



ESCOLA NAVAL

talant de biefaire



Diogo Martins Ceia

Identificação de dano em veículos autónomos por medição de vibrações

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia
Naval Ramo de Mecânica



Alfeite

2025



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Diogo Martins Ceia

*Identificação de dano em veículos autónomos por medição
de vibrações*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval Ramo
de Mecânica

Orientação de: Rui Pedro Chegas Sampaio

Co-orientação de Hugo Filipe Diniz Policarpo

O Aluno Mestrando,

O Orientador,

GMAR EN-MEC Martins Ceia

Chedas Sampaio

Alfeite

2025

“Vibration is the language of machines.”

Victor Wowk

Dedico este trabalho à minha mãe e à minha irmã.

Agradecimentos

A conclusão deste trabalho assinala o término do meu percurso na Escola Naval. Percurso esse que apenas foi possível com o apoio daqueles que me rodeiam, demonstrando assim o meu profundo agradecimento.

Ao meu orientador, Sr. Professor Rui Sampaio, pelas valiosas diretrizes durante a supervisão atenta e disponível, fundamentais para a resolução dos desafios encontrados.

Ao meu co-orientador, Sr. Professor Hugo Policarpo, pela disponibilidade permanente, incentivo e motivação durante os períodos mais adversos.

À Sra. Professora Raquel Almeida pelo auxílio fornecido durante os ensaios experimentais e por permitir a utilização de um método da sua autoria.

A todos os camaradas do curso Fernão de Magalhães, pelos momentos partilhados, pela camaradagem desenvolvida ao longo destes seis anos e por me terem feito crescer enquanto pessoa, líder e oficial de marinha.

Por último, gostaria de agradecer à Escola Naval pela formação académica e pessoal, proporcionando experiências de vida incapazes de encontrar noutra instituição.

Resumo

A detecção de dano em estruturas tem sido tema de estudo para a comunidade científica nos últimos anos, e a identificação de dano com base em vibrações tornou-se um aspeto fundamental da manutenção preditiva e condicionada. A crescente complexidade das operações militares levou os países de todo o mundo a desenvolverem veículos não tripulados como uma solução estratégica para reduzir o risco humano, introduzindo necessidades ao nível da manutenção dos mesmos. A detecção de problemas numa fase inicial optimiza as reparações e reduz o tempo de inatividade, assegurando que este tipo de equipamento pode funcionar em condições severas.

Esta dissertação tem como objetivo implementar vários métodos de detecção e localização de dano (desenvolvidos por diferentes autores) e avaliar a sua sensibilidade ao dano, utilizando dados obtidos numérica e experimentalmente. Recorrendo ao método dos elementos finitos, é modelada numericamente uma viga onde o dano é simulado pela redução parcial da espessura, permitindo obter a resposta dinâmica no domínio da frequência. Experimentalmente, são utilizados dados provenientes de trabalhos de outros autores (no caso da viga) e realizados ensaios com um *LEO ROVER*, com o objetivo de comparar os resultados obtidos para a viga e confirmar a sua aplicabilidade noutro tipo de estruturas.

Palavras-chave: Detecção de dano, Análise modal experimental, análise de vibrações, *Structural Health Monitoring*

Abstract

The detection of damage in structures has been a subject of concern for the scientific community in recent years, and vibration-based damage identification has become a key aspect of predictive and condition-based maintenance. The increasing complexity of military operations has led countries worldwide to develop Unmanned Vehicles as a strategic solution to reduce human risk, introducing maintenance requirements. Detecting problems at an early stage optimizes repairs and reduces downtime, ensuring that this type of equipment can operate under severe conditions.

The main objective of this work is to implement various methods for damage detection and localization (developed by different authors) and evaluate their sensitivity to damage using data obtained both numerically and experimentally. The finite element method is employed to numerically model a beam, where damage is introduced by partially reducing the thickness, enabling the analysis of the dynamic response in the frequency domain. On the experimental side, data from previous studies are used for the beam case, while complementary tests are conducted on a LEO ROVER. This approach allows for a comparative analysis and supports the assessment of the method's applicability to other structures.

Keywords: Structural damage detection, Experimental modal analysis, Vibration analysis, Structural Health Monitoring

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivo da dissertação	3
1.3	Estrutura	3
2	Enquadramento teórico	5
2.1	Modelos vibracionais	5
2.2	Modelos de 1 e N graus de liberdade	6
2.3	Tipos de análise estrutural	9
2.4	<i>Fast Fourier Transform</i>	9
2.5	<i>Structural Health Monitoring</i>	10
2.6	Métodos dos Elementos Finitos (MEF)	11
2.7	Métodos Experimentais	13
3	Estado da Arte	17
3.1	Métodos no domínio modal	17
3.1.1	Normalização das frequências naturais (NFN)	17
3.1.2	<i>Multiple Damage Location Assurance Criterion</i> (MDLAC)	18
3.1.3	<i>Modal Assurance Criterion</i> (MAC)	18
3.1.4	<i>Coordinate Modal Assurance Criterion</i> (COMAC)	19
3.1.5	<i>Mode shape</i> (MS)	19
3.1.6	<i>Mode Shape Curvature</i> (MSC)	19
3.1.7	<i>Modal Strain Energy</i> (MSE)	19
3.1.8	<i>Damage Index</i> (DI)	20
3.2	Métodos no domínio da frequência	20
3.2.1	<i>Index</i>	21
3.2.2	<i>Frequency Response Assurance Criterion</i> (FRAC)	21
3.2.3	<i>Frequency Domain Assurance Criterion</i> (FDAC)	21
3.2.4	<i>Global Correlation</i>	22
3.2.5	<i>FRF based Mode Shape</i> (FRF_MS)	23

3.2.6	<i>FRF-based Mode Shape Curvature Method</i> (FRF_MSC) . . .	23
3.2.7	<i>FRF-based Damage Index</i> (FRF_DI)	23
3.2.8	<i>Resonant Gapped-smoothing Broadband Method</i> (RGSB) . .	23
3.2.9	<i>Detection and Relative Damage Quantification Indicator</i> (DRQ)	24
3.2.10	<i>Transmissibility Damage Indicator</i> (TDI)	24
3.2.11	Método de localização de dano	25
3.3	Métodos no domínio do tempo	25
3.3.1	Algoritmo de otimização em combinação com resposta em ace- leração	25
3.3.2	<i>Beat Method</i>	26
3.4	Máximas ocorrências	27
4	Descrição do Trabalho	29
4.1	Métodos Selecionados	29
4.2	Modelação Numérica	30
4.2.1	Viga livre-livre	30
4.2.2	Implementação do ruído	34
4.3	Trabalho Experimental	35
4.3.1	<i>Setup</i>	35
4.3.2	Viga livre-livre	37
4.3.3	<i>LEO ROVER</i>	38
5	Resultados e Discussão	41
5.1	Resultados Numéricos	41
5.2	Resultados experimentais	47
5.2.1	Viga livre-livre	47
5.2.2	Leo Rover	51
6	Conclusão e perspectivas de trabalho futuro	55
6.1	Conclusão	55
6.2	Perspetivas de trabalho futuro	56
	Bibliografia	57
	Apêndices	63
A	Resultados numéricos obtidos através do Método das Completas aplicado na viga	63
B	Resultados numéricos obtidos através do DRQ na viga	81

C	Resultados experimentais obtidos através do MC na viga	89
D	Resultados experimentais obtidos através do DRQ na viga	97
E	Resultados experimentais obtidos através do MC no <i>Leo Rover</i>	101
F	Resultados experimentais obtidos através do DRQ no <i>Leo Rover</i>	107
G	Lista de código <i>ANY</i> <i>S APDL</i>	109
H	Lista de código <i>MATLAB</i> para DRQ numérico	115
I	Lista de código <i>MATLAB</i> para DRQ experimental	121
	Anexos	127
I	Método de localização de dano	127
II	Máximas ocorrências- Método de localização de dano	129

Lista de Figuras

2.1	Processo teórico de análise de vibrações	6
2.2	Análise modal experimental	6
2.3	Esquema de Sistema de 1 Grau de Liberdade	7
2.4	Representação esquemática de discretização 2D: (A) Domínio original e (B) Domínio representado por elementos triangulares e quadrangulares	12
2.5	Representação esquemática dos elementos: (A) 1D , (B) 2D e (C) 3D	12
2.6	Geometria do <i>BEAM</i> 188	13
2.7	Aplicação de janela exponencial	15
2.8	Exemplo de janela transiente	15
3.1	Método de detecção no domínio do tempo	26
4.1	Geometria da viga	30
4.2	Demonstração gráfica da implementação do dano	31
4.3	Metodologia aplicada na viga	32
4.4	Esquema ilustrativo do <i>setup</i> experimental	35
4.5	<i>Setup</i> experimental	36
4.6	Janelas aplicadas: (A) Janela exponencial (B) Janela transiente . .	37
4.7	<i>LEO ROVER</i>	38
4.8	Dimensões do <i>LEO ROVER</i>	39
4.9	Disposição dos acelerómetros	40
4.10	Disposição esquemática dos acelerómetros e dos pontos de excitação	40
4.11	Exemplo de dano	40
4.12	Localização do dano no veículo	40
5.1	DRQ Caso 1	42
5.2	DRQ Caso 1 com máximas ocorrências	42
5.3	DRQ Caso 1 com 2% de ruído	43
5.4	DRQ Caso 1 com máximas ocorrências e 2% de ruído	43
5.5	Dano a 10%, sem ruído (0-1000Hz)	44

5.6	Tabelas resumo da localização de dano para o MC com diferentes percentagens de dano	45
5.7	Dano 10%, sem ruído (0-750Hz)	46
5.8	Tabelas resumo da localização de dano para o MC com 2% de ruído	46
5.9	DRQ Caso 1	47
5.10	DRQ Caso 1 com máximas ocorrências	47
5.11	DRQ Caso 2	47
5.12	DRQ Caso 2 com máximas ocorrências	47
5.13	DRQ Caso 3	48
5.14	DRQ Caso 3 com máximas ocorrências	48
5.15	DRQ Caso 4	48
5.16	DRQ Caso 4 com máximas ocorrências	48
5.17	DRQ Caso 5	48
5.18	DRQ Caso 5 com máximas ocorrências	48
5.19	Dano 1 (0-1000Hz)	50
5.20	Tabelas resumo da localização de dano para o MC na riga experimental	51
5.21	DRQ Caso 1	52
5.22	DRQ Caso 1 com máximas ocorrências	52
5.23	DRQ Caso 2	52
5.24	DRQ Caso 2 com máximas ocorrências	52
5.25	DRQ Caso 3	52
5.26	DRQ Caso 3 com máximas ocorrências	52
5.27	Comparação visual dos diferentes danos (0-750Hz)	53
5.28	Tabelas resumo da localização de dano para o MC no <i>LEO ROVER</i>	54
A.1	Dano a 10%, sem ruído (0-250Hz)	64
A.2	Dano a 10%, sem ruído (0-500Hz)	65
A.3	Dano a 10%, sem ruído (0-750Hz)	66
A.4	Dano a 10%, sem ruído (0-1000Hz)	67
A.5	Dano a 15%, sem ruído (0-250Hz)	68
A.6	Dano a 15%, sem ruído (0-500Hz)	69
A.7	Dano a 15%, sem ruído (0-750Hz)	70
A.8	Dano a 15%, sem ruído (0-1000Hz)	71
A.9	Dano a 25%, sem ruído (0-250Hz)	72
A.10	Dano a 25%, sem ruído (0-500Hz)	73
A.11	Dano a 25%, sem ruído (0-750Hz)	74
A.12	Dano a 25%, sem ruído (0-1000Hz)	75
A.13	Dano a 50%, sem ruído (0-250Hz)	76

A.14 Dano a 50%, sem ruído (0-500Hz)	77
A.15 Dano a 50%, sem ruído (0-750Hz)	78
A.16 Dano a 50%, sem ruído (0-1000Hz)	79
B.1 DRQ Caso 1	82
B.2 DRQ Caso 1 com máximas ocorrências	82
B.3 DRQ Caso 2	82
B.4 DRQ Caso 2 com máximas ocorrências	82
B.5 DRQ Caso 3	82
B.6 DRQ Caso 3 com máximas ocorrências	82
B.7 DRQ Caso 4	83
B.8 DRQ Caso 4 com máximas ocorrências	83
B.9 DRQ Caso 5	83
B.10 DRQ Caso 5 com máximas ocorrências	83
B.11 DRQ Caso 6	83
B.12 DRQ Caso 6 com máximas ocorrências	83
B.13 DRQ Caso 7	84
B.14 DRQ Caso 7 com máximas ocorrências	84
B.15 DRQ Caso 8	84
B.16 DRQ Caso 8 com máximas ocorrências	84
B.17 DRQ Caso 1 com 2% de ruído	84
B.18 DRQ Caso 1 com máximas ocorrências e 2% de ruído	84
B.19 DRQ Caso 2 com 2% de ruído	85
B.20 DRQ Caso 2 com máximas ocorrências e 2% de ruído	85
B.21 DRQ Caso 3 com 2% de ruído	85
B.22 DRQ Caso 3 com máximas ocorrências e 2% de ruído	85
B.23 DRQ Caso 4 com 2% de ruído	86
B.24 DRQ Caso 4 com máximas ocorrências e 2% de ruído	86
B.25 DRQ Caso 5 com 2% de ruído	86
B.26 DRQ Caso 5 com máximas ocorrências e 2% de ruído	86
B.27 DRQ Caso 6 com 2% de ruído	87
B.28 DRQ Caso 6 com máximas ocorrências e 2% de ruído	87
B.29 DRQ Caso 7 com 2% de ruído	87
B.30 DRQ Caso 7 com máximas ocorrências e 2% de ruído	87
B.31 DRQ Caso 8 com 2% de ruído	88
B.32 DRQ Caso 8 com máximas ocorrências e 2% de ruído	88
C.1 Dano 1 (0-250Hz)	90

C.2	Dano 1 (0-500Hz)	90
C.3	Dano 1 (0-750Hz)	91
C.4	Dano 1 (0-1000Hz)	91
C.5	Dano 2 (0-250Hz)	92
C.6	Dano 2 (0-500Hz)	92
C.7	Dano 2 (0-750Hz)	93
C.8	Dano 2 (0-1000Hz)	93
C.9	Dano 3 (0-250Hz)	94
C.10	Dano 3 (0-500Hz)	94
C.11	Dano 3 (0-750Hz)	95
C.12	Dano 3 (0-1000Hz)	95
D.1	DRQ Caso 1	98
D.2	DRQ Caso 1 com máximas ocorrências	98
D.3	DRQ Caso 2	98
D.4	DRQ Caso 2 com máximas ocorrências	98
D.5	DRQ Caso 3	98
D.6	DRQ Caso 3 com máximas ocorrências	98
D.7	DRQ Caso 4	99
D.8	DRQ Caso 4 com máximas ocorrências	99
D.9	DRQ Caso 5	99
D.10	DRQ Caso 5 com máximas ocorrências	99
E.1	Dano 1, (0-1000Hz)	102
E.2	Dano 2, (0-1000Hz)	102
E.3	Comparação visual dos diferentes danos (0-1000Hz)	103
E.4	Comparação visual dos diferentes danos (0-750Hz)	104
E.5	Comparação visual dos diferentes danos (0-500Hz)	105
E.6	Comparação visual dos diferentes danos (0-250Hz)	106
F.1	DRQ Caso 1	108
F.2	DRQ Caso 1 com máximas ocorrências	108
F.3	DRQ Caso 2	108
F.4	DRQ Caso 2 com máximas ocorrências	108
F.5	DRQ Caso 3	108
F.6	DRQ Caso 3 com máximas ocorrências	108
I.1	Demonstração gráfica da matriz tridimensional	127
II.1	Ilustração da matriz B	129

Lista de Tabelas

3.1	Caso hipotético de índice de localização de dano	27
4.1	Propriedades do material	30
4.2	Localização dos pontos de medição e excitação	32
4.3	Localização do dano	33
4.4	Localização do dano experimental	38
5.1	Tabela resumo de detecção usando DRQ	42
5.2	Tabela resumo de detecção usando DRQ com 2% de ruído	43

Lista de Abreviaturas

CEOM	C entro de E xperimentação O peracional da M arinha
CEOV	C élula de I novação e E xperimentação O peracional de S istemas N ão T ripulados
CINAV	C entre de I nvestigação N aval
COMAC	C oordinate M odal A ssurance C riterion
DI	D amage i ndex
DFT	D iscrete F ourier T ransform
DRQ	D etection and R elative D amage Q uantification
FDAC	F requency D omain A ssurance C riterion
FRAC	F requency R esponse A ssurance C riterion
FRF	F requency R esponse F unction
FRF_DI	F requency R esponse F unction D amage I ndex
FRF_MS	F requency R esponse F unction M ode S hape
FRF_MSC	F requency R esponse F unction M ode S hape C urvature
FFT	F ast F ourier T ransform
GAC	G lobal A mplitude C orrelation F unction
GDL	G rau D e L iberdade
GSC	G lobal S hape C orrelation F unction
MAC	M odal A ssurance C riterion
MC	M étodo das C ompletas
MDLAC	M ultiple D amage L ocation A ssurance C riterion
MS	M ode s hape
MSE	M odal S train E nergy
MSECR	M odal S train E nergy C hange R atio
MSC	M ode S hape C urvature
NFN	N ormaização das F reqüências n aturais
ODS	O perational D eflection S hape

RGSB	R esonant G apped- S oothing B roadband
RVAC	R esponse V ector A ssurance C riterion
SHM	S tructural H ealth M onitoring
TDI	T ransmissibility D amage I ndicator
UAV	U nmanned A erial V ehicle
UV	U nmanned V ehicle
VANT	V eículo A éreo N ão T ripulado

Capítulo 1

Introdução

As operações militares e da proteção civil são uma tarefa desafiante pela sua complexidade e perigos associados. Através da forte evolução tecnológica na indústria dos veículos não tripulados, a sua utilização tem sido cada vez maior com o objetivo de afastar os militares e os profissionais do perigo, reduzindo as perdas humanas. Os desafios passam por tornar estes veículos cada vez mais autónomos, robustos e fiáveis por forma a estender a sua operação a cenários cada vez mais complexos e exigentes.

1.1 Motivação

A utilização do acrónimo VANTs, Veículos Aéreos Não Tripulados, (em inglês UAVs, *Unmanned Aerial Vehicle*) começou por ser introduzida, principalmente a nível militar, em operações de reconhecimento e de vigilância mas, gradualmente, começaram a surgir aplicações no âmbito da proteção civil, nomeadamente durante a pandemia onde se utilizaram estes meios para monitorizar o cumprimento das medidas de isolamento. Atualmente são utilizados maioritariamente para captação de imagem, inspeção e manutenção, mapeamento, vigilância, e na agricultura de precisão (Elmeseiry et al. 2021).

Os veículos não tripulados são uma realidade nas nossas Forças Armadas, ganhando ênfase desde o início do conflito na Ucrânia. Estes meios permitem fazer face a limitações, nomeadamente ao nível financeiro, pessoal e de material, apresentando-se como uma solução vantajosa para as capacidades ofensivas e defensivas. Ao nível da Marinha essa realidade fez-se sentir com a criação de unidades tais como a Unidade de Sistemas Não Tripulados X-31, o Centro de Experimentação Operacional da Marinha (CEOM) e a Célula de Inovação e Experimentação Operacional de Sistemas Não Tripulados (CEOV) (Amador 2024).

Os veículos não tripulados (em inglês UVs, *Unmanned Vehicles*) são equipamentos suscetíveis de sofrer danos na sua estrutura, quer por defeitos no fabrico, sobrecargas ou até por pequenos impactos. Desta forma, é necessário submeter a estrutura a testes não destrutivos para detetar, localizar e diagnosticar a severidade do dano, o mais antecipadamente possível. Os ensaios não destrutivos mais comuns que são utilizados na deteção de dano nestas estruturas, nomeadamente em materiais compósitos, são os ultrassons, a termografia e a análise de vibrações. Existem outros testes tais como raios-x ou correlação de imagem digital, mas, devido a diversas limitações, não são utilizados de forma tão recorrente (Katunin et al. 2015).

As estruturas e os diversos componentes dos VANTs são sujeitos a cargas dinâmicas, provocando um aumento de tensões que pode resultar na sua falha mecânica (Aykan e Celik 2009). As vibrações nestes equipamentos, mecânicas ou provenientes de esforços aerodinâmicos, é algo indesejado uma vez que podem levar à sua falha, redução da eficiência operacional e diminuição da vida útil. As vibrações aumentam quando as frequências a que a estrutura é sujeita são iguais às frequências naturais ou se encontram próximas desses valores, causando vibrações de grande amplitude por toda a estrutura. Através da análise de vibrações identificam-se as frequências naturais e os modos de vibração que determinam o seu comportamento dinâmico (Tejeda-del Cueto et al. 2024).

Qualquer estrutura ou componente mecânico sofre degradação ao longo do tempo, necessitando, mais cedo ou mais tarde, de alguma intervenção de manutenção. A gestão da manutenção torna-se importante em qualquer organização quando tem como finalidade a disponibilidade dos sistemas e equipamentos. Ou seja, através de uma gestão eficaz da manutenção é possível garantir a disponibilidade dos meios com o objetivo de cumprir com a missão, de forma a aumentar a produtividade, garantindo a qualidade e a redução de custos (Otani et al. 2008).

De acordo com *NP EN 13306:2007 - Terminologia da Manutenção 2007* as ações de manutenção podem ser dividir em:

- Manutenção Corretiva- efetuada após a ocorrência da avaria.
- Manutenção Preventiva- efetuada com a finalidade de prevenir a ocorrência da avaria de acordo com critérios prescritos.
 - Condicionada- com base na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento.

- Sistemática- efetuada em intervalos de tempo preestabelecidos ou segundo número definidos de unidades de utilização, sem controlo prévio.

Para fazer face ao possível aparecimento de dano em veículos autónomos surge a necessidade de criar uma metodologia que permita fazer a monitorização dos equipamentos de modo a identificar possíveis fontes de falha antes que estas ocorram.

1.2 Objetivo da dissertação

Esta dissertação tem como objetivo, fazer uso de métodos já existentes para detetar e localizar dano em veículos autónomos por análise de vibrações em ambiente controlado, procurando aumentar o estado operacional dos meios da Marinha. Para tal será necessário selecionar os métodos de identificação de dano por análise de vibrações, desenvolver simulações numéricas de modo a aferir o desempenho dos mesmos e, por fim, demonstrar o desempenho dos métodos selecionados numa viga livre-livre e num veículo terrestre em ambiente de laboratório.

Os métodos em estudo terão como finalidades:

- Detecção de dano- deverá ser capaz de indicar ao operador que está perante a existência de dano.
- Diagnóstico- limita-se o estudo apenas à localização, pelo que se deverá conseguir indicar ao operador a região onde se encontra o dano.

1.3 Estrutura

Após este breve capítulo introdutório, onde é abordada a motivação e os objetivos deste trabalho, a dissertação será estruturada da seguinte forma:

O Capítulo 2, Enquadramento Teórico, contém aqueles que são os fundamentos teóricos básicos necessários para compreender os temas desenvolvidos nos capítulos seguintes. São descritas algumas das propriedades vibracionais, a modelação de um sistema de 1 grau de liberdade, a generalização para N graus de liberdade, a *Fast Fourier Transform*, objetivos do *Structural Health Monitoring*, o método dos elementos finitos e os métodos experimentais existentes.

O Capítulo 3, Estado da Arte, tem como objetivo elaborar uma revisão de alguns dos métodos de identificação de dano com base na medição de vibrações. Os

métodos apresentados foram divididos entre o domínio modal, da frequência e do tempo, de forma a seguir a mesma divisão apresentada no enquadramento teórico.

O Capítulo 4, Descrição do Trabalho, consiste na apresentação dos métodos seleccionados para o estudo, de deteção e de localização, e caracterização dos trabalhos numérico e experimental, focando nas diversas fases da investigação assim como nos materiais a utilizar para a sua realização.

O Capítulo 5, Resultados e Discussão, será constituído por duas secções, a primeira para o trabalho numérico e a segunda para o trabalho experimental. Neste capítulos serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas diversas fases do trabalho.

O Capítulo 6, intitulado Conclusões e perspectivas de trabalho futuro, constitui a parte final desta dissertação. Nele, são apresentadas as principais conclusões alcançadas ao longo do desenvolvimento do trabalho, seguidas de algumas propostas de melhoria para investigações futuras.

Capítulo 2

Enquadramento teórico

O aparecimento de métodos de identificação de dano pela análise de vibrações é fruto de uma evolução em áreas da engenharia tais como os materiais, os sensores, a manutenção, métodos numéricos, entre outros. Este capítulo irá abordar os modelos, conceitos e áreas em estudo, permitindo uma melhor compreensão dos temas abordados. Para dar início, serão enunciadas propriedades vibracionais básicas, descrevendo os modelos utilizados na análise de vibrações. Seguidamente irá ser realizado um breve enquadramento a um algoritmo que será muito utilizado, a *Fast Fourier Transform*, à área na qual o tema se enquadra, o *Structural Health Monitoring*, ao métodos dos elementos finitos e, por último, aos métodos experimentais.

2.1 Modelos vibracionais

A descrição do comportamento vibracional de estruturas costuma ser apresentada através de três modelos (D. Ewins 2009):

- Modelo Espacial
- Modelo Modal
- Modelo de Resposta

O **Modelo espacial** corresponde à descrição do comportamento vibracional da estrutura através das propriedades espaciais, massa, rigidez e amortecimento.

O **Modelo modal**, corresponde à descrição do comportamento vibracional da estrutura através dos seus modos de vibração, frequências naturais e fatores de amortecimento.

O **Modelo de resposta** corresponde à descrição com comportamento vibracional do sistema através do cálculo das funções de resposta em frequência (domínio da frequência), em inglês *Frequency response functions* (FRF), ou das funções de resposta de resposta impulsiva (domínio do tempo).

Ou seja, em termos teóricos, de modo a obter a resposta de uma estrutura (Modelo de resposta em frequência), é necessário descrever as suas propriedades espaciais (Modelo espacial), de modo a deduzir as suas frequências naturais e modos de vibração (Modelo modal). A Figura 2.1 demonstra graficamente o processo descrito anteriormente.

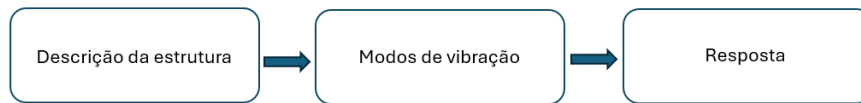


FIGURA 2.1: Processo teórico de análise de vibrações

Adaptado de: D. Ewins (2009)

Tal como descrito na Figura 2.2, em termos práticos, aquilo que é possível realizar é o processo inverso, conhecido como Análise Modal Experimental, ou seja, através da medição de vibrações, deduz-se o modelo modal e, por fim, obtêm-se as propriedades espaciais vibracionais.

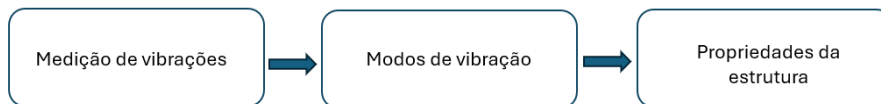


FIGURA 2.2: Análise modal experimental

Adaptado de: D. Ewins (2009)

2.2 Modelos de 1 e N graus de liberdade

A construção de um modelo de 1 Grau de Liberdade (GDL), ou seja, onde apenas uma coordenada é suficiente para especificar a posição de uma massa em qualquer instante, torna-se útil, uma vez que, permite a construção de um modelo através do qual derivam os sistemas mais complexos. Este modelo é descrito pela seguinte equação (Rao 2017):

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (2.1)$$

Onde m corresponde à massa, c ao coeficiente de amortecimento, k à rigidez, f à força ou momento aplicado no sistema, $x(t)$ à posição, $\dot{x}(t)$ à velocidade, e $\ddot{x}(t)$ à aceleração.

Graficamente, os sistemas de 1 GDL costumam ser representados por:

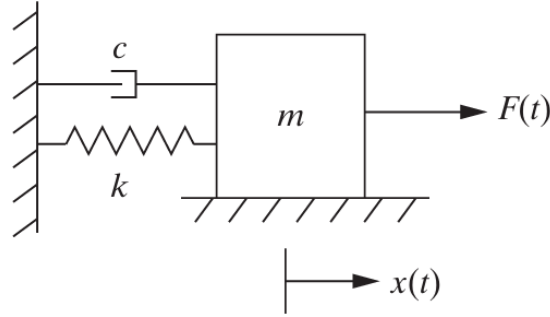


FIGURA 2.3: Esquema de Sistema de 1 Grau de Liberdade
Fonte: Daniel J. Inman (2013)

Muitas das estruturas necessitam de inúmeras coordenadas de modo a descrever o seu movimento devido ao elevado número de partes que as constituem e às direções nas quais se podem movimentar. Como tal, o modelo de 1 GDL deixa de ser suficiente, pelo que os sistemas têm de ser descritos através da seguinte equação (Daniel J. Inman 2013):

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (2.2)$$

correspondendo $[M]$ à matriz massa, $[K]$ a matriz rigidez, $[C]$ a matriz de amortecimento viscoso, $\{\dot{x}(t)\}$ é o vetor velocidade, $\{\ddot{x}(t)\}$ o vetor aceleração, e $\{f(t)\}$ o vetor das forças e momentos aplicados. Às matrizes massa, amortecimento e rigidez é usualmente atribuída a designação de modelo espacial (Nobari e Aliabadi 2018).

Para vibração livre, $f = 0$, a solução da equação (2.2) passa por resolver o problema de valores e vetores próprios dado por:

$$(K - \omega^2 M + i\omega C)\psi = 0 \quad (2.3)$$

sendo duas matrizes $N \times N$, matriz espectral Ω e modal Ψ . As matrizes espectral e modal são dadas, respetivamente, por:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \ddots & 0 & 0 \\ 0 & s_r & 0 \\ 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix}$$

$$\Psi = [\vec{\psi}^{(1)}, \vec{\psi}^{(2)}, \dots, \vec{\psi}^{(N)}]$$

onde $s_r = -\omega'_{n_r} \zeta_r + \omega'_{n_r} \sqrt{1 - \zeta_r^2} j$, sendo ω'_{n_r} a frequência natural do modo r , ζ_r o fator de amortecimento modal do modo r e $\vec{\psi}^{(r)}$ o modo de vibração.

Para cada frequência ω , no caso de excitação harmónica, a relação entre a resposta e a excitação é dada por:

$$\mathbf{X}(\omega) = \alpha(\omega) \mathbf{F}(\omega) \quad (2.4)$$

onde $\alpha(\omega) = (K - \omega^2 M + i\omega C)^{-1}$ é a receptância, que contém toda a informação sobre as características dinâmicas do sistema. Cada elemento dessa matriz corresponde a uma FRF, representando a resposta na coordenada i a uma força unitária aplicada em j :

$$\alpha_{i,j}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{F_j(\omega)}; \quad F_k = 0, \quad k = 1 \dots N; \quad k \neq j. \quad (2.5)$$

O vetor coluna, j , da matriz $\alpha(\omega)$ constitui a deformada operacional, em inglês *Operational Deflection Shape* (ODS), para cada frequência ω . A ODS representa, no espaço, a forma que a estrutura assume para cada frequência dada pela resposta devido a uma excitação normalizada aplicada. Quando essa frequência é natural, à ODS, atribui-se a designação de modo de vibração.

As curvaturas dos modos de vibração e das deformadas operacionais, são obtidas através da sua segunda derivada. Pandey et al. 1991 utilizou a diferença central de segunda ordem de modo a calcular a curvatura em i do modo de vibração j :

$$\psi''_{i,r} = \frac{\psi_{i-1,r} - 2\psi_{i,r} + \psi_{i+1,r}}{h^2} \quad (2.6)$$

onde h representa a distância entre coordenadas adjacentes.

Da mesma forma, a curvatura da ODS é dada por:

$$\alpha''_{i,j}(\omega) = \frac{\alpha_{i-1,j}(\omega) - 2\alpha_{i,j}(\omega) + \alpha_{i+1,j}(\omega)}{h^2}. \quad (2.7)$$

2.3 Tipos de análise estrutural

As análises estruturais podem ser classificadas de diversas formas mas Rao 2017 destaca as seguintes:

- Vibração livre- após sofrer um distúrbio inicial, o sistema é deixado a vibrar de forma livre sem que haja atuação de forças exteriores
- Vibração forçada- existe atuação de forças exteriores ao sistema

A primeira análise é usualmente utilizada para obter as frequências naturais de uma estrutura, também designada de análise modal. No domínio da frequência, corresponde à resolução da seguinte equação:

$$([K] - \omega^2[M] + i\omega[C])\{X\} = 0. \quad (2.8)$$

A análise em vibração forçada, muitas das vezes designada análise harmónica, a estrutura é excitada harmonicamente através da ação de uma força. Desta forma, o sistema é descrito pela equação 2.9:

$$([K] - \omega^2[M] + i\omega[C])\{X\} = \{F\}. \quad (2.9)$$

As análises de vibração livre e forçada, seja no domínio do tempo ou da frequência, têm elevada relevância uma vez que a primeira permite identificar as frequências naturais e o amortecimento da estrutura e a segunda permite identificar a natureza da excitação e do dano.

