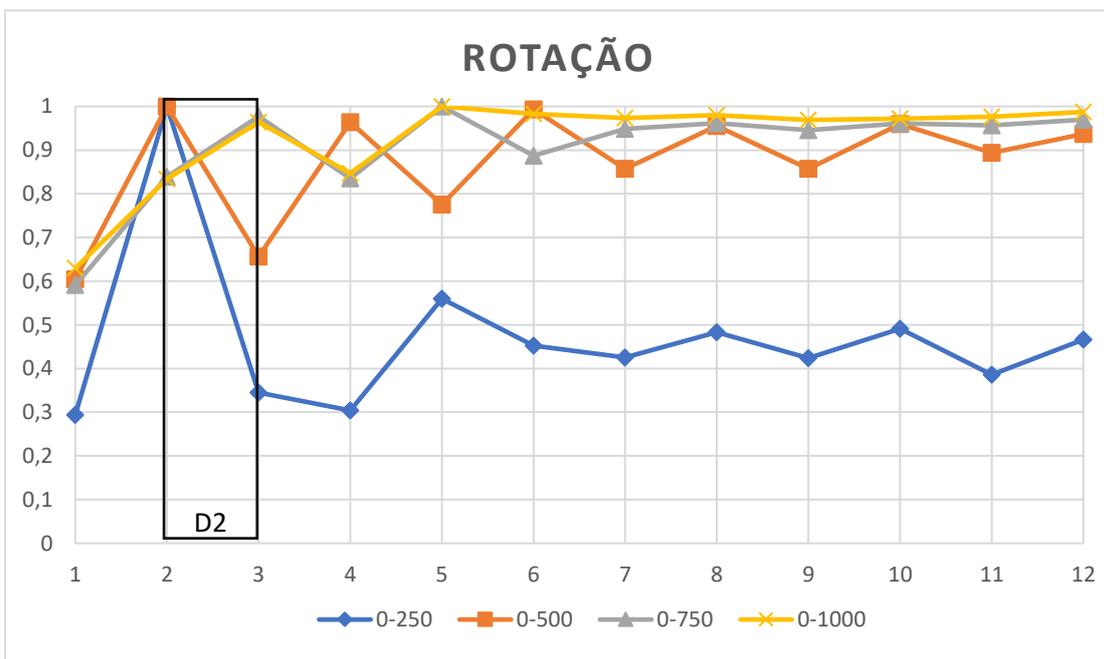


Figura 5.9 - Estudo do caso de dano D2 utilizando o indicador Erro e as rotações para quatro gamas de freqüência em estudo

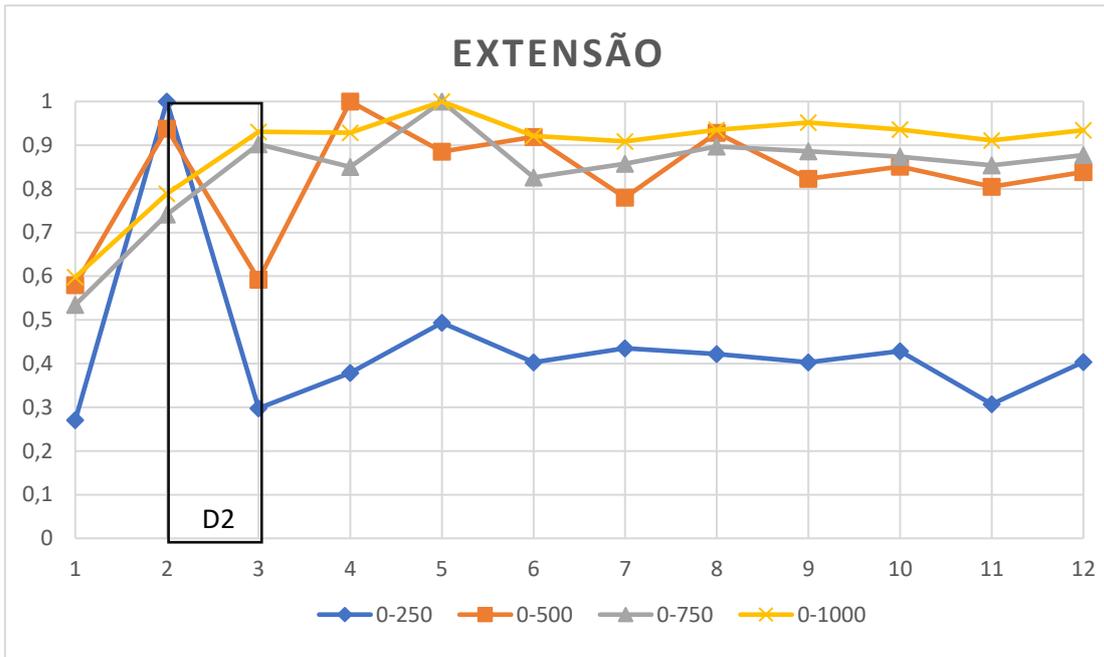


Figura 5.10 - Estudo do caso de dano D2 utilizando o indicador Erro e as extensões para quatro gamas de frequência em estudo

As tabelas 5.9 e 5.10 apresentam os resultados obtidos com a aplicação dos indicadores CSF e Coe.

Tabela 5.9 - Resumo do estudo da eficácia do indicador CSF para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência

CSF	Gama de frequências (Hz)											
	Extensão				Rotação				Translação			
Localização do dano (mm)	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000
50	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Red	Red
140	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Red	Red
240	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
340	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
500	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green
660	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
860	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green
940	Red	Red	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red

Tabela 5.10 - Resumo do estudo da eficácia do indicador Coe para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência

Coe	Gama de frequências (Hz)											
	Extensão				Rotação				Translação			
Localização do dano (mm)	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000
50	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Red	Red
140	Green	Red	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red
240	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
340	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
500	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green
660	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
860	Green	Red	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red
940	Red	Red	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red

Analisando agora os dados correspondentes aos indicadores CSF e Coe, rapidamente se averigua que estes somente conseguiram localizar o dano nas localizações mais perto dos extremos da viga, nas gamas de frequência de 0-250Hz e 0-500Hz, sendo que a aplicação dos indicadores utilizando as translações foi o que apresentou melhores resultados. Na figura 5.11 é representado o estudo do caso de dano D1, que vem evidenciar o que se referiu anteriormente. Como já foi referido, para estes indicadores o dano é identificado não pelo ponto máximo, mas sim pelo ponto mínimo.

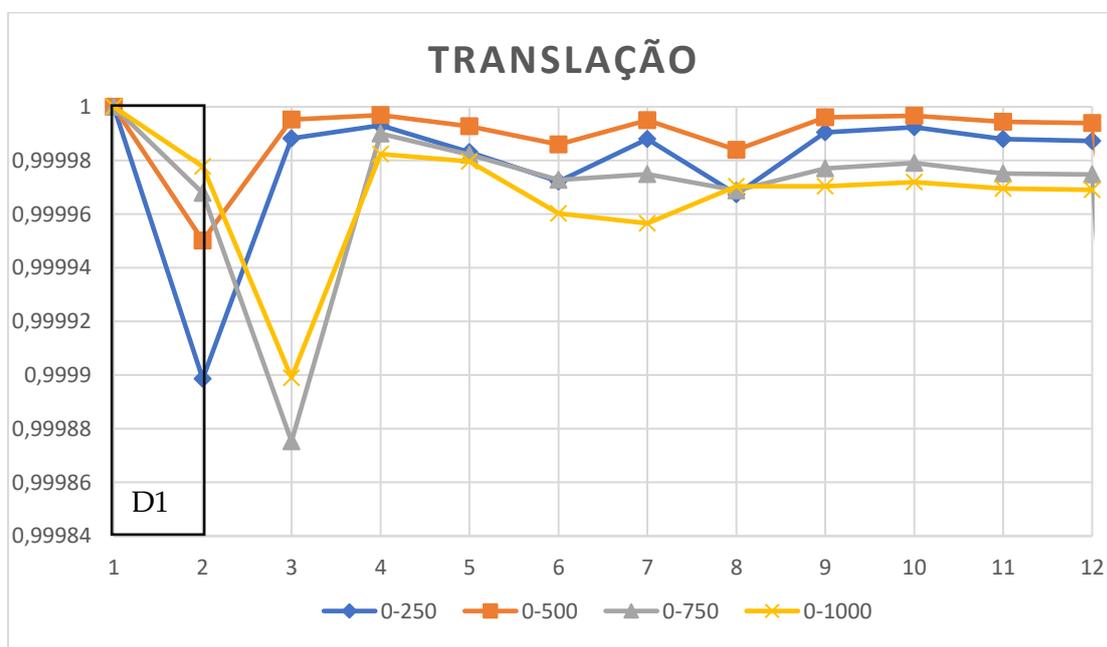


Figura 5.11 - Estudo do caso de dano D1 utilizando o indicador Coe e as translações para quatro gamas de frequência em estudo

Com os dados obtidos anteriormente, conclui-se que não é possível escolher uma gama de frequências que permita o favorecimento simultâneo de todos os indicadores.

Assim sendo e tendo em conta que o indicador Razão se mostrou o mais eficaz, optou-se por o utilizar para o estudo dos restantes fatores influenciadores, na gama de frequências que permitiu obter melhores resultados, a gama de 0-500 Hz.

5.1.3 Percentagem de dano

Um dos fatores importantes no estudo da deteção de dano recai na relação da dimensão do dano e a sua deteção. É de esperar que danos mais reduzidos provoquem uma maior dificuldade na sua localização. Com isto, pretende-se concluir se a deteção de danos inferiores é possível. Assim sendo, são analisados os diferentes casos de dano para percentagens de 5% e 2%, apenas para o indicador Razão e para a gama 0-500 Hz. Os resultados correspondentes são apresentados nas tabelas 5.11 e 5.12.

Tabela 5.11 - Resumo da eficácia do indicador Razão para um dano de 5%

Razão (5%)	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão								
rotação								
translação								

Tabela 5.12 - resumo da eficácia do indicador Razão para um dano de 2%

Razão (2%)	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão								
rotação								
translação								

Relativamente à maior ou menor dificuldade de detetar o dano consoante a percentagem de dano, apresenta-se o estudo do caso de dano D6 (dano a 660 mm), no qual este foi simulado para as 3 diferentes percentagens de dano, correspondentes a 2%, 5% e 10, sendo a sua comparação representada nas figuras 5.12 a 5.14.

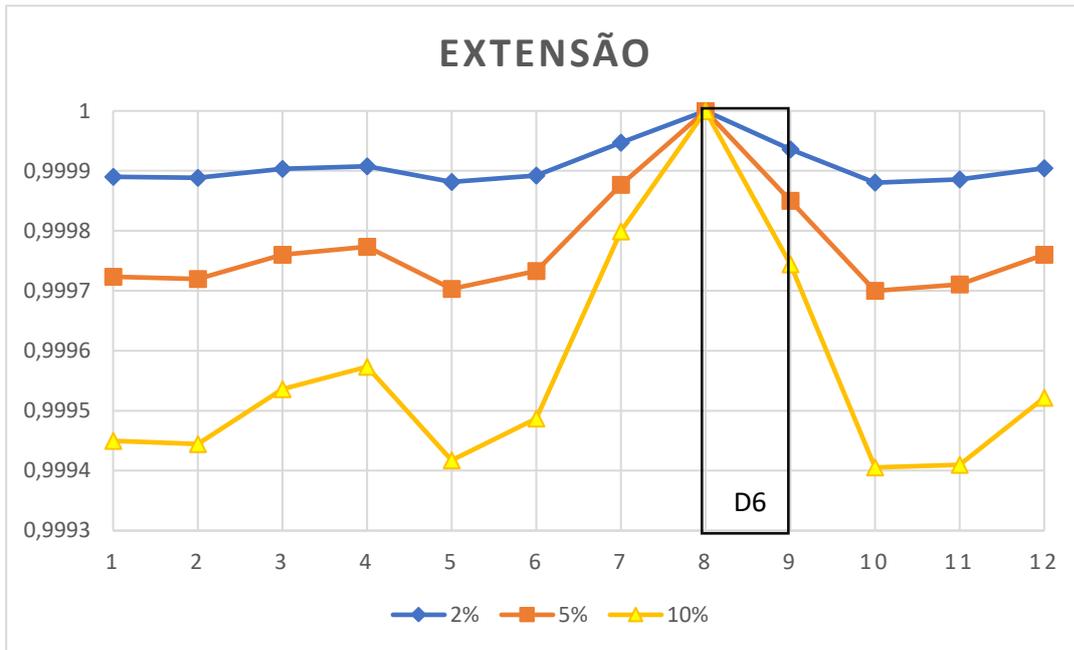


Figura 5.12 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as extensões para diferentes reduções de espessura e o indicador razão

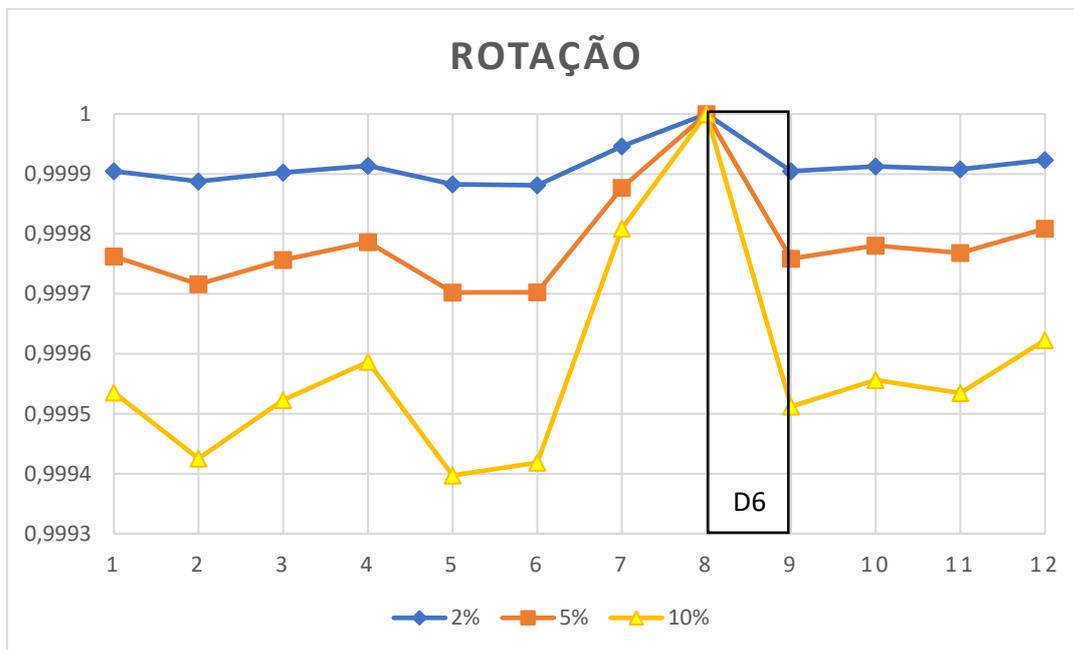


Figura 5.13 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as rotações para diferentes reduções de espessura e o indicador Razão

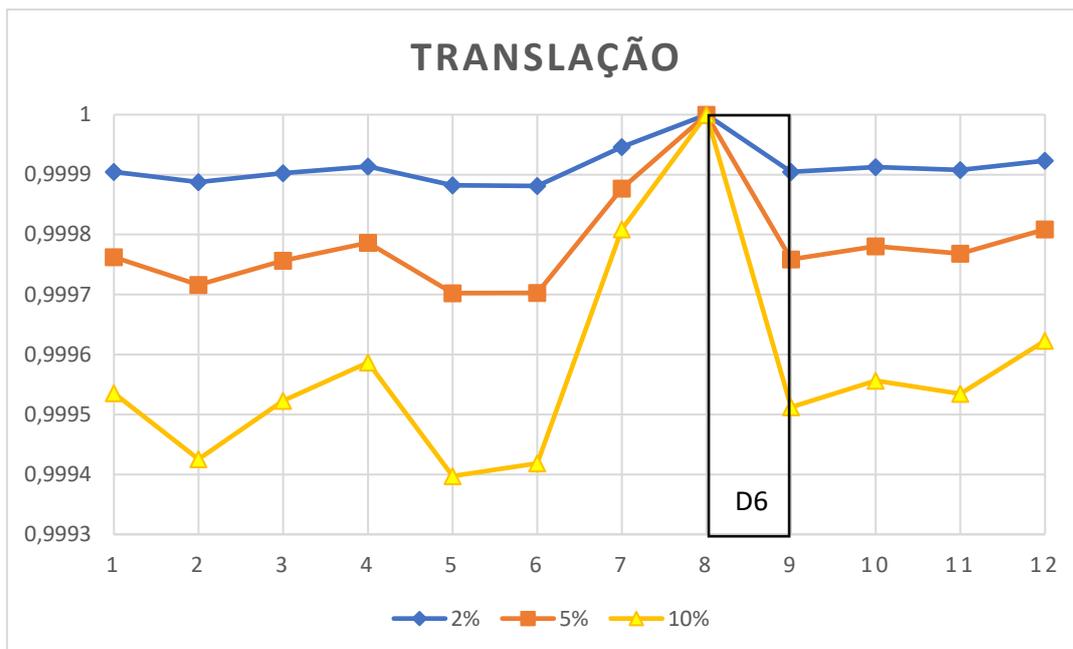


Figura 5.14 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as translações para diferentes reduções de espessura e o indicador Razão

Tal como se previa, através da análise dos gráficos anteriormente apresentados, vem que para uma maior percentagem de dano é representada uma maior diferença entre o valor máximo 1, o qual indica a localização do dano, e o ponto mínimo. Tem-se como exemplo o caso da rotação, no qual o ponto mínimo correspondente aos 10 % encontra-se na casa dos 0,9994 enquanto o correspondente aos 2% apresenta um valor na ordem dos 0,9999. Apesar disto, confirma-se que apesar de uma maior dificuldade, é possível detetar danos com dimensões mais reduzidas.

5.1.4 Ruído

Como já havia sido anteriormente referido, o ruído presente nas FRFs medidas experimentalmente é um dos principais fatores para uma incorreta deteção e localização de dano. Assim sendo, foi realizado um estudo para perceber a sua influência na capacidade dos diferentes indicadores de localizarem o dano, utilizando dados em termos de rotação, extensão e translação, para diferentes percentagens de dano considerado.

Previamente, concluiu-se que o indicador mais eficaz é a Razão e que este permitiu obter melhores resultados quando foi utilizada a gama de frequências de 0-500 Hz. Assim sendo, o estudo dos efeitos do ruído será realizado apenas para este indicador e para esta gama de frequências, variando apenas a percentagem de dano.

Inicialmente, será testada a influência do ruído para uma redução da espessura correspondente a 10 %. Para cada caso de estudo são efetuados diversos ensaios, sendo a sua eficácia traduzida em percentagem. Nas tabelas 5.13, 5.15 e 5.16, são apresentados os resultados, quando foram utilizados dados em termos de extensão, rotação e translação, respetivamente. Na tabela 5.14 é apresentada a legenda correspondente ao estudo.

Tabela 5.13 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as extensões e um dano de 10%

Extensão	% Ruído			
Local do dano	0,5	1	2	3
50	Verde	Verde	Verde Claro	Amarelo
140	Verde	Verde	Verde	Verde
240	Verde	Amarelo	Vermelho	Vermelho
340	Verde	Verde	Verde Claro	Amarelo
500	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho
660	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo
860	Verde	Verde	Verde	Verde
940	Verde	Verde	Verde	Amarelo

Tabela 5.14 - Legenda

Cor	Eficácia (%)
Verde	100
Verde Claro	90-100
Amarelo	80-90
Amarelo	60-80
Vermelho	0-60

Analisando agora, os resultados obtidos por estudo, utilizando as extensões, verifica-se que para qualquer percentagem de ruído considerado, o caso de dano D5 torna-se impossível de detetar, contrariamente os casos de dano D2 e D7 foram detetáveis para todas as percentagens de ruído adicionado às FRFs. A dificuldade de localizar corretamente o caso de dano D5 para qualquer percentagem mínima de ruído era expectável, dada a dificuldade em detetar danos localizados a meio da viga por meio de extensões, mesmo na situação sem ruído. Destaca-se também o caso de dano D3, que apenas é detetável para ruídos muito reduzidos (0.5%). Em regra geral, um ruído superior a 1 % promove um grande aumento da dificuldade da deteção dos danos, sendo que para 2% grande parte dos casos são ainda detetáveis, enquanto para 3% só se conseguiu detetar, sem sombra de dúvida os casos de dano D2 (140mm) e D7(860mm). Nas figuras 5.15 a 5.17 é demonstrado o estudo relativo à influência do ruído no caso de dano 6, para diferentes percentagens do mesmo.

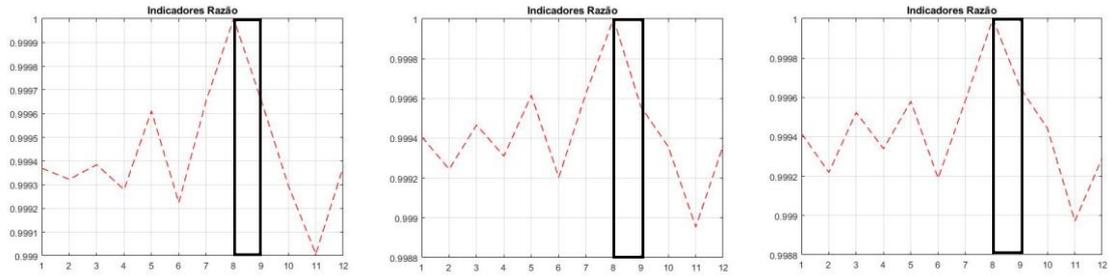


Figura 5.15 - Gráficos correspondentes ao caso de dano D6 para um ruído de 0.5%

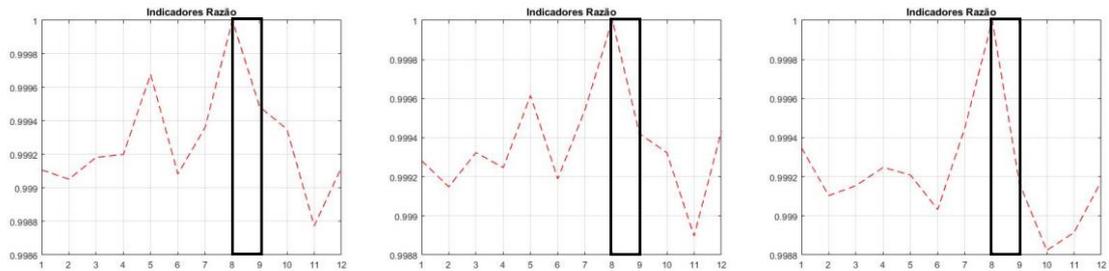


Figura 5.16 - Gráficos correspondentes ao caso de dano D6 para um ruído de 1%

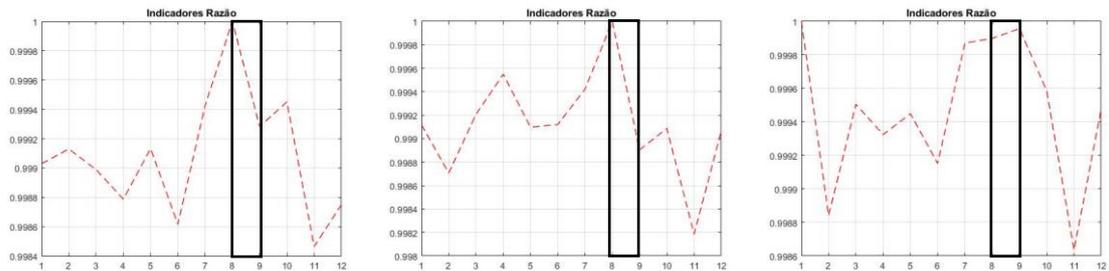


Figura 5.17 - Gráficos correspondentes ao caso de dano D6 para um ruído de 2%

Analisando a figura 5.15, verifica-se que as interferências causadas por um ruído de 0.5% são mínimas, dado que estas provocam alterações pouco significativas. Relativamente a um ruído de 1%, as interferências causam disparidades ligeiramente superiores, permitindo ainda assim, uma fácil deteção. Contrariamente, um ruído de 2% introduz alterações muito significativas, como é facilmente observado pela ordem de grandeza representada nos gráficos.