2.4 *Fast Fourier Transform*

A *Fast Fourier Transform* (FFT) é um algoritmo de computação da Transformada de Fourier. Amplamente utilizado desde os anos 60, uma vez que, permite

executar a Transformada de Fourier Discreta, em inglês *Discrete Fourier Transform* (DFT), de forma muito mais rápida. Esta é uma técnica que combina sequencialmente somas ponderadas progressivamente maiores de amostras de dados de modo a produzir a DFT (Cochran et al. 1967).

Segundo Brigham e Morrow 1967 a Transformada de Fourier de uma função periódica $x(t)$ é dada por:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.10)$$

Tendo em conta que, em máquinas digitais, têm de ser consideradas amostras finitas de dados discretizados, a DFT é dada por:

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.11)$$

2.5 *Structural Health Monitoring*

O *Structural Health Monitoring* (SHM) pretende fornecer, durante o ciclo de vida de uma estrutura, o estado dos materiais que a constituem, das diferentes partes e do seu conjunto como um todo através da integração de sensores, transmissão de dados e processamento computacional (Balageas et al. 2006).

Esta área de investigação tem ganho relevância na comunidade científica uma vez que falhas em estruturas podem causar perdas catastróficas, tanto a nível económico, como ao nível de perdas humanas. Por isso é crucial a identificação atempada do dano para evitar a sua evolução até à falha (Fan e Qiao 2011).

Segundo Nobari e Aliabadi 2018 o SHM tem como objetivo responder às seguintes questões:

- Detecção: Existe dano no sistema?
- Localização: Onde se situa o dano?
- Natureza: Que tipo de dano está presente?
- Quantificação: Qual a gravidade do dano?
- Prognóstico: Qual o tempo de vida restante?

O objetivo principal do SHM é a identificação de dano, desenvolvendo-se em duas fases:

- Detecção (existência)
- Diagnóstico (Localização, tipo, quantificação e prognóstico)

A medição de vibrações tem ganho enorme aplicação desde os anos 60 no controlo de condição de máquinas, no entanto, no SHM a monitorização de estruturas apenas se tem vindo a afirmar a partir dos anos 90.

2.6 Métodos dos Elementos Finitos (MEF)

O Método de Elementos Finitos é um algoritmo matemático utilizado para resolver sistemas de equações diferenciais ou integrais, utilizado em larga escala para resolver numericamente problemas estruturais de elevada complexidade. É possível obter soluções exatas para problemas simples que envolvam vigas ou placas mas, sem recurso ao MEF, seria inviável a análise da grande maioria das situações da realidade prática.

Esta metodologia matemática subdivide o todo o domínio do problema em elementos finitos, tal como ilustrado na figura 2.4. Os vértices destes elementos, designados por nodos, são partilhados uns com os outros de forma a representar o volume do sólido ou do fluído. Como resultado, o problema inicial definido por um conjunto de equações diferenciais complexas, é transformado em equações polinomiais mais pequenas e mais simples que se aproximam da solução diferencial (Bathe 2007).

No MEF, a equação correspondente ao equilíbrio dinâmico é expressa por:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (2.12)$$

sendo bastante semelhante à equação 2.2 mas onde $\{\ddot{u}(t)\}$, $\{\dot{u}(t)\}$ e $\{u(t)\}$ correspondem, respetivamente, aos vetores das acelerações, velocidades e deslocamentos dos nós.

Para resolver problemas com recurso a este método é necessário caracterizá-los geometricamente, de modo a selecionar o elemento que melhor o define. Os elementos disponíveis para a caracterização da malha encontram-se ilustrados na figura 2.5.

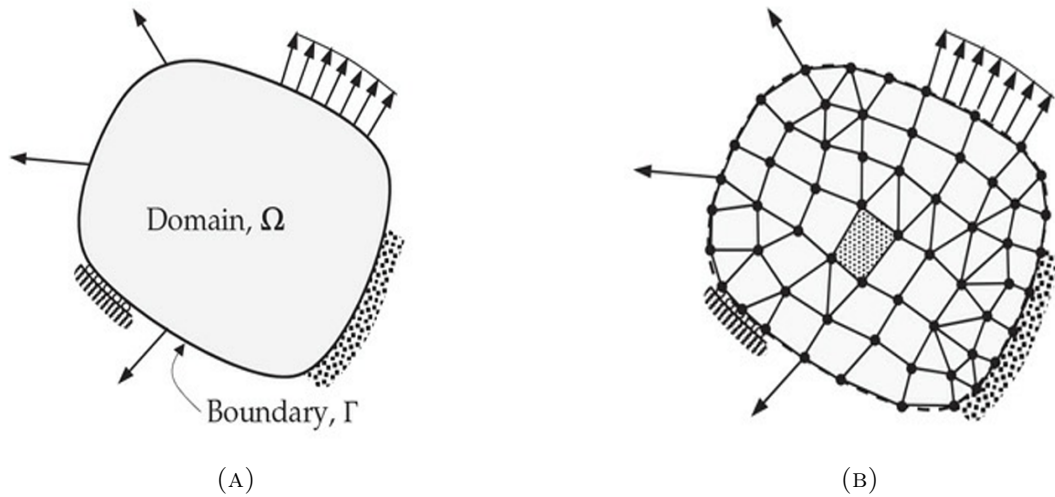


FIGURA 2.4: Representação esquemática de discretização 2D: (A) Domínio original e (B) Domínio representado por elementos triangulares e quadrangulares

Fonte: Reddy 2019

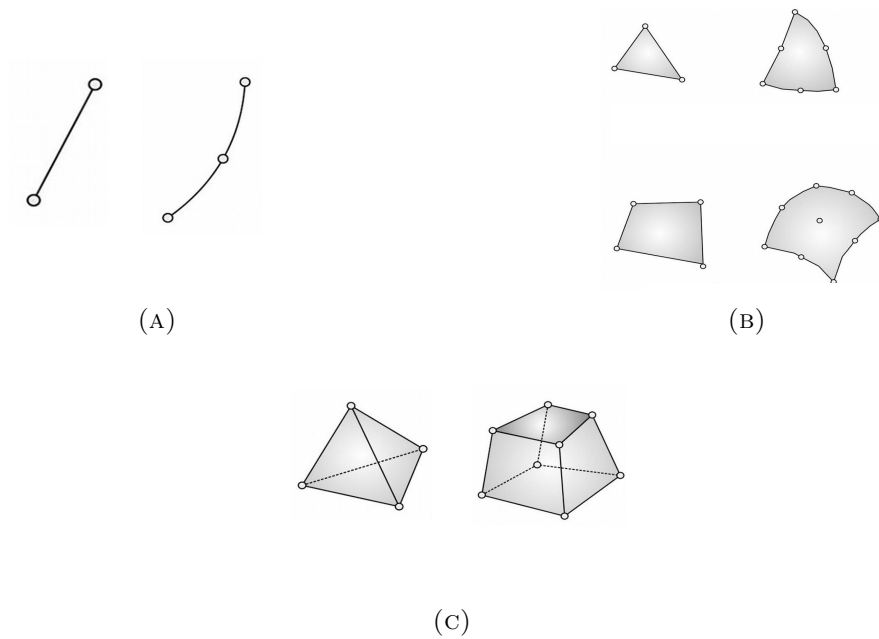


FIGURA 2.5: Representação esquemática dos elementos: (A) 1D , (B) 2D e (C) 3D

Adaptado de: Pires e Pena dos Reis 2015

Para resolver problemas complexos com recurso ao MEF é comum utilizar-se *software* de simulação que se baseia neste método. O *ANSYS* é um dos produtos disponíveis que permite realizar esse tipo de simulações, sendo estas decompostas essencialmente em três passos:

- **Pré-processamento**- nesta fase o utilizador define o problema físico, ou seja, desenha o objeto ou a estrutura, seleciona os tipos de elementos, escolhe o material, define condições de fronteira, a malha utilizada, etc.;
- **Solução**- aqui são definidas as opções de análise, por exemplo, no âmbito desta dissertação optou-se por realizar análises dinâmicas em condições de vibração forçada;
- **Pós-processamento**- corresponde à fase onde o utilizador pode visualizar, imprimir ou exportar resultados. Desta forma pode comprar e verificar os resultados obtidos, retirando as devidas conclusões.

Na realização desta dissertação foi utilizado um elemento finito do tipo viga linear, com 2 nós e 6 GDL em cada nó, tal como ilustrado na figura 2.6. No *ANSYS*, o elemento utilizado, denominado por *BEAM188*, baseia-se na teoria de vigas de *Timoshenko* e é adequado para a análise de estruturas de vigas esbeltas.

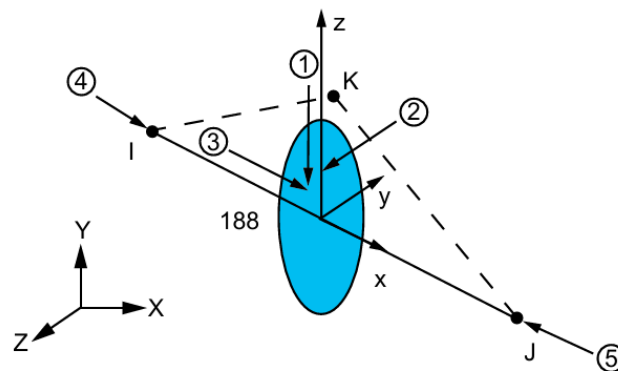


FIGURA 2.6: Geometria do *BEAM 188*
Fonte: *Ansys 2025 R1 Element Reference* (2025)

2.7 Métodos Experimentais

A análise modal experimental é o processo através do qual se determinam dos parâmetros modais de uma estrutura para todos os modos, na gama de frequências de interesse. Na montagem de um aparato experimental para a realização deste tipo de análise, podem-se destacar as seguintes etapas (Døssing et al. 1988):

- Seleção dos graus de liberdade- tendo em conta as características da estrutura, limitam-se os graus de liberdade em estudo;

- Suspensão da estrutura de teste- a condição de livre-livre é a mais favorável em ambiente de laboratório, conseguida através da suspensão por meio de cabos elásticos;
- Escolha da excitação- tendo em conta fatores como a massa da estrutura ou a gama de frequência pretendida pode ser utilizado um *shaker* ou um martelo de impacto (que foi a forma utilizada nesta dissertação). ;
- Ligação dos transdutores de força e resposta- os transdutores devem ser ligados de forma segura e adequada à estrutura de teste. O transdutor de força deve ser ligado entre o excitador (*shaker* ou martelo) e a estrutura. O transdutor de resposta, normalmente um acelerómetro, deve ser montado utilizando um método apropriado (como cera, íman ou parafuso);
- Calibração dos transdutores- os sinais dos transdutores são condicionados por amplificadores com os fatores de calibração inseridos. Deve ser feita uma verificação adicional da calibração através do método da razão de massas (*mass-ratio*), de forma a assegurar a fiabilidade de toda a cadeia de medição;
- Definição dos parâmetros de análise- devem ser definidos parâmetros como a frequência de amostragem, número de médias, tempo de aquisição, resolução em frequência e tipo de janela a aplicar.

A qualidade das FRFs obtidas é afetada por inúmeros fatores, tais como máquinas, vento ou movimentos dentro do laboratório. Desta forma, as curvas resultantes são estimadas, tentando anular ou reduzir estes efeitos externos. Assim sendo, pretende-se que o estimador seja o mais eficiente possível na remoção do ruído aleatório, tendo sido utilizado o H_1 , expresso por (Policarpo 2013):

$$H_1(\omega) = \frac{\sum \bar{F} \cdot X}{\sum \bar{F} \cdot F}, \quad (2.13)$$

onde F é a força de excitação, X a resposta à excitação e $\bar{F}$ é o complexo conjugado.

Na definição dos parâmetros de análise, um dos fatores a ter em conta é a aplicação de janelas, tanto ao sinal de entrada como ao sinal de resposta. Para mitigar erros cometidos por *leakage* é aplicada uma janela ao sinal de saída- função ponderada que força o sinal a satisfazer a periodicidade requerida pela FFT. Nos ensaios com martelo de impacto e acelerómetros, é geralmente utilizada uma

janela exponencial para o sinal medido nos acelerómetros (Avitabile 2001). A implementação desta janela tem um efeito ilustrado pela figura 2.7. Quanto ao sinal de excitação, a janela mais utilizada é a janela transiente. Esta tem como objetivo reduzir o ruído presente no sinal da força, tornando-o nulo fora do intervalo de interesse, tal como ilustrado na figura 2.8 (Schwarz e Richardson 1999).

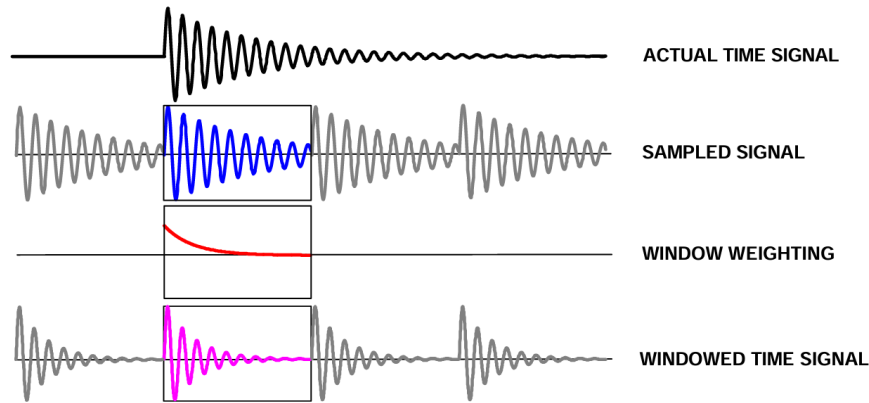


FIGURA 2.7: Aplicação de janela exponencial
Fonte: Avitabile (2001)

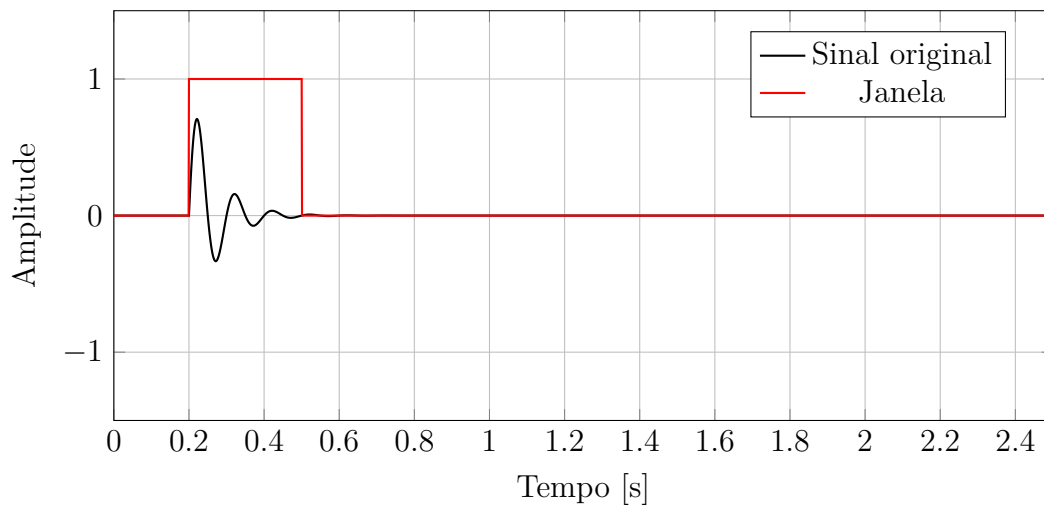


FIGURA 2.8: Exemplo de janela transiente

Capítulo 3

Estado da Arte

No capítulo anterior foi apresentada a teoria necessária para compreender os modelos matemáticos utilizados na identificação de dano em estrutura pela análise de vibrações. Assim, o foco neste capítulo será fazer revisão da literatura existente, através da apresentação de diversos métodos.

Ao longo do capítulo os métodos apresentados foram divididos em três domínios: métodos no domínio modal, da frequência e do tempo.

3.1 Métodos no domínio modal

3.1.1 Normalização das frequências naturais (NFN)

Este método é descrito Sinou 2009 como sendo o quociente entre as frequências naturais danificadas e não danificadas da estrutura.

$$NFN_i = \frac{\omega_i^d}{\omega_i} \quad (3.1)$$

onde ω_i^d corresponde às frequências da estrutura danificada e ω_i às frequências da estrutura sem dano.

Para o método detetar o dano é necessário medir ou calcular com grande rigor as frequências naturais não danificadas uma vez que o valor de NFN varia muito pouco com o dano. Se o dano estiver localizado perto de um nodo a variação não é praticamente sentida, será maior se a localização for no ponto de maior deflexão do respetivo modo de vibração (Sinou 2009).

3.1.2 *Multiple Damage Location Assurance Criterion (MDLAC)*

Messina et al. 1998 inicialmente propôs o *Damage Location Assurance Criterion* (DLAC) com base no pressuposto que apenas existia um dano. Este método baseia-se na alteração das frequências naturais da seguinte forma:

$$DLAC(j) = \frac{|\{\Delta f\}^T \cdot \{\delta f_j\}|^2}{(\{\Delta f\}^T \cdot \{\Delta f\}) \cdot (\{\delta f_j\}^T \cdot \{\delta f_j\})} \quad (3.2)$$

sendo Δf representativa do vetor com as variações experimentais das frequências naturais de uma estrutura que apresenta um único dano com localização e tamanho desconhecidos, e δf o vetor obtido teoricamente das variações obtidas quando o dano, de tamanho conhecido, se localiza em j .

Devido à limitação do método ser aplicável a estruturas com apenas um dano, Messina et al. 1998 propôs o *Multiple Damage Location Assurance Criterion* (MDLAC), uma alteração ao método anterior de modo a completar situações com múltiplos danos.

$$MDLAC(\delta D) = \frac{|\{\Delta f\}^T \cdot \{\delta f(\delta D)\}|^2}{(\{\Delta f\}^T \cdot \{\Delta f\}) \cdot (\{\delta f(\delta D)\}^T \cdot \{\delta f(\delta D)\})} \quad (3.3)$$

onde se pretende obter o valor de δD , padrão de dano arbitrário que provoca as alterações de frequência δf .

3.1.3 *Modal Assurance Criterion (MAC)*

O *Modal Assurance Criterion*, proposto por Allemang e Brown 1982, é definido pela correlação entre os modos de vibração r da estrutura sem dano e da estrutura danificada. Sendo assim, os modos são comparados da seguinte forma:

$${}^dMAC_r = \frac{|\sum_i {}^d\psi_{i,r} \overline{\psi_{i,r}}|^2}{\sum_i {}^d\psi_{i,r} {}^d\overline{\psi_{i,r}} \sum_i \psi_{i,r} \overline{\psi_{i,r}}} \quad (3.4)$$

correspondendo ${}^d\psi_{i,r}$ ao modo de vibração da estrutura danificada, $\psi_{i,r}$ ao modo de vibração da estrutura intacta e $\overline{\psi}$ representa o complexo conjugado. O seu valor varia entre 0 e 1, sendo que, à medida que os modos se afastam, o valor tende para 0.

3.1.4 *Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC)*

O MAC apenas é um bom indicador de dano, pelo que Lieven e D. J. Ewins 1988 propôs o *Coordinate Modal Assurance Criterion* que consegue identificar qual a coordenada que está a contribuir negativamente para um valor de MAC baixo. O COMAC, para cada grau de liberdade i , é dado por:

$${}^d\text{COMAC}_i = \frac{\left| \sum_r {}^d\psi_{i,r} \overline{\psi}_{i,r} \right|^2}{\sum_r {}^d\psi_{i,r} {}^d\overline{\psi}_{i,r} \sum_r \psi_{i,r} \overline{\psi}_{i,r}} \quad (3.5)$$

3.1.5 *Mode shape (MS)*

Método baseado na suposição de que maior diferença absoluta entre os modos de vibração da estrutura com e sem dano, aparecem nos nodos ou nos locais da medição perto do dano. Sendo assim, D. J. Ewins e Ho 2000 definiu:

$${}^d\text{MS}_{i,r} = \left| {}^d\psi_{i,r} - \psi_{i,r} \right|. \quad (3.6)$$

3.1.6 *Mode Shape Curvature (MSC)*

Com base no mesmo pressuposto que o MS, Pandey et al. 1991 utilizou a curvatura dos modos de vibração para a deteção e localização de dano, comparando-o com o MAC e COMAC de modo a comprovar a sua maior sensibilidade. O método é formulado como sendo a diferença absoluta entre as curvaturas dos modos de vibração da estrutura danificada e da estrutura saudável.

$${}^d\text{MSC}_{i,r} = \left| {}^d\psi''_{i,r} - \psi''_{i,r} \right| \quad (3.7)$$

onde ${}^d\psi''$ e ψ'' são, respetivamente, as curvaturas dos modos de vibração da estrutura danificada e saudável.

3.1.7 *Modal Strain Energy (MSE)*

Fazendo uso das mudanças na rigidez de uma estrutura provocada pela existência de dano, Shi et al. 1998 desenvolveu um método que compara a *Modal Strain Energy* dos elementos estruturais antes e após a ocorrência de dano de modo

a indicar a sua localização. Para a situação sem dano, no modo de vibração i a MSE para o ponto em estudo j é dada por:

$$MSE_{ij} = \psi_i^T K_j \psi_i \quad (3.8)$$

onde K corresponde à matriz rigidez sem dano. De forma análoga, para a situação com dano:

$${}^dMSE_{ij} = {}^d\psi_i^T K_j^d \psi_i. \quad (3.9)$$

Uma vez que o dano se vai fazer notar pela alteração da rigidez num determinado ponto, a localização do dano é definida pelo *Modal Strain Energy Change Ratio* (MSECR):

$$MSECR_{ij} = \frac{|{}^dMSE_{ij} - MSE_{ij}|}{MSE_{ij}}. \quad (3.10)$$

3.1.8 *Damage Index* (DI)

Tendo por base variações na energia de deflexão dos modos e das curvaturas, Stubbs et al. 1995 desenvolveram um método para localização, podendo ser utilizado também para identificação de dano. Para uma respetiva localização i , num determinado modo de vibração r , o *Damage Index* pode ser formulado da seguinte forma:

$${}^dDI_{i,r} = \frac{\left({}^d\psi_{i,r}''^2 + \sum_i {}^d\psi_{i,r}''^2 \right) \sum_i \psi_{i,r}''^2}{\left(\psi_{i,r}'^2 + \sum_i \psi_{i,r}''^2 \right) \sum_i {}^d\psi_{i,r}''^2}. \quad (3.11)$$

3.2 Métodos no domínio da frequência

Os métodos anteriormente apresentados implicam o uso de técnicas de análise modal para obter os modos de vibração, o que pode consumir muito tempo, e adiciona, inevitavelmente, fontes de erros. Desta forma, o uso de métodos no

domínio da frequência, que utilizam a informação medida diretamente, pode representar alguma vantagem. Além disso, estes métodos baseiam-se na generalização dos modos de vibração para toda a gama de frequências (Maia, Silva et al. 2003).

3.2.1 *Index*

Devido às mudanças no comportamento dinâmico das estruturas na presença de dano, Bovio et al. 2000 propõe um indicador de modo a avaliar as mudanças nas FRFs de modo a obter diretamente as dimensões do dano:

$$Index = \frac{\sum_{i=1}^n |FI_i - FD_i|}{\sum_{i=1}^n FI_i} \quad (3.12)$$

onde FI_i e FD_i correspondem, respetivamente, à amplitude da FRF da estrutura intacta e da estrutura danificada na frequência i .

3.2.2 *Frequency Response Assurance Criterion (FRAC)*

O dano introduz também mudanças na matriz receptância. Com base nesse princípio, Ward Heylen e Lammens 1996 propõe uma extensão do MAC ao domínio da frequência. O indicador varia entre 0 e 1 sendo que, se o valor se aproximar de 0 existe presença de dano. O *Frequency Response Assurance Criterion* obtido na coordenada i devido à excitação na coordenada j é dado por:

$$FRAC_j(\omega) = \frac{|\alpha_{i,j}(\omega)(\alpha_{i,j}(\omega))|^2}{(\alpha_{i,j}(\omega)(\overline{\alpha_{i,j}(\omega)}))(\alpha_{i,j}(\omega)(\overline{\alpha_{i,j}(\omega)}))} \quad (3.13)$$

sendo $\alpha_{i,j}$ representativa da matriz receptância da estrutura saudável, ${}^d\alpha_{i,j}$ a matriz receptância da estrutura com dano, e $\bar{\alpha}$ o complexo conjugado.

3.2.3 *Frequency Domain Assurance Criterion (FDAC)*

Assumindo que quanto menor o grau de correlação entre os vetores coluna $\alpha_j(\omega)$ e ${}^d\alpha_j(\omega)$ maior o nível de dano, Pascual et al. 1997 define o *Frequency Domain Assurance Criterion* como forma de medir essa correlação. Este método analisa N coordenadas, comparando a frequência ω_2 medida na coordenada j , com o respetivo

caso da estrutura sem dano na coordenada j e frequência ω_1 :

$$FDAC_{jd}(\omega_1, \omega_2) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N {}^d\alpha_{ij}(\omega_2) \overline{\alpha_{ij}(\omega_1)} \right|^2}{\sum_{i=1}^N \left[{}^d\alpha_{ij}(\omega_2) \overline{\alpha_{ij}(\omega_2)} \right] \sum_{i=1}^N \left[\alpha_{ij}(\omega_1) \overline{\alpha_{ij}(\omega_1)} \right]}. \quad (3.14)$$

3.2.4 Global Correlation

Com o objetivo de detetar a existência de dano, Zang et al. 2003 propõe primeiramente, o *Global Shape Correlation Function* (GSC). Para cada ponto de medição i e uma determinada força j é calculado:

$$GSC(\omega) = \frac{\left| \sum_{i=1}^n \left(\overline{\alpha_{i,j}(\omega)} {}^d\alpha_{i,j}(\omega) \right) \right|^2}{\sum_{i=1}^n \left(\overline{\alpha_{i,j}(\omega)} \alpha_{i,j}(\omega) \right) \sum_{i=1}^n \left({}^d\overline{\alpha_{i,j}(\omega)} {}^d\alpha_{i,j}(\omega) \right)} \quad (3.15)$$

retribuindo um valor real entre 0 e 1, indicado uma maior ou menos correlação.

No seguimento do seu trabalho, os autores apresentam um segundo critério, denominado *Global Amplitude Correlation Function* (GAC) baseado na amplitude de resposta:

$$GAC(\omega) = \frac{2 \left| \sum_{i=1}^n \left(\overline{\alpha_{i,j}(\omega)} {}^d\alpha_{i,j}(\omega) \right) \right|}{\sum_{i=1}^n \left(\overline{\alpha_{i,j}(\omega)} \alpha_{i,j}(\omega) \right) + \sum_{i=1}^n \left({}^d\overline{\alpha_{i,j}(\omega)} {}^d\alpha_{i,j}(\omega) \right)} \quad (3.16)$$

Para além os indicadores acima referidos, são apresentados outros dois que integram as médias dos valores obtidos de modo a englobar todos os resultados para a gama de frequência estudada:

$$AIGSC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N GSC(\omega_i) \quad (3.17)$$

$$AIGAC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N GAC(\omega_i). \quad (3.18)$$

3.2.5 *FRF based Mode Shape (FRF_MS)*

O *FRF based Mode Shape* foi desenvolvido por Maia, Silva et al. 2003 com base no mesmo princípio que o MS, mas generalizado para todas as frequências medidas da FRF. Foi desenvolvido inicialmente para localização, podendo ser utilizado para deteção. A variação para cada frequência ω com a força aplicada em j é dada por:

$${}^dFRF_MS_i(\omega) = \left| {}^d\alpha_{i,j}(\omega) - \alpha_{i,j}(\omega) \right|. \quad (3.19)$$

3.2.6 *FRF-based Mode Shape Curvature Method (FRF_MSC)*

Este método, proposto por Sampaio et al. 1999, surge como uma generalização do MSC. Podendo ser utilizado para deteção e localização, é definido pela diferença absoluta entre as curvaturas das FRF medidas na estrutura intacta danificada:

$${}^dFRF_MSC_i(\omega) = \left| {}^d\alpha''_{i,j}(\omega) - \alpha''_{i,j}(\omega) \right|. \quad (3.20)$$

3.2.7 *FRF-based Damage Index (FRF_DI)*

Através da generalização do *Damage Index* para toda a gama de frequência, baseado nas FRFs das deformadas operacionais, Maia, Silva et al. 2003 propõe o seguinte:

$${}^dFRF_DI_i(\omega) = \left| \frac{\left({}^d\alpha''_{i,j}{}^2(\omega) + \sum_i {}^d\alpha''_{i,j}{}^2(\omega) \right) \sum_i \alpha''_{i,j}{}^2(\omega)}{\left(\alpha''_{i,j}{}^2(\omega) + \sum_i \alpha''_{i,j}{}^2(\omega) \right) \sum_i {}^d\alpha''_{i,j}{}^2(\omega)} \right|. \quad (3.21)$$

3.2.8 *Resonant Gapped-smoothing Broadband Method (RGSB)*

Tendo em conta que, por vezes, se torna difícil obter o modelo dinâmico que defina corretamente a estrutura sem qualquer dano, Ratcliffe 1997 desenvolveu um método no qual não é necessário conhecer as propriedades antes do dano. Na continuação do seu trabalho, Ratcliffe 2000 e Yoon et al. 2005 propõem o RGSB de

modo a localizar dano com base em descontinuidades nas deformadas operacionais no domínio da frequência:

$${}^dRGSB_i(\omega) = \left[\text{Re}(P_3(i)) - \text{Re}(\alpha''_{i,j}(\omega)) \right]^2 + \left[\text{Im}(P_3(i)) - \text{Im}(\alpha''_{i,j}(\omega)) \right]^2 \quad (3.22)$$

onde $P_3 = a_0 + a_1i + a_2i^2 + a_3i^3$, polinómio de terceiro grau que melhor aproxima o elemento i da curvatura da deformada operacional, α'' , no ponto j .

3.2.9 *Detection and Relative Damage Quantification Indicator (DRQ)*

Na procura por um indicador eficiente, sensível e robusto para deteção de quantificação de dano, Sampaio et al. 2003 propõe o *Detection and Relative Damage Quantification Indicator*. Este indicador surge com base na definição de correlação de um fator conhecido como *Response Vector Assurance Criterion* (W. Heylen et al. 1998), sendo um caso particular do *FDAC*:

$$RVAC_d(\omega) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N \alpha_i^d(\omega) \overline{\alpha_i(\omega)} \right|^2}{\sum_{i=1}^N \left[\alpha_i^d(\omega) \overline{\alpha_i^d(\omega)} \right] \sum_{i=1}^N \left[\alpha_i(\omega) \overline{\alpha_i(\omega)} \right]} \quad (3.23)$$

e o indicador DRQ é dado por:

$$DRQ_d = \frac{\sum_{\omega} RVAC_d(\omega)}{N_{\omega}}. \quad (3.24)$$

3.2.10 *Transmissibility Damage Indicator (TDI)*

Uma das propriedades dinâmicas que se alteram com o dano é a transmissibilidade, desta forma Maia, Almeida et al. 2011 propõe um método sensível a essa alteração, comparando transmissibilidades locais ao longo de uma estrutura, com e sem dano para cada frequência:

$$RVAC(\omega) = \frac{\sum_{r=1}^{N-1} \left| \sum_{s=r+1}^N {}^d\tau_{rs}(\omega) \overline{\tau_{rs}(\omega)} \right|^2}{\sum_{r=1}^{N-1} |{}^d\tau_{rs}(\omega)|^2 \sum_{r=1}^{N-1} |\tau_{rs}(\omega)|^2}, \quad s = r + 1 \quad (3.25)$$

3.3. Métodos no domínio do tempo

onde $\tau_{rs} \equiv T_{rs} = \frac{X_r}{X_s} = \frac{H_{rj}}{H_{sj}}$ representa a transmissibilidade entre as coordenadas r e s .

Caso sejam feitas várias medições, variando a posição j da força aplicada ao longo de M posições, obtém-se o TDI:

$$TDI = \frac{1}{N_\omega} \sum_{\omega} \frac{\left| \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M d\tau_{rs}^{(j)} \overline{\tau_{rs}^{(j)}} \right|^2}{\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M \left| d\tau_{rs}^{(j)} \right|^2 \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M \left| \tau_{rs}^{(j)} \right|^2}, \quad s = r + 1. \quad (3.26)$$

3.2.11 Método de localização de dano

Este método, proposto pela Prof. Raquel Almeida (Nova FCT) e pelo Prof. Hugo Policarpo (Escola Naval) ainda não se encontra publicado, pelo que foi solicitada confidencialidade. A metodologia referente ao mesmo encontra-se explicada no anexo I. À semelhança de outros métodos apresentados, surgiram algumas variantes, sendo que aquela que se vai utilizar é a mais genérica e vai ser referida como Método das Completas (MC).