Tabela 5.15 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as rotações e um dano de 10%

Rotação	% Ruído			
Local do dano	0,5	1	2	3
50	Verde	Verde	Verde	Verde
140	Verde	Verde	Verde	Verde
240	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Vermelho
340	Verde	Verde	Vermelho	Vermelho
500	Verde	Amarelo	Laranja	Laranja
660	Verde	Verde	Laranja	Laranja
860	Verde	Verde	Verde	Verde
940	Verde	Verde	Verde	Amarelo

Relativamente às rotações e analisando os resultados da tabela 5.15, rapidamente se conclui que um ruído superior a 1% inviabiliza o seu uso, dada a dificuldade de detetar os casos 3, 4, 5 e 6. Para 1%, as rotações apenas apresentam alguma dificuldade em detetar os casos 3 e 5, ainda que os consigam detetar com uma elevada eficácia.

Tabela 5.16 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as translações e um dano de 10%

Translação	% Ruído			
Local do dano	0,5	1	2	3
50	Verde	Verde	Verde	Verde
140	Verde	Verde	Verde	Amarelo
240	Verde	Amarelo	Vermelho	Vermelho
340	Verde	Verde	Verde	Amarelo
500	Verde	Verde	Laranja	Vermelho
660	Verde	Verde	Amarelo	Vermelho
860	Verde	Verde	Verde	Verde
940	Verde	Verde	Verde	Verde

De igual modo, o uso das translações apresenta uma grande redução na eficácia para ruídos superiores a 1%, sendo que para 2% grande parte dos casos ainda são detetáveis.

Após a análise dos resultados, verifica-se que as translações são menos afetadas pelo ruído, quando comparadas com as extensões e rotações. Conclui-se também, que em regra geral a eficácia fica comprometida para ruídos superiores a 1%, sendo que para 3% os resultados obtidos apresentam uma eficácia extremamente reduzida, pelo que esta percentagem não será utilizada nos estudos que se seguem. Note-se que o caso de dano D3, independentemente de serem utilizados dados em termos de extensões, rotações ou translações, revelou ser o mais afetado pelo ruído. A explicação para esta situação recai

na mesma utilizada para este mesmo caso quando utilizadas diferentes gamas de frequência.

Pretende-se agora entender a influência do ruído para danos inferiores. Para tal, repete-se o processo acima referido para uma percentagem de dano de 5%. Presume-se que danos de menores dimensões sejam mais sensíveis ao ruído, dado que no subcapítulo anterior foi concluído que estes apresentam dados menos claros, devido à menor ordem de grandeza. Posto isto, os resultados são apresentados nas tabelas 5.17 a 5.19.

Tabela 5.17 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as extensões e um dano de 5%

Extensão	% Ruído		
Local do dano	0,5	1	2
50	Verde	Amarelo	Vermelho
140	Verde	Verde	Verde
240	Amarelo	Laranja	Vermelho
340	Verde	Verde Claro	Laranja
500	Vermelho	Vermelho	Vermelho
660	Verde	Verde Claro	Laranja
860	Verde	Verde	Verde
940	Verde	Amarelo	Laranja

Tabela 5.18 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as rotações e um dano de 5%

Rotação	% Ruído		
Local do dano	0,5	1	2
50	Verde	Verde	Laranja
140	Verde	Verde	Verde
240	Amarelo	Vermelho	Vermelho
340	Verde	Amarelo	Vermelho
500	Verde Claro	Laranja	Vermelho
660	Verde Claro	Laranja	Vermelho
860	Verde	Verde	Verde Claro
940	Verde	Verde Claro	Amarelo

Tabela 5.19 - resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as translações e um dano de 5%

Translação	% Ruído		
	0,5	1	2
50			
140			
240			
340			
500			
660			
860			
940			

Tal como se previa, o efeito produzido pelo ruído influencia negativamente a localização do dano quando este é de dimensões reduzidas, como é evidenciado pelos resultados anteriormente apresentados, a presença de um ruído superior a 0.5% impossibilita uma localização viável do dano, sendo que para uma redução de 10 % da espessura um ruído de 1% era aceite.

Através deste estudo, constata-se que danos localizados nas extremidades da viga são mais facilmente localizados, principalmente quando são utilizados dados em termos de translação

5.2 Análise dos resultados utilizando como input as Transmissibilidades

Como havia sido referido anteriormente, as transmissibilidades apresentam a grande vantagem de não ser necessário conhecer a força, tendo somente de garantir que esta é aplicada no mesmo ponto, na estrutura com e sem dano. Dado isto, torna-se importante verificar a sua possível utilização na área de deteção de dano.

Nos subcapítulos que se seguem, será estudada a influência dos fatores anteriormente estudados, quando são utilizadas as transmissibilidades obtidas utilizando diretamente as respostas em termos de extensão, rotação e translação, ao invés das FRFs (translação e rotação) e SFRFs que requerem o conhecimento da força aplicada.

5.2.1 Eficácia dos indicadores

Tal como havia sido feito no subcapítulo 5.1.1, irá ser testada a eficácia dos indicadores para uma percentagem de dano de 10 %, sendo neste caso utilizadas as transmissibilidades. Assim sendo, serão analisados os mesmos casos de danos, anteriormente apresentados na tabela 5.1.

O dano, tal como nas situações prévias, é identificado pelo ponto máximo do gráfico. Posto isto, em seguida, são apresentadas nas tabelas 5.20 a 5.23, assinalados a verde os resultados que indicam a correta deteção e localização do dano e a vermelho assinalam-se os casos cuja deteção não foi possível.

Tabela 5.20 - Resumo da eficácia do indicador Razão para 10 % de dano

Razão	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Vermelho
rotação	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde
translação	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

Tabela 5.21 - Resumo da eficácia do indicador Erro para 10 % de dano

Erro	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão	Vermelho							
rotação	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Verde	Vermelho	Vermelho	Vermelho
translação	Vermelho	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho

Tabela 5.22 - Resumo da eficácia do indicador Coe para 10 % de dano

Coe	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão	Vermelho							
rotação	Vermelho							
translação	Vermelho	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho

Tabela 5.23 - Resumo da eficácia do indicador CSF para 10 % de dano

CSF	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão	Vermelho							
rotação	Vermelho	Verde	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Verde	Vermelho
translação	Vermelho	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho

De forma similar ao método que utiliza como input as FRFs ou as SFRFs, o indicador mais eficiente para esta caso é o indicador a Razão, sendo que a utilização das transmissibilidades, contrariamente à utilização das FRFs e SFRFs, não permitiu localizar corretamente o caso de dano D6 aquando do uso das rotações e o D8 para as extensões. Por outro lado, tanto o indicador Erro como o CSF e o Coe, apresentam uma eficácia superior, quando comparados com os resultados obtidos por meio de FRFs em termos de translação e rotação. No entanto, estes continuam a apresentar uma eficácia muito reduzida para poderem ser considerados.

Após a análise dos resultados, conclui-se que as transmissibilidades são viáveis para detetar e localizar o dano, no entanto para o indicador mais eficaz (Razão) as FRFs em termos de rotação e SFRFs apresentam uma maior eficácia.

5.2.2 Gama de frequências

Pretende-se agora, entender a influência que a escolha da gama de frequências tem na correta deteção e localização do dano, quando são utilizadas as transmissibilidades. Assim sendo, realiza-se um estudo similar ao anteriormente apresentado para as FRFs (translação e rotação) e SFRFs (subcapítulo 5.1.2), ou seja, serão analisadas quatro gamas de frequências, previamente apresentadas na tabela 5.6, para os diferentes indicadores em estudo. Os resultados são apresentados nas tabelas 5.24 a 5.27.

Tabela 5.24 - resumo do estudo da eficácia do indicador Razão para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência

Razão	Gama de frequências (Hz)											
	Extensão				Rotação				Translação			
Localização do dano (mm)	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000
50	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
140	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
240	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Red	Red	Green	Green	Red	Green
340	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
500	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
660	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green
860	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
940	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

Analisando os resultados acima apresentados, rapidamente se retira a mesma conclusão, tanto para o uso das FRFs e SFRFs como para o das transmissibilidades, o

indicador Razão é mais eficaz para gamas de frequências mais reduzidas, nomeadamente a gama de 0-500 Hz, na qual conseguiu localizar corretamente todos os casos de dano, independentemente do tipo de dados utilizado nas transmissibilidades. Seguem-se as figuras 5.18, 5.19 e 5.20, que evidenciam a redução da eficácia com o aumento do intervalo da gama de frequências.

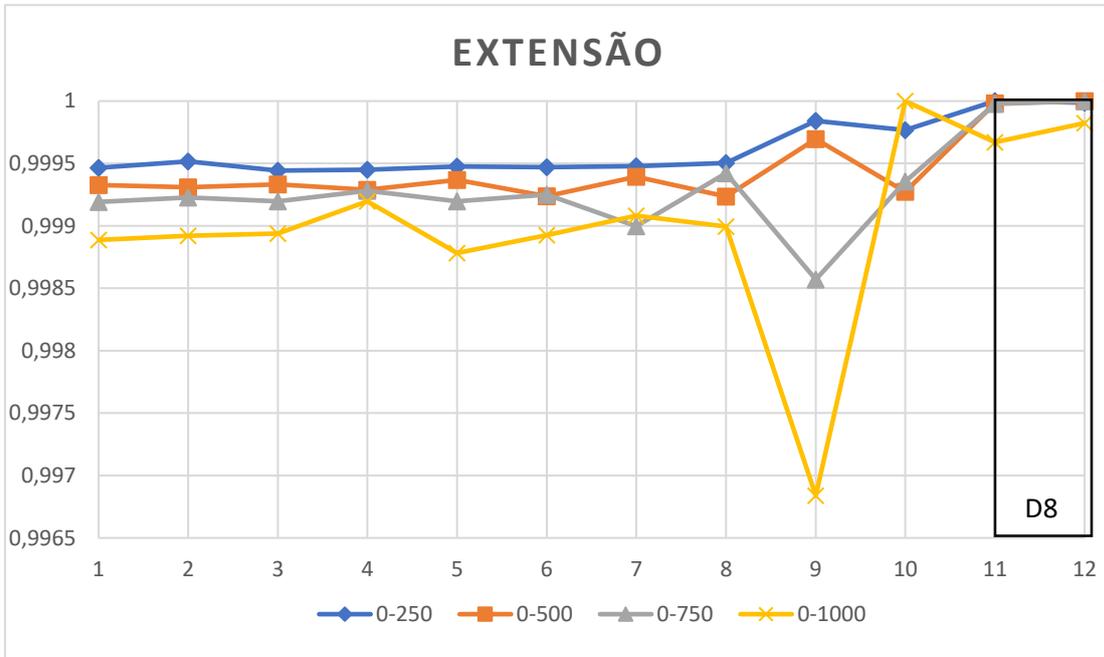


Figura 5.18 - Estudo do caso de dano D8 utilizando o indicador Razão e as extensões para quatro gamas de frequência em estudo

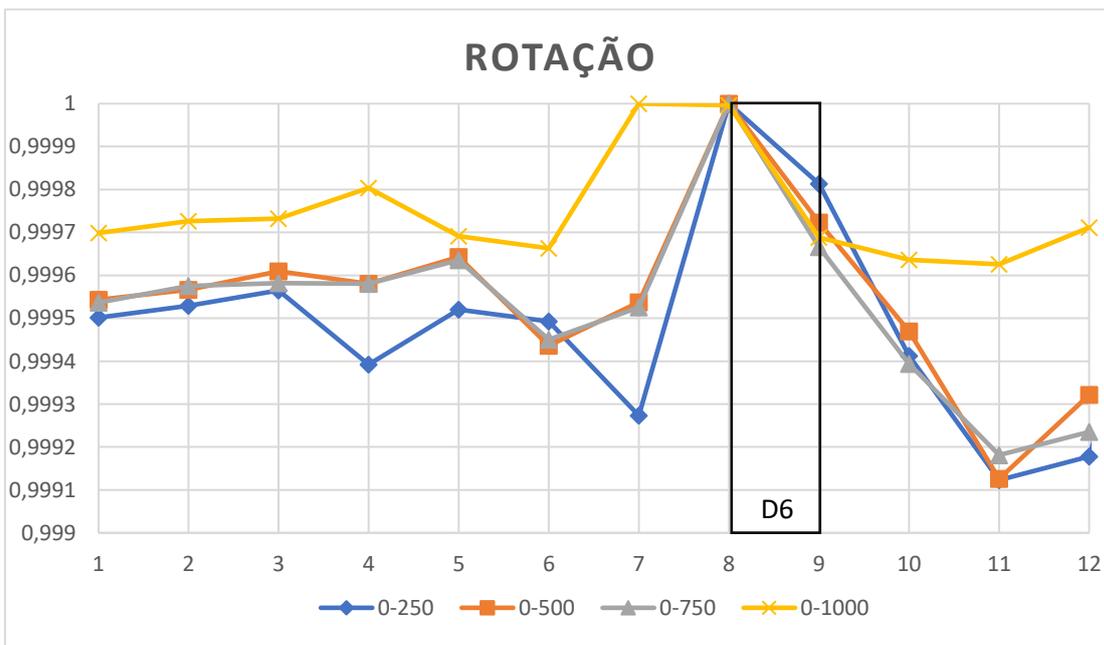


Figura 5.19 - Estudo do caso de dano D6 utilizando o indicador Razão e as rotações para quatro gamas de frequência em estudo

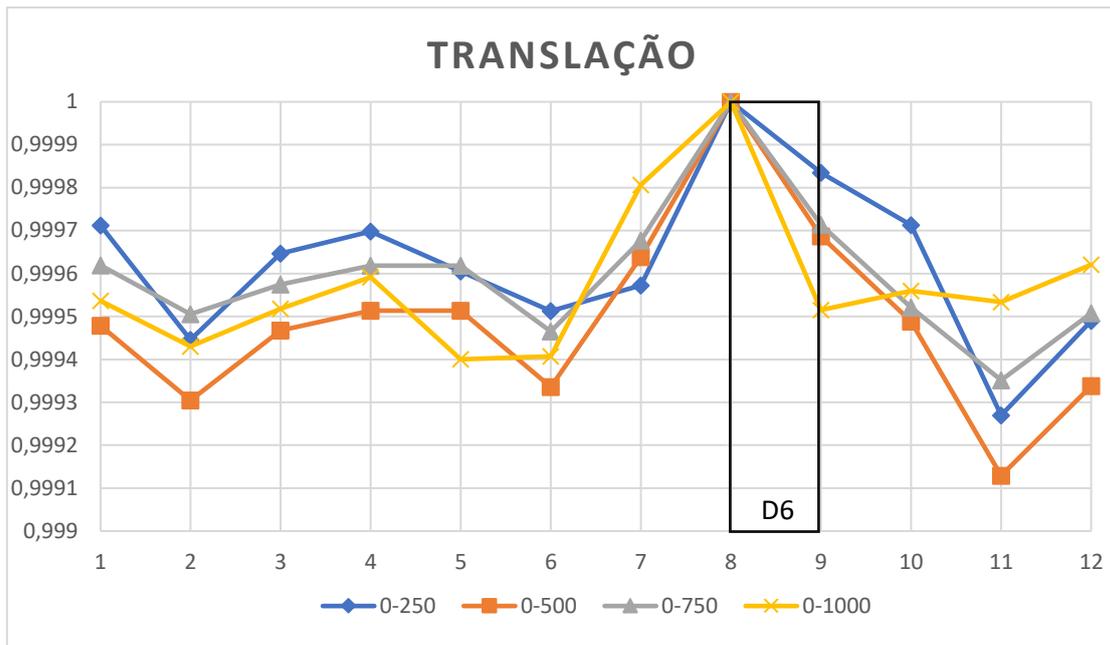


Figura 5.20 - Estudo do caso de dano D6 utilizando o indicador Razão e as translações para quatro gamas de frequência em estudo

Tabela 5.25 - Resumo do estudo da eficácia do indicador Erro para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência

Erro	Gama de frequências (Hz)											
	Extensão				Rotação				Translação			
Localização do dano (mm)	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000
50	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Red	Red
140	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Red	Red
240	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Red
340	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
500	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Green
660	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
860	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Red	Red
940	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Red	Red

Relativamente ao indicador Erro, tal como para as FRFs e SFRFs, também com as transmissibilidades, este apresenta uma eficácia ligeiramente superior para gamas de frequência inferiores, no entanto esta continua a ser muito reduzida, localizando poucos casos de dano.

Tabela 5.26 - Resumo do estudo da eficácia do indicador Coe para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência

Coe	Gama de frequências (Hz)											
	Extensão				Rotação				Translação			
Localização do dano (mm)	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000
50	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
140	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
240	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
340	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
500	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
660	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
860	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
940	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

Tabela 5.27 - Resumo do estudo da eficácia do indicador CSF para um dano de 10% e para as diferentes gamas de frequência

CSF	Gama de frequências (Hz)											
	Extensão				Rotação				Translação			
Localização do dano (mm)	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000	0-250	0-500	0-750	0-1000
50	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
140	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
240	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
340	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
500	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
660	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
860	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
940	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

Analisando agora simultaneamente os indicadores Coe e CSF, observa-se que estes apresentam uma maior eficácia para intervalos de frequência mais reduzidos, nomeadamente o de 0-250 Hz.

Posto isto, serão utilizados para os restantes estudos apenas o indicador mais eficaz e a sua respetiva gama, nomeadamente o indicador Razão e o intervalo de 0-500 Hz, sendo este o único a ser analisado nos subcapítulos que se seguem.

5.2.3 Percentagem de dano

Seguindo o mesmo raciocínio utilizado para as FRFs e SFRFs, serão analisados os diferentes casos de dano para diferentes percentagens de dano 5% e 2 %, sendo utilizado apenas o indicador Razão. Após a análise das diferentes gamas de frequência, conclui-se que o indicador obtém melhores resultados para o intervalo de 0-500 Hz, pelo que

este será o único a ser utilizado para este estudo. Em seguida são apresentadas as tabelas com os resultados correspondentes ao estudo da severidade do dano (tabelas 5.28 e 5.29).

Tabela 5.28 - Resumo da eficácia do indicador Razão para um dano de 5%

Razão (5%)	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão								
rotação								
translação								

Tabela 5.29 - Resumo da eficácia do indicador Razão para um dano de 2%

Razão (2%)	50	140	240	340	500	660	860	940
extensão								
rotação								
translação								

Similarmente ao que havia sido concluído para o estudo do indicador Razão com as FRFs e SFRFs, para as transmissibilidades, uma redução da percentagem de dano não impossibilita a sua correta localização. Relativamente à clareza dos resultados, uma menor percentagem revela-se numa maior dificuldade de identificação como é demonstrado na análise do caso D6, representada nas figuras 5.21 a 5.23.

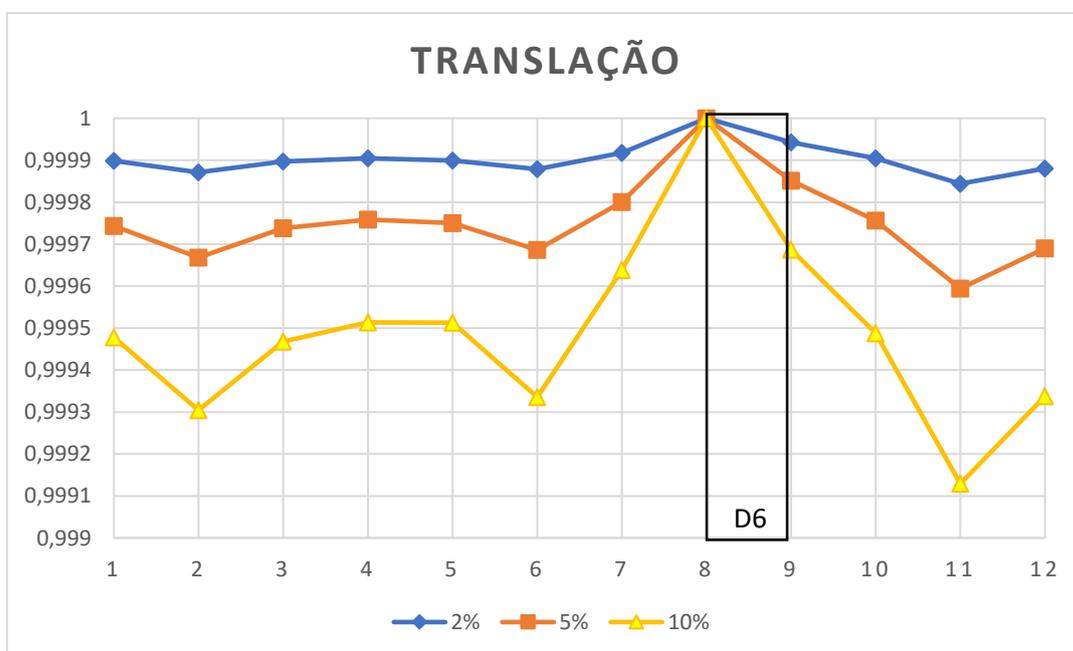


Figura 5.21 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as translações para diferentes reduções de espessura e o indicador Razão

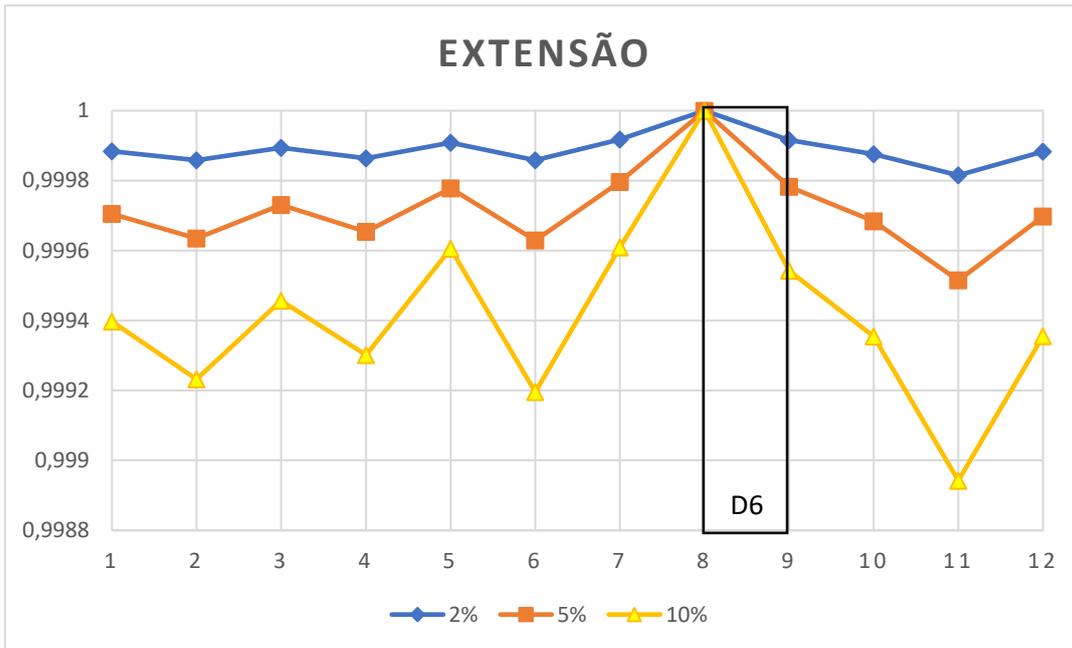


Figura 5.22 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as extensões para diferentes reduções de espessura e o indicador Razão

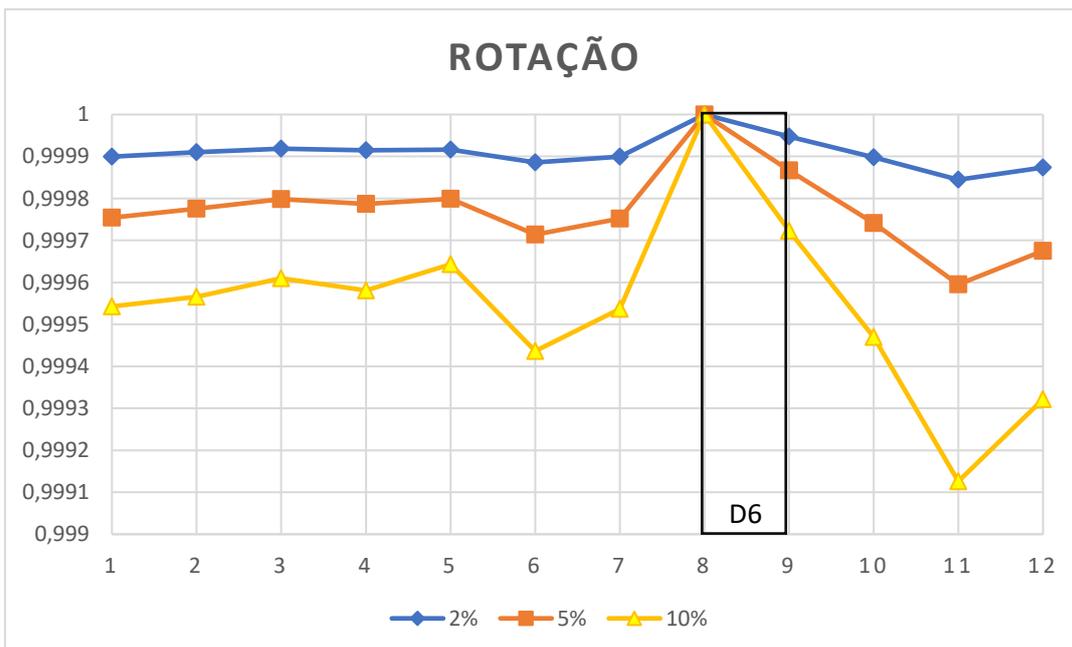


Figura 5.23 - Comparação na eficácia do caso de dano D6 utilizando as rotações para diferentes reduções de espessura e o indicador Razão

Assim, conclui-se que independentemente da metodologia utilizada e para os casos em estudo, uma diminuição da severidade do dano não impossibilita a sua localização, apenas a dificulta.

5.2.4 Ruído

Tal como foi realizado anteriormente para as FRFs (translação e rotação) e SFRFs, pretende-se agora entender a influência que o ruído tem quando são utilizadas as transmissibilidades. Para tal, é utilizado apenas o indicador mais eficaz na sua gama mais eficaz (0-500 Hz), neste caso o indicador Razão. Similarmente ao que havia sido feito anteriormente no capítulo 5.1.4, inicialmente é estudada a influência do ruído para uma percentagem de dano de 10% e em seguida de 5%. Os valores de ruído introduzidos são de 0.5%, 1% e 2%.

Nas tabelas 5.30 a 5.32 são apresentados os resultados correspondentes ao indicador Razão e a uma redução da espessura de 10%:

Tabela 5.30 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as extensões e um dano de 10%

Extensão	% Ruído		
Local do dano	0,5	1	2
50	Verde	Verde	Amarelo
140	Verde	Verde	Verde
240	Verde	Amarelo	Vermelho
340	Verde	Verde	Amarelo
500	Amarelo	Vermelho	Vermelho
660	Verde	Verde	Amarelo
860	Verde	Verde	Verde
940	Verde	Verde	Amarelo

Analisando os resultados das transmissibilidades das extensões, tal como para as SFRFs, verifica-se uma dificuldade em localizar corretamente os casos D3 e D5, sendo que para uma percentagem de ruído de 0.5 o D5 ainda é detetável com alguma eficácia. Posto isto, verifica-se uma redução acentuada da eficácia para um ruído superior a 1%, ainda que para 2% esta seja considerável.

Tabela 5.31 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as rotações e um dano de 10%

Rotação	% Ruído		
Local do dano	0,5	1	2
50	Verde	Verde	Verde
140	Verde	Verde	Verde
240	Amarelo	Vermelho	Vermelho
340	Verde	Verde	Amarelo
500	Verde	Amarelo	Amarelo
660	Verde	Verde	Amarelo
860	Verde	Verde	Verde
940	Verde	Verde	Verde

Relativamente às transmissibilidades determinadas com a utilização das rotações e comparando os resultados com os das FRFs de rotação, rapidamente se verifica uma menor eficácia das transmissibilidades para um ruído de 0.5% e 1%, sendo, no entanto, superior para 2%. De igual modo, verifica-se uma dificuldade na correta localização do D3, sendo mais acentuada para as transmissibilidades. Verifica-se também uma redução significativa da eficácia ao passar de um ruído de 1% para 2%.

Tabela 5.32 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as translações e um dano de 10%

Translação	% Ruído		
Local do dano	0,5	1	2
50	Verde	Verde	Verde
140	Verde	Verde	Verde
240	Verde	Amarelo	Vermelho
340	Verde	Verde	Amarelo
500	Verde	Verde	Amarelo
660	Verde	Verde	Amarelo
860	Verde	Verde	Verde
940	Verde	Verde	Verde

Passando agora para as transmissibilidades obtidas com as translações, estas são as que apresentam maior eficácia de um modo geral, sendo pouco influenciadas por ruídos até 1%, tal como acontecia para as FRFs.

Com esta análise, conclui-se, tal como para as FRFs e SFRFs, que para o indicador Razão, as translações são as menos afetadas pelo ruído, sendo que de um modo geral, um ruído superior a 1% provoca uma redução acentuada da eficácia.

Segue-se então, nas tabelas 5.33 a 5.35, o estudo relativo a uma percentagem de dano de 5%, no qual se espera uma maior sensibilidade ao ruído, tentando-se perceber qual o ruído limite.

Tabela 5.33 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as extensões e um dano de 5%

Extensão	% Ruído		
Local do dano	0,5	1	2
50	Verde	Verde Claro	Vermelho
140	Verde	Verde	Verde
240	Amarelo	Vermelho	Vermelho
340	Verde	Amarelo	Vermelho
500	Amarelo	Vermelho	Vermelho
660	Verde	Amarelo	Vermelho
860	Verde	Verde	Verde Claro
940	Verde	Verde Claro	Amarelo

Tabela 5.34 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as rotações e um dano de 5%

Rotação	% Ruído		
Local do dano	0,5	1	2
50	Verde	Verde Claro	Amarelo
140	Verde	Verde	Verde Claro
240	Amarelo	Vermelho	Vermelho
340	Verde	Amarelo	Vermelho
500	Verde Claro	Amarelo	Vermelho
660	Verde	Amarelo	Amarelo
860	Verde	Verde	Verde Claro
940	Verde	Verde Claro	Amarelo

Tabela 5.35 - Resumo do estudo relativo à influência do ruído no indicador Razão utilizando as translações e um dano de 5%

Translação	% Ruído		
Local do dano	0,5	1	2
50	Verde	Verde Claro	Amarelo
140	Verde	Verde	Verde Claro
240	Verde Claro	Amarelo	Vermelho
340	Verde	Amarelo	Vermelho
500	Verde	Amarelo	Vermelho
660	Verde	Amarelo	Vermelho
860	Verde	Verde	Amarelo
940	Verde	Verde Claro	Amarelo

Tal como era expectável, uma menor percentagem de dano reflete-se numa maior influência do ruído. Com isto, observa-se que para um ruído superior a 0.5% a eficácia reduz drasticamente. Comparando os resultados para 0.5% de ruído para um dano de 5% e 10%, rapidamente se conclui que para este último, a eficácia é ligeiramente mais elevada.

6 Resultados experimentais

O trabalho experimental tem como objetivo confirmar os resultados obtidos por a via numérica. Assim sendo, será testado o uso das FRFs de translação e das transmissibilidades obtidas em termos de translação, apenas para o indicador e para a gama de frequência mais eficazes, nomeadamente o indicador Razão e o intervalo de frequência de 0-500 Hz.

Como já havia sido referido anteriormente, tanto a viga como o modo de introdução do dano na mesma, diferem nos procedimentos experimentais e numéricos. Para a parte experimental, a simulação do dano é efetuada pela adição de uma ou mais massas ao longo da viga, considerando sempre que o caso sem dano corresponde à viga com a massa adicionada e o com dano somente a viga sem massas. Os casos de dano em estudo são apresentados na tabela 6.1 e ilustrados na figura 6.1.

Tabela 6.1 - Casos de dano

Casos de dano (D)	Posição (mm)	Sensores
1	43	1 e 2
2	201	3 e 4
3	495	6 e 7
4	726	7 e 8
5	890	8 e 9
6 (dois danos)	41 e 890	1 e 2 / 8 e 9

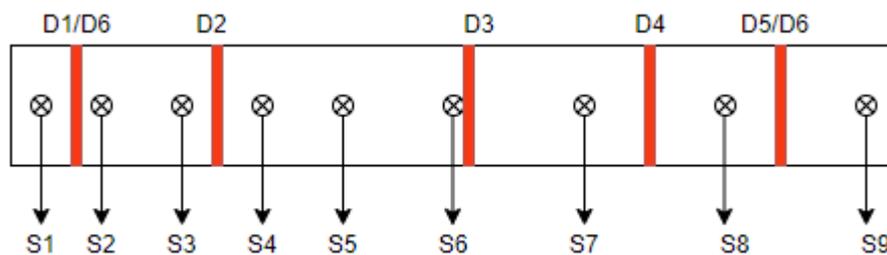


Figura 6.1 - Representação dos diferentes casos de dano

6.1 Análise de resultados

Passando agora para a análise dos resultados, é apresentado na tabela 6.2, o estudo relativo à gama de 0-500 Hz.

Tabela 6.2 - Quadro resumo dos resultados experimentais para uma gama de 0-500 Hz

Razão	1	2	3	4	5	6
translações	Green	Green	Green	Green	Green	Green
transmissibilidades	Green	Red	Green	Green	Green	Red

Por meio das FRFs de translação verificou-se que foi possível identificar todos os casos de dano. Já as transmissibilidades, apenas não se conseguiram detetar corretamente os casos de dano 2 e 6. Relativamente ao caso 2, este correspondente ao caso de dano 3 da simulação numérica, sendo este um dos danos mais complicados de localizar. Para este caso verificou-se uma grande influência do ruído. Esta influência do ruído está mais presente nas zonas de menor amplitude, nomeadamente a das antirressonâncias (figuras 6.2 e 6.3), podendo este mesmo ruído causar variações no indicador Razão superiores ao efeito do dano.

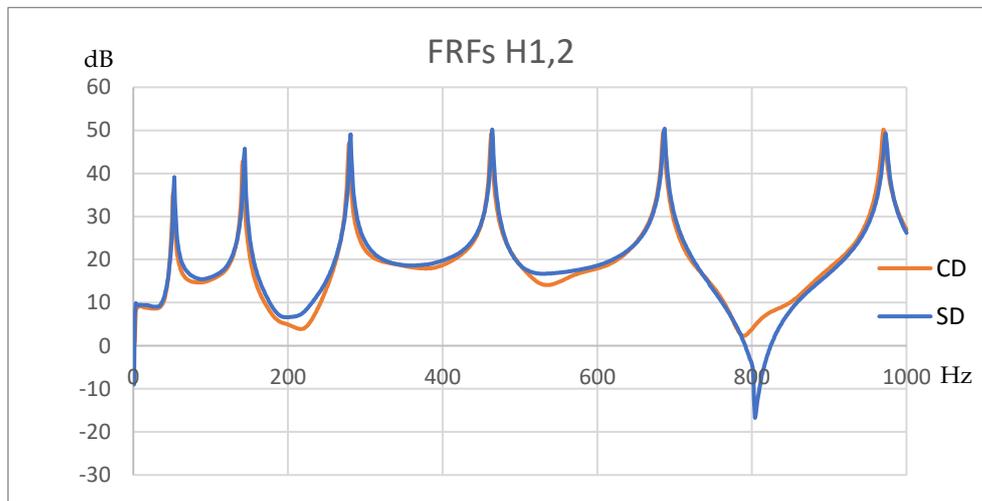


Figura 6.2 - FRFs experimentais H1,2 com e sem dano

Na figura 6.3 são apresentadas FRFs diretas, ou seja, FRFs em que as medições foram efetuadas no mesmo ponto onde a força foi aplicada.

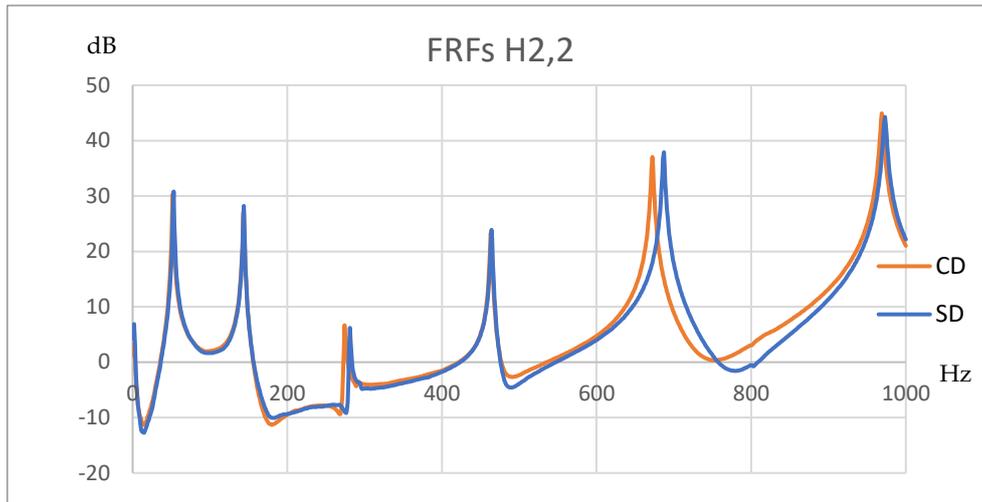


Figura 6.3 - FRFs experimentais H2,2 com e sem dano

Os gráficos relativos ao caso de dano 6, onde foram aplicados não um mas dois danos, são apresentados na figura 6.3. A detecção para esta caso em específico é dada pelos dois picos de maior amplitude.

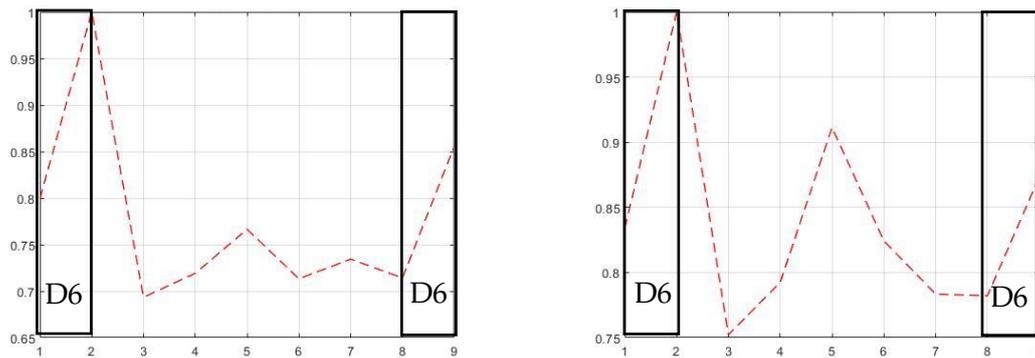


Figura 6.4 - Representação gráfica do caso de dano 6 utilizando as FRFs de translação e as transmissibilidades de translação

Verifica-se para as transmissibilidades, que embora o primeiro pico localize a primeira massa, o segundo não, dado que o segundo pico de maior amplitude se encontra no sensor 5, em vez do 8 ou 9. Tanto o caso de dano D6 como o D2, vêm reforçar a influência que o ruído tem nas FRFs medidas experimentalmente.

São ainda apresentados nas figuras 6.4 a 6.8, os gráficos correspondentes aos restantes casos de dano, utilizando as FRFs de translação

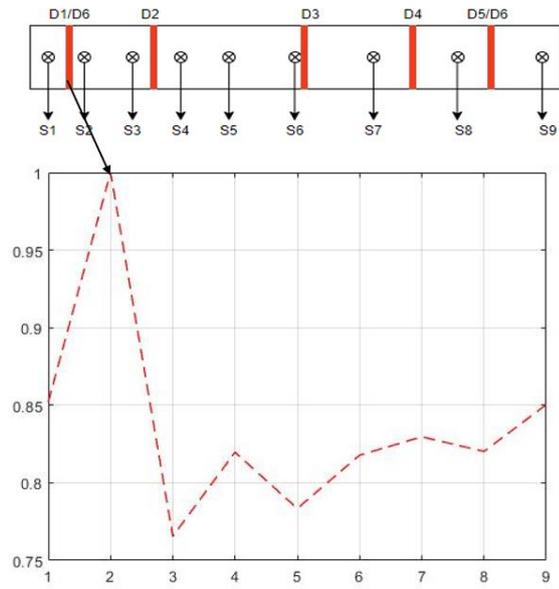


Figura 6.5 - Gráfico correspondente ao caso de dano D1, utilizando as FRFs de translação e o indicador Razão

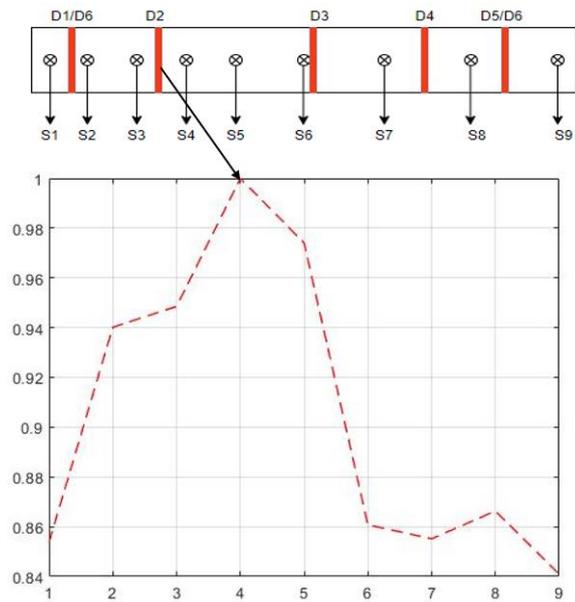


Figura 6.6 - Gráfico correspondente ao caso de dano D2, utilizando as FRFs de translação e o indicador Razão

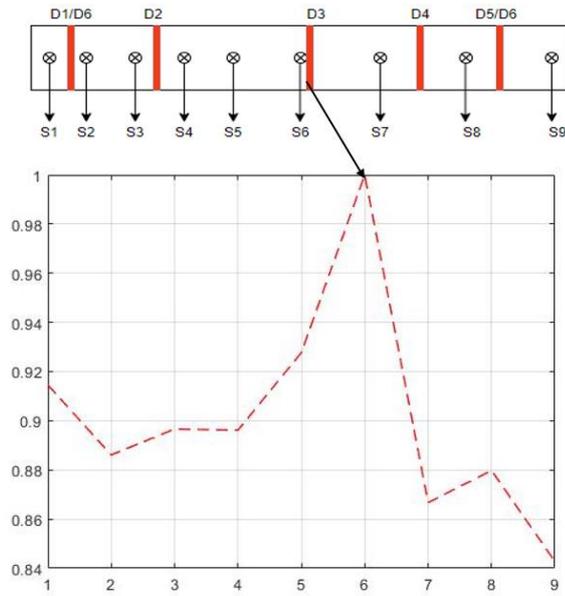


Figura 6.7 - Gráfico correspondente ao caso de dano D3, utilizando as FRFs de translação e o indicador Razão

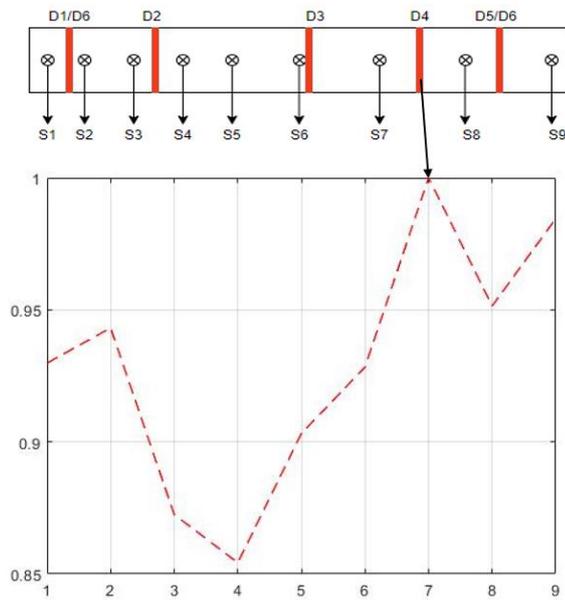


Figura 6.8 - Gráfico correspondente ao caso de dano D4, utilizando as FRFs de translação e o indicador Razão

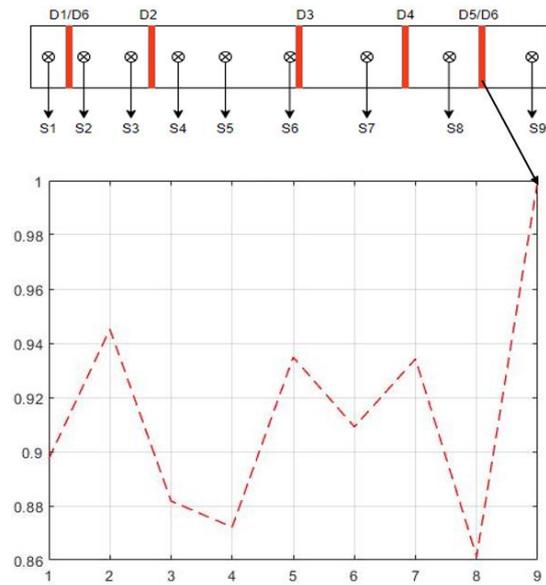


Figura 6.9 - Gráfico correspondente ao caso de dano D5, utilizando as FRFs de translação e o indicador Razão

Com isto, conclui-se que os resultados experimentais vêm confirmar a fiabilidade da metodologia em questão, sendo que o próximo objetivo deverá passar pela procura de um método que permita contornar o ruído experimental de forma mais eficaz.

7 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo a avaliação da utilização das FRFs, SFRFs e transmissibilidades na detecção e localização do dano. Para tal, foi utilizada uma metodologia que tem por base a comparação das respostas de uma estrutura com e sem dano, através de indicadores, nomeadamente o indicador Razão, Erro, Coe e CSF. Para averiguar a possível utilização das repostas dinâmicas previamente enunciadas, foi realizada primeiramente uma parte numérica e em seguida uma experimental.

A parte numérica corresponde à simulação de uma viga livre-livre com base no Método dos Elementos Finitos. A viga simulada teria 12 pontos de medição (acelerómetros e extensómetros), sendo esta excitada nesses mesmos pontos. O dano foi introduzido por redução da espessura de um elemento de 1mm. Com isto, obtiveram-se as FRFs, SFRFs e Transmissibilidades para a estrutura intacta e danificada. Estas respostas foram posteriormente correlacionadas por meio dos indicadores anteriormente referidos, pelo que o primeiro estudo correspondeu à avaliação destes na correta detecção e localização do dano. Neste estudo, verificou-se que o indicador Razão foi o mais eficaz, na correta localização dos vários casos de dano em análise.

Após isto, procurou-se entender a influência que alguns fatores têm na correta localização do dano, nomeadamente a gama de frequências escolhida, o aumento da severidade do dano e a presença de ruído nas respostas utilizadas.

Relativamente à gama, foram estudados quatro intervalos distintos, 0-250 Hz, 0-500 Hz, 0-750 Hz e 0-1000 Hz, tanto para as FRFs e SFRFs, como para as transmissibilidades. Verificou-se que o indicador Razão conseguiu localizar melhor o dano quando o intervalo de frequência em estudo era de 0-500 Hz. Conclui-se também que os restantes indicadores só conseguiam localizar danos nos extremos da viga quando se utilizaram gamas de frequência mais reduzidas. Estes indicadores apresentaram uma reduzida eficácia na localização do dano quando comparados como o indicador Razão. Com isto, foi decidido que para os estudos que se seguiam apenas se utilizaria o indicador Razão para a gama de frequências 0-500 Hz.

Passando agora para o estudo relativo ao aumento da severidade do dano, verificou-se que uma diminuição desta não impossibilitava a detecção do dano, no entanto dificultava-a.

Para finalizar o estudo numérico, realizou-se um estudo do efeito produzido pelo ruído nas respostas "medidas", introduzindo-se ruído compreendido entre 0.5% e 3%. Com isto, conclui-se que para um dano de 10%, as translações utilizando o indicador Razão, eram as menos afetadas pelo ruído. Observou-se também que, em regra geral, para esta percentagem de dano, um ruído superior a 1% reduzia consideravelmente a eficácia da localização do dano. Por fim, procurou-se testar a influência do ruído em danos de menores dimensões, nomeadamente para uma redução da espessura de 5%. Com isto, verificou-se que para ruídos superiores a 0.5% a eficácia reduzia drasticamente, pelo que rapidamente se concluiu que danos reduzidos são mais afetados pela presença ruído. Identificou-se também, que a presença de ruído prejudica fortemente a possibilidade de detetar danos que não estejam nas extremidades da viga.

A viga utilizada para o trabalho experimental, não foi a mesma utilizada para a simulação numérica. Para além de apresentar dimensões diferentes, na viga experimental apenas foram considerados 9 pontos de medição, onde foram colocados somente acelerómetros e não acelerómetros e extensómetros, como inicialmente tinha sido pensado. Estes acelerómetros permitiram obter somente respostas em termos de translações. Estas respostas foram medidas tentando simular a situação de apoio livre-livre.

Relativamente aos resultados experimentais, verificou-se uma grande eficácia na deteção de todos os casos de dano quando foram utilizadas FRFs de translações. Por outro lado, o uso das transmissibilidades não permitiu a identificação de dois dos seis casos de dano. Isto pode ter-se ficado a dever à presença de ruído nas respostas experimentais, sendo este mais influente nas zonas de menor amplitude, nomeadamente as antirressonâncias.