3.3 Métodos no domínio do tempo

3.3.1 Algoritmo de otimização em combinação com resposta em aceleração

Com base na aceleração medida no tempo, em pontos limitados de uma estrutura danificada e a aplicação de um algoritmo de otimização, Seyedpoor et al. 2019 propõe um método de modo a localizar e quantificar a severidade do dano. O dano é localizado calculando um conjunto de variáveis de modo a maximizar/minimizar o índice de correlação entre a resposta da estrutura antes e depois do dano. O algoritmo de otimização de utilizado de forma a:

$$\begin{aligned} \text{Encontrar:} \quad & X^T = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \\ \text{Minimizando:} \quad & w(X) \\ & X^l \leq X \leq X^u \end{aligned} \quad (3.27)$$

sendo $X^T = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ o vetor das variáveis de dano contendo as n localizações e tamanhos do dano e X^l e X^u são os limites inferiores e superiores do vetor.

A função que se pretende minimizar, w , é definida:

$$w(X) = -\frac{(a_d^T \cdot a(X))^2}{(a_d^T \cdot a_d)(a(X)^T \cdot a(X))} \quad (3.28)$$

onde a_d é a aceleração medida na estrutura com dano e a a aceleração da estrutura saudável ou de um modelo analítico. A função w vai variar entre -1 e 0, sendo mínima quando os vetores de aceleração forem idênticos.

3.3.2 Beat Method

Excitando uma estrutura tempo suficiente até que fique em regime estacionário, após a interrupção da excitação, a estrutura com dano vai começar por ter um comportamento diferente de quando esta se encontrava saudável, nomeadamente uma mudança de fase. Desta forma, Cattarius e D. Inman 1997 propõe subtrair as respostas no tempo de modo a registar a mudança de fase:

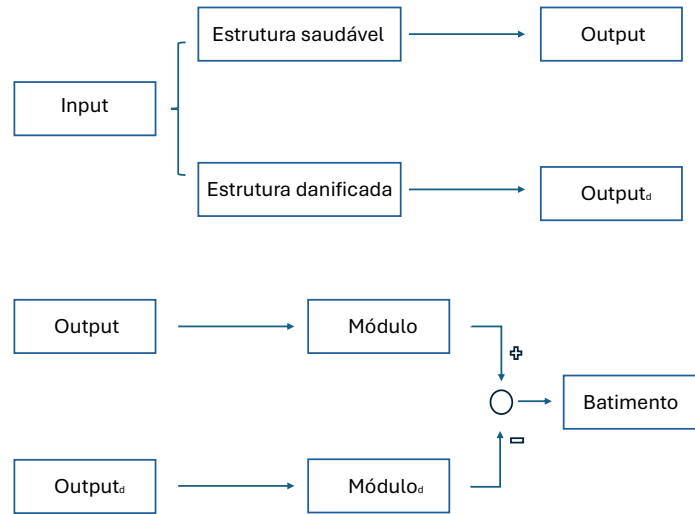


FIGURA 3.1: Método de deteção no domínio do tempo
Adaptado de: Cattarius e D. Inman (1997)

$$\Delta u(t) = |u_h(t)| - |u_d(t)| \quad (3.29)$$

3.4 Máximas ocorrências

Os índices de dano baseados nas deformadas operacionais têm um intervalo dinâmico muito grande, devido ao intervalo das FRFs em estudo. Por este motivo, os valores dos somatórios ao longo da frequência, tendem a ser dominados pelos valores próximos das ressonâncias e antirressonâncias. Esse facto fará com que os resultados sejam afetados de erros, tornando-se necessário atribuir pesos, atribuindo assim igual valor a cada frequência do espectro interveniente no cálculo.

Esta normalização das frequências por pesos pode ser efetuada de diferentes formas, dependendo dos métodos e do número de localizações procuradas. No âmbito desta dissertação, a aplicação das máximas ocorrências passou por, em cada frequência, localizar os dois sensores nos quais se obtiveram os maiores valores, atribuindo-lhes o valor de 1 e de 0 a todos os restantes.

Supondo uma estrutura com 5 localizações possíveis de dano e onde foi calculado um determinado índice X para as primeiras 5 frequências. Os valores obtidos estão presentes na tabela 3.1:

TABELA 3.1: Caso hipotético de índice de localização de dano

Frequência	1	2	3	4	5
ω_1	0.2(0)	1.0(1)	0.07(0)	0.6(0)	2.4(1)
ω_2	1.2(0)	3.0(0)	5.2(1)	2.0(0)	5.5(1)
ω_3	334.1(1)	769.0(1)	234.2(0)	144.1(0)	289.1(0)
ω_4	4.9(1)	1.7(0)	0.9(0)	0.7(0)	8.7(1)
ω_5	0.3(0)	3.0(0)	2.1(0)	4.1(1)	13.1(1)
Total	340.7(2)	777.7(2)	242.47(1)	151.5(1)	318.8(4)

Através da análise dos valores totais obtidos, seríamos levados a concluir que o dano se encontra na localização 2. Analisando de forma mais atenta a tabela, verifica-se que esse valor é influenciado, maioritariamente, pelo valor obtido para a 3ª frequência. A localização 5, por 4 vezes, verifica o maior valor de todas as localizações.

Para o caso concreto do Método de Localização de dano, a metodologia de como aplicar as máximas ocorrências encontra-se descrita no anexo II.

Capítulo 4

Descrição do Trabalho

A implementação dos métodos de deteção e localização vai ser dividida em várias etapas. Inicialmente, serão selecionados os métodos a utilizar. Posteriormente, proceder-se-á à modelação numérica dos métodos selecionados, recorrendo ao *software ANSYS*, com simulações realizadas numa viga livre-livre. Numa fase seguinte, os métodos serão avaliados utilizando dados experimentais obtidos no âmbito do trabalho desenvolvido pela equipa de investigação Nova FCT/EN/IST, permitindo validar a sua eficácia em condições reais. Finalmente, será realizada uma atividade experimental utilizando um *LEO ROVER*, com o objetivo de detetar e localizar danos estruturais no próprio equipamento, recorrendo aos métodos anteriormente analisados.

4.1 Métodos Selecionados

Após a apresentação dos diversos métodos no capítulo anterior, o método selecionado para deteção foi o seguinte:

- Indicador DRQ

Relativamente à localização, o método selecionado foi:

- Método das Completas

A finalidade do presente trabalho é detetar e localizar dano num veículo autónomo, por isso a escolha dos métodos teve que ter em conta esse fator. O DRQ foi selecionado uma vez que demonstrou elevada sensibilidade ao dano (Sampaio et al. 2003). Quanto ao MC, apresentou resultados muito promissores para vigas (Medeiros 2022) e placas (Berardo 2021), podendo ser aplicado em estruturas mais complexas.

4.2 Modelação Numérica

Inicialmente, serão apresentadas as metodologias referentes à simulação numérica da viga, com o intuito de obter as respostas dinâmicas. Essas respostas serão obtidas através de simulações efetuadas com recurso ao *ANSYS Mechanical APDL* e posteriormente analisadas em *MATLAB*.

4.2.1 Viga livre-livre

Nesta etapa é descrita a metodologia utilizada na simulação numérica da viga, incluindo aspetos como as características geométricas da estrutura, a forma e localização dos danos introduzidos, bem como a implementação de ruído nas simulações.

As características geométricas e do material da estrutura modelada numericamente foram definidas de forma a reproduzir, com a maior proximidade possível, as propriedades da viga utilizada nas experiências laboratoriais. As propriedades geométricas e do material estão representadas na figura 4.1 e na tabela 4.1.

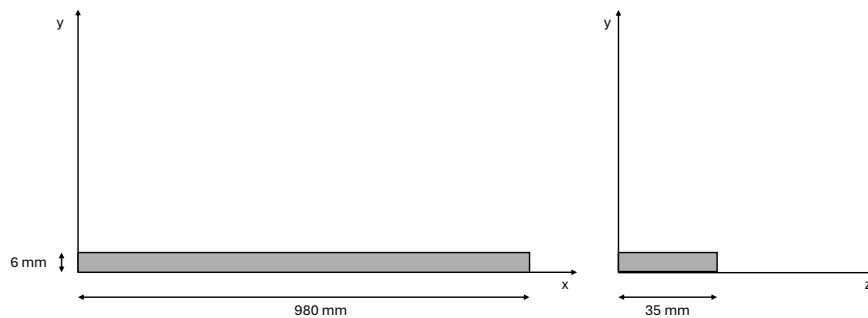


FIGURA 4.1: Geometria da viga

TABELA 4.1: Propriedades do material

Módulo de <i>Young</i>	210 GPa
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.3
Densidade	7850 kg/m ³

Para o presente trabalho, pretende-se detetar danos pequenos, i.e., na ordem dos milímetros, pelo que o dano foi introduzido sob a forma de fissura, representada

por uma redução localizada da espessura de um dos elementos da viga. A severidade do dano é quantificada em termos percentuais, sendo que 100% corresponde à remoção completa da espessura (equivalente a um furo total), enquanto, por exemplo, 50% representa uma redução da espessura para metade. Esta relação pode é descrita na equação 4.1 e gráficamente é apresentado pela figura 4.2:

$$\%dano = \frac{espessura - {}^d espessura}{espessura} \times 100. \quad (4.1)$$

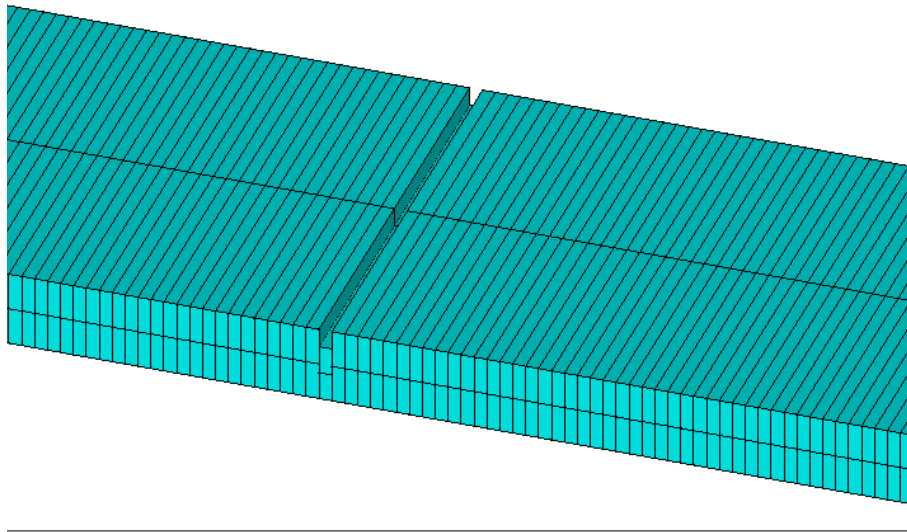


FIGURA 4.2: Demonstração gráfica da implementação do dano

O trabalho desenvolvido baseia-se na análise comparativa das FRFs da estrutura em dois estados distintos: o estado intacto e o estado danificado. Esta abordagem permite avaliar as alterações dinâmicas provocadas pela presença de dano na estrutura, uma vez que modificações locais nas propriedades físicas afetam diretamente a resposta vibracional do sistema.

Em seguida, é apresentada a figura 4.3 como forma de resumo da metodologia aplicada na simulação numérica da viga:

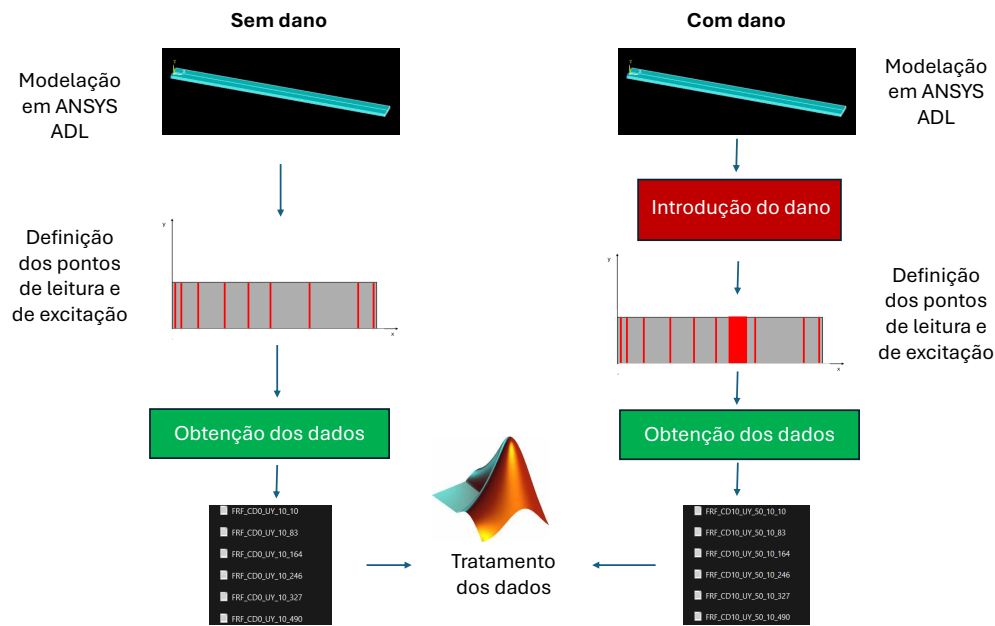


FIGURA 4.3: Metodologia aplicada na viga

Como se observa na imagem anterior, começou-se por modelar a viga, com e sem dano, dado que os métodos utilizados são com base na compração de FRFs. No caso da viga com dano, introduziu-se o dano através de uma redução na espessura, tal como referido anteriormente. Com intuito de obter as respostas em frequência em diferentes regiões da estrutura, foram definidos pontos específicos para medição e excitação. As respetivas localizações encontram-se discriminadas na tabela 4.2:

TABELA 4.2: Localização dos pontos de medição e excitação

Sensor	Posição na viga (mm)
1	10
2	83
3	164
4	246
5	327
6	490
7	654
8	818
9	970

No que respeita à localização dos danos, estes foram introduzidos em diferentes posições ao longo da viga, com o objetivo de avaliar o desempenho dos métodos de deteção e localização face à variação da posição do dano. Esta abordagem permite verificar a sensibilidade e robustez dos métodos aplicados em diversos

cenários. No total, foram analisadas 8 localizações distintas de dano, conforme discriminado na tabela 4.3:

TABELA 4.3: Localização do dano

Caso de dano	Posição na viga (mm)
1	50
2	140
3	240
4	340
5	500
6	660
7	860
8	940

Na modelação da viga no *software ANSYS*, esta foi dividida em elementos de 1mm , sendo utilizado o elemento *BEAM 188*. Medeiros 2022 realizou um teste de convergência para situações semelhantes, onde verificou que não eram necessários tantos elementos. Optou-se por fazer desta forma pelo facto dos elementos estarem numerados sempre da mesma forma, facilitando o processo de introdução do dano.

A obtenção dos dados foi realizada por meio de uma análise harmónica no *software ANSYS*, abrangendo uma gama de frequências entre 0 e 1600 Hz, com um incremento de 0,625 Hz. Para isso foram aplicadas forças em 9 locais distintos (correspondentes às localizações dos sensores) e esse processo é repetido para cada local e percentagem de dano. Após a execução de cada análise, os deslocamentos ao longo do eixo YY foram exportados para ficheiros de texto (*.txt), a fim de serem posteriormente processados em ambiente *MATLAB*. Desta forma, para cada ponto de medição, obtém-se um ficheiro de texto com 3 colunas (frequência, parte real da FRF e parte imaginária da FRF) e 1600 linhas.

Numa abordagem inicial, as simulações foram realizadas em condições ideais, ou seja, na ausência de ruído, de forma a isolar e compreender o comportamento dos métodos de deteção e localização de dano em cenários controlados. Nesta fase, foram testadas três variáveis principais: percentagem de dano, local do dano e local de aplicação da força. A modificação sistemática destes parâmetros permite avaliar a sensibilidade dos métodos relativamente a cada um deles, analisando de que forma influenciam a capacidade de deteção e localização do dano. Esta etapa constitui uma base fundamental para a validação preliminar dos algoritmos antes da introdução de fatores adicionais, como o ruído ou incertezas experimentais.

Na fase seguinte, as simulações são realizadas adicionando-se um nível determinado nível de ruído às FRFs obtidas numericamente. Considerando que, inevitavelmente, os dados experimentais estarão sujeitos a este tipo de interferências, torna-se fundamental avaliar o impacto desta perturbação nos resultados. Esta análise permite compreender a robustez dos algoritmos perante condições realistas, aproximando a simulação das condições práticas.

Cada um dos métodos tem uma sensibilidade diferente ao dano, sendo assim, as fases anteriores são decompostas em três níveis de dano: 10%, 15% e 25%. Assim será possível comparar o desempenho de cada um e as alterações provodas pelo aumento da percentagem de dano.

Na última fase do processo, dedicada ao tratamento dos dados, são utilizados diferentes *scripts* em *Matlab* consoante o método aplicado. Independentemente do método em análise, o programa inicia-se com a leitura dos ficheiros e o armazenamento dos dados numa matriz tridimensional $i \times j \times \omega$. A dimensão dessa matriz pode ser descrita como *sensores* $\times$ *forças* $\times$ *frequência*, ou seja, cada linha corresponde a um sensor e cada coluna a uma força aplicada. Dentro de cada um dos elementos da matriz está contido um vetor com 1600 linhas, relativas a cada um das frequências em estudo. Uma vez os dados guardados nessa matriz, serão aplicados os diferentes métodos de forma separada.

O código desenvolvido e utilizado para obter os dados em *Ansys* pode ser consultado no apêndice G, assim como o código desenvolvido em *Matlab* se encontra disponível no apêndice H. Visto que o ruído apenas é introduzido antes da aplicação dos métodos, os dados experimentais utilizados em ambas as fases são os mesmos, variando apenas a percentagem de ruído introduzido no *MatLab*.

4.2.2 Implementação do ruído

Nos testes experimentais o ruído é algo inevitável e que prejudica fortemente os resultados. Assim, a sua introdução tem como principal objetivo testar a influência no desempenho dos métodos. Esta abordagem permite aproximar os resultados das simulações às condições reais dos ensaios experimentais, contribuindo para uma análise mais realista dos métodos desenvolvidos. Os dados obtidos já são FRFs, desta forma o modelo de ruído adotado representa uma alteração aleatória de $\pm x\%$ segundo uma distribuição normal, representada pela equação 4.2.

$$\alpha_{ij}^{ruído} = \alpha_{ij} \times \left[1 + \left(\frac{\%ruído}{100} \right) \times (2 \times (0.5 - rand(gama\ de\ frequência, 1))) \right] \quad (4.2)$$

4.3 Trabalho Experimental

Nesta etapa é descrita a metodologia utilizada nas medições experimentais das FRFs. Dado que foi utilizado o mesmo *setup* experimental para ambas as estruturas analisadas, inicia-se com uma descrição geral da montagem do sistema, seguida de uma explicação detalhada dos procedimentos adotados em cada uma das etapas do trabalho experimental.

4.3.1 Setup

Apesar das estruturas em estudo serem bastante diferentes, o equipamento e a montagem foi semelhante. Ambas as estruturas foram suspensas num pórtico, considerado rígido, com recurso a fios de *nylon* de forma a obter condições de livre-livre. Na montagem utilizada para o procedimento, pretendia-se simular a condição de livre-livre, uma vez serem as condições mais simples e adequadas de se obter em laboratório. A figura 4.4 apresenta um esquema da montagem em questão.

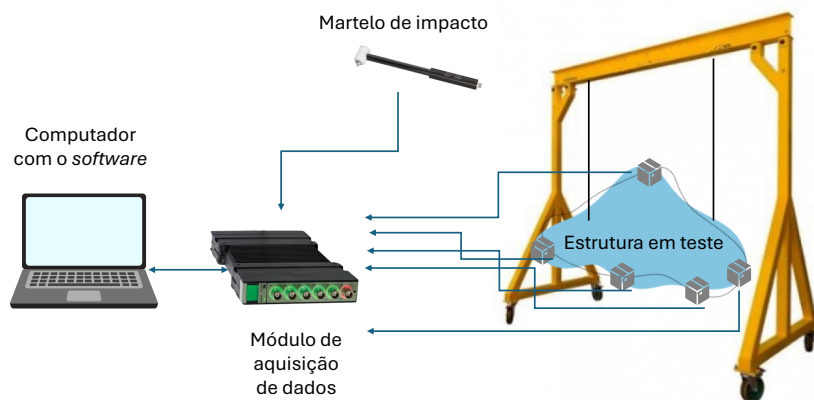


FIGURA 4.4: Esquema ilustrativo do *setup* experimental

Foram colocados 9 acelerómetros (*Brüel & Kjær* 4397), conectados a dois módulos de entrada multiuso (*Brüel & Kjær* 3050-A-060), cada um de seis canais. Estes módulos estabelecem a *interface* entre os sensores e o computador, no qual está instalado o *software Brüel & Kjær – Pulse LabShop (Version 22.2.0.98)*, responsável pela aquisição e processamento das FRFs. A excitação da estrutura foi realizada por meio de impactos utilizando um martelo de impacto instrumentado, equipado com um transdutor de força (PCB 208C01). A figura 4.5 apresenta o conjunto de materiais utilizados nos ensaios.



FIGURA 4.5: *Setup* experimental

Quanto às janelas utilizadas, como as estruturas eram diferentes, houve necessidade de utilizar parâmetros adaptados ao comportamento das mesmas. A janela exponencial utilizada nos acelerómetros colocados na viga possuía um *shift* de 60ms e um τ igual a 2s. Relativamente à janela transiente aplicada no transdutor de força para esse ensaio o *shift* era de 48ms, com duração de 5ms. Os mesmos parâmetros mas relativos ao ensaio com o veículos encontram-se ilustrados na figura 4.6.

Para a obtenção experimental das FRFs foram aplicados impactos em cada um dos pontos definidos para o efeito. Com o objetivo de reduzir variabilidades associadas aos impactos, foram efetuados 4 impactos sucessivos em cada ponto. Resumindo, em cada iteração eram efetuados 4 impactos num dos pontos de excitação,

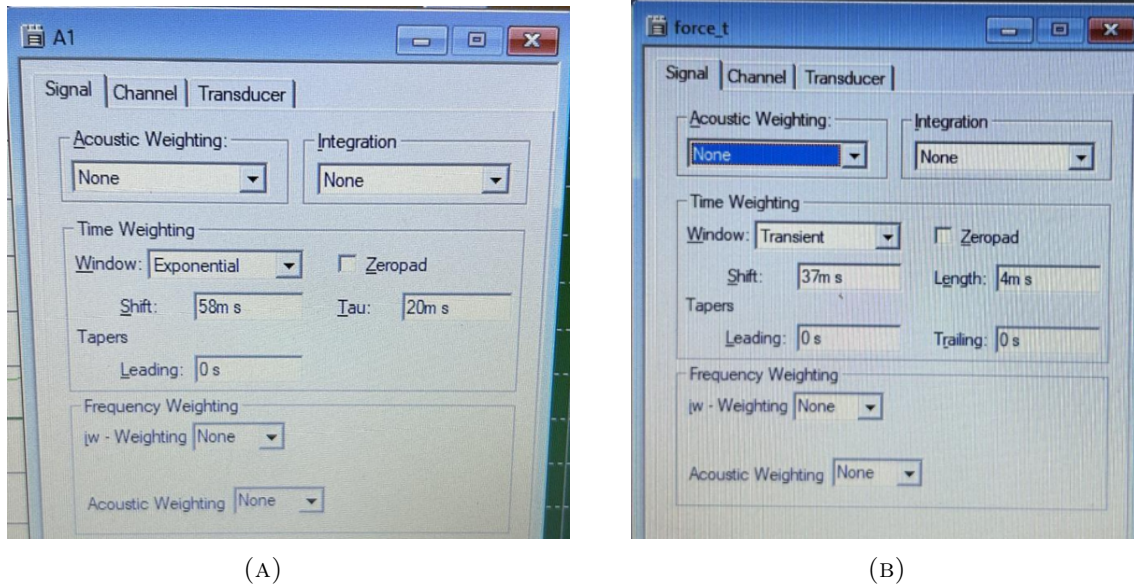


FIGURA 4.6: Janelas aplicadas: (A) Janela exponencial (B) Janela transiente

guardavam-se as médias das FRFs obtidas para cada um dos sensores e repetia-se este processo para todos os pontos de impacto.

À semelhança dos ensaios numéricos, as FRFs foram guardadas em ficheiros de texto e analisadas em *Matlab*. Tendo em conta que os ficheiros gerados eram diferentes daqueles obtidos numericamente, foi necessário utilizar um código ligeiramente diferente e que pode ser consultado no apêndice I.

4.3.2 Viga livre-livre

A viga em estudo tem as mesmas propriedades físicas e geométricas que a viga analisada numericamente, representadas na figura 4.1 e na tabela 4.1. Por ser uma estrutura longilínea, os acelerómetros foram colocados ao longo do seu comprimento, segundo as distâncias presentes na tabela 4.2, à semelhança das simulações numéricas. Os impactos eram aplicados na face oposta da viga, imediatamente por trás dos sensores.

O dano foi induzido através da redução de massa. Para este efeito, foram definidos 3 níveis de severidade, correspondentes a perdas de 5g, 15g e 45g, o que representa reduções de massa de 0.3%, 0.9% e 2.8%, relativamente ao peso total da viga. Com o objetivo de avaliar a sensibilidade dos métodos de deteção e localização de dano face à variação da sua posição, cada nível de dano foi testado em 5 localizações distintas ao longo da estrutura. A disposição dessas posições encontram-se

detalhadas na tabela 4.4.

TABELA 4.4: Localização do dano experimental

Caso de dano	Posição na viga (mm)
1	43
2	201
3	495
4	726
5	890

4.3.3 *LEO ROVER*

O *LEO ROVER* 1.7, ilustrado na figura 4.7 é um veículo terrestre não tripulado desenvolvido pela empresa *fictionlab*, tendo sido adquirido pelo CINAV (Centro de Investigação Naval).



FIGURA 4.7: *LEO ROVER*
Fonte: Fictionlab (2025)

Segundo Fictionlab 2025, tem um peso de cerca de 6,5Kg, com dimensões máximas de $425 \times 448 \times 305$ mm tal como representado na figura 4.8.

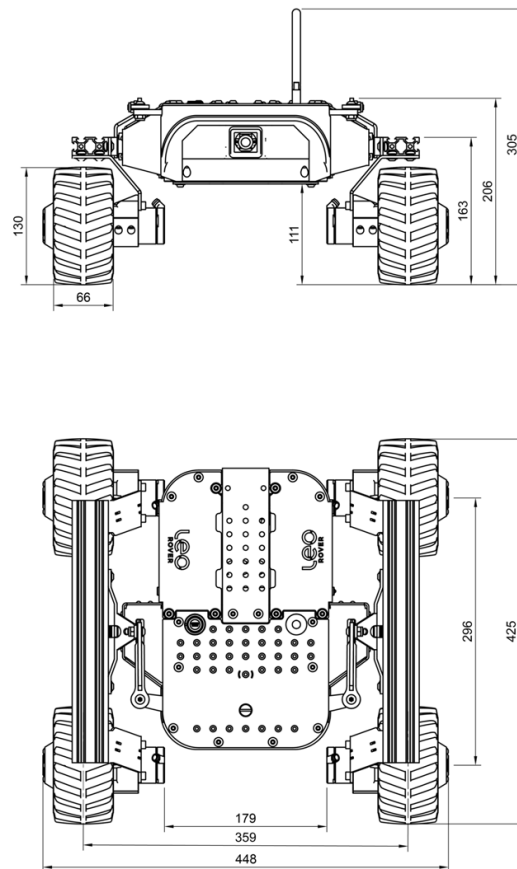


FIGURA 4.8: Dimensões do *LEO ROVER*

Fonte: Fictionlab (2025)

No *Leo Rover*, os acelerómetros foram colocados na sua parte superior tal como ilustrado na figura 4.9 e os pontos de aplicação da força foram definidos perto de cada um dos acelerómetros, da forma visualizada na figura 4.10. Desta forma pretendia-se ter sempre um ponto de impacto nas proximidades de cada sensor.

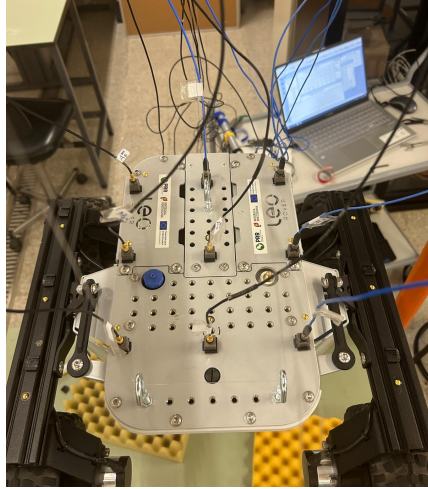


FIGURA 4.9: Disposição dos acelerómetros

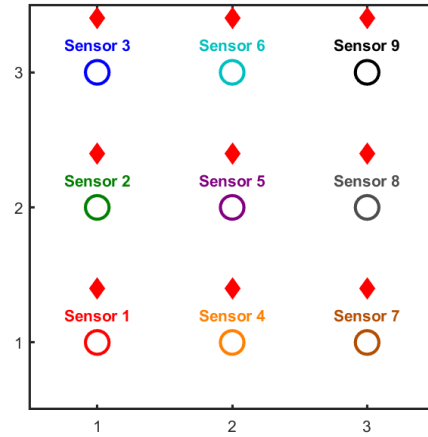


FIGURA 4.10: Disposição esquemática dos acelerómetros e dos pontos de excitação

O dano foi introduzido sob a forma de redução de massa, tal como ilustrado na figura 4.11, sendo considerado a situação saudável aquela com as massas introduzidas. A aplicação de dano deu-se em 3 localizações diferentes, sendo que em cada uma delas se registaram 3 níveis de severidade. Cada nível de dano correspondente à perda de 30g, 80g e 110g, equivalente a uma redução de 0.46%, 1.23% e 1.7% da massa total, respetivamente. A disposição das situações de dano ao longo do veículo podem ser visualizadas esquematicamente na figura 4.12.

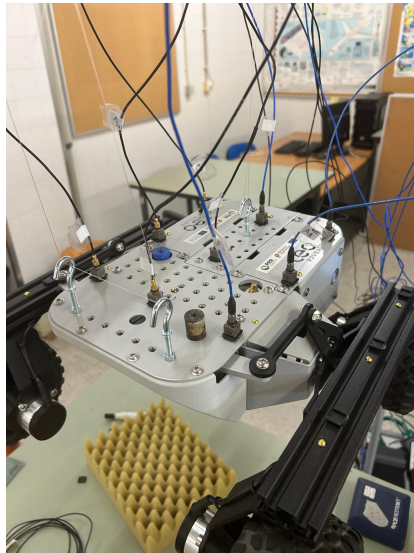


FIGURA 4.11: Exemplo de dano

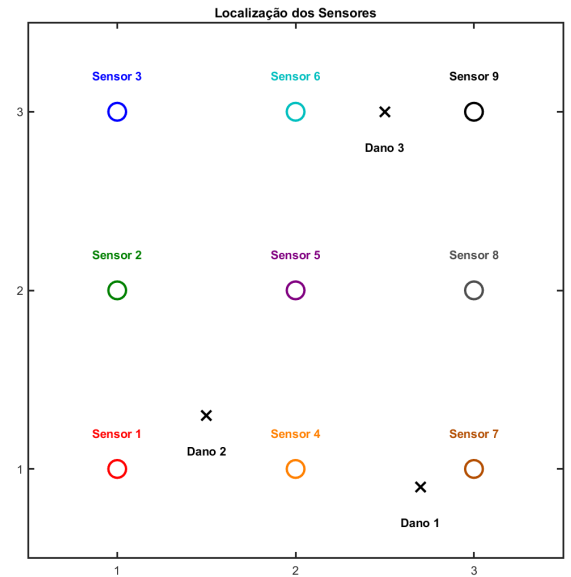


FIGURA 4.12: Localização do dano no veículo

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos, abrangendo tanto a etapa de simulação numérica como os ensaios experimentais. Considerando que os métodos em estudo têm finalidades distintas, o DRQ para detecção e o Método das Completas para localização, os resultados serão analisados tendo em conta esse fator.

Assim sendo, para garantir uma melhor organização da informação, o capítulo será dividido em dois subcapítulos:

- Resultados numéricos;
- Resultados experimentais;

Visto que se gera um elevado volume de resultados, no corpo principal desta dissertação, apenas serão apresentados alguns dos gráficos gerados, ficando a informação resumida em formato de tabelas.