Resumidamente, com esta dissertação foi possível concluir que tanto as extensões como as transmissibilidades, aparentam ser promissoras para o futuro da área de identificação de dano. Conclui-se também que a metodologia em questão apresenta bons resultados, pelo que em trabalhos futuros, não deverá ser testada a sua fiabilidade, mas sim um modo de combater o ruído.

7.1 Trabalhos futuros

No seguimento do estudo desenvolvido na presente dissertação, será necessário validar experimentalmente, as conclusões retiradas numericamente, relativas ao uso das extensões e das rotações. Com isto, será necessário desenvolver um método que permita ultrapassar as dificuldades associadas às medições das rotações.

Identifica-se também, a necessidade de conseguir mitigar os efeitos do ruído presente nas respostas medidas, sendo este um grande entrave na implementação de diversos métodos de deteção de dano. Assim sendo, propõe-se uma nova metodologia que permita reduzir estes efeitos, nomeadamente nas zonas de menor amplitude de resposta.

Por último, sugere-se a aplicação da presente metodologia em placas de materiais metálicos e materiais compósitos (fibra de vidro e de carbono).

8 Bibliografia

- [1] P. Jorge, L. Fernandes, Avaliação de vários indicadores na deteção e localização de dano em estruturas, utilizando as Funções de Resposta em Frequência, (2019).
- [2] Raquel Sofia Torrão Rodrigues, Identificação de dano numa viga utilizando as respostas dinâmicas, (2021).
- [3] Z. Wang, R.M. Lin, M.K. Lim, *IIIB* __, 7825 (1997).
- [4] S. Doebling, C. Farrar, M. Prime, e D. Shevits, Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review, Los Alamos National Laboratory, USA, (1996).
- [5] D. E. Bray e R. K. Stanley, *Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing and Service*. CRC Press, (1996).
- [6] K. A. Ramsey, S. M. Systems, S. Jose, *Experimental Modal Analysis , Structural Modifications and FEM Analysis on a Desktop Computer mathematical dynamic models of structures so that they could,* *Sound Vib.*, no. February, pp. 1–10, (1983).
- [7] R.P.C. Sampaio, N.M.M. Maia, J.M.M. Silva, Damage detection using the frequency-response-function curvature method, *J. Sound Vib.* 226 (1999) 1029–1042.
- [8] R.A.B. Almeida, A.P.V. Urgueira, J.D.P. Morais, N.M.M. Maia, An assessment of frequency response curvature methods for damage localization, *Proc. ISMA 2014 - Int. Conf. Noise Vib. Eng. USD 2014 - Int. Conf. Uncertain. Struct. Dyn.* (2014) 453–467.
- [9] J. Daniel, P. Morais, *Deteção e localização de dano em estruturas*, (2014).
- [10] Rytter, *Aalborg Universitet Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures* Rytter , Anders, (1993).
- [11] N.G. Park, Y.S. Park, Identification of damage on a substructure with measured frequency response functions, *J. Mech. Sci. Technol.* 19 (2005) 1891–1901.
- [12] Y.J. Yan, L. Cheng, Z.Y. Wu, L.H. Yam, Development in vibration-based structural damage detection technique, *Mech. Syst. Signal Process.* 21 (2007)
- [13] J.J. Sinou, A review of damage detection and health monitoring of mechanical systems from changes in the measurement of linear and non-linear vibrations, *Mech. Vib. Meas. Eff. Control.* (2009) 643–702.
- [14] J.M. Lifshitz, A. Rotem, Determination of Reinforcement Unbonding of Composites by a Vibration Technique, *J. Compos. Mater.* 3 (1969) 412–423.
- [15] P. Cawley, R.D.R.D. Adams, The Location of Defects in Structures From Measurements of Natural Frequencies *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, *J. Strain Anal. Eng. Des.* 14 (1979) 49–57.
- [16] O.S. Salawu, Detection of structural damage through changes in frequency: a review, *Eng. Struct.* 19 (1997) 718–723.

- [17] Messina, A., Jones, I., and Williams, E., 1992. Damage detection and localization using natural frequency changes. In Proceedings of the 1st Conference on Identification, Cambridge, England, UK, 1, p. 67-76. [31].
- [18] Z. Yang, Le Wang, Structural damage detection by changes in natural frequencies, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 21 (2010) 309–319.
- [19] W. M. West, Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an Orbiter test specimen, presented at the IN: International Modal Analysis Conference, 4th, Los Angeles, CA, 1986, vol. 1, pp. 1–6.
- [20] N. Lieven e D. Ewins, Spatial Correlation of Mode Shapes, the Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC), presented at the Proceedings of the 4th {IMAC} (International Modal Analysis Conference), 1988, pp. 690–695.
- [21] M. Radzie ski, M. Krawczuk, M. Palacz, Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters, *Mech. Syst. Signal Process.* 25 (2011) 2169–2190.
- [22] S. H. Yoo, H. K. Kwak, and B. S. Kim, Detection and location of a crack in a plate using modal analysis, *Proceedings of 17th International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, (1999)*, pp. 1902–1908.
- [23] B.H. Koh, S.J. Dyke, Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data, *Comput. Struct.* 85 (2007) 117–130.
- [24] A. Pandey, M. Biswas, M. Samman, Damage Detection From Mode Changes in Curvature, *J. Sound Vib.* 145 (1991) 321–332.
- [25] Ho, Y., and Ewins, D., 2000. On the structural damage identification with mode shapes. In *Proceedings of the European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring Madrid, Spain, 1*, p. 677–686.
- [26] N. Stubbs, J.-T. Kim, e C. R. Farrar, Field verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm, *Proceedings of the XIII International Modal Analysis Conference, Nashville, USA, (1995)*, pp. 210–210.
- [27] Dong, C., Zhang, P., and Huang, W. F. T., 1994. The sensitivity study of the modal parameters of a cracked beam. *Proceedings of 12th International Modal Analysis Conference, 1*, p. 98–104.
- [28] M. Radzie ski, M. Krawczuk, Experimental verification and comparison of mode shape-based damage detection methods, *J. Phys. Conf. Ser.* 181 (2009).
- [29] Z. Y. Shi, S. S. Law, e L. M. Zhang, Structural damage localization from modal strain energy change, *J. Sound Vib.*, vol. 218, no. 5, pp. 825–844, Dec. 1998.
- [30] E. Parloo, P. Guillaume, M. Van Overmeire, Damage assessment using mode shape sensitivities, *Mech. Syst. Signal Process.* 17 (2003) 499–518.
- [31] R.P.C. Sampaio, N.M.M. Maia, R.A.B. Almeida, A.P.V. Urgueira, A simple damage detection indicator using operational deflection shapes, *Mech. Syst. Signal Process.* 72–73 (2016) 629–641.
- [32] U. Lee, J. Shin, A frequency response function-based structural damage identification method, *Comput. Struct.* 80 (2002) 117–132.

- [33] J. V. Araújo dos Santos, C. M. Mota Soares, C. A. Mota Soares, e N. M. M. Maia, Structural damage identification in laminated structures using FRF data, *Composite Structures*, Vol. 67, No. 2, (2005), pp. 239–249.
- [34] I. Bovio, M. Viscardi, L. Lecce, Innovative Method for Damage Identification and Structural Health Monitoring based on Vibration Measurements, (2006) 1–9.
- [35] M.P. Limongelli, Frequency response function interpolation for damage detection under changing environment, *Mech. Syst. Signal Process.* 24 (2010) 2898–2913.
- [36] M.M. Nozarian, A. Esfandiari, Structural damage identification using Frequency Response Function, *Mater. Forum.* 33 (2008) 443–449.
- [37] Heylen, W., and Lammens, S., 1996. FRAC : a consistent way of comparing frequency response functions. *Identification in Engineering systems*, Swansea, 1, p. 48– 57.
- [38] Pascual, R., Golinval, J., and Razeto, M., 1997. A frequency domain correlation technique for model correlation and updating. In *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, USA, 1, p. 587-592.
- [39] Sampaio, R., Maia, N., and Silva, J., 2003. The frequency domain assurance criterion as a tool for damage identification. In *Proceedings of the 5th International Conference on Damage Assessment of Structures*, Southampton, England, UK, 1, p. 69–76.
- [40] R. P. C. Sampaio, N. M. M. Maia, e J. M. M. Silva, The Frequency Domain Assurance Criterion as a Tool for Damage Detection, *Key Eng. Mater.*, vol. 245–246, pp. 69–76, 2003.
- [41] N.M.M. Maia, J.M.M. Silva, E.A.M. Almas, R.P.C. Sampaio, Damage detection in structures: From mode shape to frequency response function methods, *Mech. Syst. Signal Process.* 17 (2003) 489–498.
- [42] R. P. C. Sampaio, N. M. M. Maia and J. M. M. Silva 1999 *Journal of Sound and Vibration*, 226, 1029–1042. Damage detection using the frequency–response-function curvature method.
- [43] X. Liu, N.A.J. Lieven, P.J. Escamilla-Ambrosio, Frequency response function shape-based methods for structural damage localisation, *Mech. Syst. Signal Process.* 23 (2009) 1243–1259.
- [44] A.P. Adewuyi, Z. Wu, Vibration-based damage localization in flexural structures using normalized modal macrostrain techniques from limited measurements, *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 26 (2011) 154–172.
- [45] A.P. Adewuyi, Z. Wu, N.H.M. Kammrujaman Serker, Assessment of vibration-based damage identification methods using displacement and distributed strain measurements, *Struct. Heal. Monit.* 8 (2009) 443–461.
- [46] Li, S.Z. and Wu, Z.S. (2007a). Development of distributed long-gage fiber optic sensing system for structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 6(6), 133–143.
- [47] J. Shang, Z.M. Qin, X.D. Wang, W. Li, Y.H. Bai, Y.F. Hu, G.F. Chen, B. Li, Research on crack damage identification based on SFRF and fiber bragg grating

sensors, *Adv. Mater. Res.* 904 (2014) 282–286.

- [48] H. Cui, X. Xu, W. Peng, Z. Zhou, M. Hong, A damage detection method based on strain modes for structures under ambient excitation, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 125 (2018) 438–446.
- [49] L. Cheng, G. Busca, P. Roberto, M. Vanali, A. Cigada, Damage detection based on strain transmissibility for beam structure by using distributed fiber optics, *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser. 7* (2017) 27–40.
- [50] C. Paper, *Transmissibility Techniques for Damage Detection Techniques for Damage I &): = [% a] { Fa }*, (2016).
- [51] Sampaio, R.P.C., Maia, N. M. M., Silva, J. M. M., Ribeiro, A. M. R. On the Use of Transmissibility for Damage Detection and Location Proceedings of the European COST F3 Conference on System Identification & Structural Health Monitoring, Universidad Po.
- [52] N.M.M. Maia, R.A.B. Almeida, A.P.V. Urgueira, R.P.C. Sampaio, Damage detection and quantification using transmissibility, *Mech. Syst. Signal Process.* 25 (2011) 2475–2483.
- [53] Y.L. Zhou, E. Figueiredo, N. Maia, R. Perera, Damage detection and quantification using transmissibility coherence analysis, *Shock Vib.* 2015 (2015).
- [54] S. Chesné, A. Deraemaeker, Damage localization using transmissibility functions: A critical review, *Mech. Syst. Signal Process.* 38 (2013) 569–584.
- [55] H. Kim, H. Melhem, Damage detection of structures by wavelet analysis, *Eng. Struct.* 26 (2004) 347–362.
- [56] J. Rhim, S.W. Lee, A neural network approach for damage detection and identification of structures, *Comput. Mech.* 16 (1995) 437–443.
- [57] H.M. Gomes, N.R.S. da Silva, Algoritmos genéticos para detecção de dano estrutural, *Rev. Sul-Americana Eng. Estrutural.* 3 (2008) 7–21.
- [58] F.L.M. Dos Santos, B. Peeters, R. Van Der Vorst, W. Desmet, L.C.S. Góes, The use of strain and mixed strain/acceleration measurements for modal analysis, *Proc. Int. Conf. Struct. Dyn. , EURO DYN.* 2014-Janua (2014) 2247–2254.
- [59] N.M.M. Maia, J.M.M. Silva, A.M.R. Ribeiro, Transmissibility concept in multi-degree-of-freedom systems, *Mech. Syst. Signal Process.* 15 (2001) 129–137.
- [60] S.H. Crandall, The role of damping in vibration theory, *J. Sound Vib.* 11 (1970) 3–18.
- [61] J. Cardoso, *Métodos Computacionais em Engenharia Mecânica (PT)*, (2018).
- [62] A. de M.R.S. Ramos, L.A. do Amaral, P.R. de Souza, V.P. Pinheiro, N.S. das Neves, D.C. de M. Candido, Análise Dinâmica Do Modelo De Viga De Euler-Bernoulli Via Método Das Diferenças Finitas, *Rev. Ifes Ciência.* 4 (2018) 21–39.
- [63] H.L.G. Pina, O Metodo Dos Elementos Finitos., *Tec.* 51 (1976) 241–248.

9 Anexos

Anexo 1

Na tabela 9.1 são apresentadas as frequências naturais obtidas de acordo com a variação do número de elementos da viga. Com isto conclui-se que é necessário um mínimo de 15 elementos para modelar a viga.

Tabela 9.1 - Convergência da malha

		Número de elementos						
		1	5	10	15	20	25	30
Frequências naturais		37,83	34,55	34,55	34,55	34,55	34,55	34,55
		141,47	95,24	95,22	95,22	95,22	95,22	95,22
		199,91	182,64	182,63	182,63	182,63	182,63	182,63
		568,24	186,86	186,59	186,59	186,59	186,59	186,59
		738,60	309,83	308,30	308,27	308,26	308,26	308,26
			469,80	460,33	460,18	460,17	460,17	460,17
			499,57	499,46	499,46	499,46	499,46	499,46
			568,08	568,08	568,08	568,08	568,08	568,08
			670,49	642,77	642,23	642,18	642,17	642,17
			929,07	855,90	854,29	854,15	854,13	854,12
			969,41	968,08	968,05	968,05	968,05	968,05

Na tabela 9.2 são apresentados os erros relativos correspondentes à comparação dos dados obtidos na tabela anterior.

Tabela 9.2 - Erro relativo correspondente à variação do número de elementos

Erro relativo					
1-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
-8,66E+00	-1,09E-03	-1,12E-05	6,16E-07	6,81E-07	4,71E-07
-3,27E+01	-2,16E-02	-3,18E-04	-1,99E-05	-1,01E-06	7,84E-07
-8,64E+00	-1,09E-03	-1,11E-05	5,91E-07	6,68E-07	4,29E-07
-6,71E+01	-1,43E-01	-2,39E-03	-1,82E-04	-2,46E-05	-3,65E-06
-5,81E+01	-4,93E-01	-1,04E-02	-8,39E-04	-1,28E-04	-2,67E-05
	-2,01E+00	-3,32E-02	-2,77E-03	-4,40E-04	-9,93E-05
	-2,12E-02	-3,12E-04	-1,96E-05	-1,03E-06	7,36E-07
	-2,96E-05	-4,26E-07	-3,76E-08	-4,43E-09	-4,82E-09
	-4,13E+00	-8,53E-02	-7,39E-03	-1,20E-03	-2,80E-04
	-7,88E+00	-1,88E-01	-1,70E-02	-2,80E-03	-6,65E-04

Anexo 2

Nas tabelas 9.3 e 9.4 são apresentados os resultados relativos ao estudo efetuado para avaliar a utilização da malha rigorosa.

Tabela 9.3 - Estudo de convergência da malha rigorosa

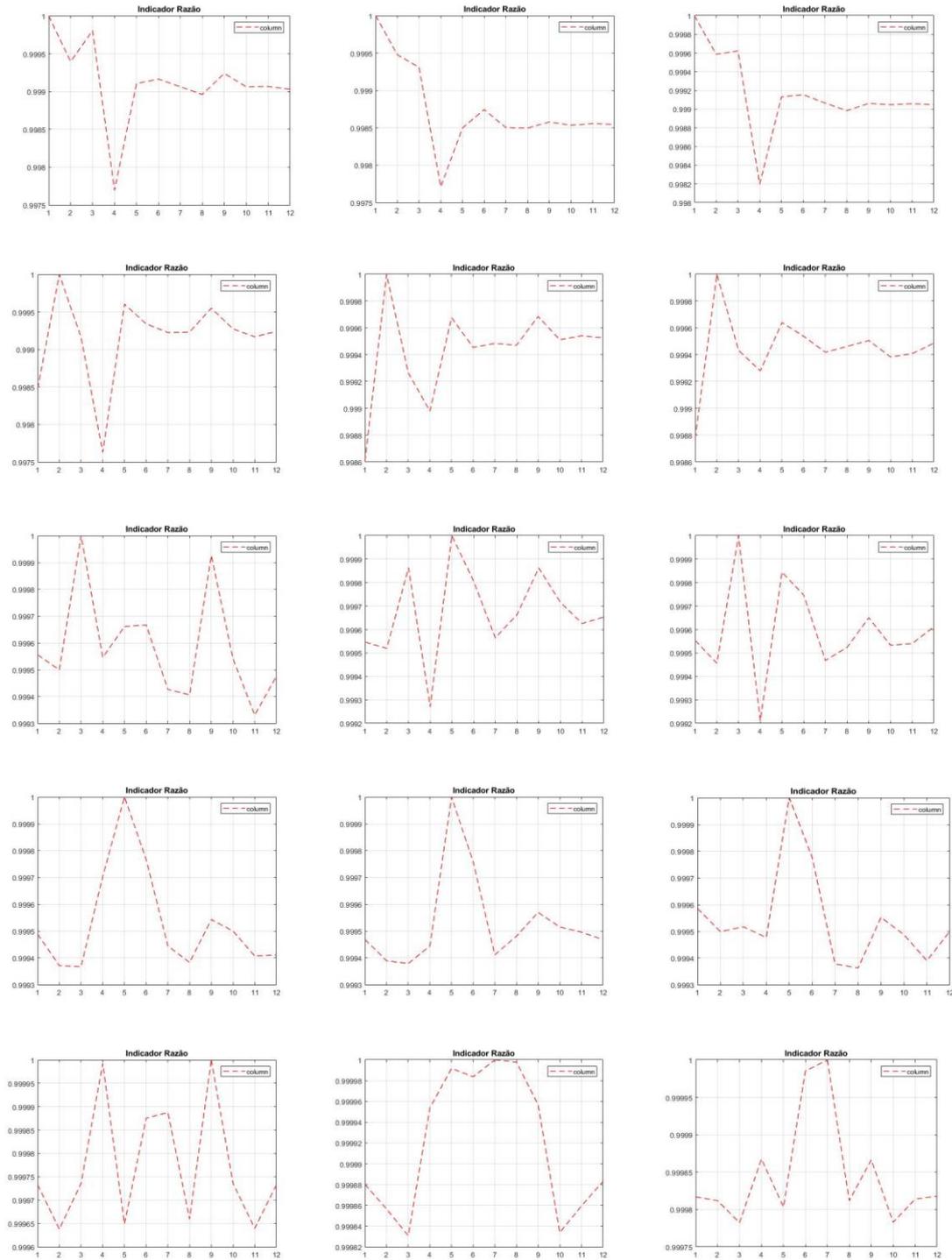
% dano	10%				25%		50%		75%	
Nº divisões	0	2	5	10	0	10	0	10	0	10
frequências naturais	34,55	34,55	34,55	34,55	34,54	34,54	34,51	34,51	34,134	34,134
	95,195	95,195	95,195	95,195	95,13	95,13	94,75	94,75	91,044	91,044
	182,63	182,63	182,63	182,63	182,62	182,62	182,60	182,60	175,547	175,547
	186,523	186,523	186,523	186,523	186,34	186,34	185,21	185,21	182,515	182,515
	308,186	308,186	308,186	308,186	307,95	307,95	306,58	306,58	296,334	296,334
	460,136	460,136	460,136	460,136	460,05	460,05	459,51	459,51	455,652	455,652
	499,433	499,433	499,433	499,433	499,38	499,38	499,17	499,17	498,416	498,416
	568,052	568,052	568,052	568,052	567,92	567,92	566,99	566,99	556,647	556,647
	642,165	642,165	642,165	642,165	642,15	642,15	642,09	642,09	641,517	641,517
	854,006	854,006	854,006	854,006	853,66	853,66	851,50	851,50	832,739	832,739
	968,011	968,011	968,011	968,011	967,89	967,89	967,38	967,38	965,462	965,462

Tabela 9.4 - Erro relativo correspondente à variação do número de elementos da zona rigorosa

% dano	10%			25%	50%	75%
Nº divisões	0-2	2-5	5-10	0-10	0-10	0-10
Erro relativo	-2,70E-07	3,54E-07	-3,20E-07	-2,48E-07	-2,37E-07	-2,13E-07
	-3,30E-08	2,91E-08	-1,10E-07	-1,26E-07	-1,33E-07	-1,66E-07
	-8,80E-09	1,63E-08	-1,80E-08	-1,27E-08	-1,20E-08	-8,21E-08
	-4,10E-09	1,02E-08	-6,30E-08	-5,82E-08	-6,30E-08	-1,17E-08
	2,87E-09	1,03E-09	-1,90E-08	-1,53E-08	-1,69E-08	-1,68E-08
	5,62E-09	6,31E-10	5,15E-09	1,22E-08	1,17E-08	9,98E-09
	5,61E-11	-2,20E-11	-2,50E-09	-2,66E-09	-2,72E-09	-1,11E-09
	-6,70E-09	1,01E-08	-5,30E-09	-4,08E-09	4,46E-10	-7,41E-09
	7,88E-09	3,95E-09	1,36E-08	2,48E-08	2,52E-08	2,67E-08
	9,09E-09	-1,20E-09	8,81E-09	1,60E-08	1,62E-08	1,45E-08
	8,91E-10	-1,10E-09	-1,20E-09	-1,99E-09	-1,60E-09	-1,01E-09

Anexo 3

Neste anexo são apresentados os gráficos relativos ao uso do indicador Razão, sendo que a cada linha corresponde uma diferente localização do dano. Os gráficos da primeira coluna correspondem às extensões, os da segunda às rotações e os da terceira às translações.



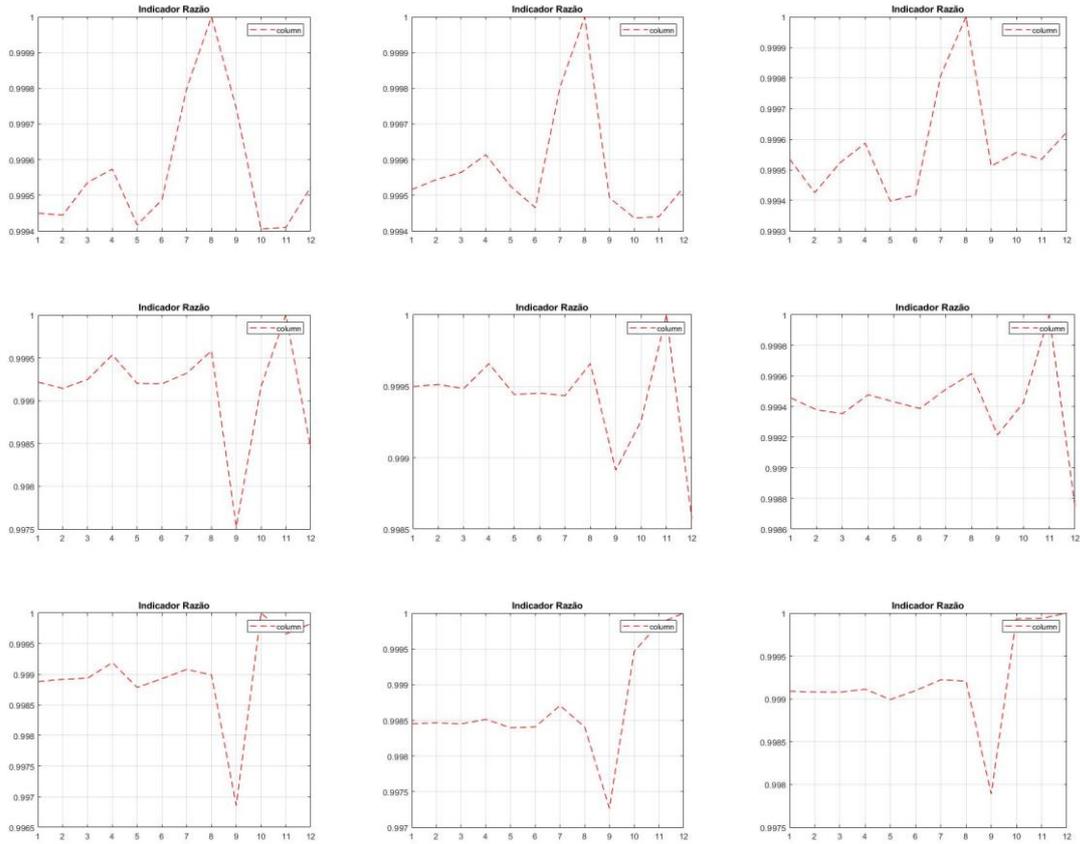
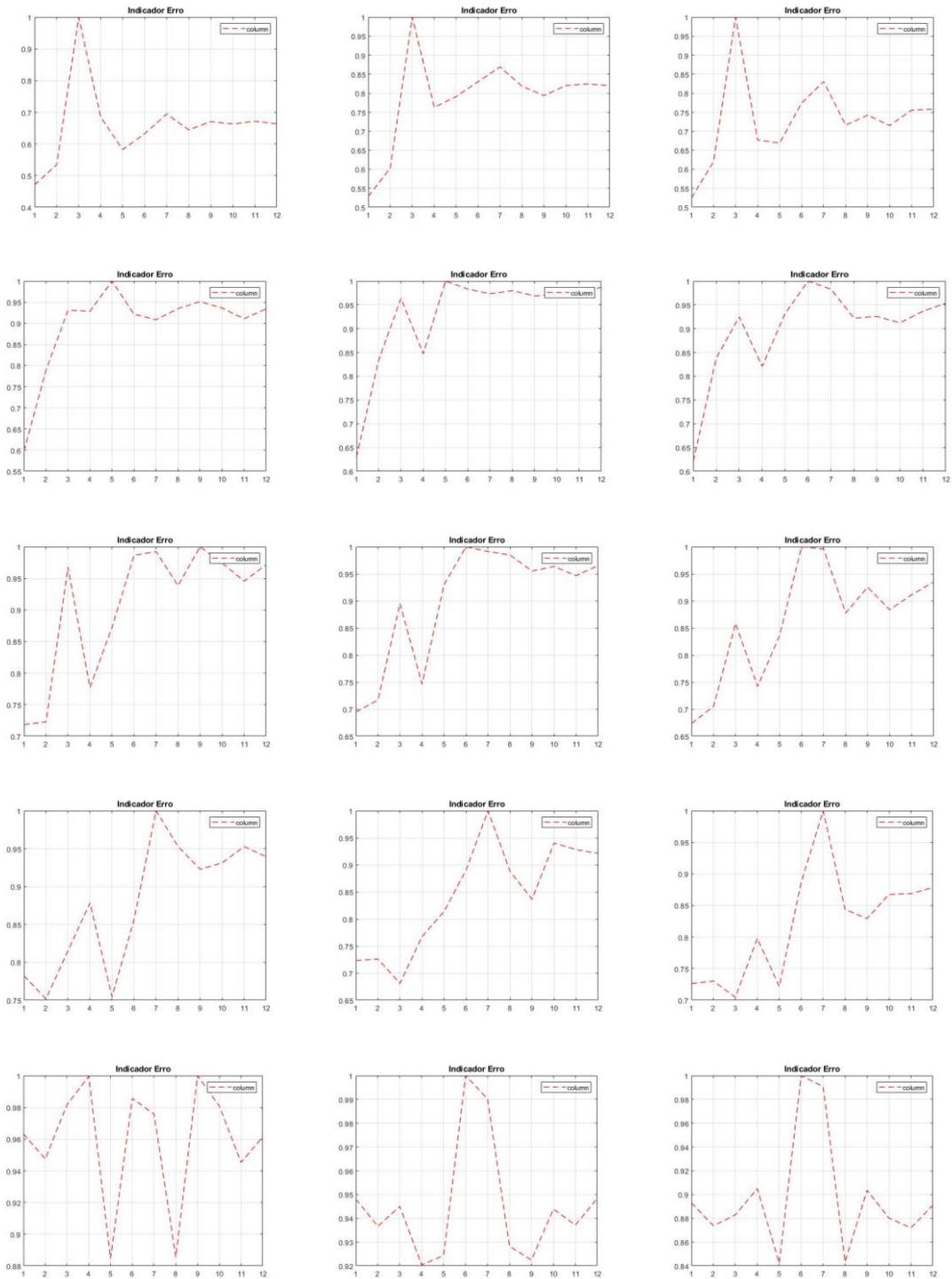


Figura 9.1 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Razão para um dano de 10%

Anexo 4

Em seguida, são apresentados os gráficos correspondentes ao uso do indicador Erro, seguindo a mesma lógica do anexo anterior.



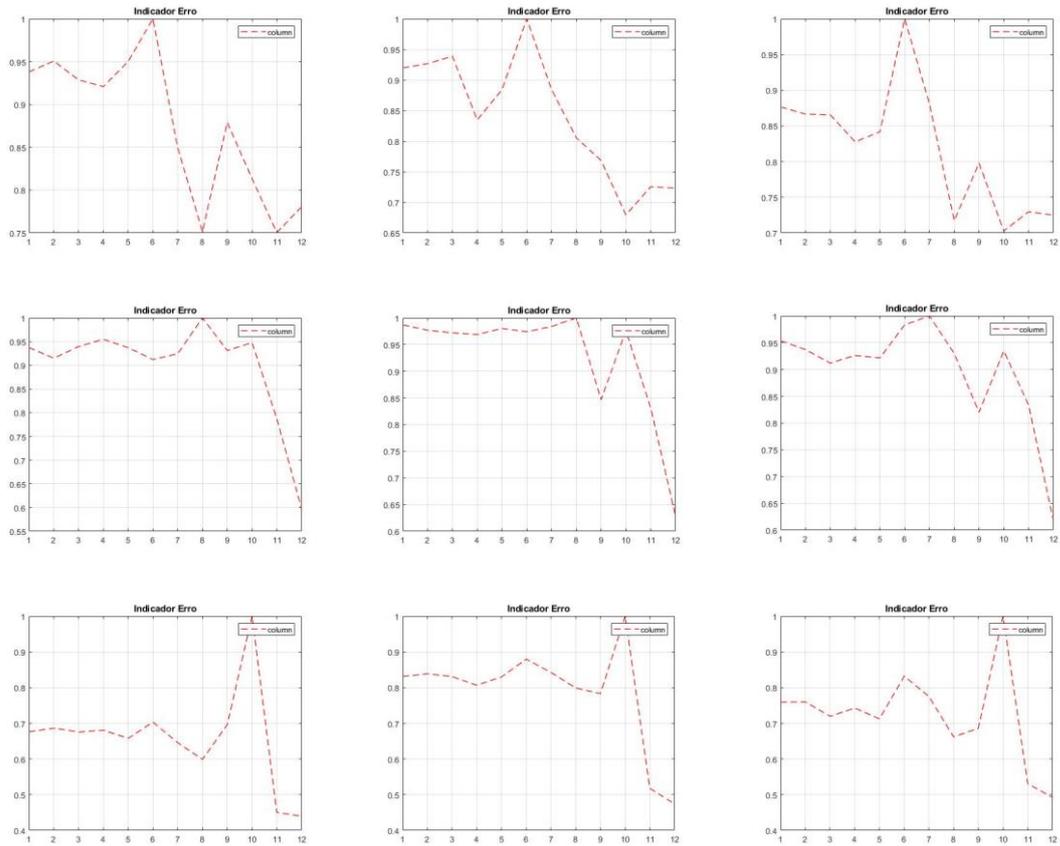
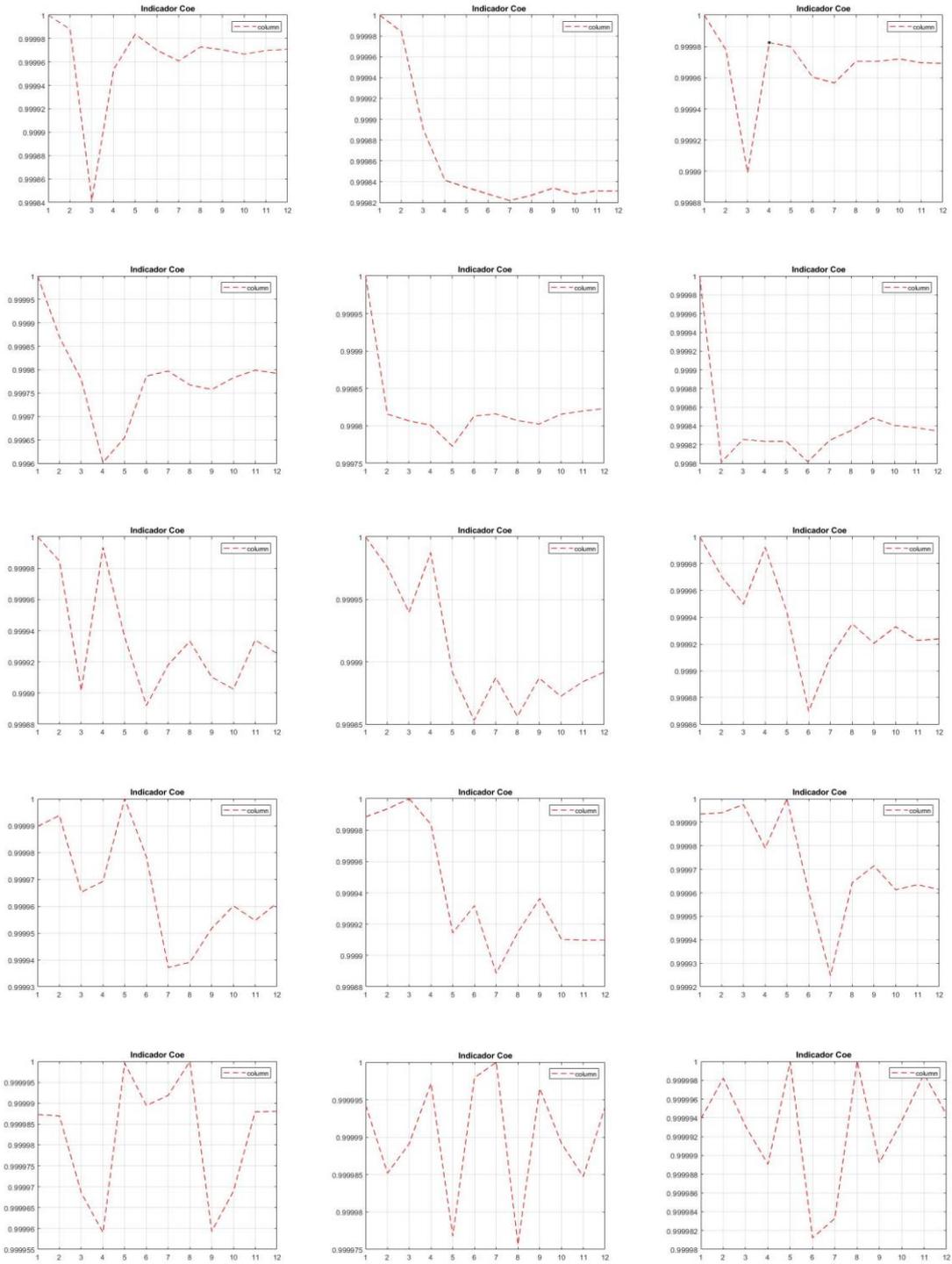


Figura 9.2 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Erro para um dano de 10%

Anexo 5

Gráficos relativos ao uso do indicador Coe



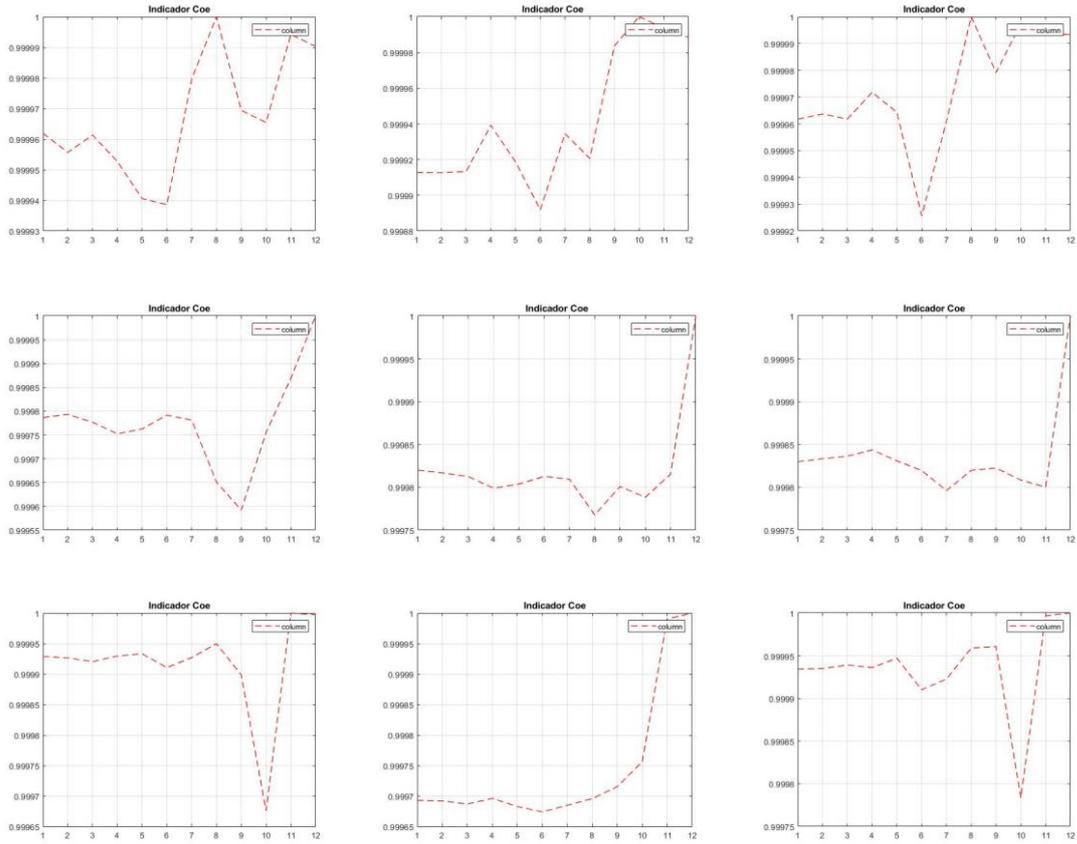
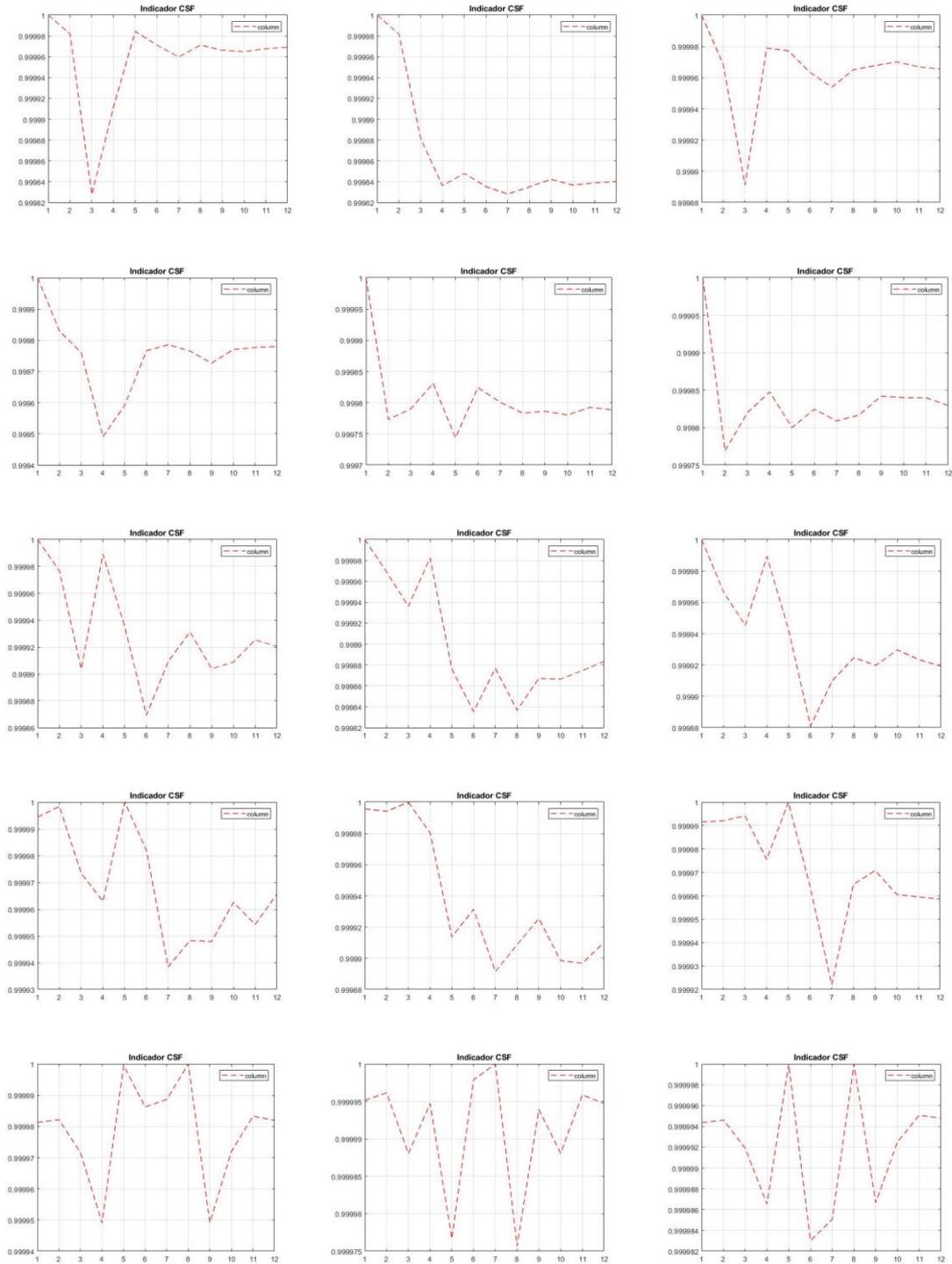


Figura 9.3 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Coe para um dano de 10%

Anexo 6

Gráficos relativos ao uso do indicador CSF



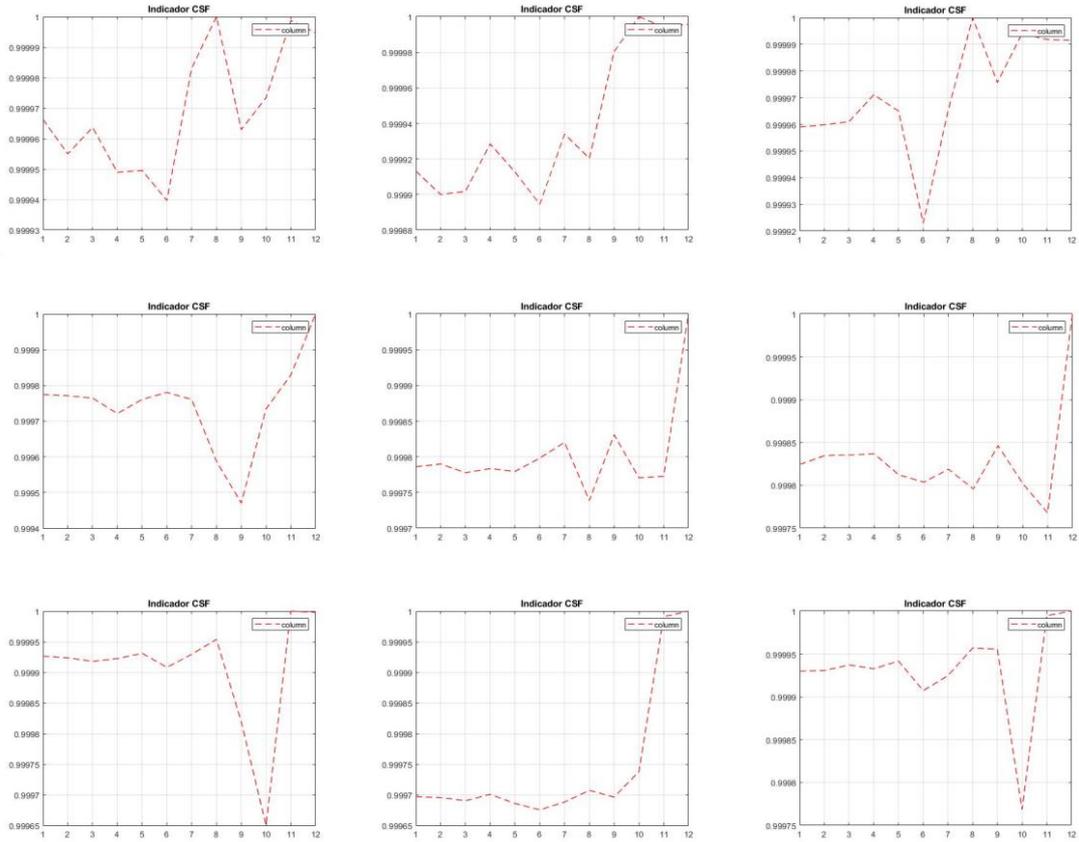
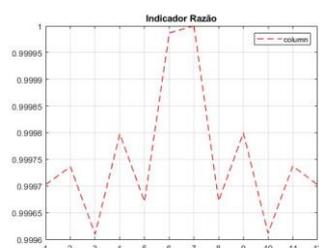
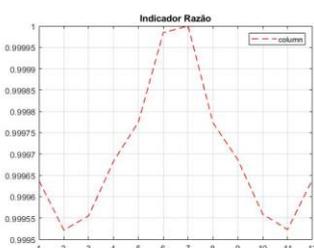
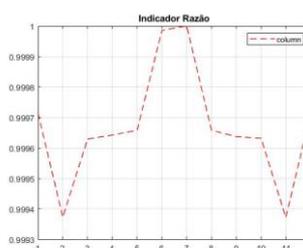
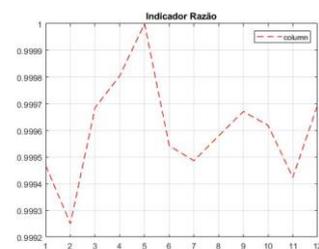
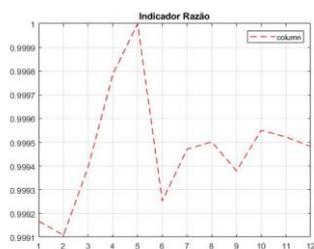
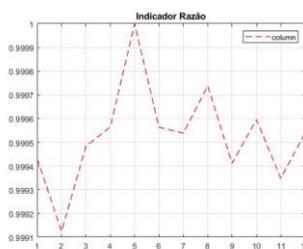
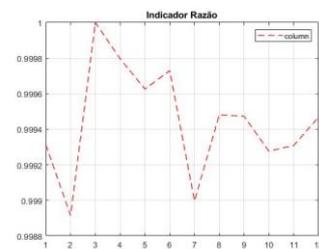
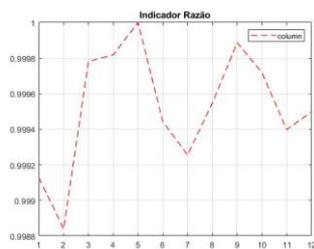
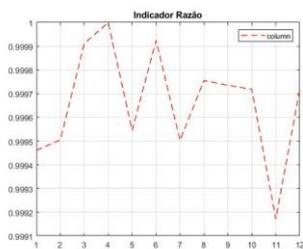
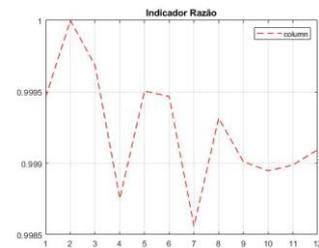
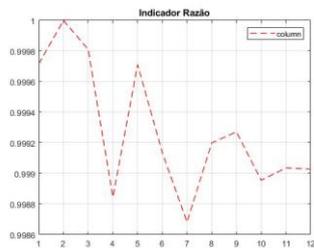
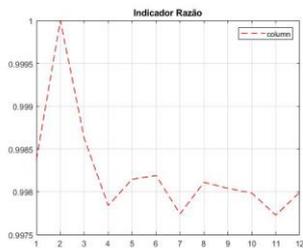
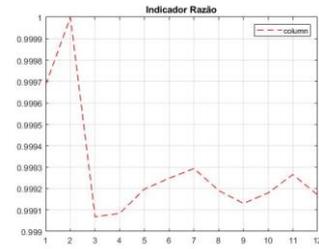
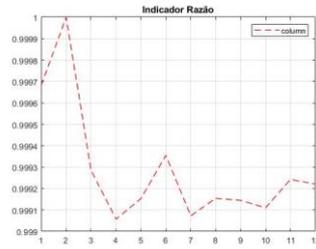
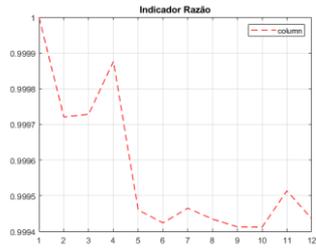


Figura 9.4 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador CSF para um dano de 10%

Anexo 7

Neste anexo são apresentados os gráficos correspondentes à gama de frequências 0-250 Hz, seguindo a mesma lógica dos anexos anteriores.