No caso do MC, são apresentados gráficos cuja a escala de cores é do tipo *jet*, ou seja, os valores próximos de 0 são representados por uma cor azul escura e os valores próximos de 1 com uma cor vermelha escura. Em termos visuais os gráficos irão apresentar uma escala de cores com valores interpolados e onde as regiões a vermelho sugerem a presença de dano.

5.1 Resultados Numéricos

Nas figuras 5.1 e 5.2 ilustram-se os resultados obtidos pelo DRQ para o primeiro caso de dano na viga. Os gráficos relativos aos restantes casos de dano podem ser consultados no anexo B.

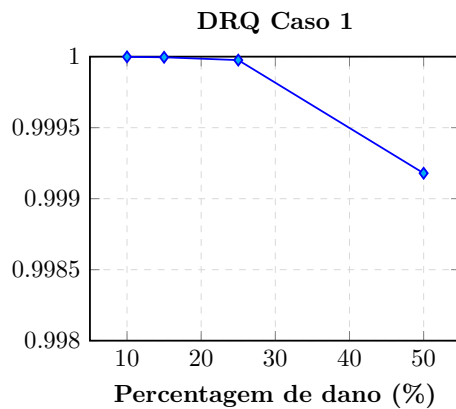


FIGURA 5.1: DRQ
Caso 1

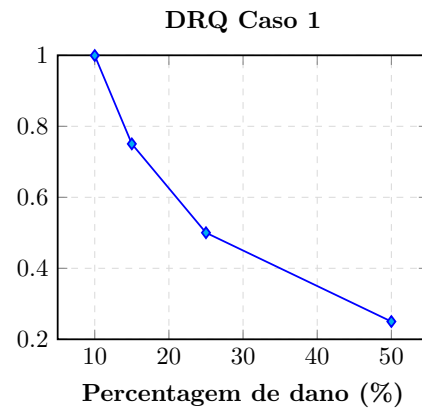


FIGURA 5.2: DRQ
Caso 1 com máximas
ocorrências

Considerando que DRQ diferentes de 1 indicam a presença de dano na estrutura, a tabela 5.1 apresenta uma síntese dos resultados obtidos para este indicador. Esta tabela permite uma visualização clara da eficácia do método na detecção dos diferentes casos analisados.

TABELA 5.1: Tabela resumo de detecção usando DRQ

	DRQ				DRQ máximas ocorrências			
	10%	15%	25%	50%	10%	15%	25%	50%
Caso 1	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 2	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Não deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 3	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Não deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 4	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Não deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 5	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Não deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 6	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 7	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 8	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta

■ - Deteta
■ - Não deteta

A análise dos gráficos permite constatar que, sem a utilização das máximas ocorrências, o indicador DRQ apresenta baixa sensibilidade para os três primeiros níveis de dano. Mesmo para um nível de severidade de 50% de dano, a escala está muito aproximada, indicando que a sensibilidade é muito reduzida. No entanto, com a aplicação das máximas ocorrências, os resultados tornam-se significativamente mais expressivos, evidenciando maiores variações no valor do DRQ e, assim, melhorando a distinção entre os diferentes níveis de dano. Apesar dessa melhoria, persistem limitações na sensibilidade do método para danos mais pequenos, uma

vez que, em três dos casos analisados, o valor do indicador manteve-se igual a 1 no primeiro nível de dano.

De modo a verificar qual a influência de ruído no desempenho do método, foi introduzido um ruído de 2% nos dados. As figuras 5.3 e 5.4 ilustram os resultados obtidos para este cenário, permitindo comparar o comportamento do indicador com e sem a presença de ruído.

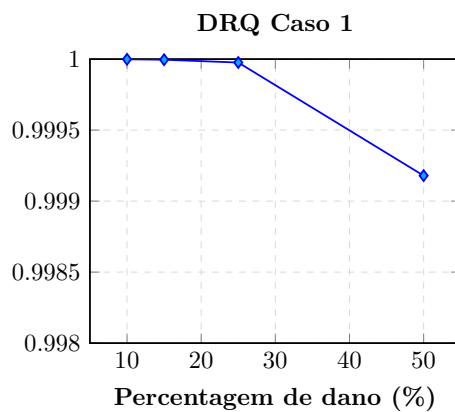


FIGURA 5.3: DRQ
Caso 1 com 2% de
ruído

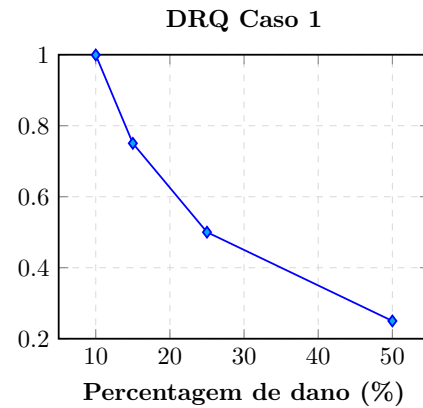


FIGURA 5.4: DRQ
Caso 1 com máximas
ocorrências e 2% de
ruído

Relativamente aos restantes resultados, não se verificaram alterações significativas em relação à situação sem ruído. Desta forma é possível afirmar que o DRQ, até aos 2%, não é sensível ao ruído. Esta constatação é evidenciada pela equivalência entre os resultados apresentados na tabela 5.2 e na tabela 5.1, demonstrando a consistência deste indicador perante este nível de ruído.

TABELA 5.2: Tabela resumo de deteção usando DRQ com 2% de ruído

	DRQ				DRQ máximas ocorrências			
	10%	15%	25%	50%	10%	15%	25%	50%
Caso 1	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 2	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Não deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 3	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Não deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 4	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Não deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 5	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Não deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 6	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 7	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta
Caso 8	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta	Deteta

- Deteta
 - Não deteta

Na figura 5.5 são apresentados os resultados obtidos através do MC para uma situação de dano correspondente a uma redução de espessura de 10%.

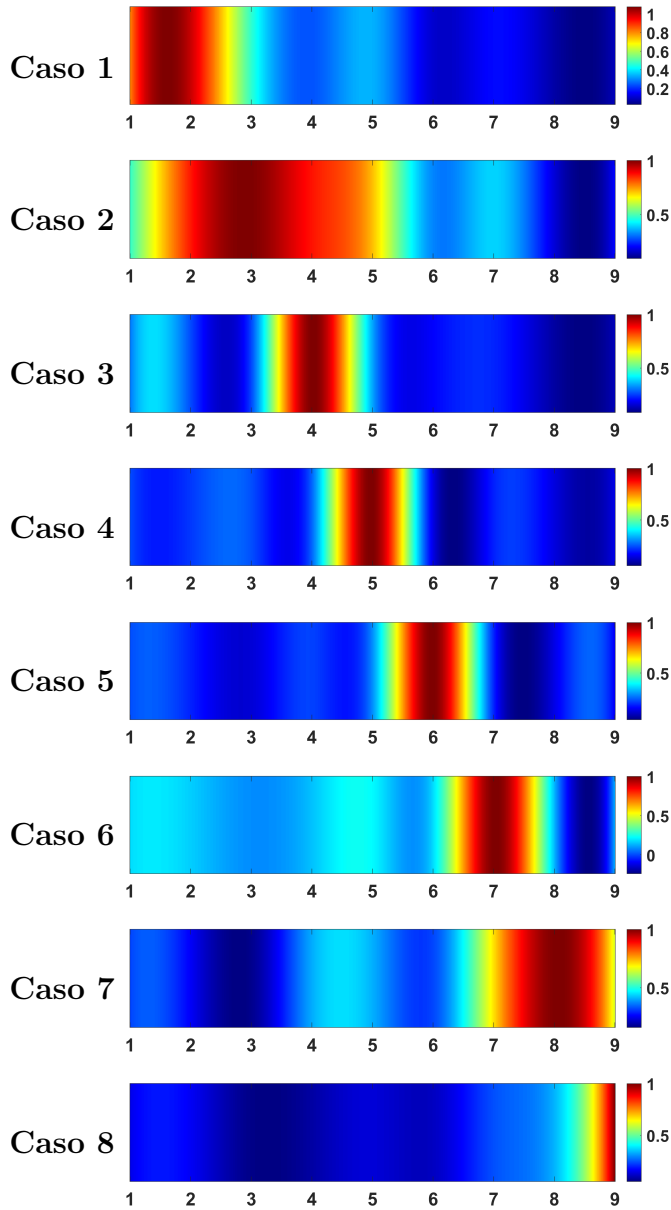


FIGURA 5.5: Dano a 10%, sem ruído (0-1000Hz)

Através da análise da figura, é possível evidenciar que o método localizou o dano corretamente em todos os casos uma vez que o máximo valor se encontra sempre no local correspondente a um dos sensores mais perto do dano. É possível verificar que existem localizações nas quais a diferença entre o local do dano e as proximidades não é tão acentuada contudo, o valor máximo ocorre no local do dano.

Foram analisadas diferentes gamas de frequência e, por forma a resumir toda a informação, foi contruída a tabela 5.6. Desta forma são apresentados todos os resultados obtidos para todas as situações de dano e para cada gama de frequência em estudo, uma vez que os resultados obtidos nos diferentes casos são análogos. A tabela está organizada por cores onde o verde corresponde a uma localização correta, o amarelo a uma localização numa área próxima do dano e o vermelho a uma situação onde a localização não foi efetiva.

	10%				15%			
	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz
Caso 1								
Caso 2								
Caso 3								
Caso 4								
Caso 5								
Caso 6								
Caso 7								
Caso 8								

	25%				50%			
	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz
Caso 1								
Caso 2								
Caso 3								
Caso 4								
Caso 5								
Caso 6								
Caso 7								
Caso 8								

- Localiza no ponto mais próximo do dano
 - Localiza na área onde se encontra o dano
 - Não localiza o dano

FIGURA 5.6: Tabelas resumo da localização de dano para o MC com diferentes percentagens de dano

Pela análise da tabela 5.6, é possível afirmar que o MC localiza corretamente, em todas as situações de dano, pelo menos a área próxima do dano, independentemente da gama de frequências. O segundo caso de dano foi aquele onde se registaram constrangimentos na localização do dano, sendo o único onde essa efetividade dependeu da gama de frequência. Na figura 5.7 é mostrado, a título de exemplo, o resultado para o caso 2 quando utilizada a gama de frequências dos 0 aos 750Hz. O valor máximo ocorre no sensor 4 enquanto deveria acontecer no sensor 2 ou no sensor 3, considerando-se que não localiza corretamente mas que identifica de forma correta a área do dano.

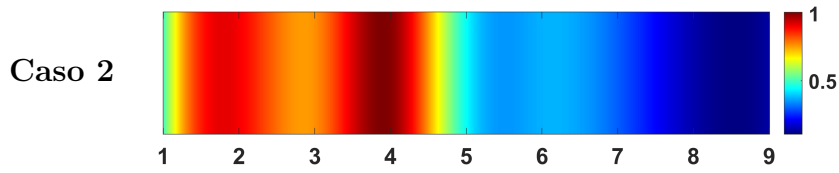


FIGURA 5.7: Dano 10%, sem ruído (0-750Hz)

Com o objetivo de avaliar a influência do ruído nos resultados, foi construída a tabela 5.8, análoga à tabela anterior, porém considerando uma situação com nível de ruído de 2%.

	10%				15%			
	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz
Caso 1								
Caso 2								
Caso 3								
Caso 4								
Caso 5								
Caso 6								
Caso 7								
Caso 8								

	25%				50%			
	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz
Caso 1								
Caso 2								
Caso 3								
Caso 4								
Caso 5								
Caso 6								
Caso 7								
Caso 8								

- Localiza no ponto mais próximo do dano
- Localiza na área onde se encontra o dano
- Não localiza o dano

FIGURA 5.8: Tabelas resumo da localização de dano para o MC com 2% de ruído

Analisando a tabela, com a introdução de ruído não se registaram alterações na eficácia do MC. Desta forma, pode-se afirmar que este método, pelo menos até aos 2% de ruído, não é afetado e localiza de igual forma o dano.

5.2 Resultados experimentais

5.2.1 Viga livre-livre

Os resultados obtidos experimentalmente para a viga, utilizando o DRQ, são apresentados pelas figuras 5.9 a 5.18. Estes gráficos ilustram a resposta do indicador em diferentes condições de dano e localizações, permitindo uma análise detalhada da sua capacidade de deteção em contexto real. Através destes resultados, é possível avaliar a sensibilidade do método face às variações estruturais e às inevitáveis perturbações experimentais, como ruído e condições ambientais.

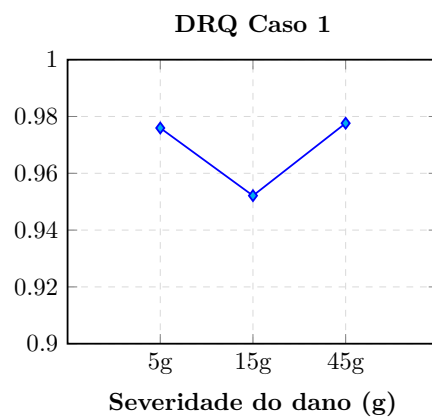


FIGURA 5.9: DRQ
Caso 1

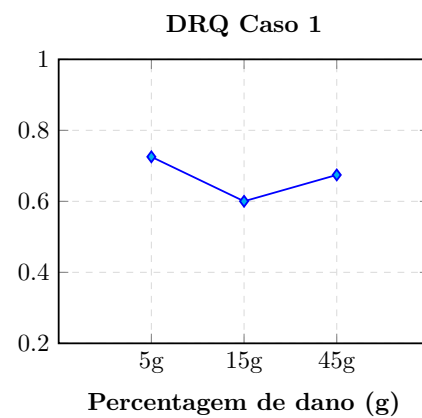


FIGURA 5.10: DRQ
Caso 1 com máximas
ocorrências

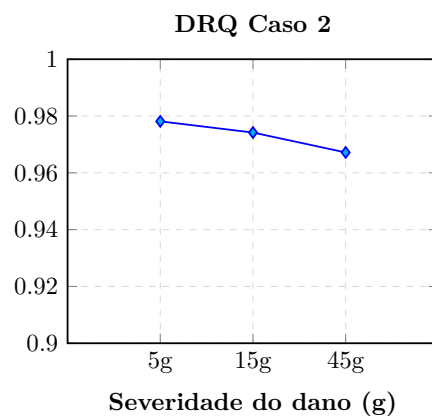


FIGURA 5.11: DRQ
Caso 2

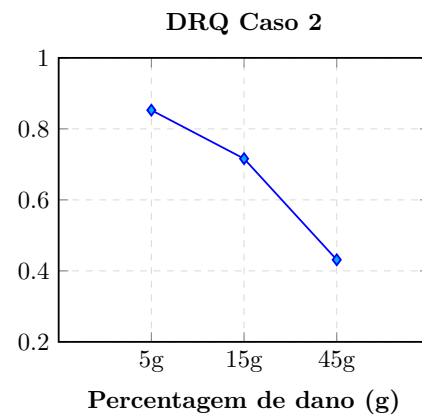


FIGURA 5.12: DRQ
Caso 2 com máximas
ocorrências

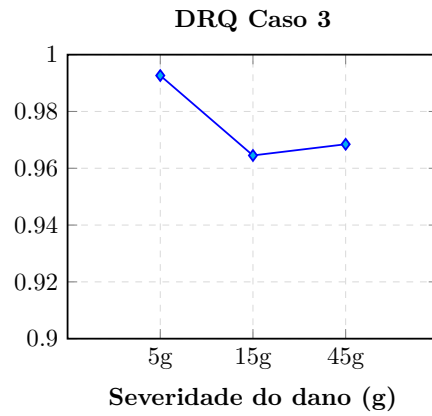


FIGURA 5.13: DRQ
Caso 3

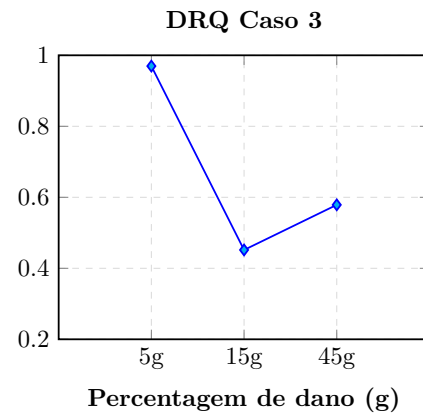


FIGURA 5.14: DRQ
Caso 3 com máximas
ocorrências

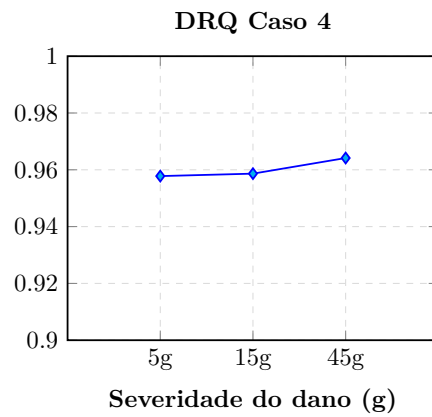


FIGURA 5.15: DRQ
Caso 4

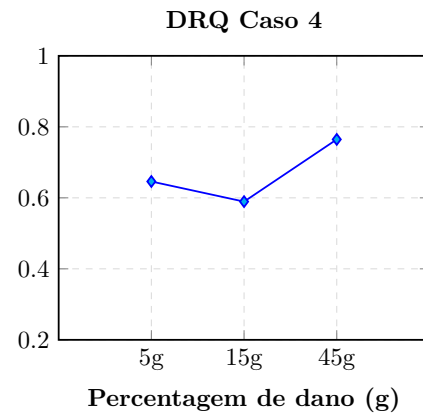


FIGURA 5.16: DRQ
Caso 4 com máximas
ocorrências

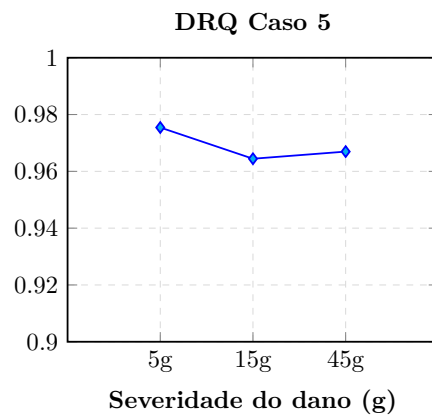


FIGURA 5.17: DRQ
Caso 5

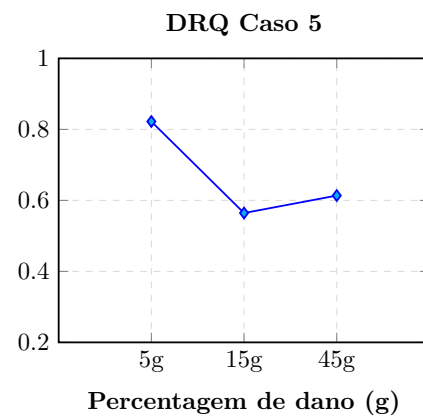


FIGURA 5.18: DRQ
Caso 5 com máximas
ocorrências

Nesta etapa são apresentados todos os gráficos obtidos uma vez que são

detetados casos onde o método faz corretamente a deteção do dano mas que não é coerente relativamente à quantificação do mesmo. Isto é, em todos os casos o valor do índice é menor que 1, ou seja, foi feita a deteção do dano corretamente mas, em alguns casos, o valor correspondente a um dano de 15g é maior que o valor correspondente ao dano de 45g. Apesar da quantificação não estar a ser alvo de estudo, este método foi desenvolvido também com o objetivo de realizar essa tarefa e registaram-se casos onde não foi possível fazê-lo.

Os valores obtidos para o DRQ, mesmo sem a aplicação do método das máximas ocorrências, revelaram uma maior evidência na deteção de dano durante a fase experimental do que durante a simulação numérica. Esse facto leva a afirmar que o dano introduzido na fase numérica era realmente de magnitude muito reduzida, de modo que, mesmo na ausência de ruído, não gerava alterações tão pronunciadas quanto aquelas observadas nos ensaios experimentais. Apesar do aumento da sensibilidade verificado, a aplicação do método das máximas ocorrências aumentou ainda mais essa sensibilidade, tornando os resultados mais evidentes.

Os resultados obtidos experimentalmente na viga, utilizando o MC, correspondentes a uma perda de massa de 5g podem ser visualizados na figura 5.19. Optou-se por apresentar apenas os resultados referentes a este nível de dano, uma vez que corresponde ao de menor severidade entre os estudados. Esta escolha justifica-se pelo facto de que, se o método demonstrar eficácia na identificação e localização do dano mais pequeno, espera-se que o seu desempenho seja ainda mais robusto e fiável nos casos de maior severidade (15 g e 45 g).

Desta forma, a análise do comportamento do método neste contexto mais exigente serve como prova de conceito da sua aplicabilidade e sensibilidade, reforçando a sua utilidade para monitorização estrutural mesmo em situações de alterações mínimas nas propriedades da estrutura.

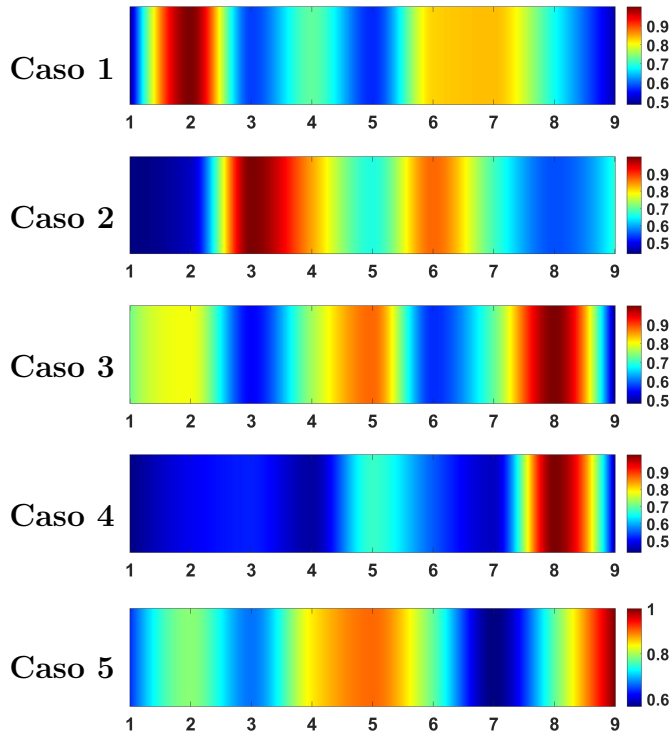


FIGURA 5.19: Dano 1 (0-1000Hz)

No caso 1 o valor máximo ocorre no sensor 4, contudo existe uma zona mais avermelhada no sensor 2, que se aproxima da localização real do dano. Embora, do ponto de vista objetivo, o dano não possa ser considerado corretamente localizado, a presença de uma resposta mais elevada nessa região sugere uma indicação parcial de dano. No caso 3 acontece algo semelhante, onde o valor máximo ocorre no sensor 4 mas na localização do dano também existe uma região mais vermelha. No caso 4, por outro lado, embora visualmente existam duas regiões a vermelho, o valor máximo ocorre na localização do dano. Os resultados correspondentes aos restantes níveis de dano são semelhantes e encontram-se resumidos na tabela 5.20.

	5g				15g			
	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz
Caso 1								
Caso 2								
Caso 3								
Caso 4								
Caso 5								

	45g			
	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz
Caso 1				
Caso 2				
Caso 3				
Caso 4				
Caso 5				

- Localiza no ponto mais próximo do dano
- Localiza na área onde se encontra o dano
- Não localiza o dano

FIGURA 5.20: Tabelas resumo da localização de dano para o MC na riga experimental

Verifica-se que, neste caso, a escolha da gama de frequências utilizada na análise tem uma influência significativa nos resultados obtidos. A seleção de uma gama adequada é essencial, uma vez que frequências fora da gama ideal podem ocultar ou distorcer as alterações provocadas por pequenos danos, comprometendo a eficácia dos métodos de deteção e localização. Esse facto deve-se há possível existência de modos de vibração que se cancelam uns aos outros, ocultando mudanças essenciais para a correta localização do dano.

Além disso, como era de esperar, o aumento da severidade do dano resultou num maior número de localizações corretamente identificadas.

5.2.2 Leo Rover

Nesta etapa, os resultados obtidos pelo DRQ nos 3 casos de dano estão ilustrados pelas figuras 5.21 a 5.26. A apresentação dos três casos permite observar tendências consistentes nos resultados e identificar eventuais limitações do método, como a sensibilidade a danos mais pequenos.

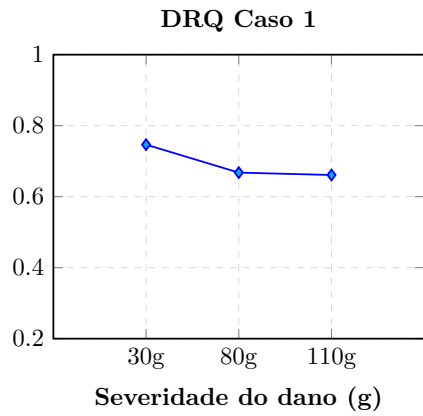


FIGURA 5.21: DRQ
Caso 1

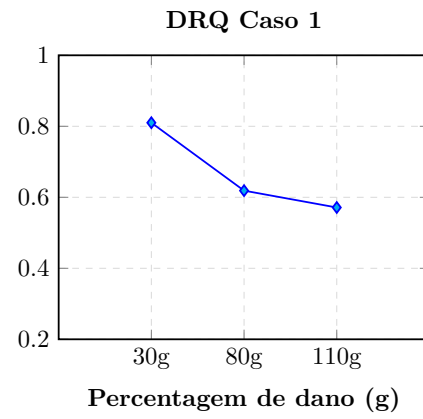


FIGURA 5.22: DRQ
Caso 1 com máximas
ocorrências

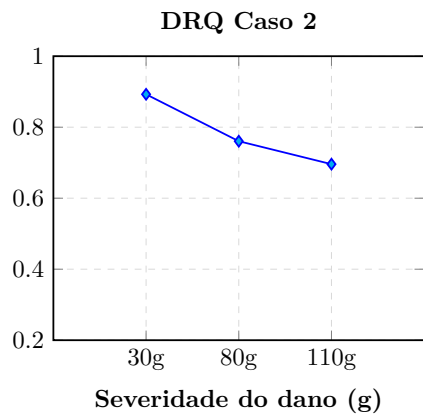


FIGURA 5.23: DRQ
Caso 2

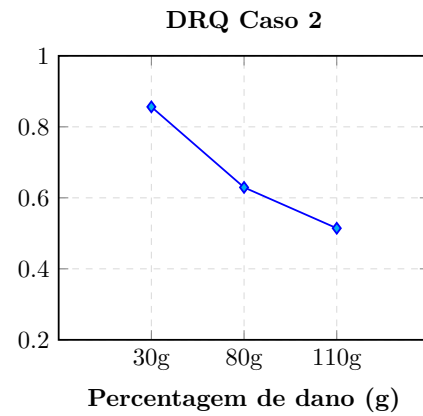


FIGURA 5.24: DRQ
Caso 2 com máximas
ocorrências

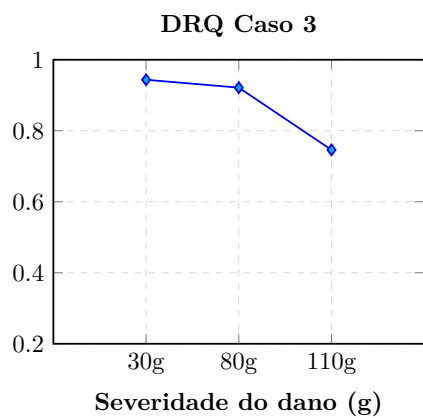


FIGURA 5.25: DRQ
Caso 3

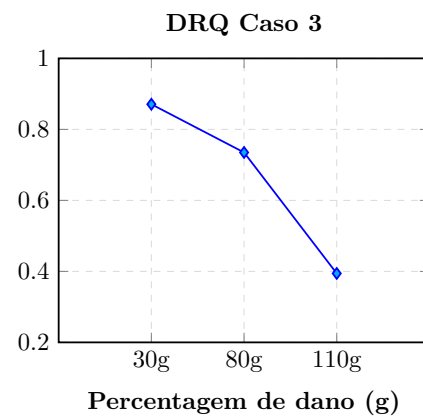


FIGURA 5.26: DRQ
Caso 3 com máximas
ocorrências

O dano foi detetado de forma correta em todos os casos, demonstrando a

eficácia do método aplicado. Contrariamente aos resultados obtidos na viga, existe sempre uma tendência decrescente do valor com o aumento da severidade. As variações registadas são bastante evidentes contudo, o método das máximas ocorrências, provocou um aumento ainda mais acentuado, evidenciando melhor os resultados.

Na figura 5.27 são ilustrados os resultados obtidos experimentalmente no veículo. À semelhança das simulações numéricas e da atividade experimental com a viga, foram analisadas diferentes gamas de frequência, tendo sido obtidos melhores resultados para uma gama de frequências dos 0 aos 750Hz. Os restantes resultados podem ser consultados no apêndice E.

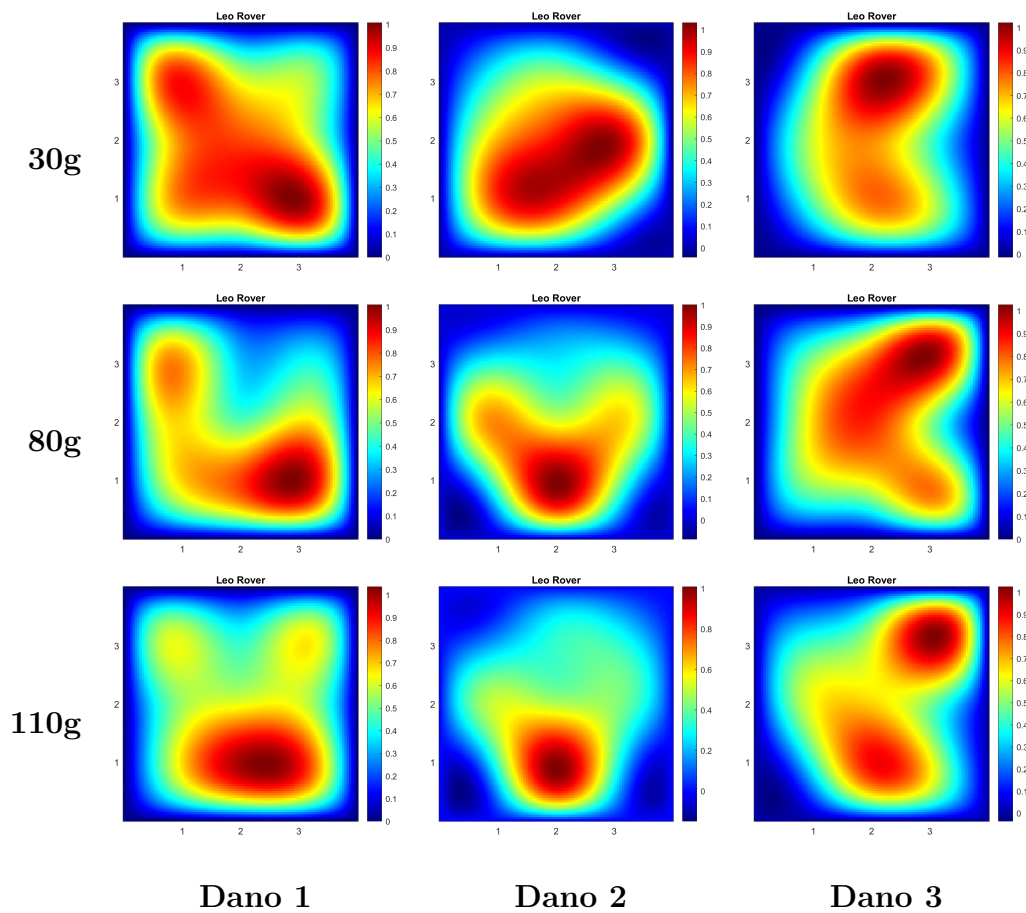


FIGURA 5.27: Comparação visual dos diferentes danos (0–750Hz)

Tendo em conta o elevado número de dados, os resultados encontram-se resumidos na tabela 5.28.

	30g				80g			
	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz
Caso 1								
Caso 2								
Caso 3								

	110g			
	0-250 Hz	0-500 Hz	0-750 Hz	0-1000 Hz
Caso 1				
Caso 2				
Caso 3				

- Localiza no ponto mais próximo do dano
- Localiza na área onde se encontra o dano
- Não localiza o dano

FIGURA 5.28: Tabelas resumo da localização de dano para o MC no *LEO ROVER*

Tendo em conta a figura 4.12, os danos localizam-se aproximadamente nas coordenadas (2.5, 1), (1.5, 1) e (2.5, 3). Como não se encontram acelerómetros nessas posições exatas, tal como seria de esperar, o dano considera-se bem localizado quando se encontra no sensor mais próximo.

Através da análise das imagens no apêndice E, é evidente a influência da gama de frequência nos resultados. Esse facto já tinha sido presenciado nos ensaios anteriores e voltou-se a verificar.