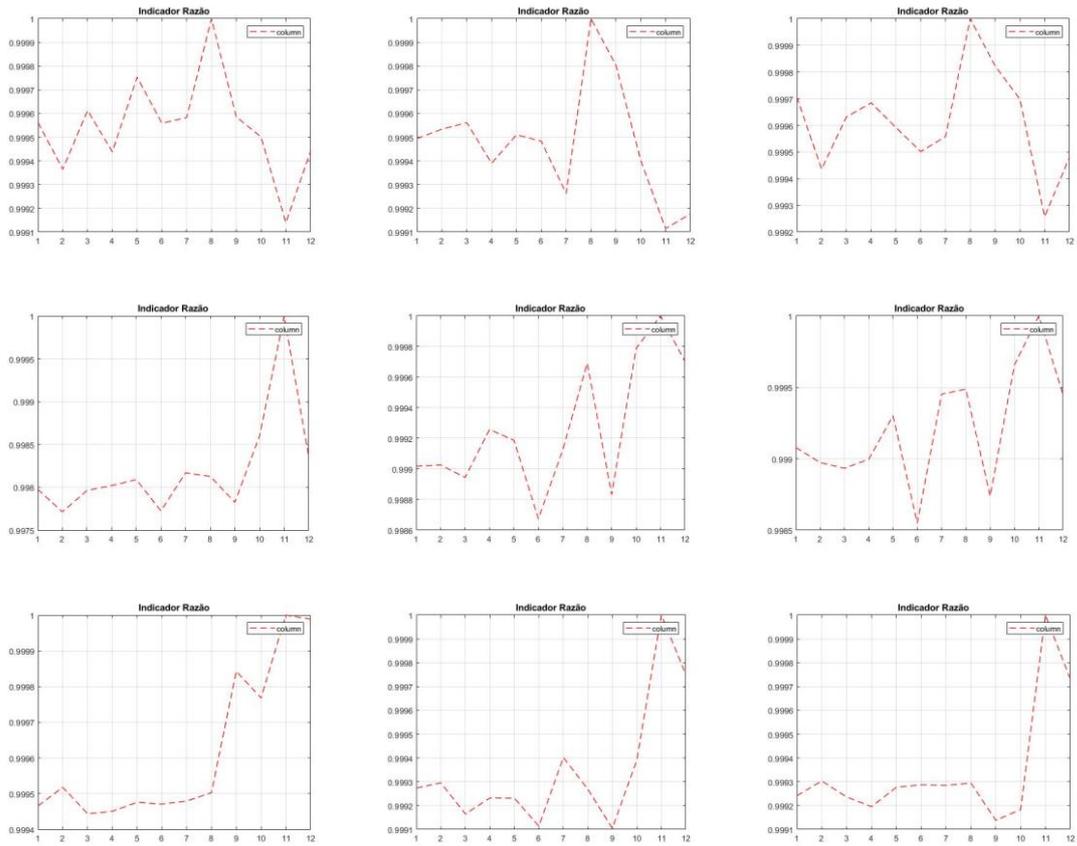
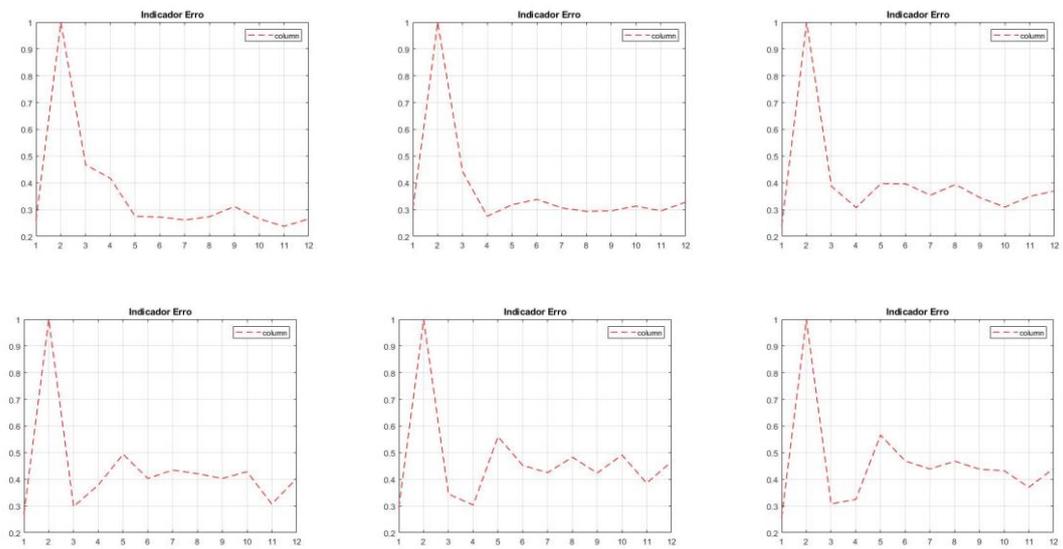
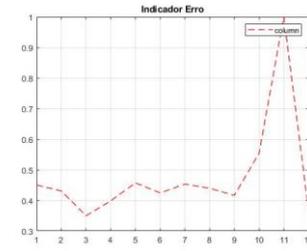
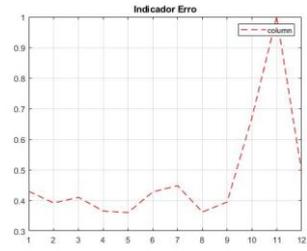
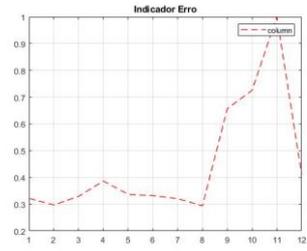
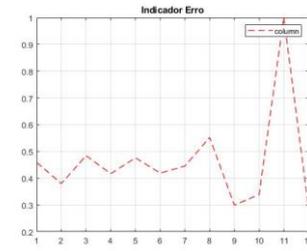
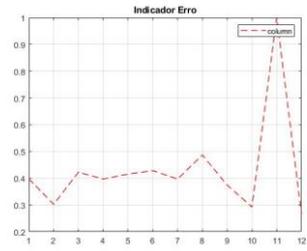
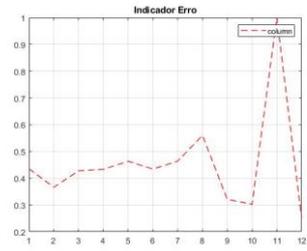
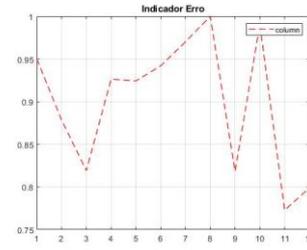
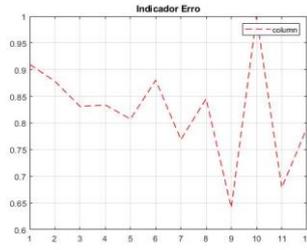
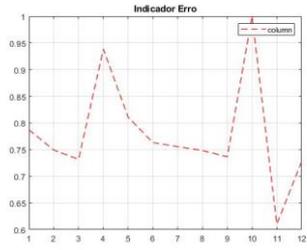
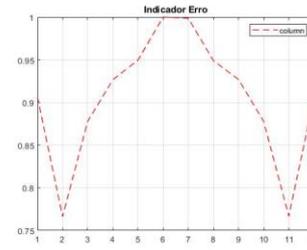
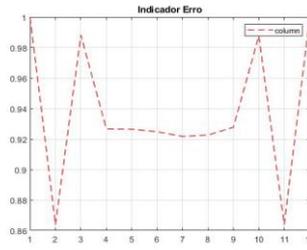
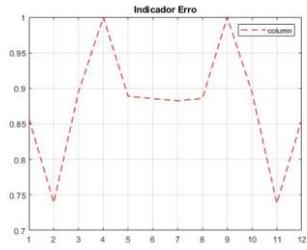
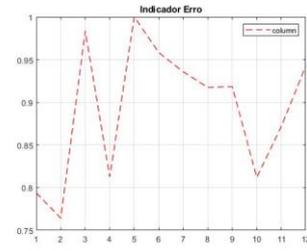
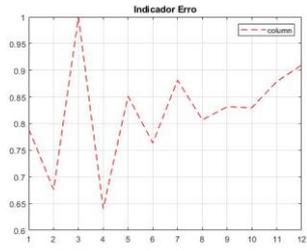
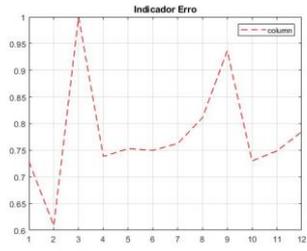
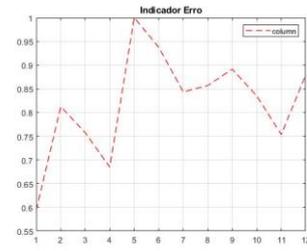
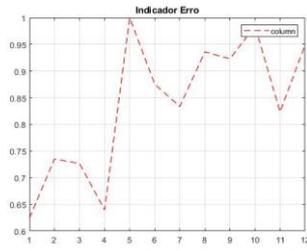
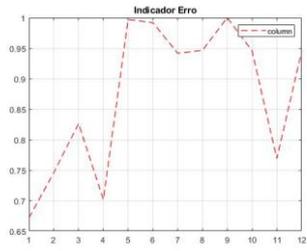
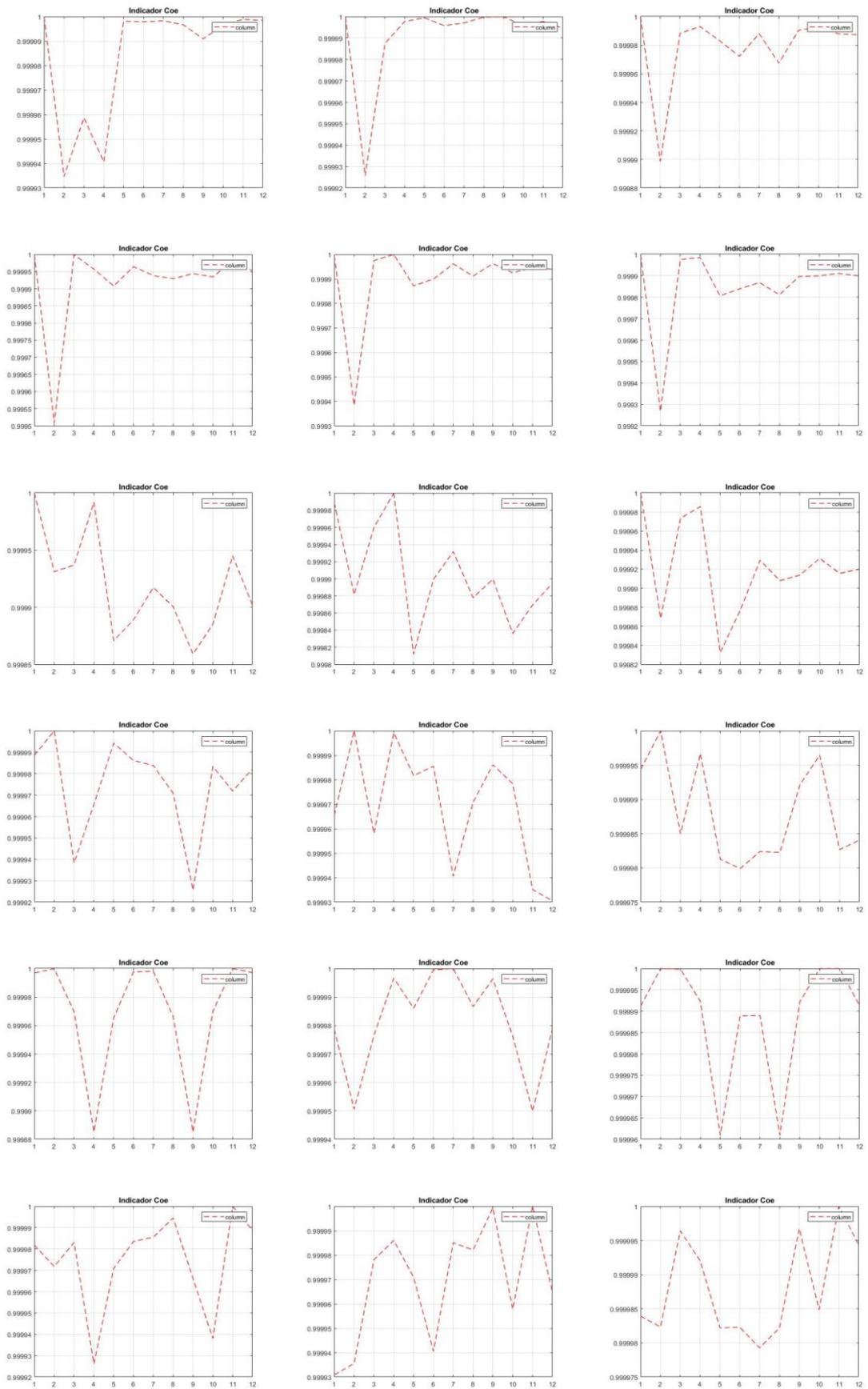


Figura 9.5 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Razão para uma gama de 0-250 Hz







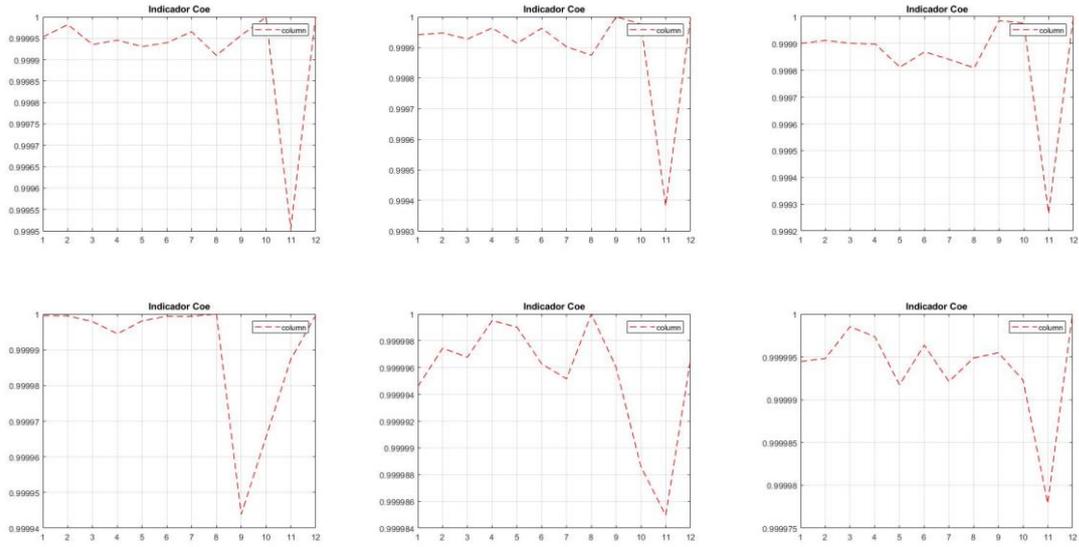
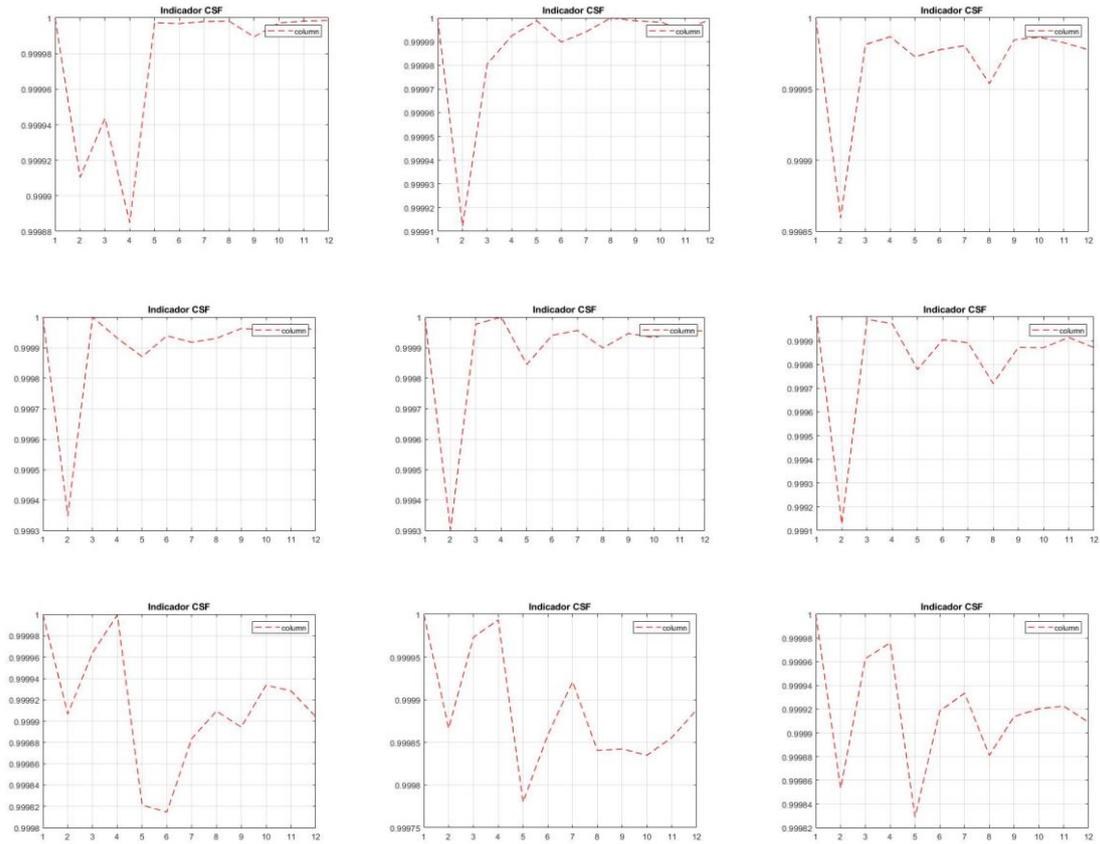


Figura 9.6 - Gráficos correspondentes ao uso dos indicadores Erro e Coe para uma gama de 0-250 Hz



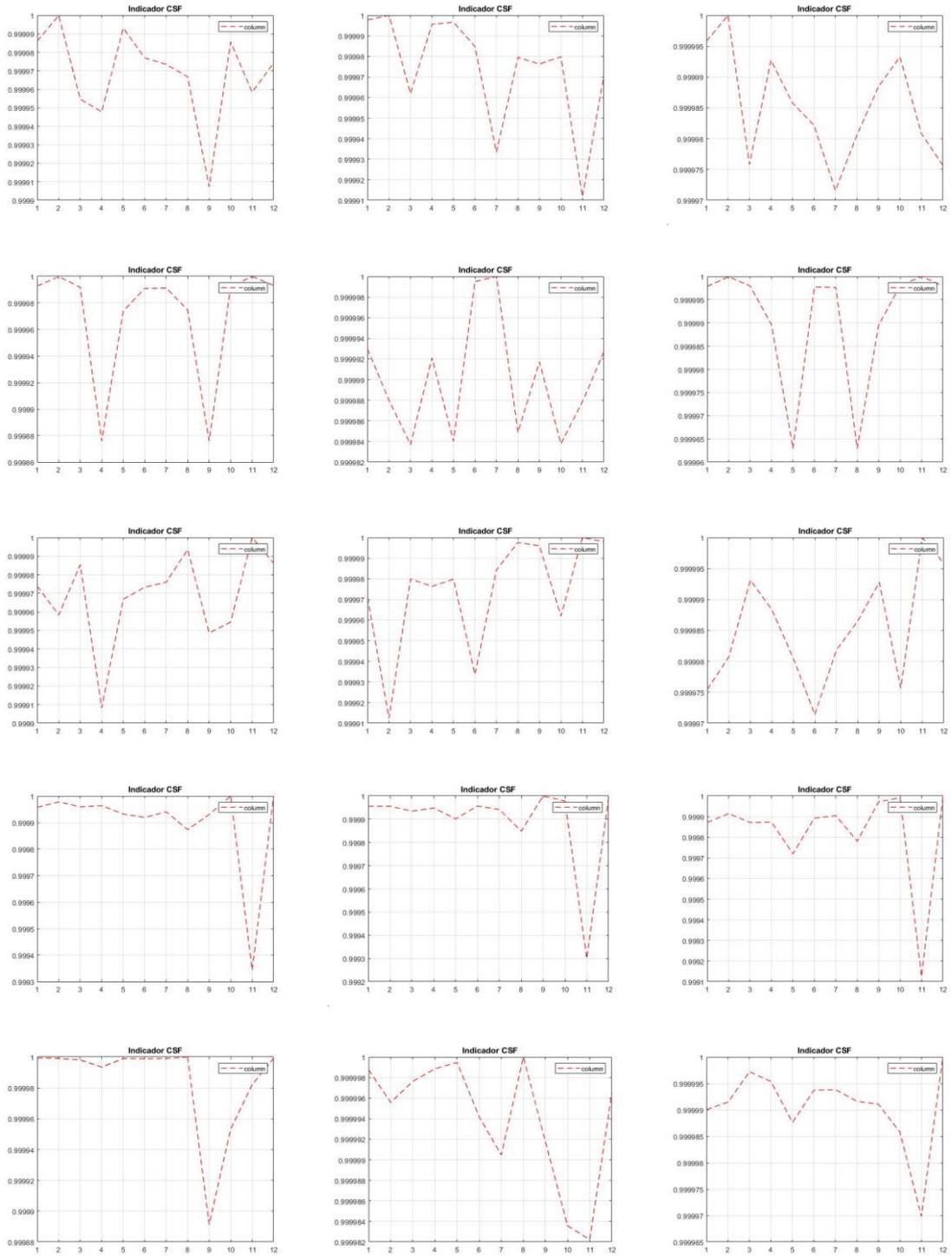
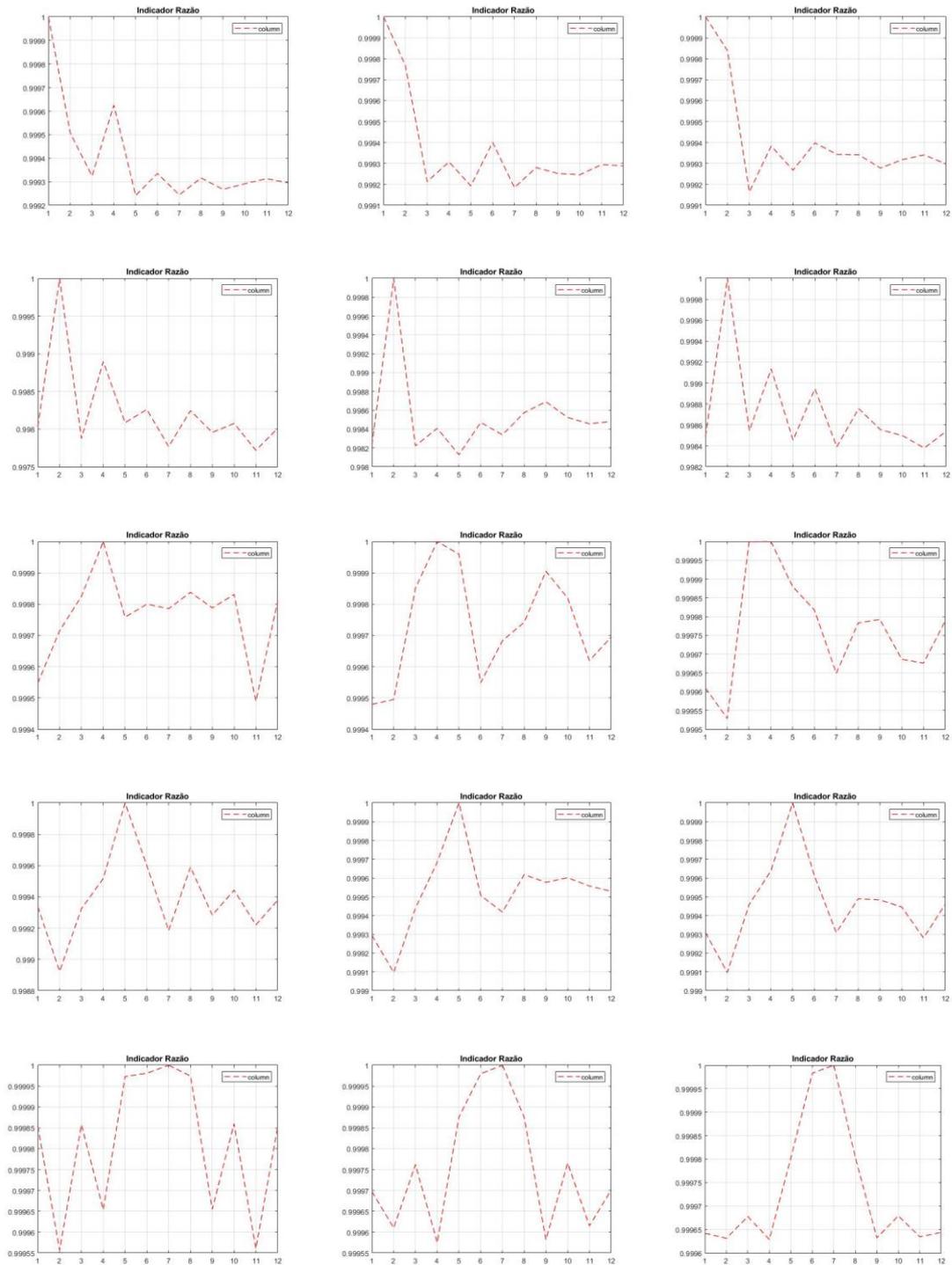


Figura 9.7 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador CSF para uma gama de 0-250 Hz

Anexo 8

Neste anexo são apresentados os gráficos correspondentes á gama de frequência de 0-500 Hz.



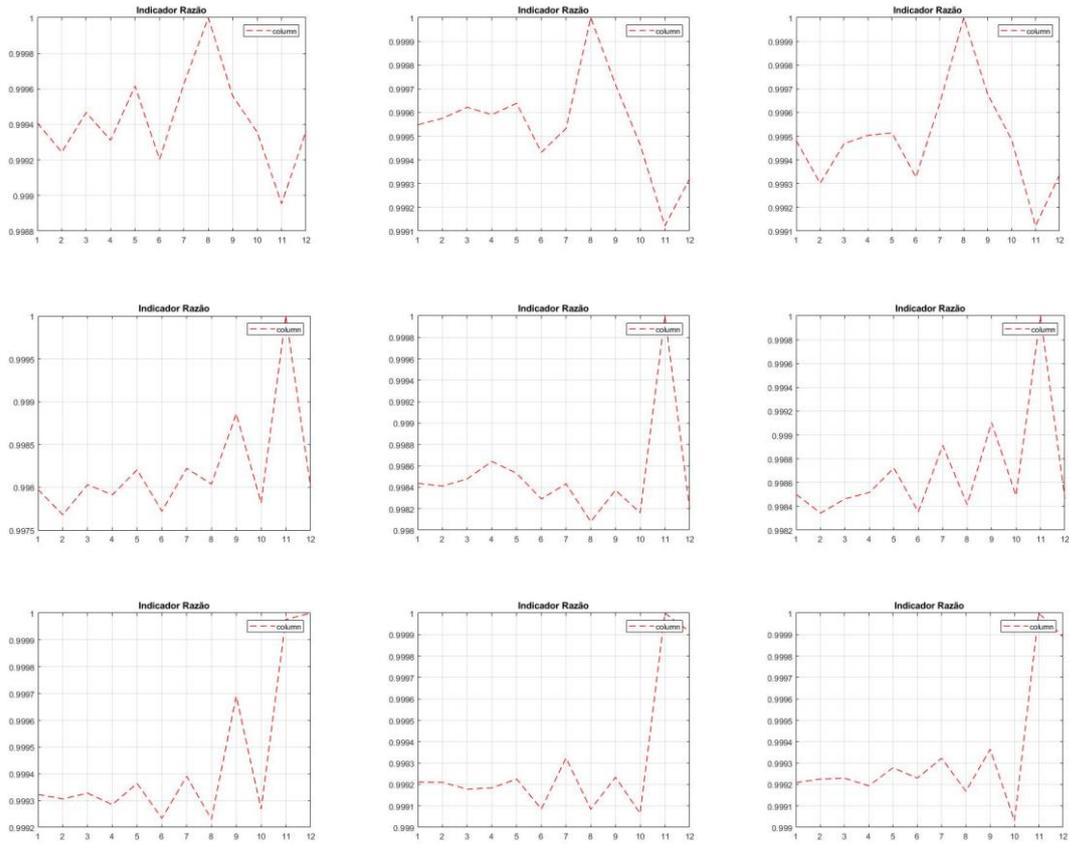
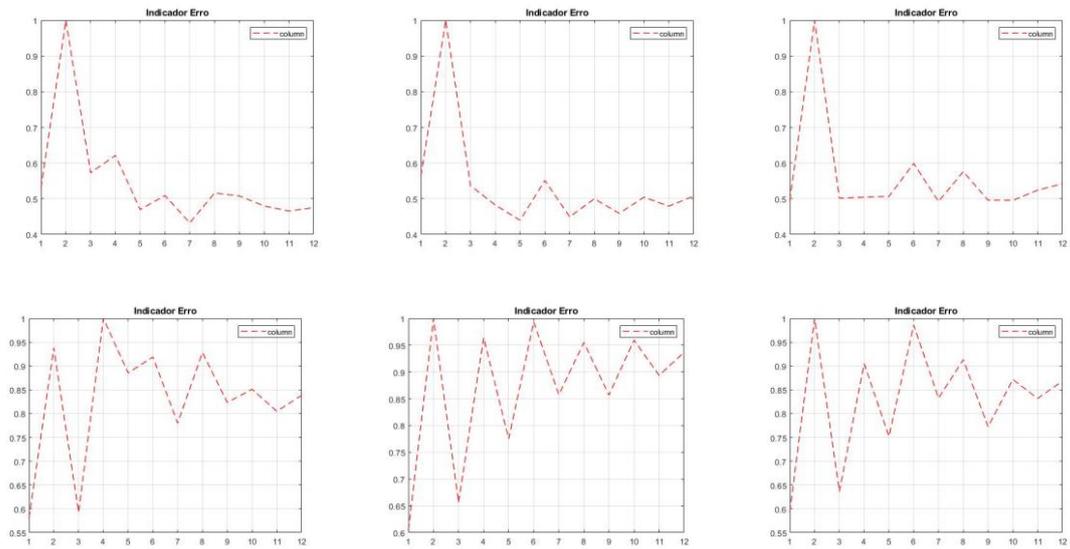
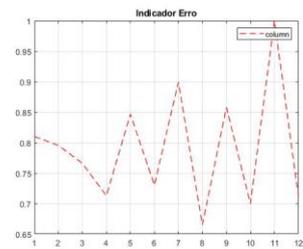
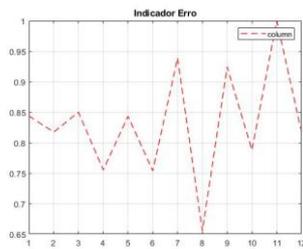
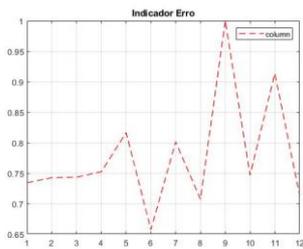
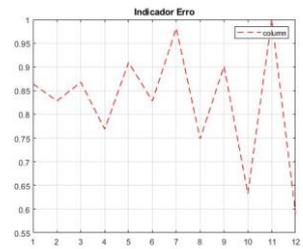
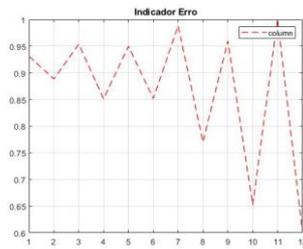
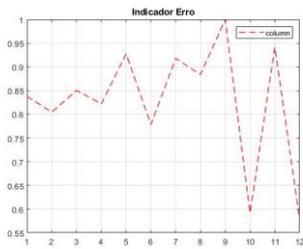
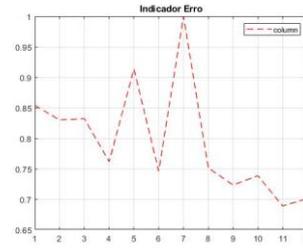
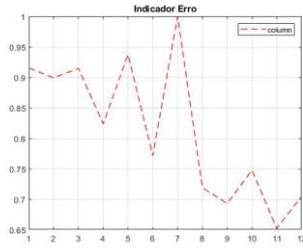
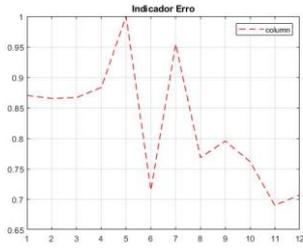
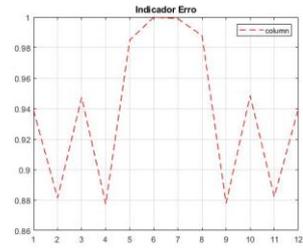
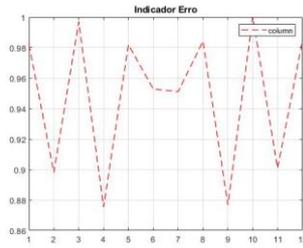
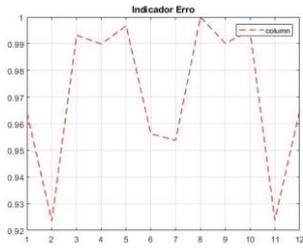
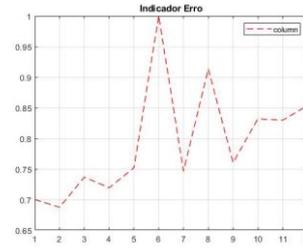
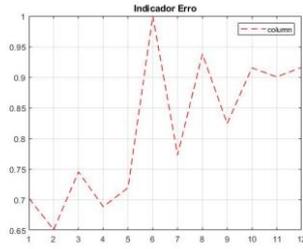
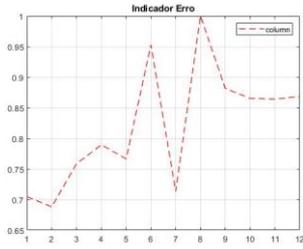
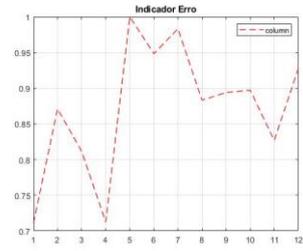
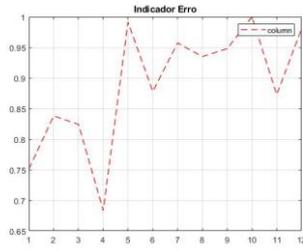
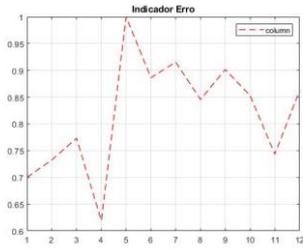
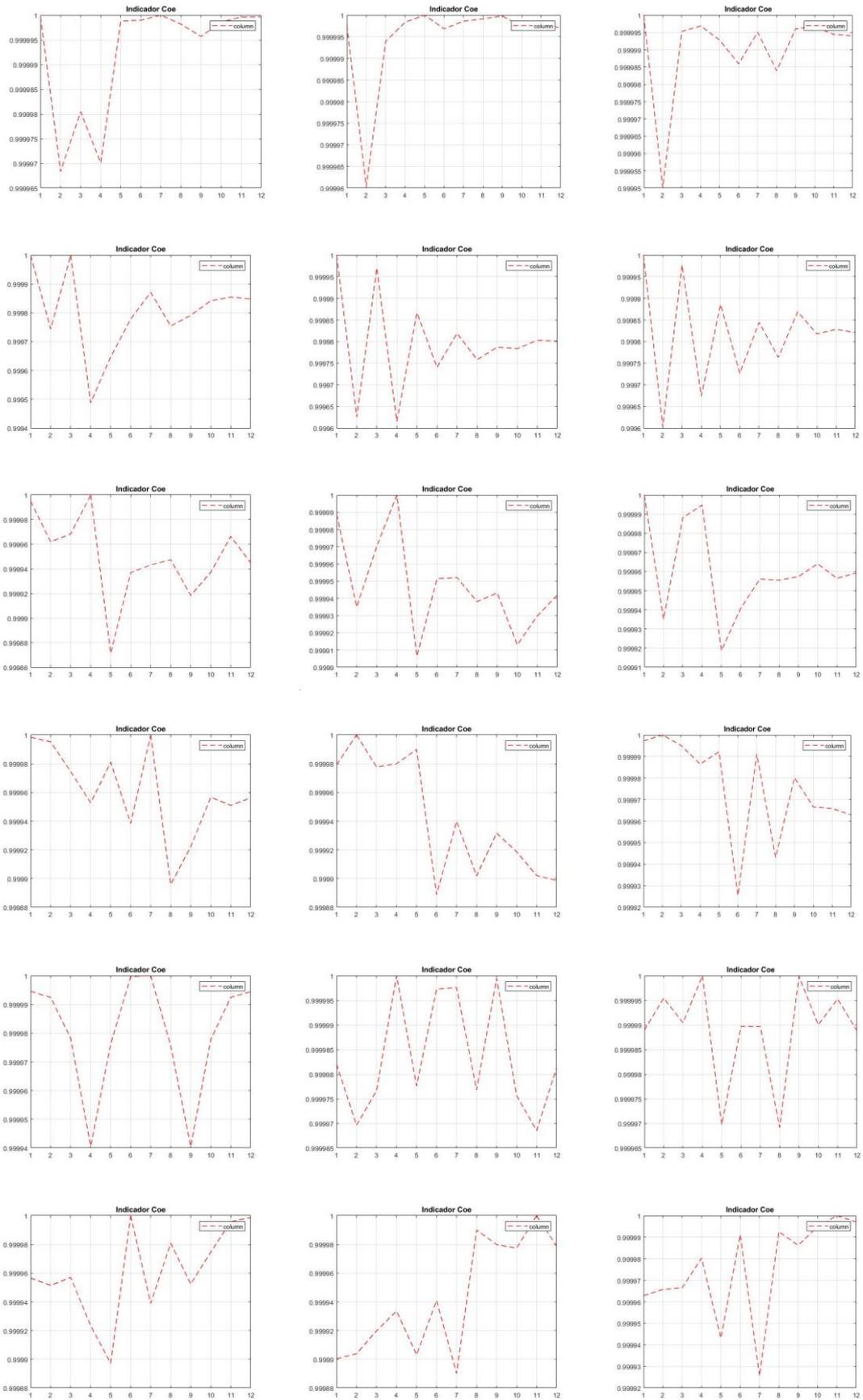


Figura 9.8 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Razão para uma gama de 0-500 Hz







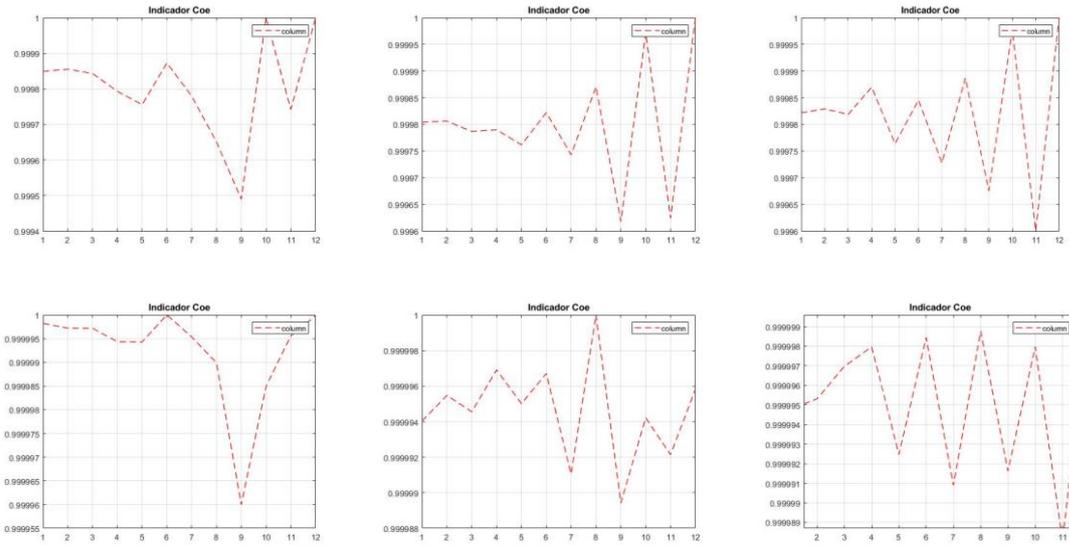
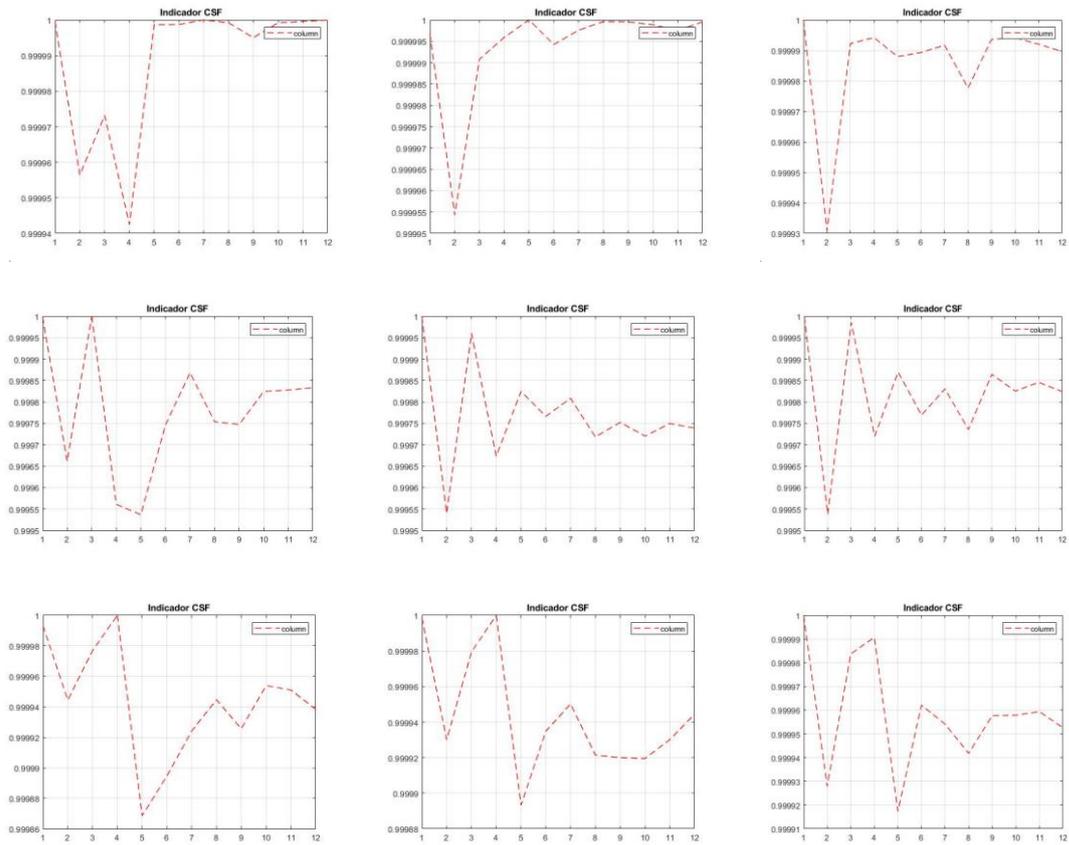


Figura 9.9 - Gráficos correspondentes ao uso dos indicadores Erro e CSF para uma gama de 0-500 Hz



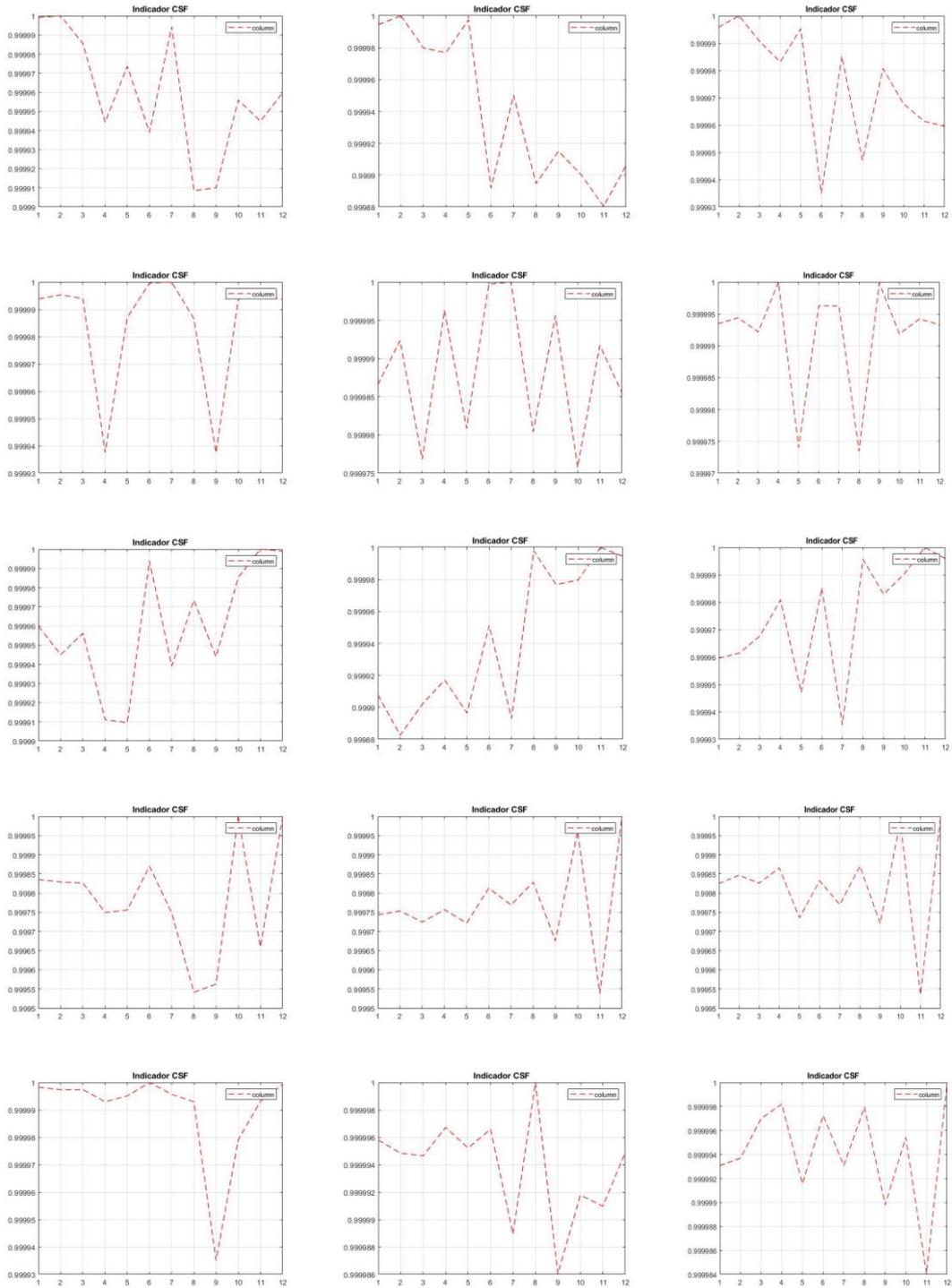
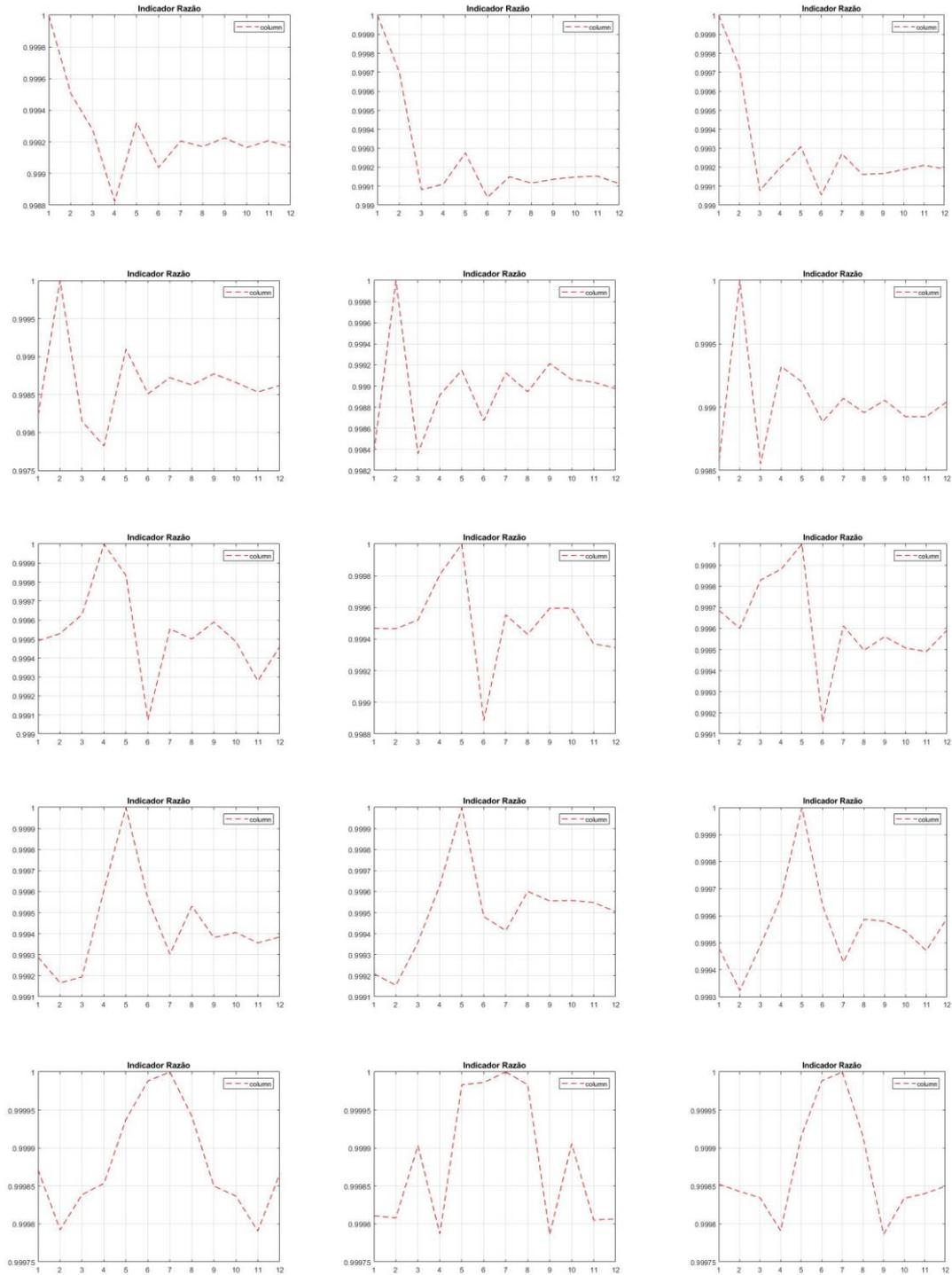


Figura 9.10 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador CSF para uma gama de 0-500 Hz

Anexo 9

Neste anexo são apresentados os gráficos correspondentes á gama de frequência de 0-750 Hz.