Quanto à severidade do dano, também é evidente que tem uma clara influência, uma vez que se verifica que os resultados ficam mais claros e as zonas correspondentes aos valor máximo vão-se aproximando cada vez mais do acelerómetro mais próximo. Contudo, para a gama de frequência entre os 0 e os 250 Hz, foi para as 110g que se verificaram os piores resultados.

Capítulo 6

Conclusão e perspectivas de trabalho futuro

6.1 Conclusão

No decorrer do presente trabalho procurou-se fazer uso de métodos de identificação de dano já existentes, com a finalidade de avaliar a sua aplicabilidade ao veículo *LEO ROVER*. Para esta dissertação foram selecionados dois métodos, pretendendo-se assim atingir os primeiros dois objetivos do SHM- Detecção e Localização.

Os estudos numéricos iniciam-se pela viga, visto ser uma estrutura simples mas que funciona como base conceptual para análise de estruturas mais complexas. Apesar da simplicidade, estes estudos permitiram retirar que a sensibilidade dos métodos varia com a localização do dano e que ambos os métodos demonstraram ter robustez perante a presença de ruído. No que respeita ao Método de Localização de Dano, verificou-se que a gama de frequências analisada constitui o parâmetro mais influente nos resultados obtidos. Não foram realizados estudos numéricos do veículo, dado o elevado custo computacional e a complexidade associada à sua modelação detalhada. Tendo em conta que a estrutura estudada tinha de ser muito simplificada, optou-se por transitar diretamente para as medições experimentais, aproveitando os conhecimentos obtidos nas análises realizadas à viga.

A fase experimental teve início com a análise de dados provenientes de trabalhos anteriores, o que possibilitou uma comparação quase direta com os resultados numéricos, dado que as propriedades físicas e geométricas das estruturas analisadas eram equivalentes. Após essa comparação, foram medidas as FRFs no *LEO ROVER*, com o intuito de cumprir com os objetivos. Nesta etapa, foi adotada uma

metodologia que demonstrou elevada eficácia tanto na detecção como na localização de pequenos danos neste tipo de estrutura.

6.2 Perspetivas de trabalho futuro

Embora anteriormente se tenha referido a ausência de estudos numéricos aplicados ao caso do veículo, importa salientar que esses estudos são viáveis e recomendáveis. Isso iria permitir realizar uma análise dos pontos ótimos para a colocação dos sensores bem como a influência na redução do número de sensores nos resultados obtidos.

Os danos foram introduzidos devido a alterações na massa mas, na realidade, o dano normalmente manifesta-se devido a alterações na rigidez. No caso do veículo autónomo, é possível replicar variações reais de rigidez através do desaperto de parafusos. Esta abordagem permite uma representação mais fidedigna das condições de dano, aproximando os ensaios experimentais a situações reais de degradação da integridade estrutural.

A análise de vibrações com vista à identificação de dano justifica-se pela necessidade de garantir a fiabilidade, disponibilidade e segurança operacional dos veículos autónomos. Assim sendo, sugere-se a realização de testes semelhantes àquilo que seria a sua aplicação prática, i.e., realizar várias medições mas havendo a montagem e desmontagem do aparato experimental entre cada medição. Desta forma verificavam-se a repetibilidade das medições, garantindo obrigatoriamente as mesmas condições ambientais.

Por fim, em estudos futuros, recomenda-se considerar a detecção de dano durante a operação do veículo. A implementação dessa funcionalidade permitiria ao operador identificar que o veículo não se encontra em condições ideais de funcionamento, justificando assim a sua deslocação a um laboratório ou oficina para diagnóstico e eventual reparação do problema.

Bibliografia

- Allemang, R. J. e D. L. Brown (1982). «A correlation coefficient for modal vector analysis». Em: *Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference*. Orlando, USA, pp. 110–116.
- Amador, Tiago Alexandre Vieira (2024). «Edificação da Capacidade UAS nas FFAA Portuguesas». Dissertação de Mestrado em Ciências Militares Navais, especialidade de Marinha. Tese de mestrado. Alfeite: Escola Naval.
- Ansys 2025 R1 Element Reference* (jan. de 2025). Release 2025 R1. ANSYS, Inc. Southpointe, Canonsburg, PA 15317, USA.
- Avitabile, Peter (2001). «Experimental modal analysis». Em: *Sound and vibration* 35.1, pp. 20–31.
- Aykan, Murat e Mehmet Celik (2009). «Vibration fatigue analysis and multi-axial effect in testing of aerospace structures». Em: *Mechanical systems and signal processing* 23.3, pp. 897–907.
- Balageas, Daniel., Claus-Peter. Fritzen e Alfredo. Güemes (2006). *Structural health monitoring*. ISTE, p. 495. ISBN: 9781905209019.
- Bathe, Klaus-Jürgen (2007). «Finite element method». Em: *Wiley encyclopedia of computer science and engineering*, pp. 1–12.
- Berardo, João Henrique Ribeiro (2021). «Desenvolvimento e Validação de uma Nova Metodologia para a Detecção de Dano em Placas». Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Tese de mestrado. Lisboa: Universidade NOVA de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Bovio, Igor, Massimo VISCARDI, Leonardo LECCE et al. (2000). «Innovative method for damage identification and structural health monitoring based on vibration measurements». Em: *Doctor Thesis, Universit á degli Studi di Napoli "Federico II"*, 238p.
- Brigham, E Oran e RE Morrow (1967). «The fast Fourier transform». Em: *IEEE spectrum* 4.12, pp. 63–70.
- Cattarius, J e DJ Inman (1997). «Time domain analysis for damage detection in smart structures». Em: *Mechanical Systems and signal processing* 11.3, pp. 409–423.

- Cochran, William T, James W Cooley, David L Favin, Howard D Helms, Reginald A Kaenel, William W Lang, George C Maling, David E Nelson, Charles M Rader e Peter D Welch (1967). «What is the fast Fourier transform?» Em: *Proceedings of the IEEE* 55.10, pp. 1664–1674.
- Døssing, O., Brüel e Kjaer (1988). *Structural Testing. Part 1. Modal Analysis and Simulation*. Structural Testing, p. 56.
- Elmeseiry, Nourhan, Nancy Alshaer e Tawfik Ismail (dez. de 2021). «A detailed survey and future directions of unmanned aerial vehicles (Uavs) with potential applications». Em: *Aerospace* 8 (12). ISSN: 22264310. DOI: 10.3390/aerospace8120363.
- Ewins, D. J. e Y. K. Ho (jun. de 2000). «On the structural damage identification with mode shapes». Em: *Proceedings of the European COST F3 Conference on System Identification & Structural Health Monitoring*. Universidade Politécnica de Madrid, Spain, pp. 677–684.
- Ewins, D.J. (2009). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. Mechanical Engineering Research Studies: Engineering Dynamics Series. Wiley. ISBN: 9780863802188. URL: https://books.google.pt/books?id=09_zDwAAQBAJ.
- Fan, Wei e Pizhong Qiao (2011). «Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study». Em: *Structural health monitoring* 10.1, pp. 83–111.
- Fictionlab (2025). *Leo Rover Documentation - Specification*. <https://docs.fictionlab.pl/leo-rover/documentation/specification>. Acedido a 15 de junho de 2025.
- Heylen, W., S. Lammens e P. Sas (1998). *Modal Analysis Theory and Testing*. Section A.6. Belgium: K.U. Leuven—PMA.
- Heylen, Ward e Stefan Lammens (1996). «FRAC: a consistent way of comparing frequency response functions». Em: *Proceedings of the conference on identification in engineering systems*, pp. 48–57.
- Inman, Daniel J. (2013). *Engineering Vibration*. 4^a ed. Pearson Education. ISBN: 978-0132871693.
- Katunin, Andrzej, Krzysztof Dragan e Michał Dziendzikowski (2015). «Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques». Em: *Composite structures* 127, pp. 1–9.
- Lieven, N. A. J. e D. J. Ewins (1988). «Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC)». Em: *Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference*. Kissimmee, USA, pp. 690–695.

- Maia, NMM, RAB Almeida, APV Urgueira e RPC Sampaio (2011). «Damage detection and quantification using transmissibility». Em: *Mechanical Systems and Signal Processing* 25.7, pp. 2475–2483.
- Maia, NMM, JMM Silva, EAM Almas e RPC Sampaio (2003). «Damage detection in structures: from mode shape to frequency response function methods». Em: *Mechanical systems and signal processing* 17.3, pp. 489–498.
- Medeiros, João Pedro Gomes Franco de (2022). «Detecção de Dano Estrutural em Vigas Utilizando as Repostas Dinâmicas Medidas com Acelerómetros e Extensómetros». Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Tese de mestrado. Lisboa: Universidade NOVA de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Messina, Arcangelo, EJ Williams e T Contursi (1998). «Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method». Em: *Journal of sound and vibration* 216.5, pp. 791–808.
- Nobari, Ali Salehzadeh e MH Ferri Aliabadi (2018). *Vibration-based techniques for damage detection and localization in engineering structures*. Vol. 10. World Scientific.
- NP EN 13306:2007 - *Terminologia da Manutenção* (2007). Norma Europeia harmonizada pela Comissão Europeia para manutenção, que define termos e definições relacionados com a manutenção.
- Otani, Mario, ; Waltair e Vieira Machado (2008). «A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial». Em: *Revista Gestão Industrial*. boa introdução para a manutenção, p. 16.
- Pandey, AK, M Biswas e MM Samman (1991). «Damage detection from changes in curvature mode shapes». Em: *Journal of sound and vibration* 145.2, pp. 321–332.
- Pascual, Rodrigo, Jean-Claude Golinval e Mario Razeto (1997). «A frequency domain correlation technique for model correlation and updating». Em: *15th International Modal Analysis Conference (IMAC XV)*.
- Pires, Rui Carreira e R Pena dos Reis (2015). «The use of finite element analysis on the characterization of the geometrical and temporal evolution of salt structures: the Matacões diapir case-study (Lusitanian Basin, Portugal)». Em: *European Regional Conference and Exhibition*.
- Policarpo, H (2013). «Numerical and experimental models for vibration attenuation using cork composite materials». Tese de doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa Lisbon, Portugal.

- Rao, Singiresu S. (2017). *Mechanical Vibrations*. 6^a ed. Harlow, UK: Pearson Education. ISBN: 9780134361307.
- Ratcliffe, Colin P (1997). «Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape data». Em: *Journal of sound and vibration* 204.3, pp. 505–517.
- (2000). «A frequency and curvature based experimental method for locating damage in structures». Em: *J. Vib. Acoust.* 122.3, pp. 324–329.
- Reddy, J. N. (2019). *Introduction to the Finite Element Method*. English. 4th. New York, N.Y.: McGraw-Hill Education.
- Sampaio, RPC, NMM Maia e JMM Silva (1999). «Damage detection using the frequency-response-function curvature method». Em: *Journal of sound and vibration* 226.5, pp. 1029–1042.
- (2003). «The frequency domain assurance criterion as a tool for damage detection». Em: *Key Engineering Materials* 245, pp. 69–76.
- Schwarz, Brian J e Mark H Richardson (1999). «Experimental modal analysis». Em: *CSI Reliability week* 35.1, pp. 1–12.
- Seyedpoor, SM, A Ahmadi e N Pahnabi (2019). «Structural damage detection using time domain responses and an optimization method». Em: *Inverse Problems in Science and Engineering* 27.5, pp. 669–688.
- Shi, ZY, SS Law e LM Zhang (1998). «Structural damage localization from modal strain energy change». Em: *Journal of sound and vibration* 218.5, pp. 825–844.
- Sinou, Jean-Jacques (2009). «A review of damage detection and health monitoring of mechanical systems from changes in the measurement of linear and non-linear vibrations». Em: *Mechanical vibrations: measurement, effects and control*, pp. 643–702.
- Stubbs, Norris, Jeong-Tae Kim e CR Farrar (1995). «Field verification of a non-destructive damage localization and severity estimation algorithm». Em: *Proceedings-SPIE the international society for optical engineering*. SPIE International Society for Optical, pp. 210–210.
- Tejeda-del Cueto, María Elena, Sara Isabel González-Cabrera, Marco Osvaldo Vigueras-Zúñiga e Maria Arroyo-Flores (2024). «State of the art in mechanical vibration analysis for UAVs». Em: *Journal of Research and Development* 10.25, pp. 1–18.
- Yoon, MK, D Heider, JW Gillespie Jr, CP Ratcliffe e RM Crane (2005). «Local damage detection using the two-dimensional gapped smoothing method». Em: *Journal of sound and vibration* 279.1-2, pp. 119–139.

Zang, C, Michael I Friswell e M Imregun (2003). «Structural health monitoring and damage assessment using measured FRFs from multiple sensors, part I: The indicator of correlation criteria». Em: *Key Engineering Materials* 245, pp. 131–140.

Apêndice A - Resultados numéricos obtidos através do Método das Completas aplicado na viga

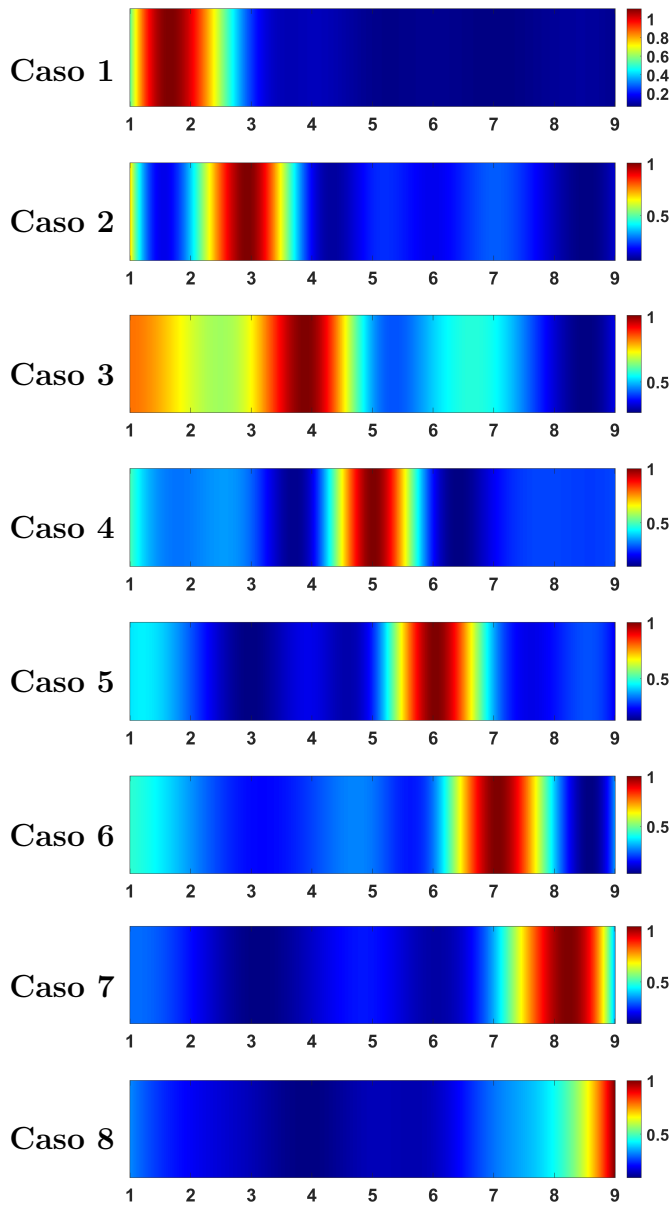


FIGURA A.1: Dano a 10%, sem ruído (0-250Hz)

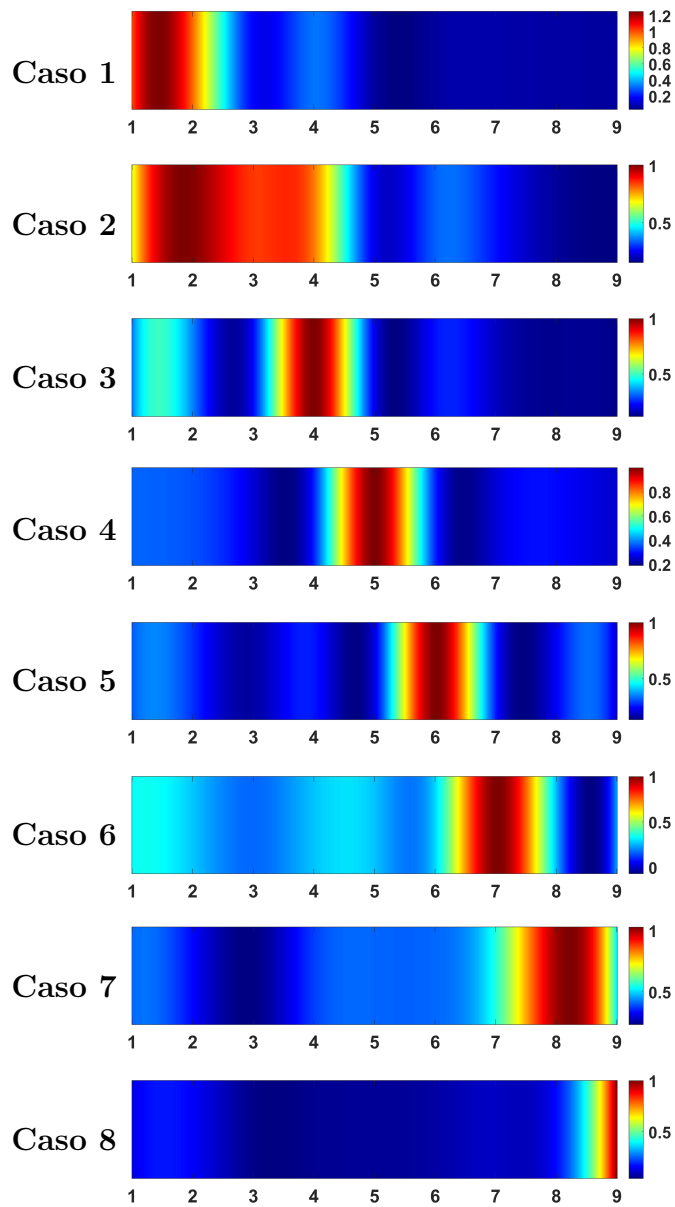


FIGURA A.2: Dano a 10%, sem ruído (0-500Hz)

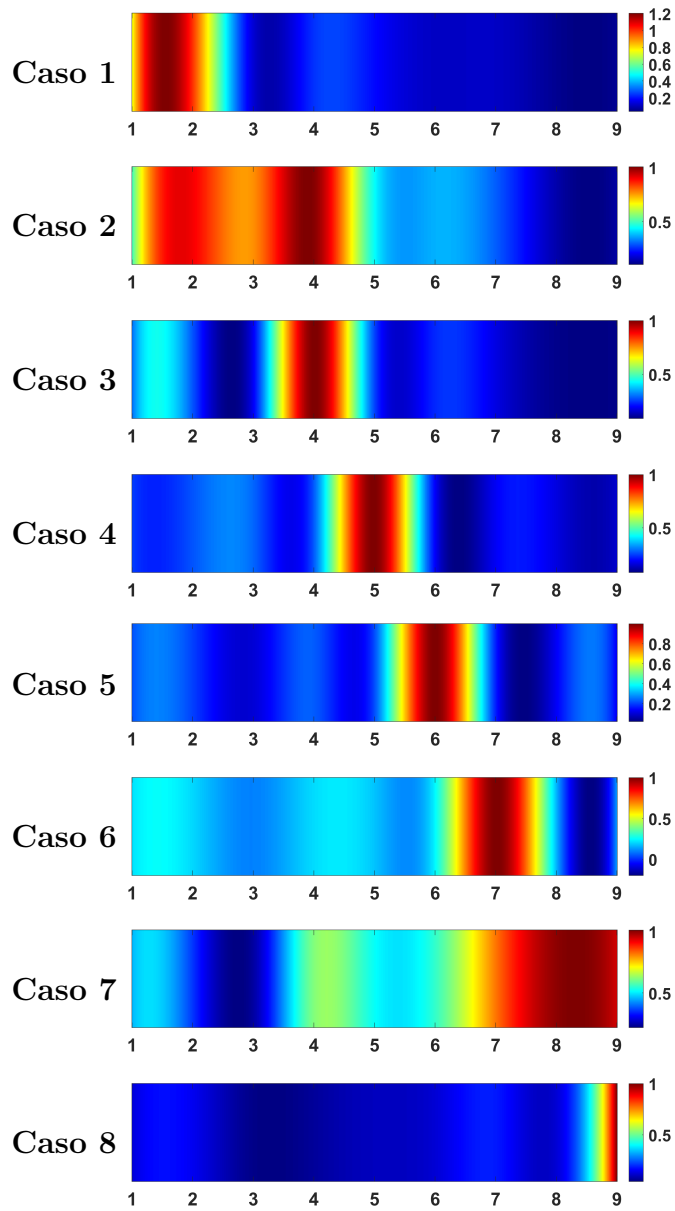


FIGURA A.3: Dano a 10%, sem ruído (0-750Hz)

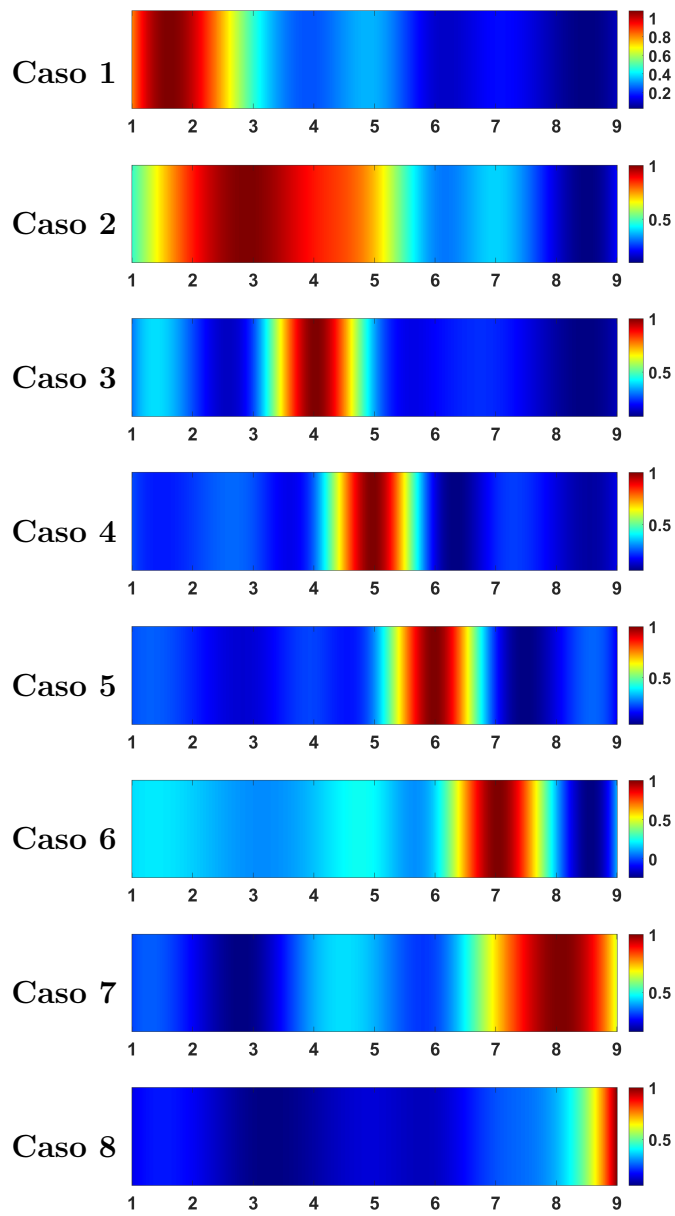


FIGURA A.4: Dano a 10%, sem ruído (0-1000Hz)

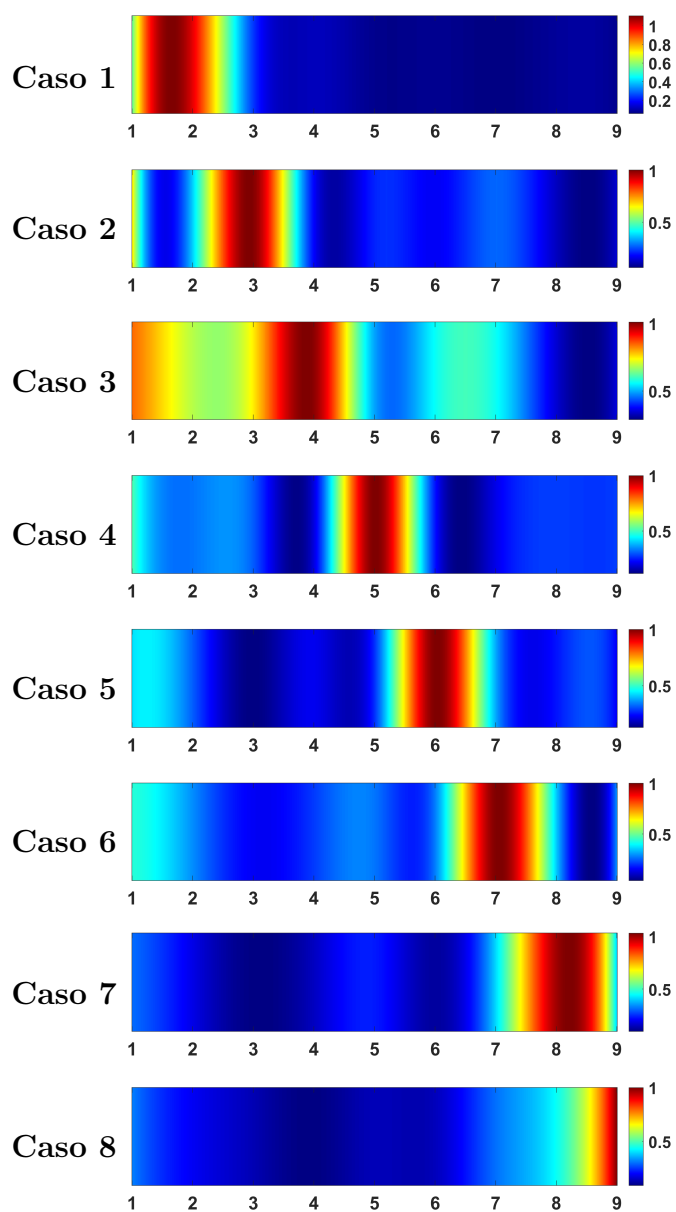


FIGURA A.5: Dano a 15%, sem ruído (0-250Hz)

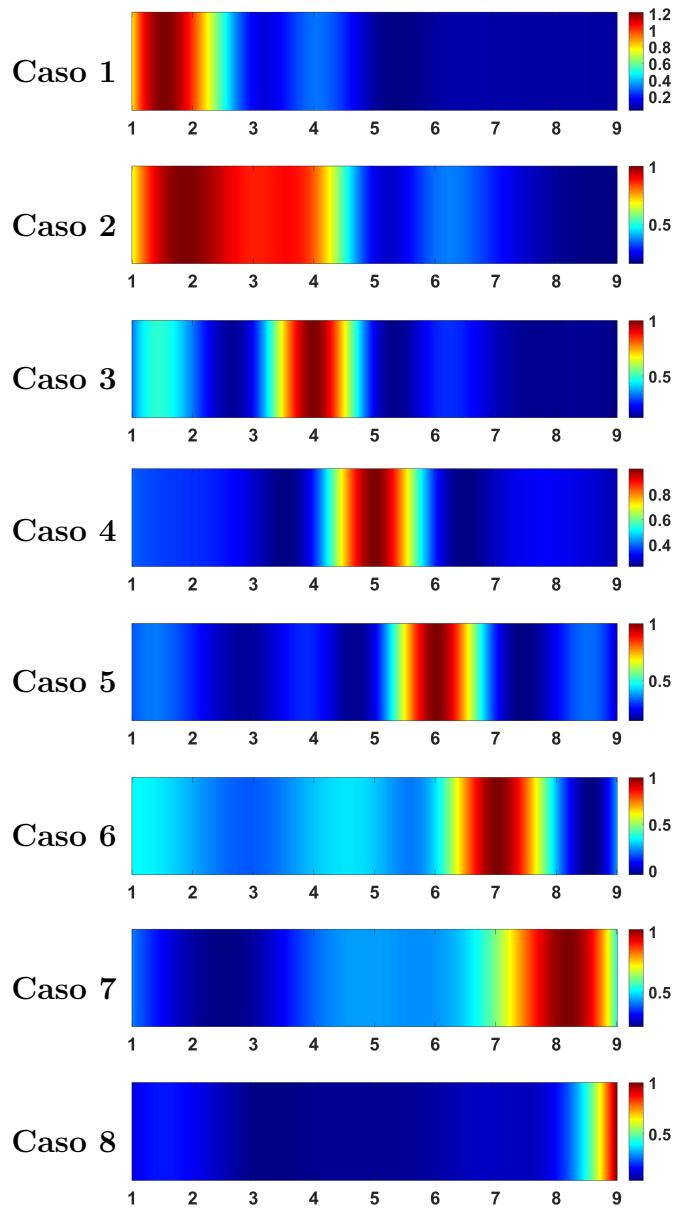


FIGURA A.6: Dano a 15%, sem ruído (0-500Hz)

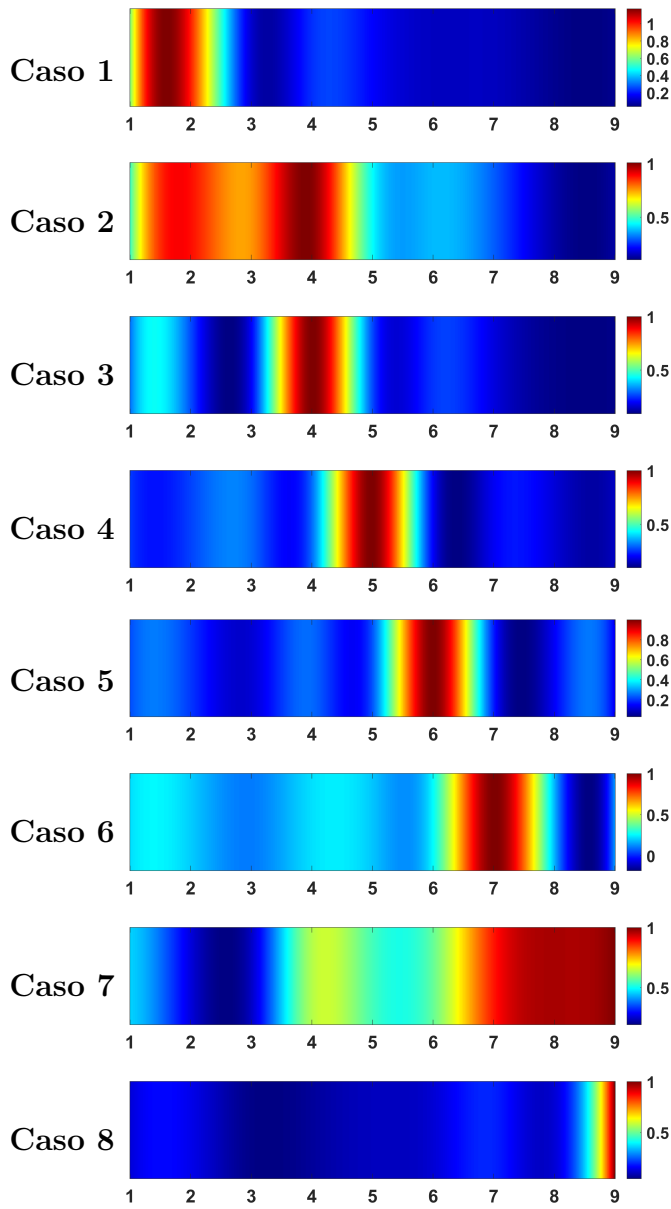


FIGURA A.7: Dano a 15%, sem ruído (0-750Hz)

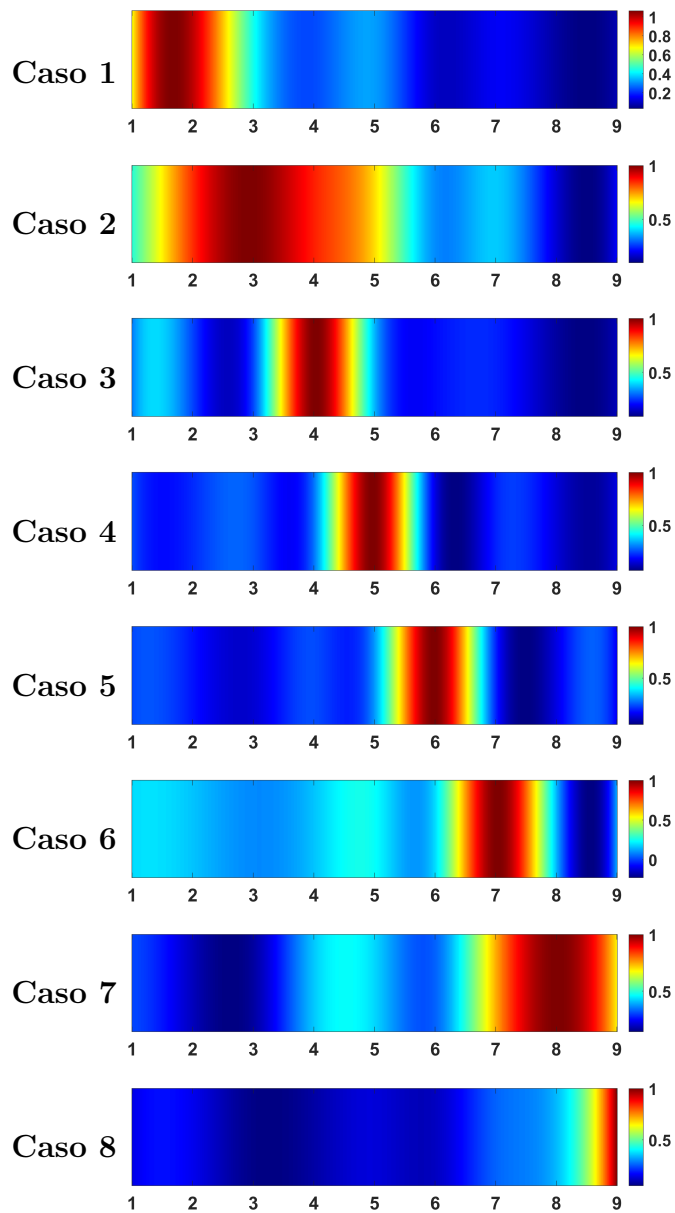


FIGURA A.8: Dano a 15%, sem ruído (0-1000Hz)

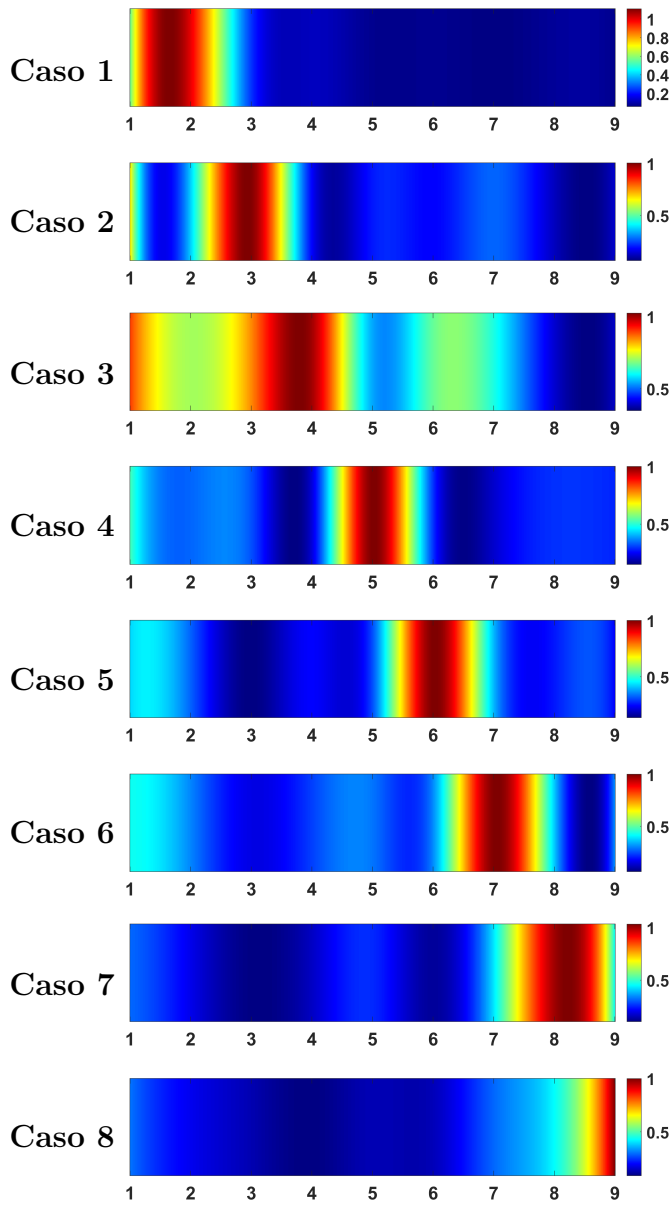


FIGURA A.9: Dano a 25%, sem ruído (0-250Hz)

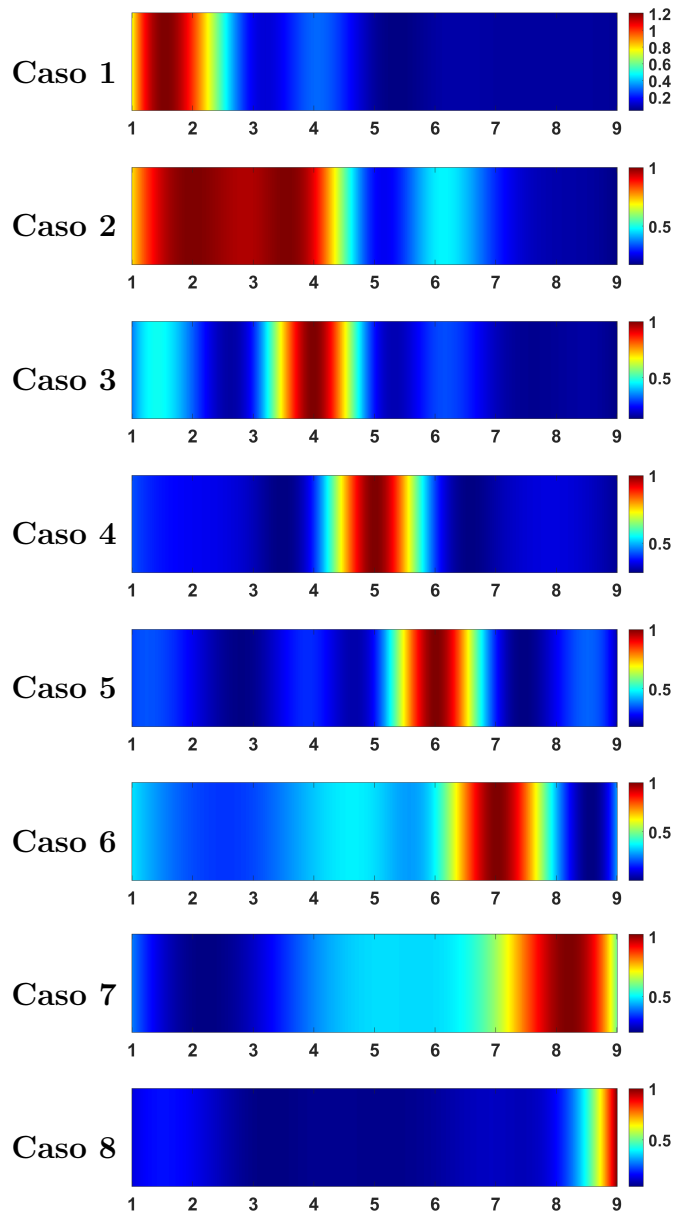


FIGURA A.10: Dano a 25%, sem ruído (0-500Hz)

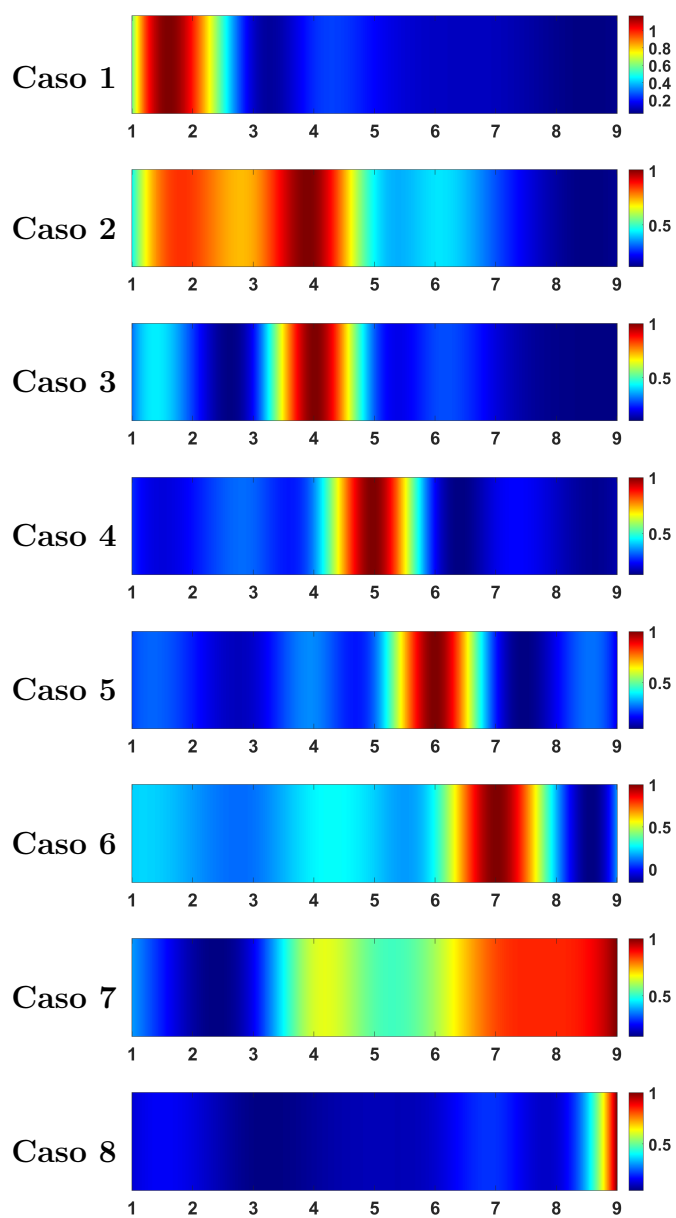


FIGURA A.11: Dano a 25%, sem ruído (0-750Hz)

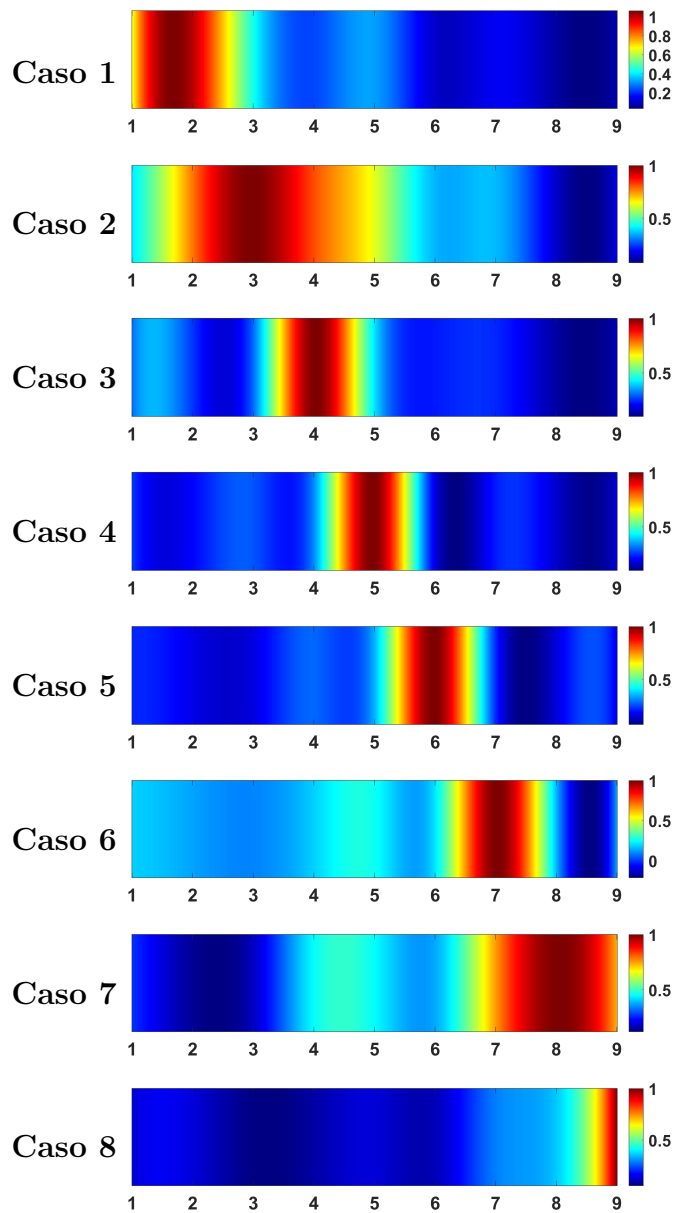


FIGURA A.12: Dano a 25%, sem ruído (0-1000Hz)

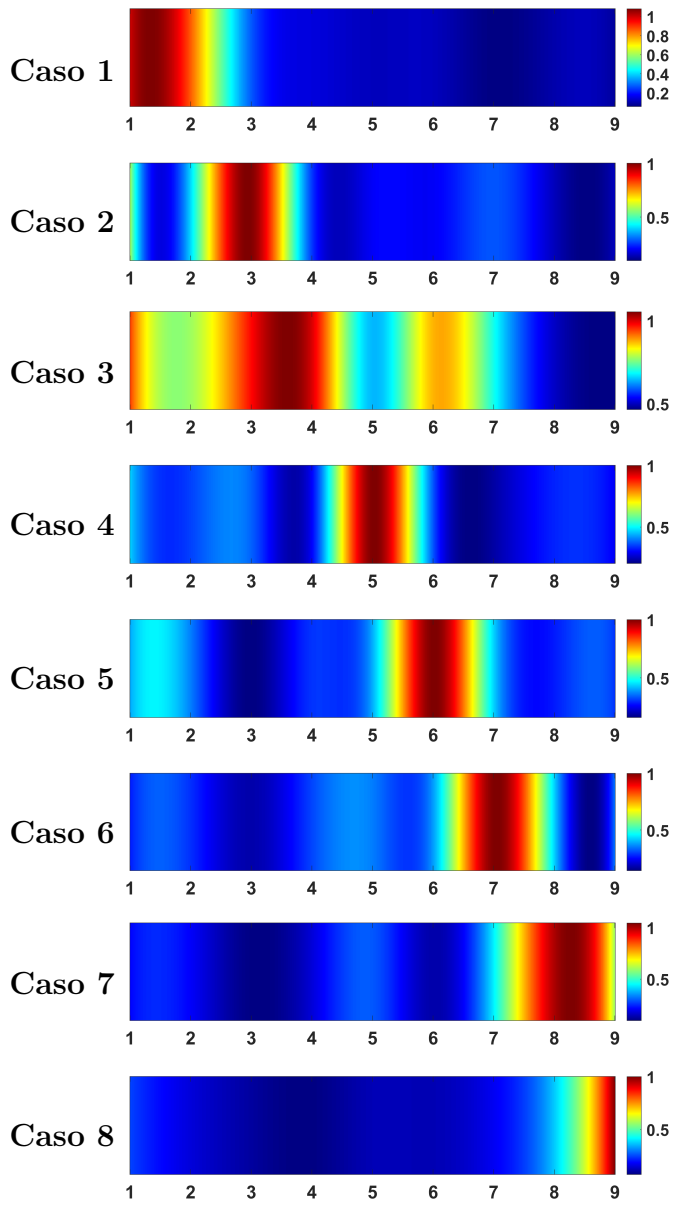


FIGURA A.13: Dano a 50%, sem ruído (0-250Hz)

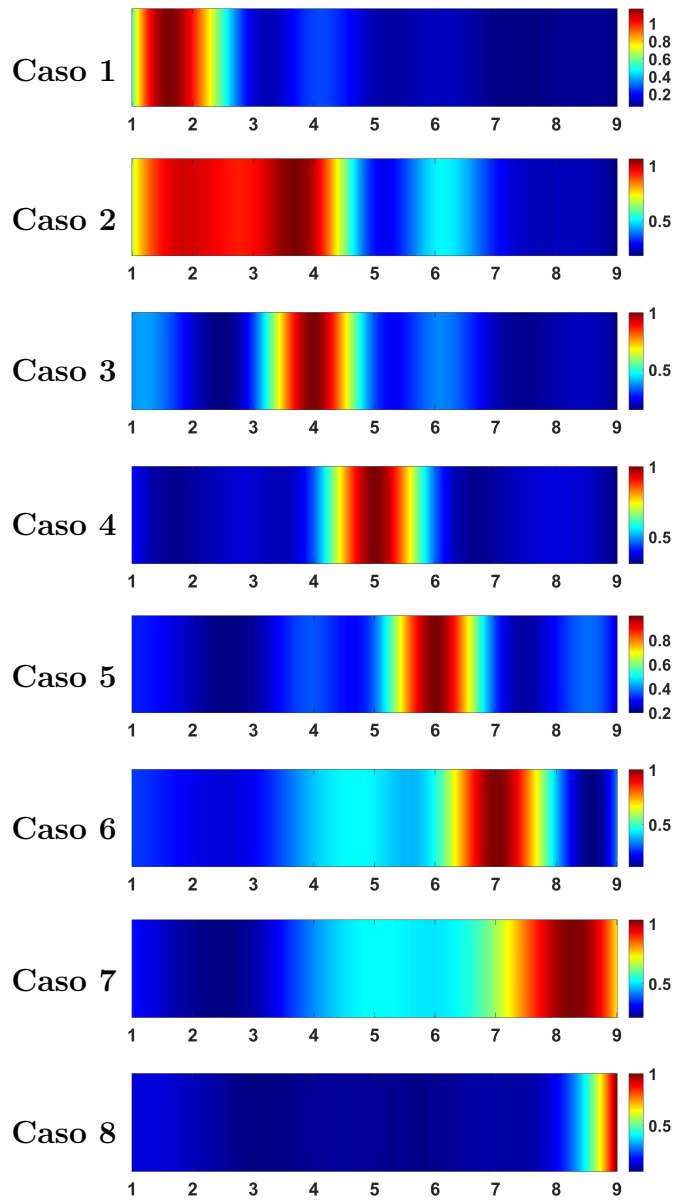


FIGURA A.14: Dano a 50%, sem ruído (0-500Hz)

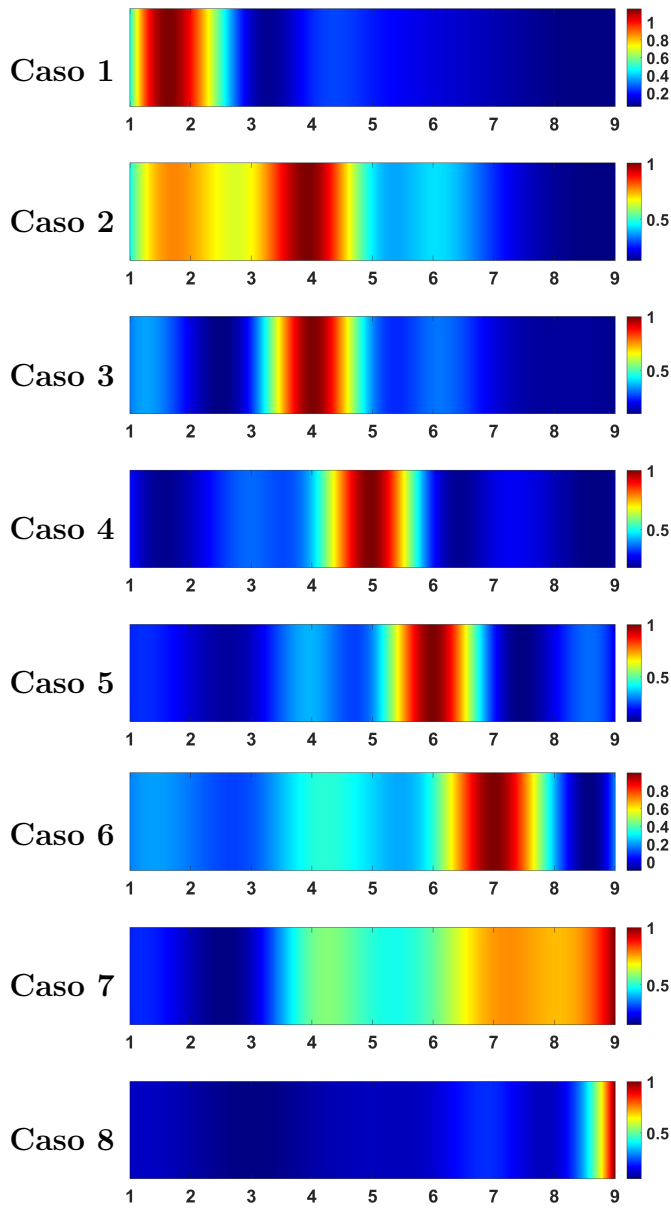


FIGURA A.15: Dano a 50%, sem ruído (0-750Hz)

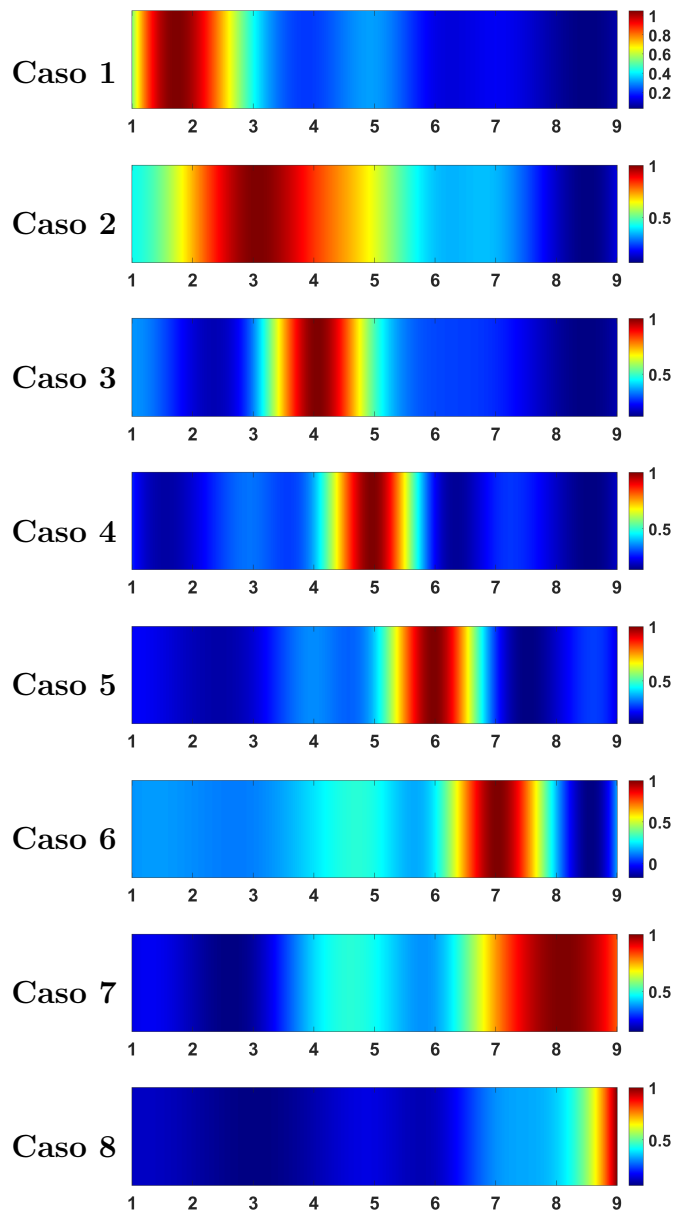


FIGURA A.16: Dano a 50%, sem ruído (0-1000Hz)