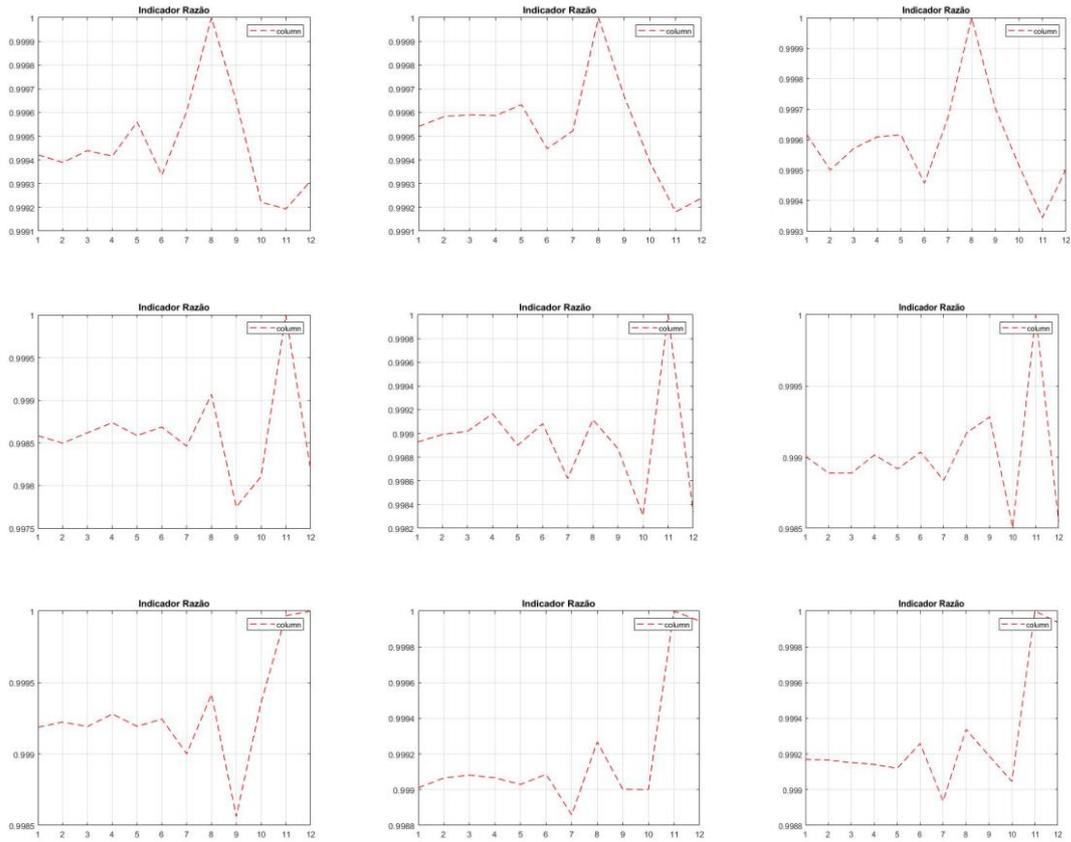
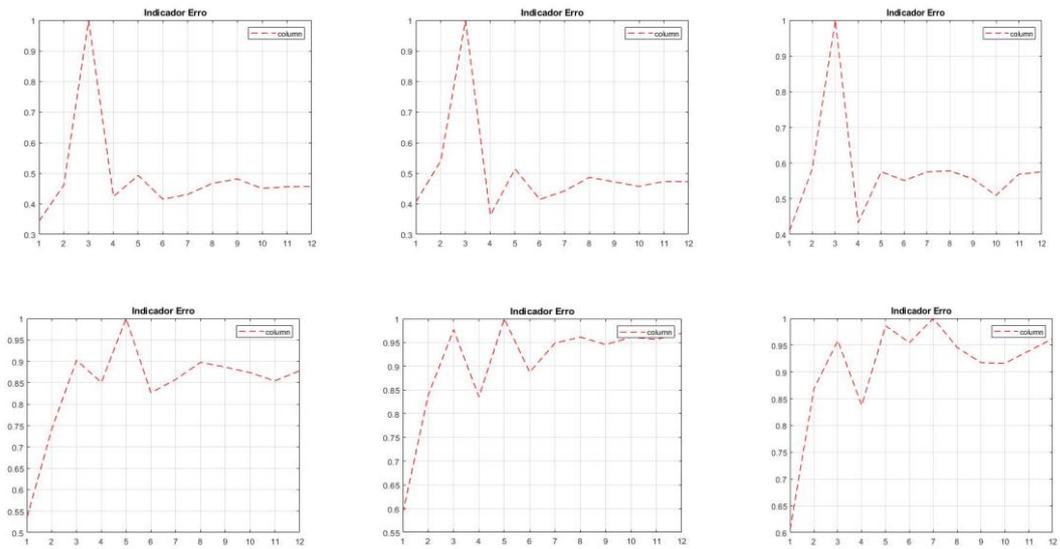
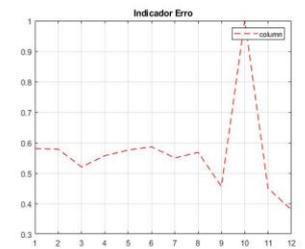
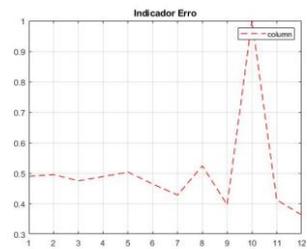
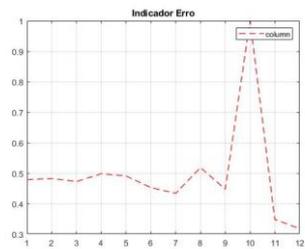
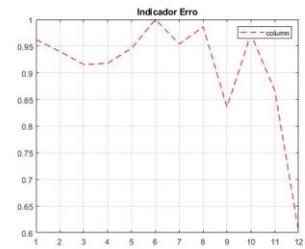
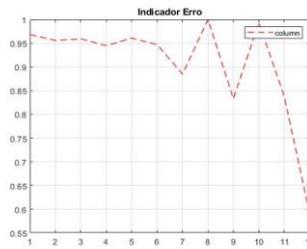
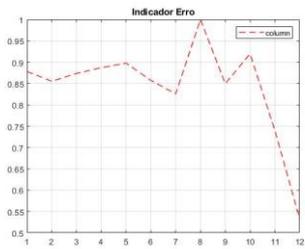
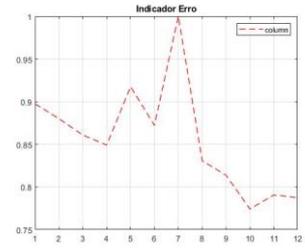
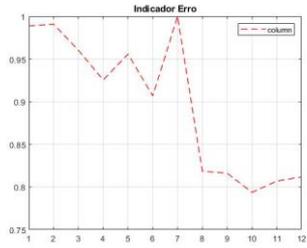
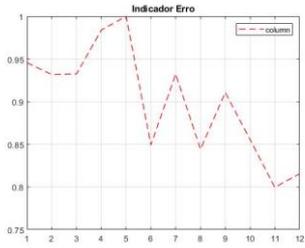
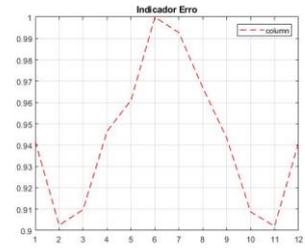
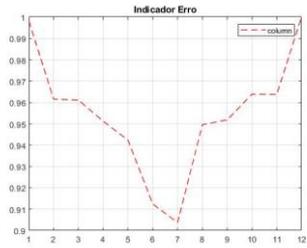
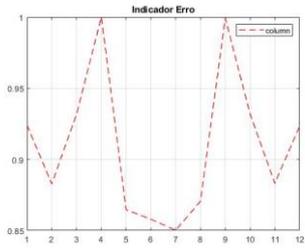
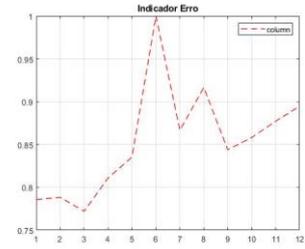
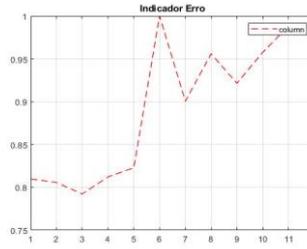
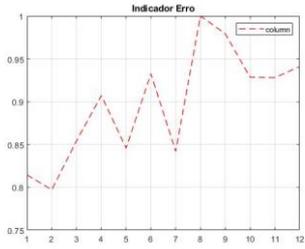
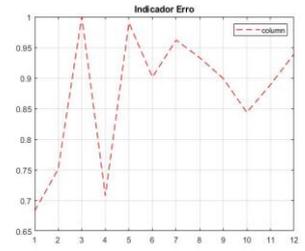
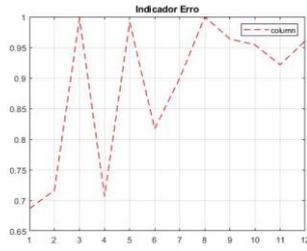
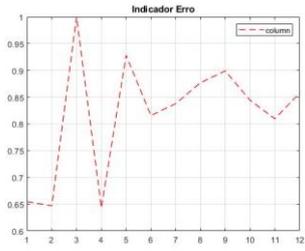
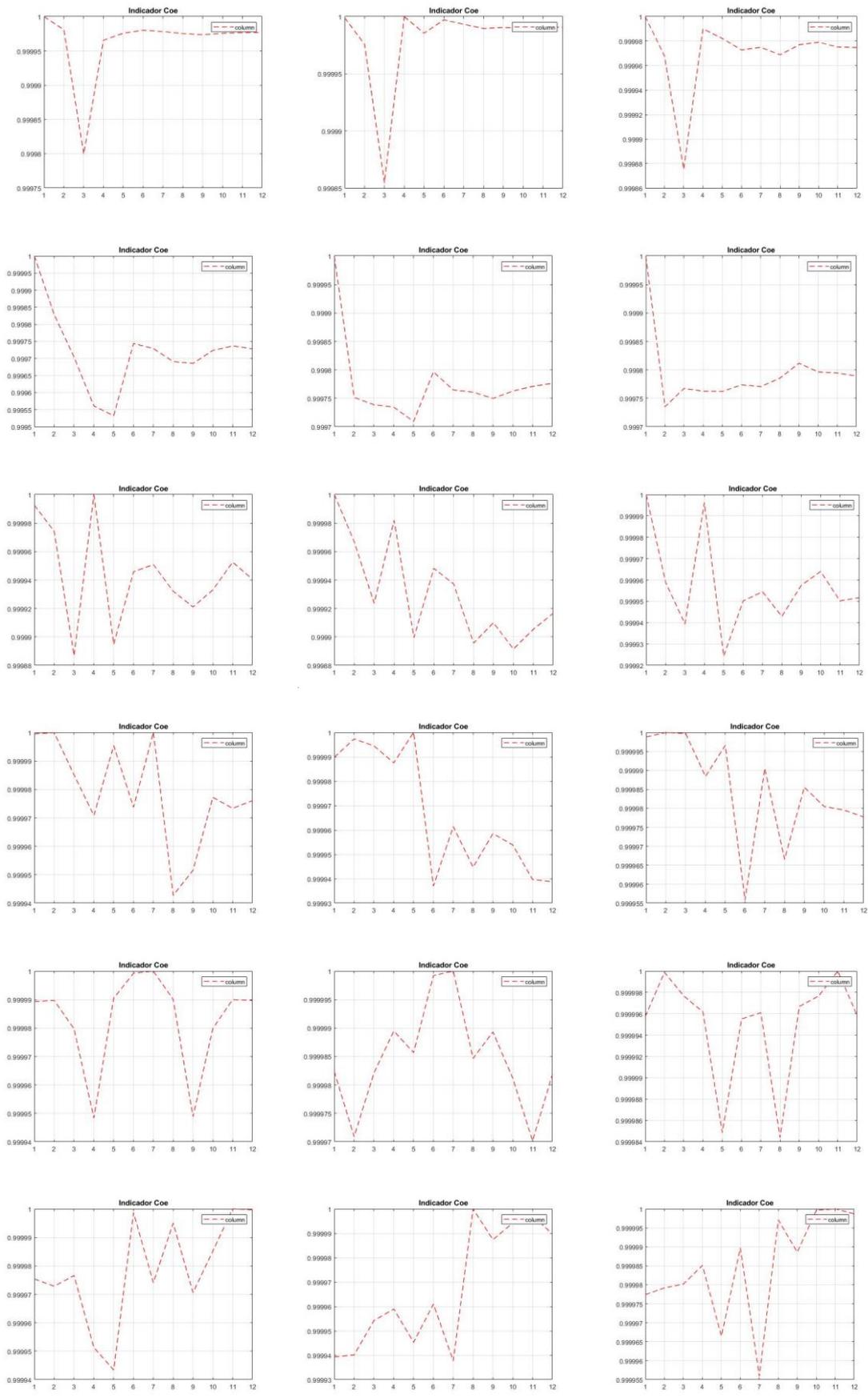


Figura 9.11 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador Razão para uma gama de 0-750 Hz







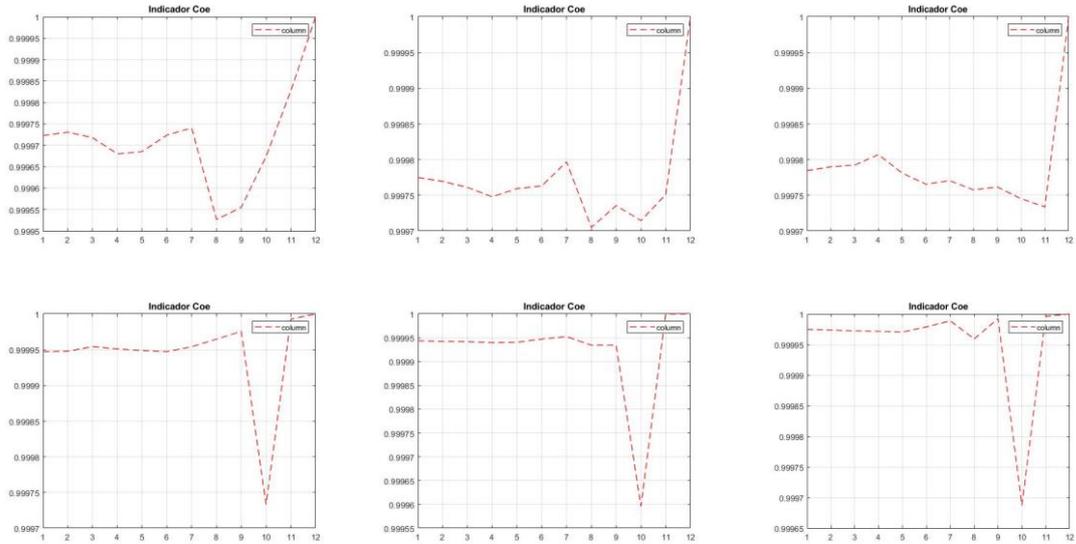
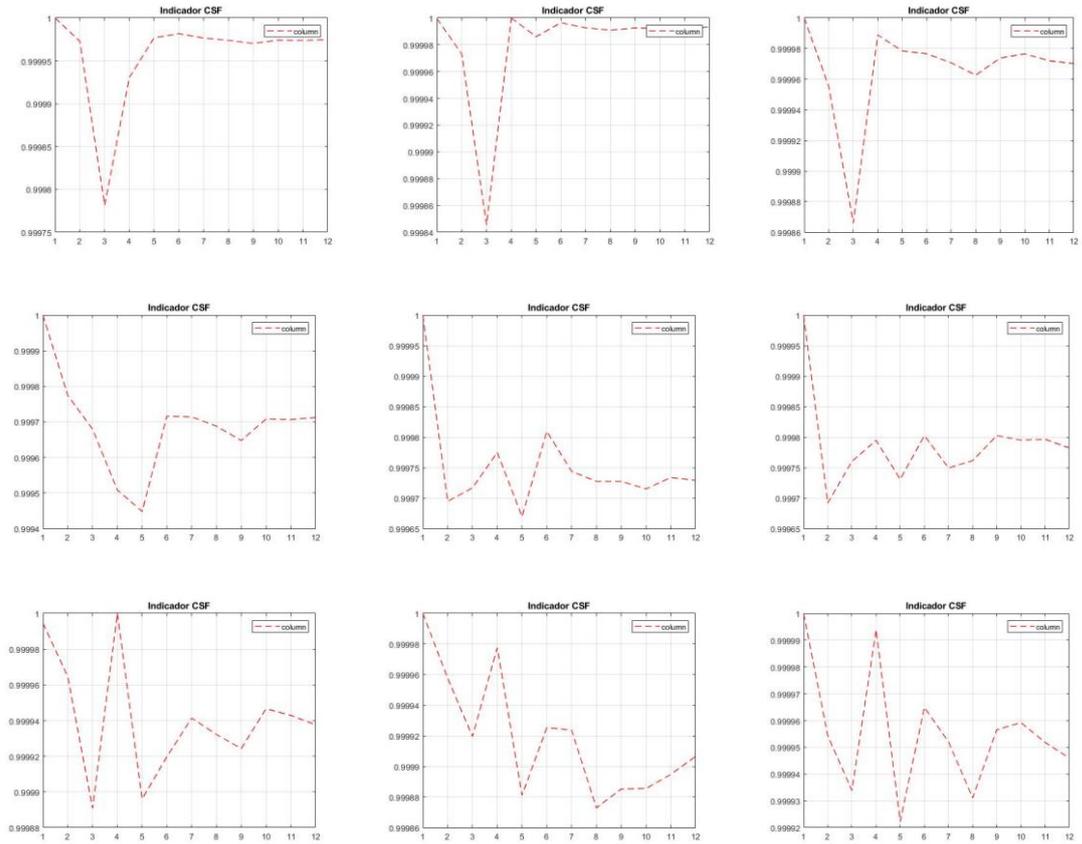


Figura 9.12 - Gráficos correspondentes ao uso dos indicadores Erro e Coe para uma gama de 0-750 Hz



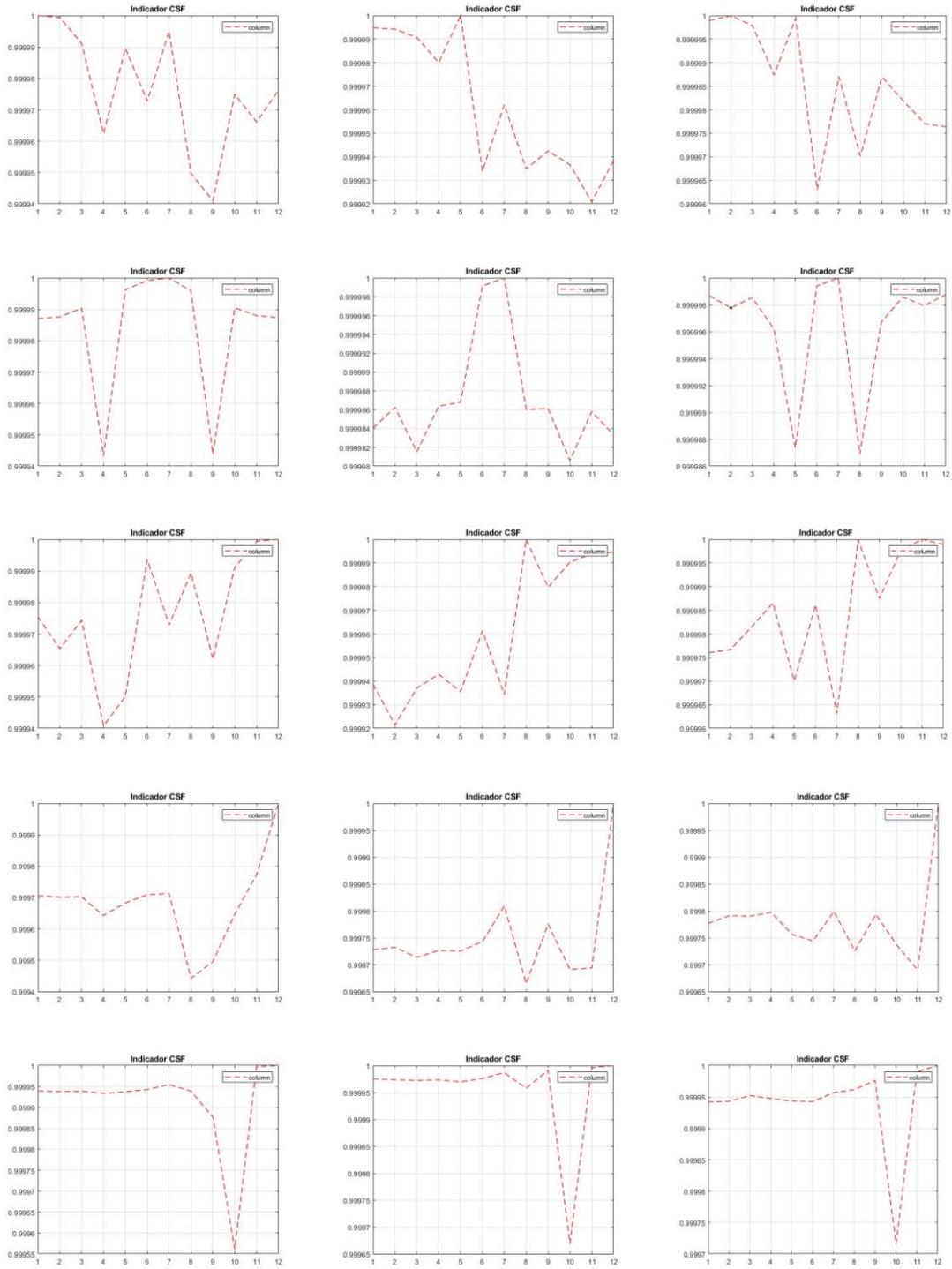


Figura 9.13 - Gráficos correspondentes ao uso do indicador CSF para uma gama de 0-750 Hz