Apêndice B - Resultados numéricos obtidos através do DRQ na viga

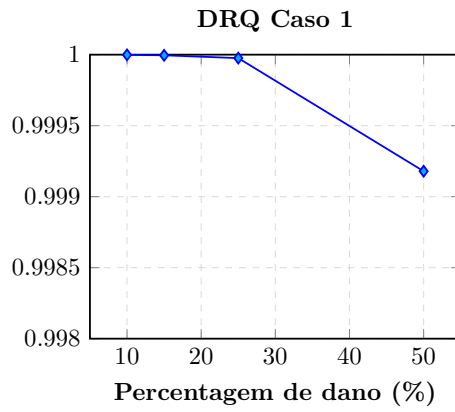


FIGURA B.1: DRQ
Caso 1

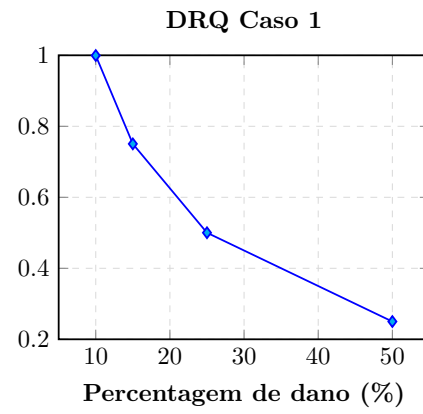


FIGURA B.2: DRQ
Caso 1 com máximas
ocorrências

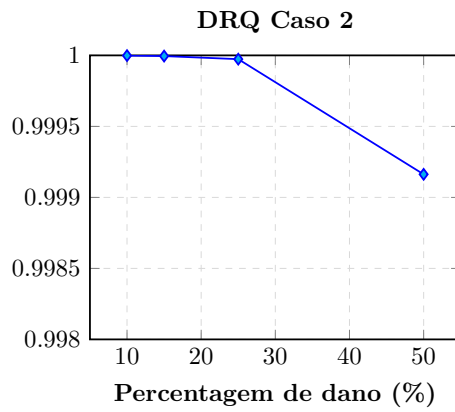


FIGURA B.3: DRQ
Caso 2

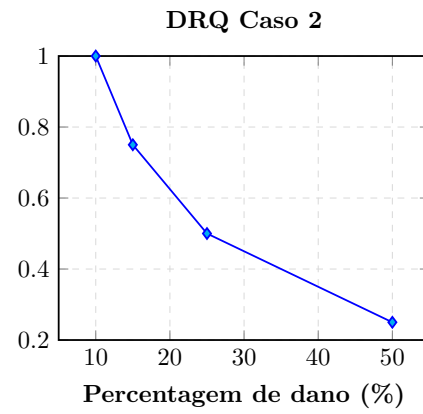


FIGURA B.4: DRQ
Caso 2 com máximas
ocorrências

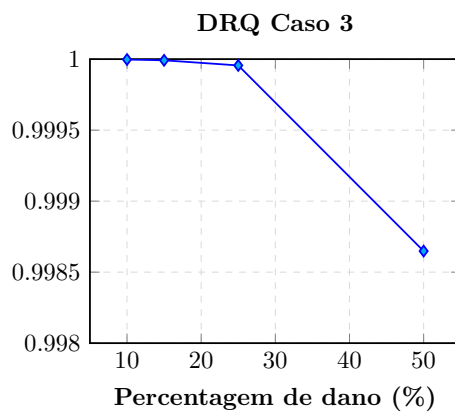


FIGURA B.5: DRQ
Caso 3

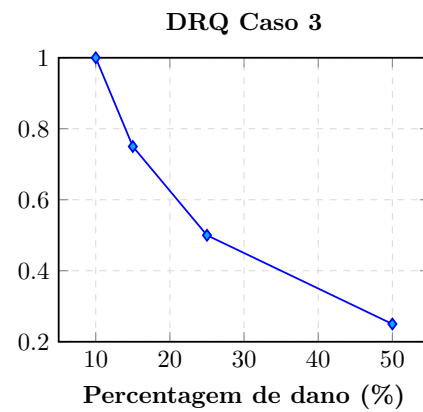


FIGURA B.6: DRQ
Caso 3 com máximas
ocorrências

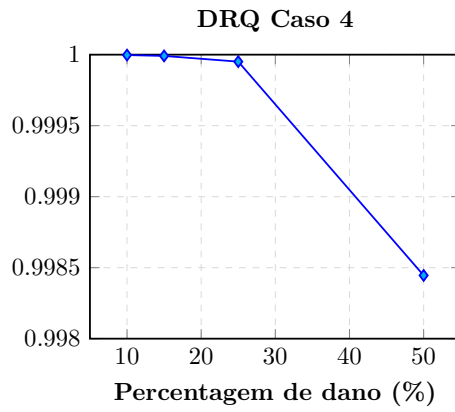


FIGURA B.7: DRQ
Caso 4

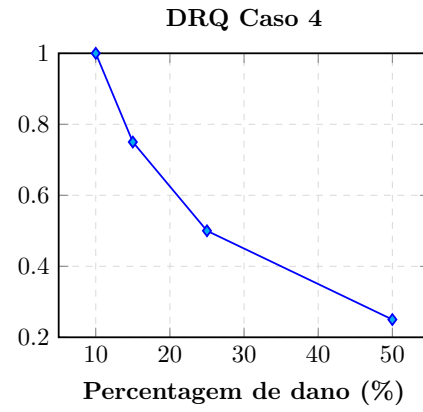


FIGURA B.8: DRQ
Caso 4 com máximas
ocorrências

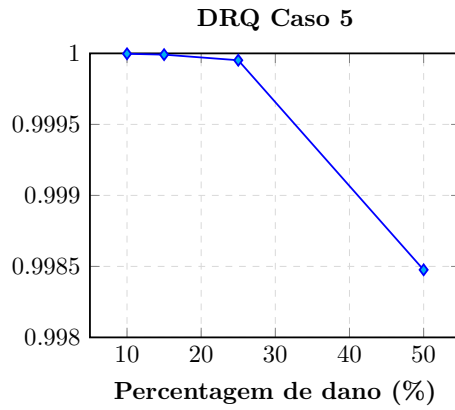


FIGURA B.9: DRQ
Caso 5

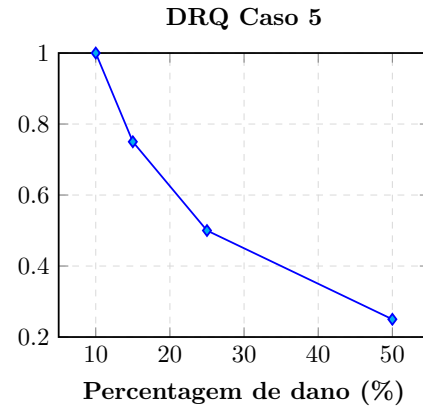


FIGURA B.10: DRQ
Caso 5 com máximas
ocorrências

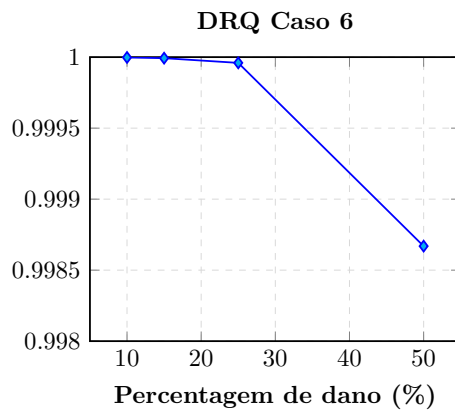


FIGURA B.11: DRQ
Caso 6

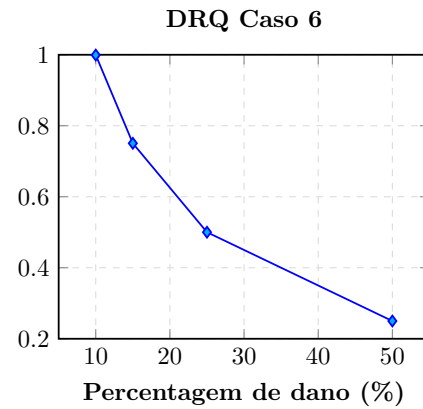


FIGURA B.12: DRQ
Caso 6 com máximas
ocorrências

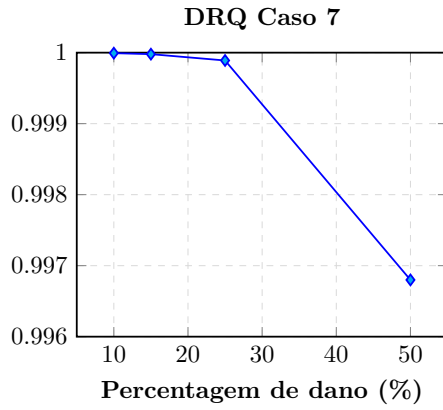


FIGURA B.13: DRQ
Caso 7

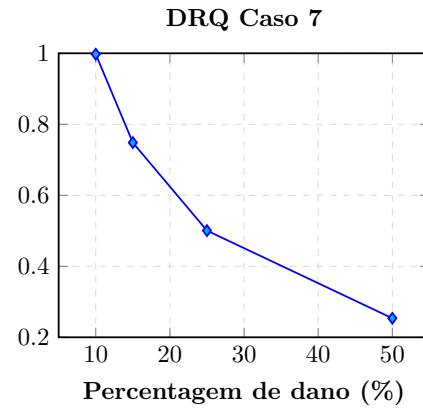


FIGURA B.14: DRQ
Caso 7 com máximas
ocorrências

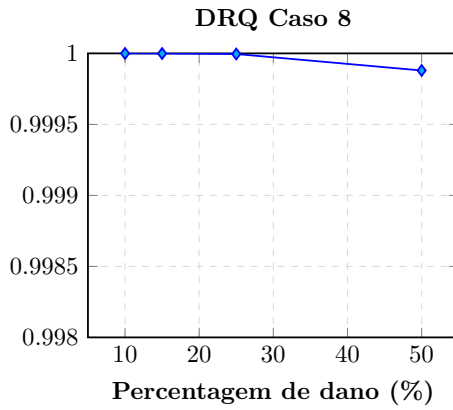


FIGURA B.15: DRQ
Caso 8

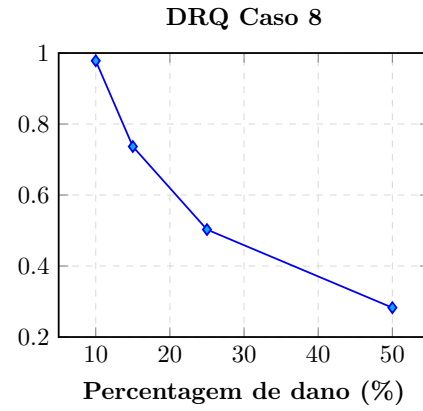


FIGURA B.16: DRQ
Caso 8 com máximas
ocorrências

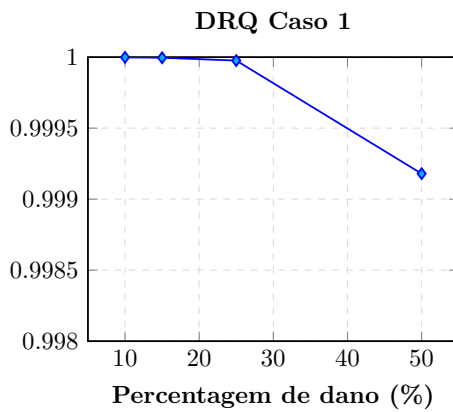


FIGURA B.17: DRQ
Caso 1 com 2% de
ruído

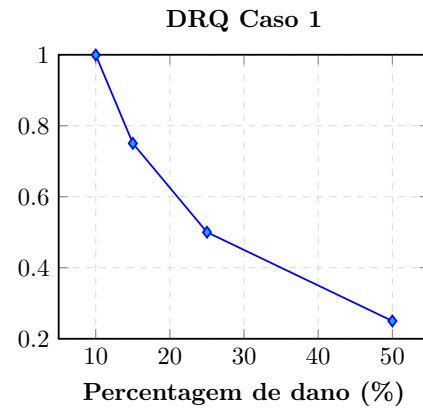


FIGURA B.18: DRQ
Caso 1 com máximas
ocorrências e 2% de
ruído

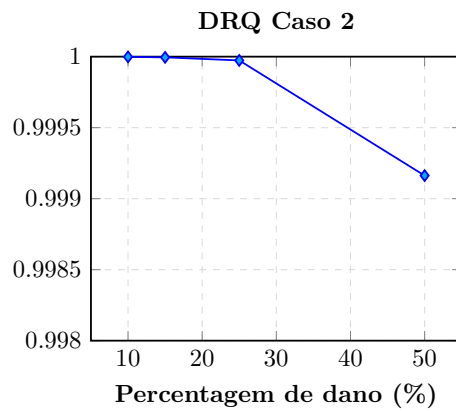


FIGURA B.19: DRQ
Caso 2 com 2% de
ruído

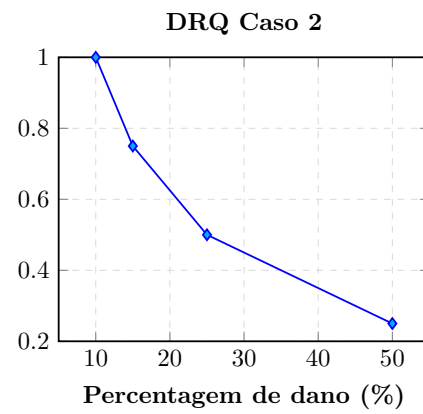


FIGURA B.20: DRQ
Caso 2 com máximas
ocorrências e 2% de
ruído

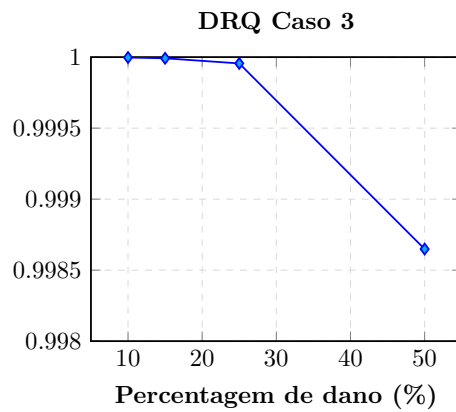


FIGURA B.21: DRQ
Caso 3 com 2% de
ruído

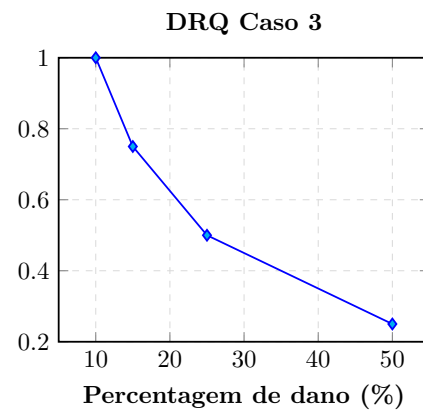


FIGURA B.22: DRQ
Caso 3 com máximas
ocorrências e 2% de
ruído

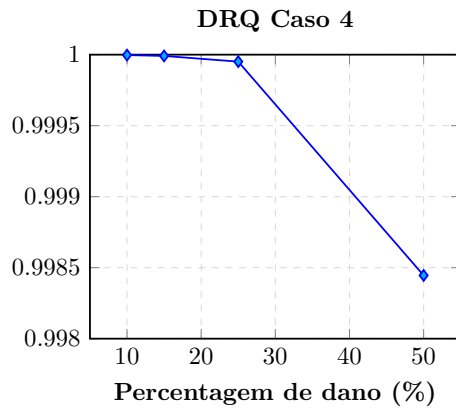


FIGURA B.23: DRQ
Caso 4 com 2% de
ruído

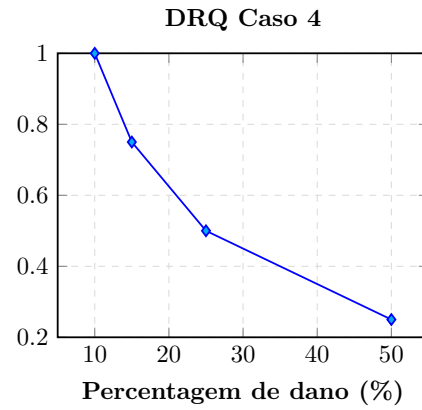


FIGURA B.24: DRQ
Caso 4 com máximas
ocorrências e 2% de
ruído

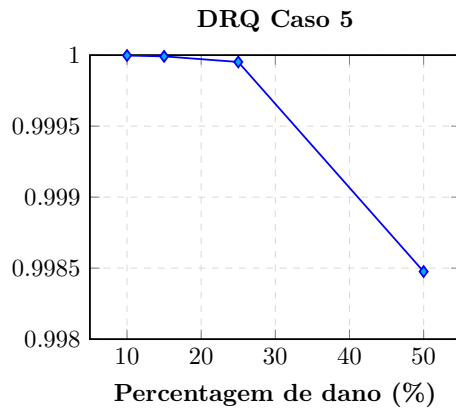


FIGURA B.25: DRQ
Caso 5 com 2% de
ruído

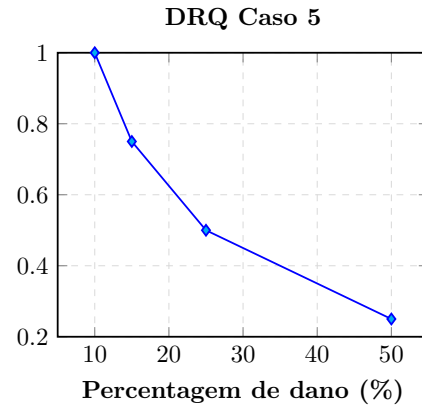


FIGURA B.26: DRQ
Caso 5 com máximas
ocorrências e 2% de
ruído

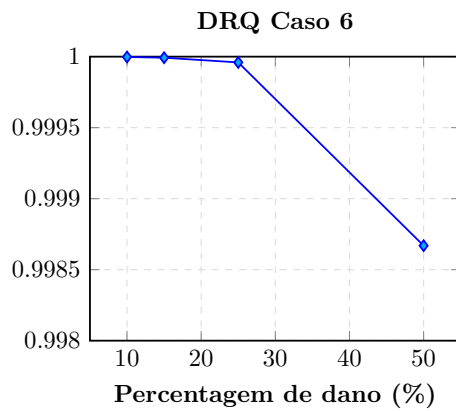


FIGURA B.27: DRQ
Caso 6 com 2% de
ruído

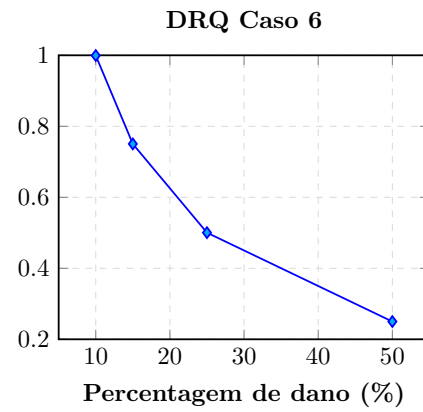


FIGURA B.28: DRQ
Caso 6 com máximas
ocorrências e 2% de
ruído

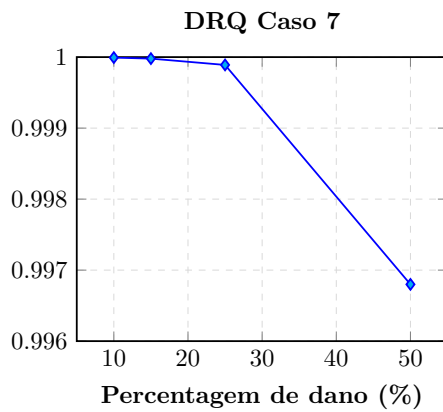


FIGURA B.29: DRQ
Caso 7 com 2% de
ruído

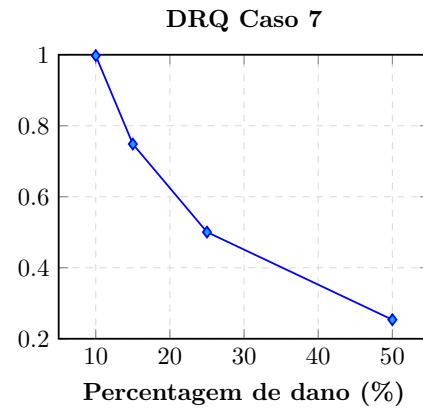


FIGURA B.30: DRQ
Caso 7 com máximas
ocorrências e 2% de
ruído

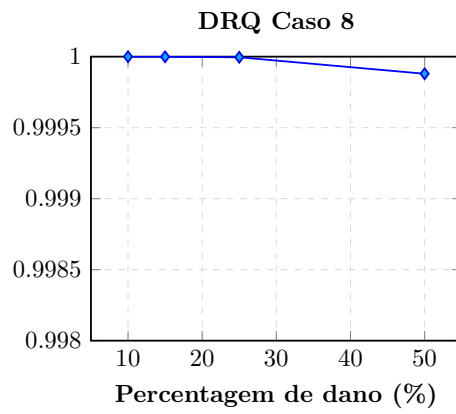


FIGURA B.31: DRQ
Caso 8 com 2% de
ruído

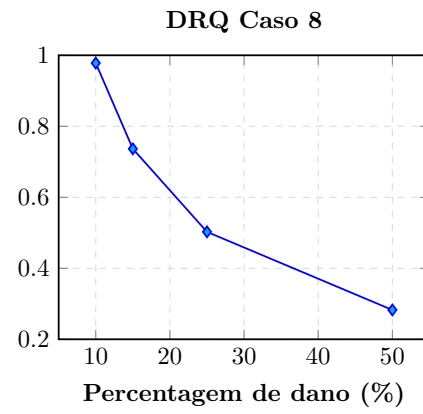


FIGURA B.32: DRQ
Caso 8 com máximas
ocorrências e 2% de
ruído

Apêndice C - Resultados experimentais obtidos através do MC na viga

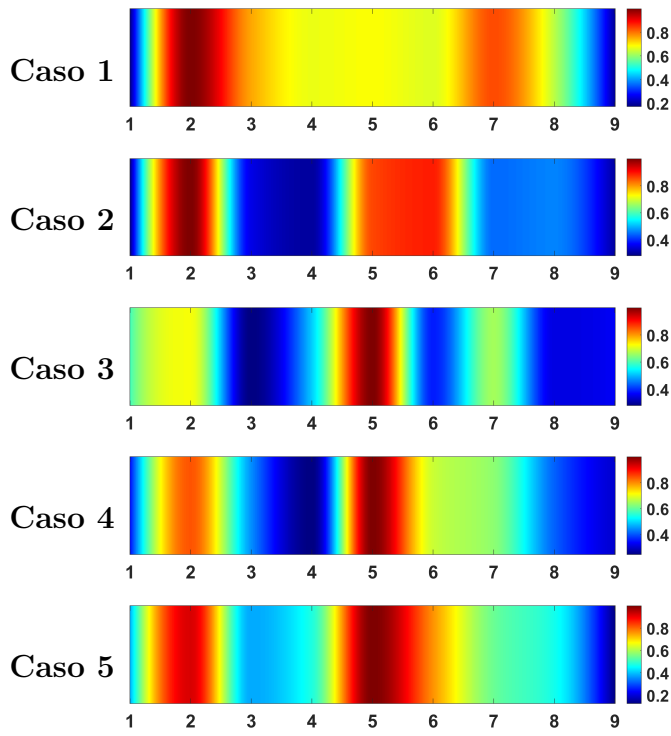


FIGURA C.1: Dano 1 (0-250Hz)

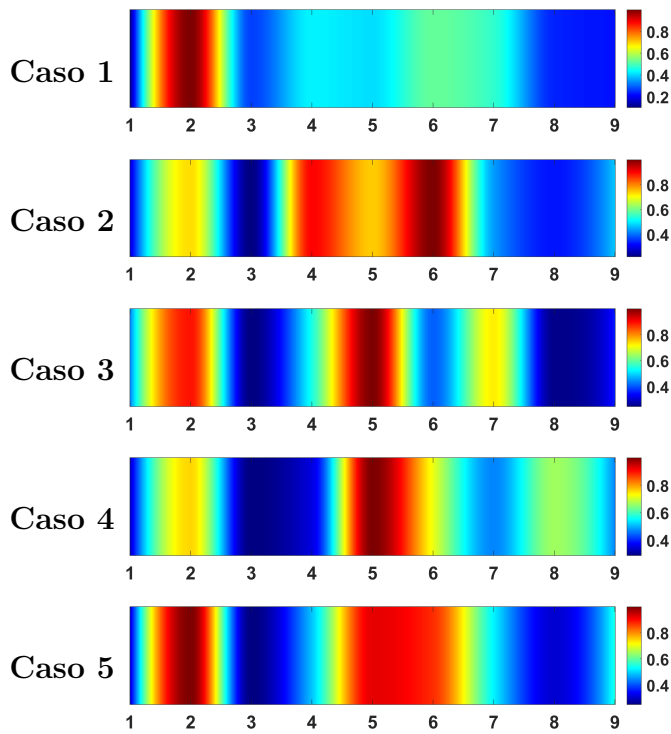


FIGURA C.2: Dano 1 (0-500Hz)

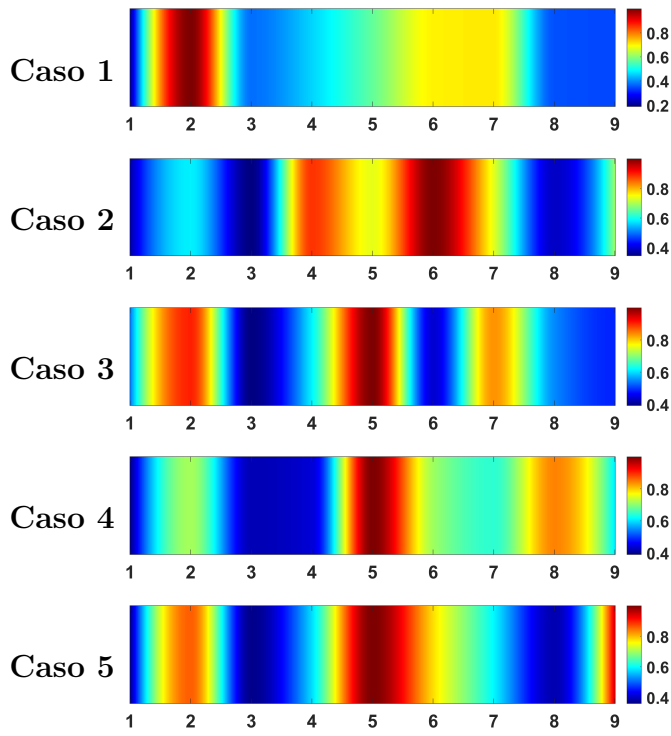


FIGURA C.3: Dano 1 (0-750Hz)

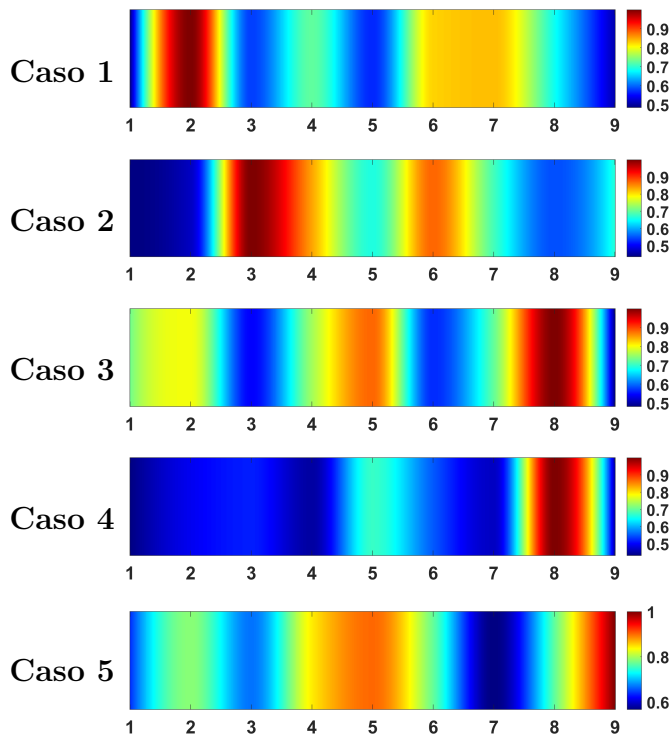


FIGURA C.4: Dano 1 (0-1000Hz)

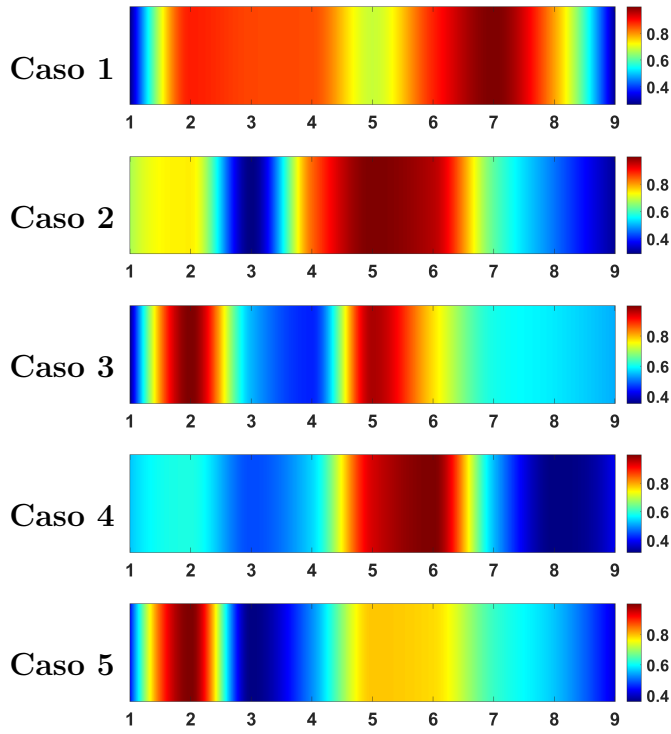


FIGURA C.5: Dano 2 (0-250Hz)

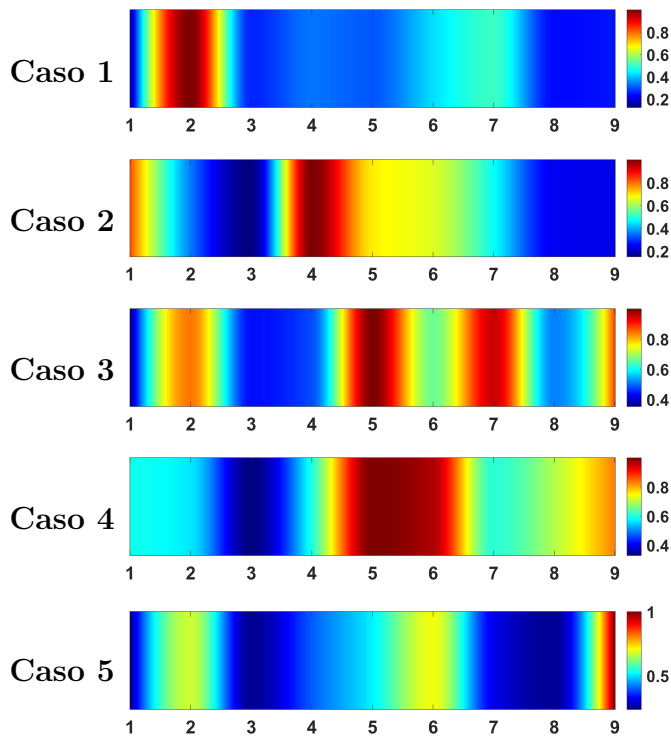


FIGURA C.6: Dano 2 (0-500Hz)

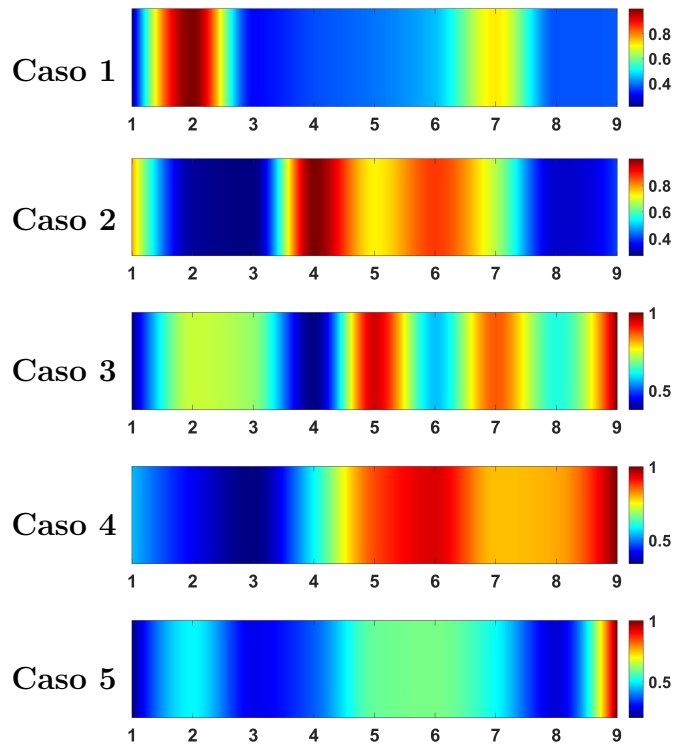


FIGURA C.7: Dano 2 (0-750Hz)

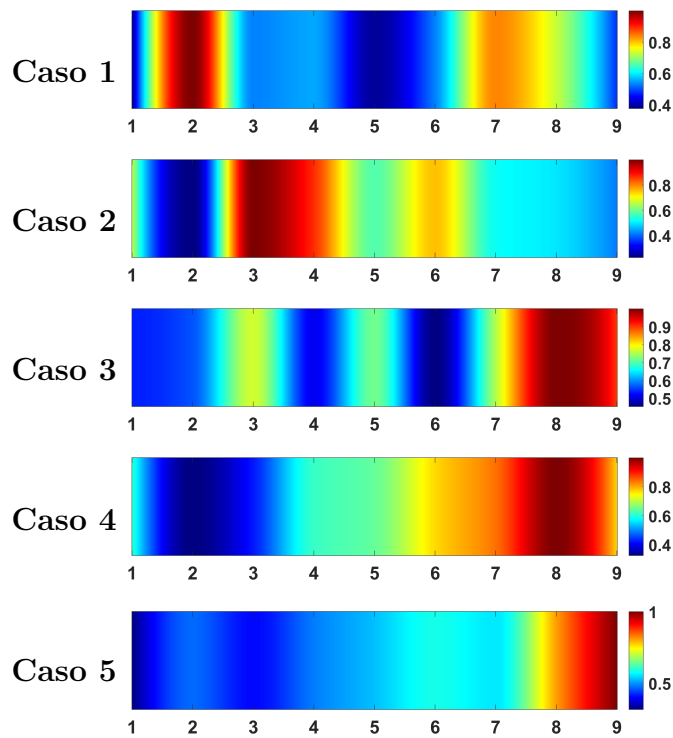


FIGURA C.8: Dano 2 (0-1000Hz)

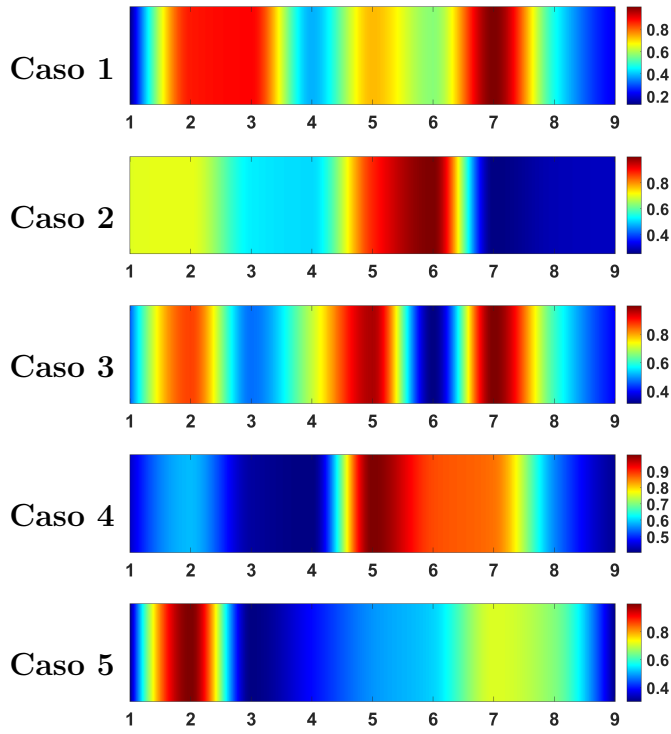


FIGURA C.9: Dano 3 (0-250Hz)

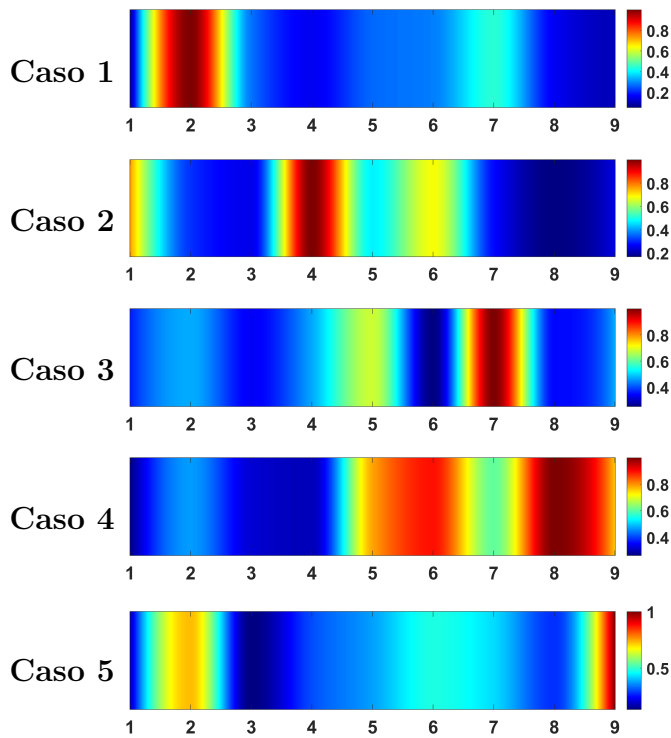


FIGURA C.10: Dano 3 (0-500Hz)

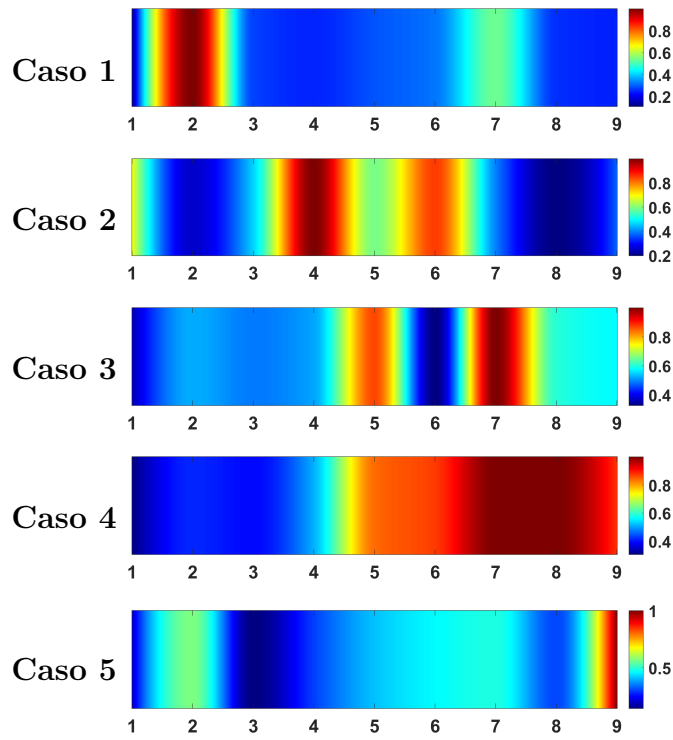


FIGURA C.11: Dano 3 (0-750Hz)

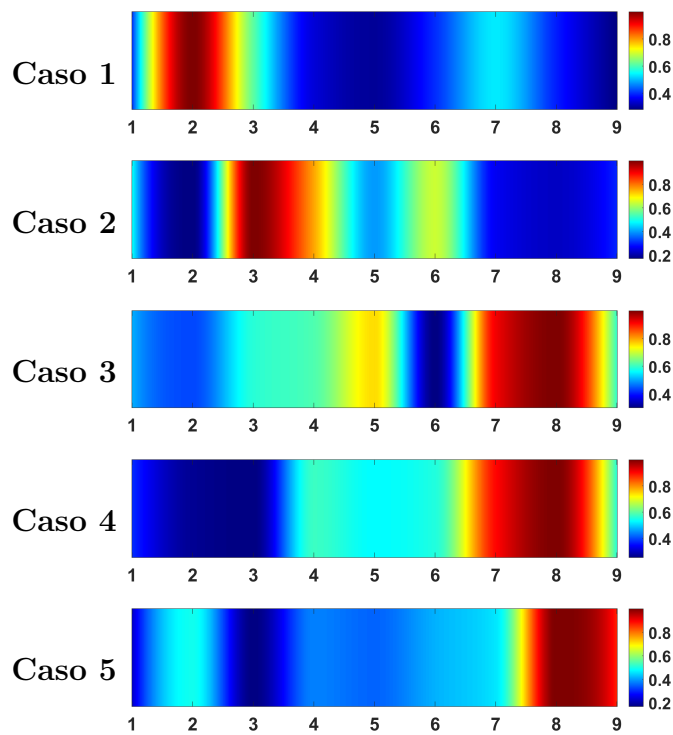


FIGURA C.12: Dano 3 (0-1000Hz)

Apêndice D - Resultados experimentais obtidos através do DRQ na viga

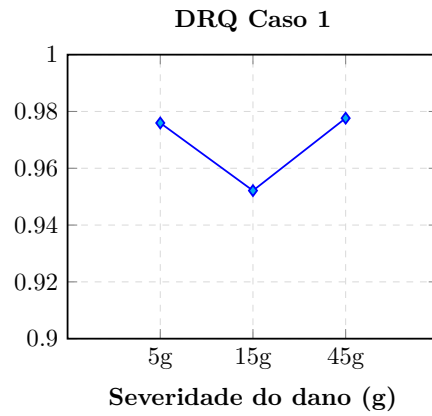


FIGURA D.1: DRQ
Caso 1

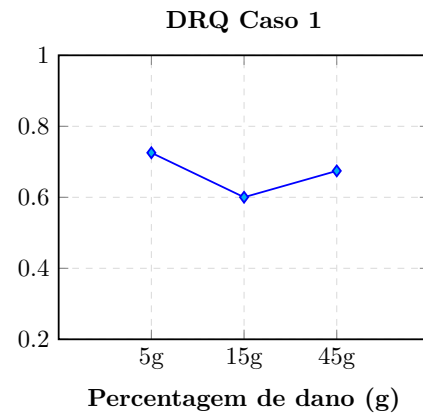


FIGURA D.2: DRQ
Caso 1 com máximas
ocorrências

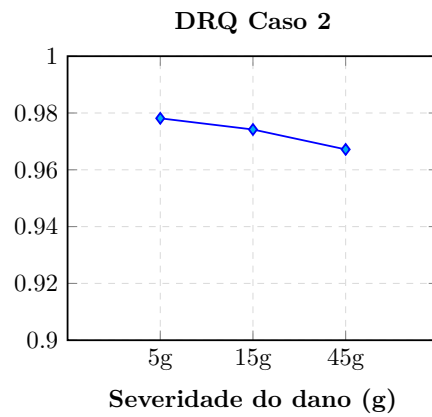


FIGURA D.3: DRQ
Caso 2

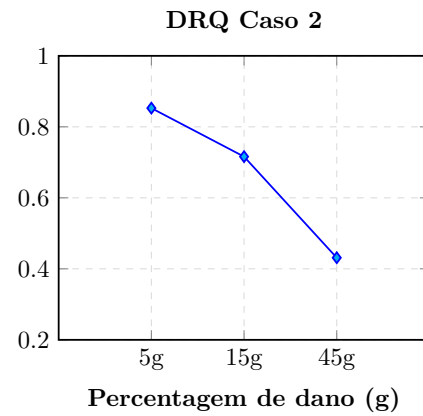


FIGURA D.4: DRQ
Caso 2 com máximas
ocorrências

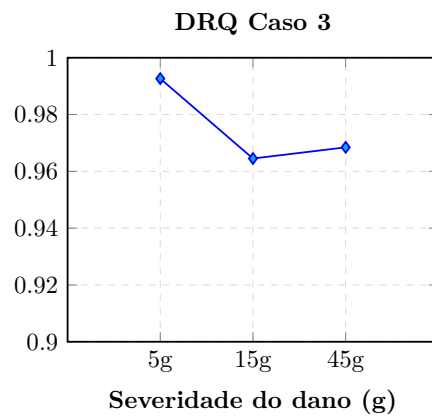


FIGURA D.5: DRQ
Caso 3

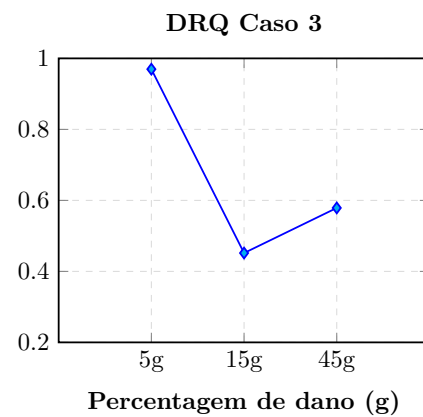


FIGURA D.6: DRQ
Caso 3 com máximas
ocorrências

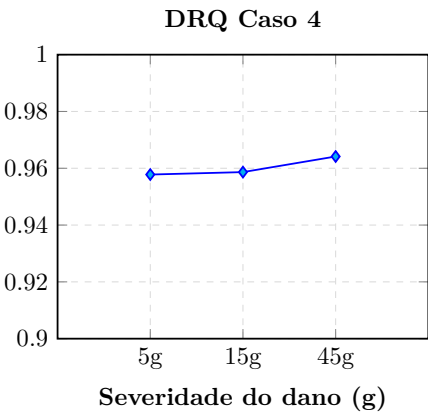


FIGURA D.7: DRQ
Caso 4

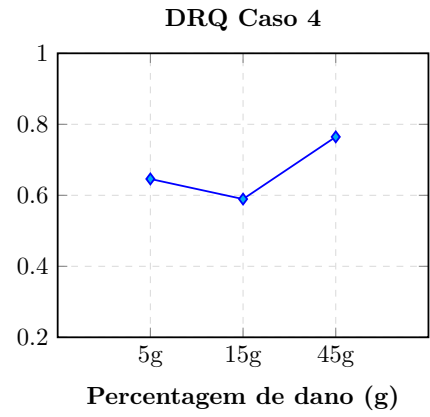


FIGURA D.8: DRQ
Caso 4 com máximas
ocorrências

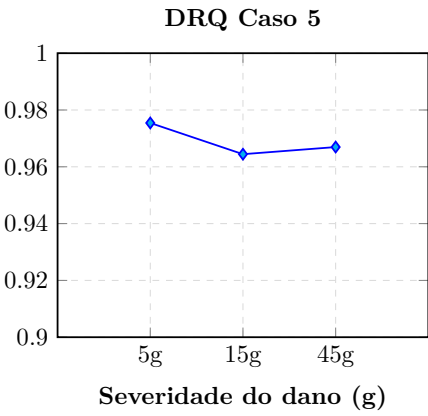


FIGURA D.9: DRQ
Caso 5

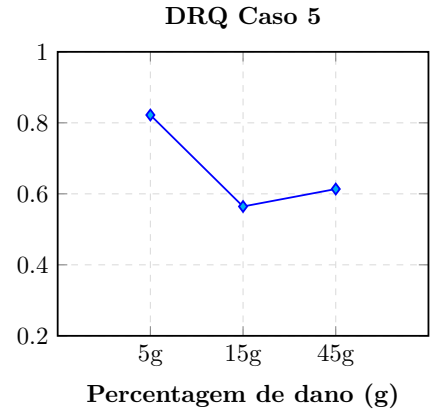


FIGURA D.10: DRQ
Caso 5 com máximas
ocorrências

Apêndice E - Resultados experimentais obtidos através do MC no *Leo Rover*

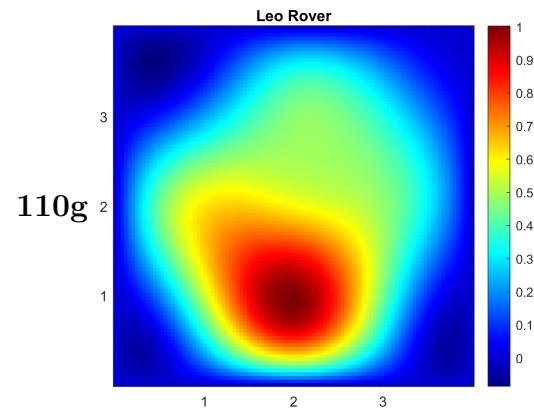
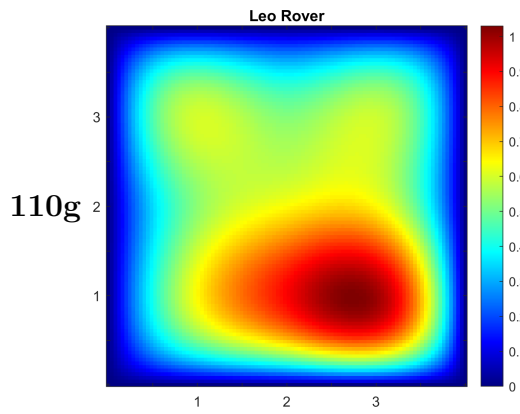
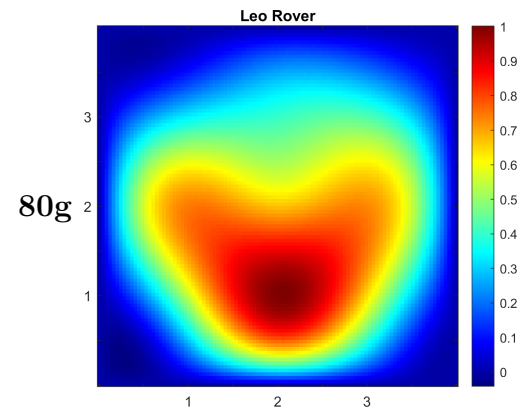
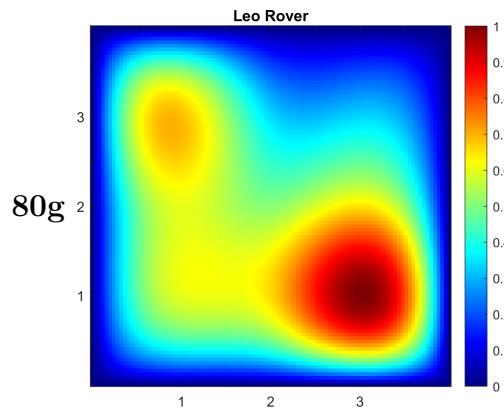
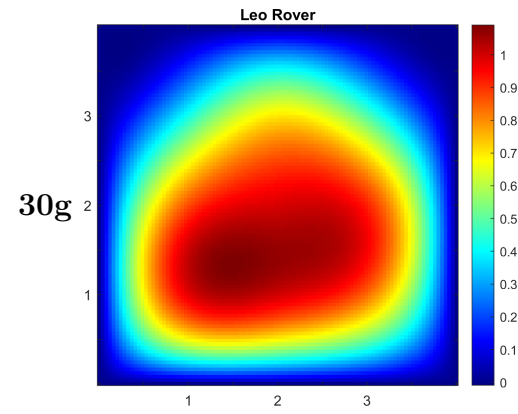
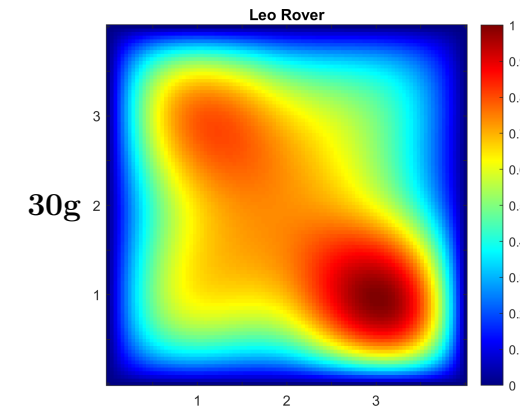


FIGURA E.1: Dano 1,
(0–1000Hz)

FIGURA E.2: Dano 2,
(0–1000Hz)

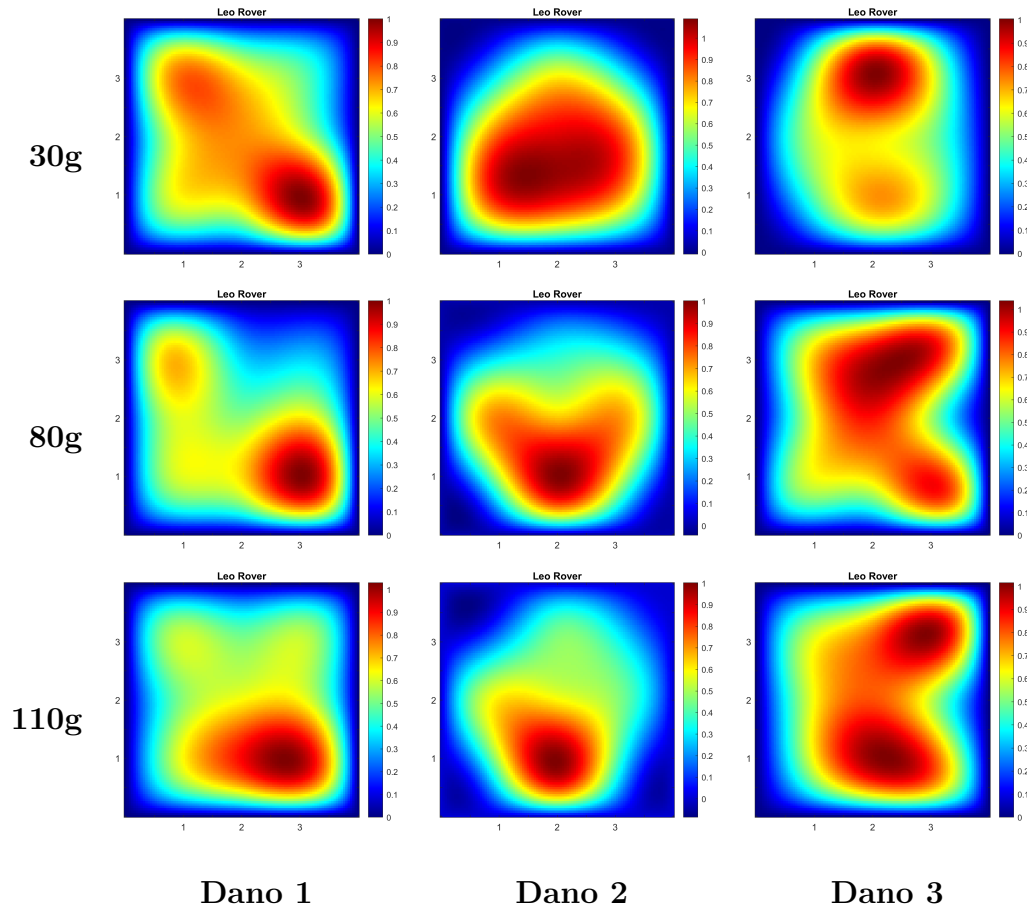


FIGURA E.3: Comparação visual dos diferentes danos (0–1000Hz)

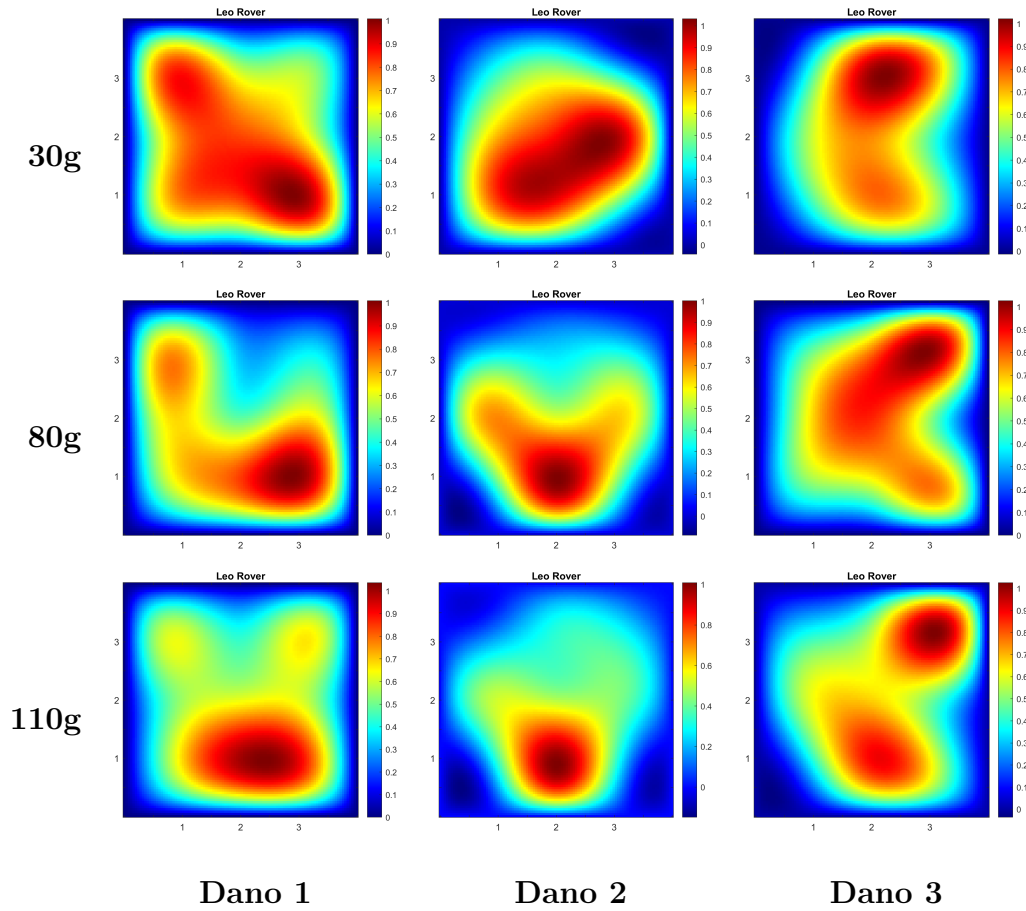


FIGURA E.4: Comparação visual dos diferentes danos (0–750Hz)

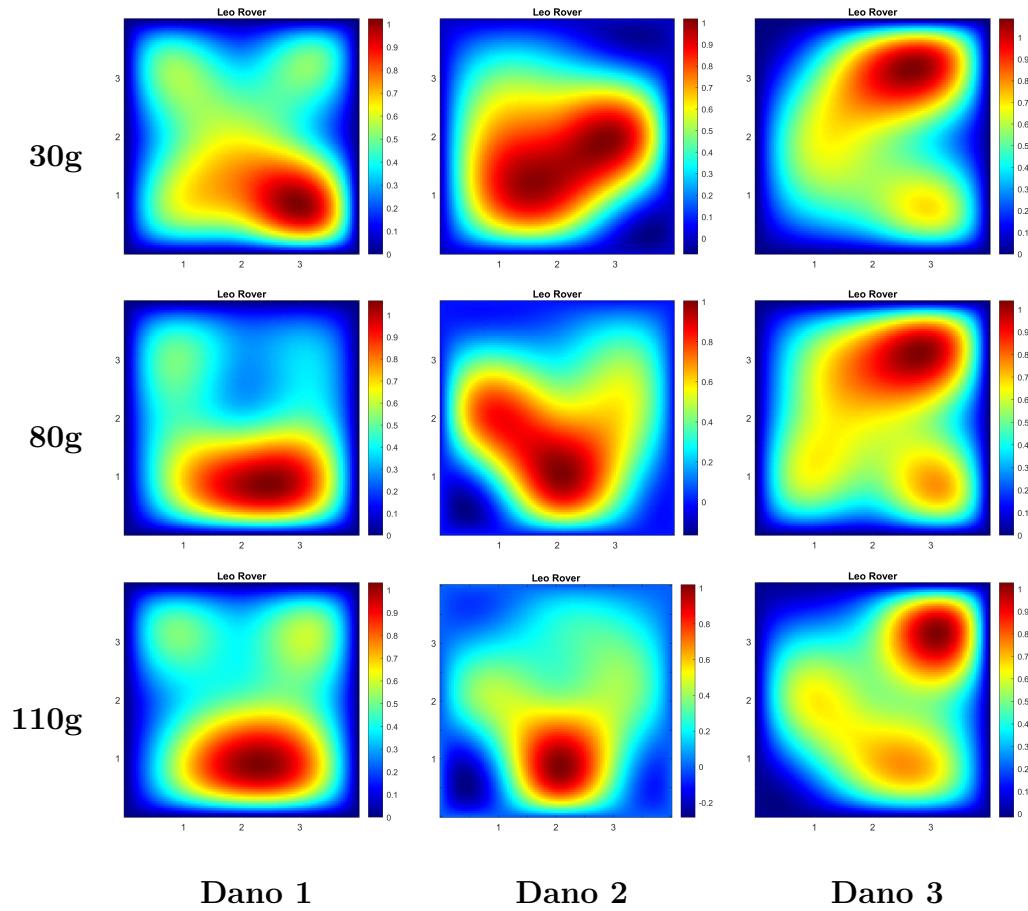


FIGURA E.5: Comparação visual dos diferentes danos (0–500Hz)

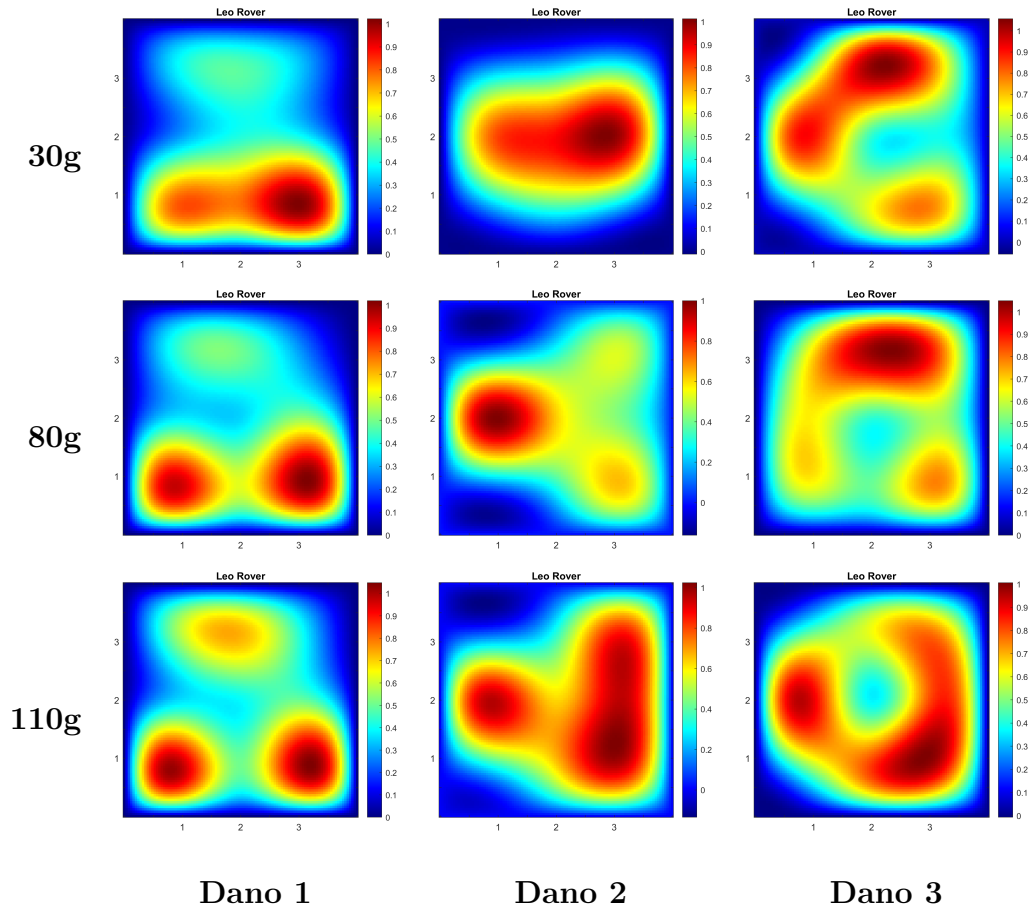


FIGURA E.6: Comparação visual dos diferentes danos (0–250Hz)

Apêndice F - Resultados experimentais obtidos através do DRQ no *Leo Rover*

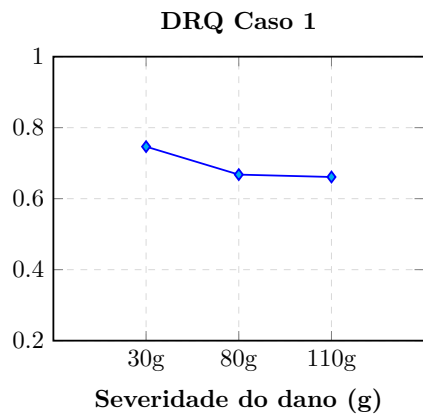


FIGURA F.1: DRQ
Caso 1

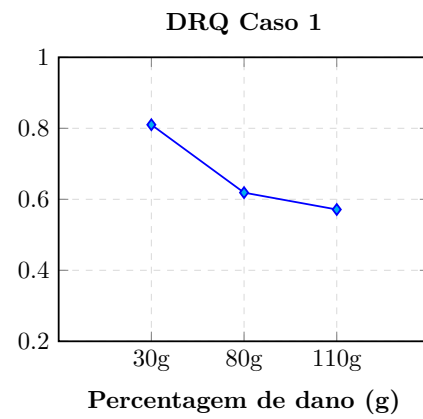


FIGURA F.2: DRQ
Caso 1 com máximas
ocorrências

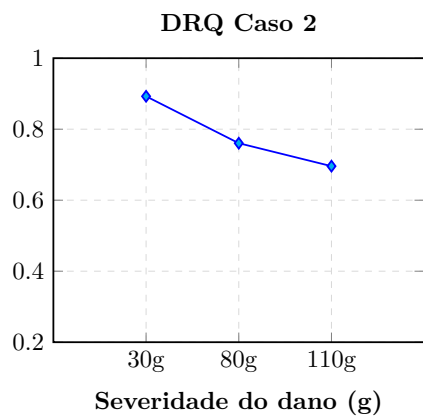


FIGURA F.3: DRQ
Caso 2

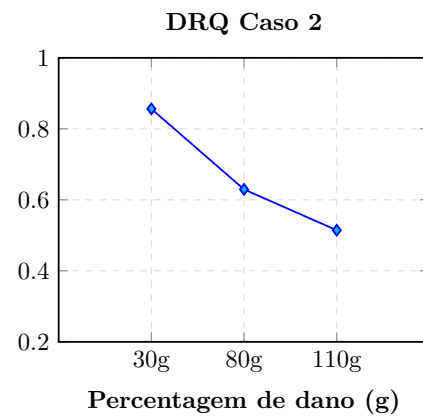


FIGURA F.4: DRQ
Caso 2 com máximas
ocorrências

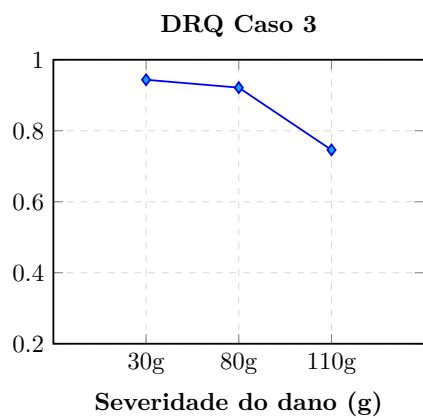


FIGURA F.5: DRQ
Caso 3

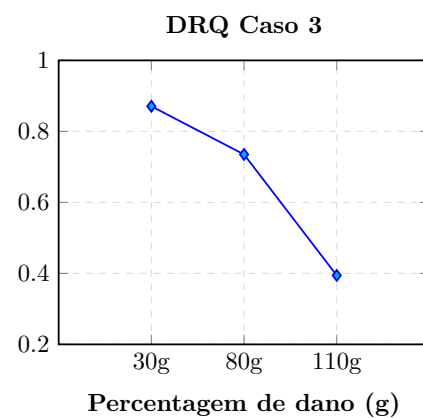


FIGURA F.6: DRQ
Caso 3 com máximas
ocorrências

Apêndice G - Lista de código *ANY**S* *APDL*

```

1 FINISH
2 /CLEAR,START
3 !
4 /PREP7
5 !
6 !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! PARAMETROS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
7 DAMGAGE=10 !Dano em percentagem
8 LOCAL_DO_DANO=940 !Local do dano em [mm]
9 FORCE_INPUT_NODE=970 !Local da forca
10
11 THK_BEAM=0.006 !ESPESSURA da
    VIGA
12 W_BEAM=0.035 !Largura da viga
13 delta_x=1E-3 !tamanho do
    elemento
14 NSTEPS=1600 !Numero de divisoes na frequencia
15 FREQ_I=0 !frequencia inicial
16 FREQ_F=1000 !frequencia final
17 !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
18 !
19 ET,1,BEAM188 !Elemento VIGA
20 !
21 !!!!!!!CARACTERIZACAO DO MATERIAL VIGA !!!!!!!
22 !
23 MPTEMP,,,,,,,,
24 MPTEMP,1,0
25 MPDATA,EX,1,,210e9 !Modulo de Young
26 MPDATA,PRXY,1,,0.3 !Coeficiente de Poisson
27 MPTEMP,,,,,,,,
28 MPTEMP,1,0
29 MPDATA,DENS,1,,7850 !Densidade
30 !
31 MPDATA,DMPR,1,,0.001
32 !
33 !!!!!!! SECCOES TRANSVERSAIS !!!!!!!
34 !
35 SECTYPE, 1, BEAM, RECT, SD1, 0
36 SECOFFSET, CENT
37 SECDATA,THK_BEAM,W_BEAM,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0 !Forma retangular Sem
    dano (SD)
38 !
39 SECTYPE, 2, BEAM, RECT, SD2, 0
40 SECOFFSET, USER, THK_BEAM/2-THK_BEAM*(1-DAMGAGE/100)/2, 0 !Offset
    de modo a ficar alinhado em baixo

```

```

41 SECDATA ,THK_BEAM*(1-DAMAGE/100),W_BEAM,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0 !Forma
    retangular Com dano (CD)
42 !
43 !!!!! KEYPOINTS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! Cria os pontos necessarios
44 !
45 *DO,i,1,980 !Extremidade a
    980 mm da origem
46 K,i,delta_x*i,0,0,
47 *ENDDO
48 !
49 !!!!! LINHAS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! Une os pontos atraves de linhas
50 !
51 !LSTR, 100, 1
52 !
53 *DO,i,1,979
54 LSTR, i, i+1
55 *ENDDO
56 !
57 !!!!!MESH!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!Geracao da malha na viga
58 !
59 !COM DANO
60 TYPE, 1
61 MAT, 1
62 REAL,
63 ESYS, 0
64 SECNUM, 1
65 LESIZE,ALL, , ,1, ,1, , ,1,
66 !
67 LSEL, , , , ALL
68 LATT,1, ,1, , , ,1
69 !
70 !LINHA COM DANO
71 !
72 LSEL, S, , , LOCAL_DO_DANO !Atribui seccao com dano no
    local pretendido
73 LATT,1, ,1, , , ,2
74 !
75 LSEL,S , , , ALL
76 !
77 LMESH,ALL
78 FINISH
79 /SOL
80 !
81 !
82 ANTYPE,3

```

```

83  !*
84  !*
85  HROPT ,FULL
86  HROUT ,ON
87  LUMPM ,0
88  !*
89  EQSLV , ,0,
90  PSTRES ,0
91  !
92  !
93  !
94  !
95  FK ,FORCE_INPUT_NODE ,FY ,-1,      !Aplicacao da forca
96  HARFRQ ,FREQ_I ,FREQ_F ,
97  NSUBST ,NSTEPS ,
98  KBC ,1
99  !
100 SOLVE
101 FINISH
102 /POST26
103 !
104 !
105 NUMVAR ,2000
106 !
107 !
108 !!!!!!!!!!!!!FICHEIRO txt DE RESULTADOS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
109 !Selecione o no
110 !Guarda ficheiro
111 N_NODE=10
112 NSTEPS_SOL = NSTEPS
113 NSOL ,2,N_NODE,U,Y,UY_%FORCE_INPUT_NODE%_%N_NODE%
114 *DIM,FRF_UY,TABLE,NSTEPS_SOL,3
115 /OUTPUT , 'FRF_CD%DAMAGE%_UY_%LOCAL_DO_DANO%_%FORCE_INPUT_NODE%_%
      N_NODE%', 'txt', '.'
116 VGET ,FRF_UY(1,0),1
117 VGET ,FRF_UY(1,1),2,,0
118 VGET ,FRF_UY(1,2),2,,1
119 *VWRITE ,FRF_UY(1,0),FRF_UY(1,1),FRF_UY(1,2)
120 (3E14.6)
121 ...
122 (repetir os blocos acima para todos os nos desejados: 83, 164, ...,
      970)
123 ...
124 /OUTPUT                                     ! Restaura o
      output para a tela

```

```
125 FINISH
126
127 EPLOTT
128 /SHRINK ,0
129 /ESHAPE ,1
130 /EFACET ,1
131 /RATIO ,1,1,1
132 /CFORMAT ,32,0
133 /REPLOT
```


Apêndice H - Lista de código *MATLAB* para DRQ numérico

```

1 %Codigo de analise de resultados obtidos em ANSYS
2 %Caso se mude de pasta e necessario alterar os file_path
3
4 clear all
5
6 %Parametrizacao
7 n_pontos_medicao=9;
8 freq_min=1;
9 freq_max=1000;
10 substeps=1600;
11 deltaf=freq_max/substeps;
12 %Onde se limita a gama de frequencia
13 ultimosub=1600;
14 primeirosub=1;
15 %
16 gama_freq=primeirosub:ultimosub;
17 tamanho=ultimosub-primeirosub+1;
18 niveis_dano=[10,15,25,50]; %Niveis de dano em analise
19 perc_ruido=0; %0 ou 2 (em percentagem)
20 node=[10,83,164,246,327,490,654,818,970]; %Nos em analise
21 forca_input=10; %Pode-se escolher qualquer um dos pontos
    de aplicacao de forca
22 local_dano=940; %50,140,240,340,500,660,860,940
23
24 %Fim parametrizacao
25
26 %j posicao da forca
27 %i posicao do no de medicao
28
29 Dano_store = cell(4,4); % Cria um cell array para armazenar os valores
30 Sem_dano_store = cell(4,4); % Cria um cell array para armazenar os valores
31
32 %Abertura/Leitura dos ficheiros gerados em ANSYS
33
34 for d=1:4 %Ciclo para o mesmo nivel de dano
35
36     perc_dano=niveis_dano(d);
37
38     for h = 1:n_pontos_medicao %Percorre todos os pontos de medicao

```

```

39
40     N_NODE=node(h);
41
42     % Le o ficheiro com dano
43     file_path = sprintf('Caminho ficheiro', perc_dano,perc_dano,
44 local_dano, forca_input, N_NODE);
45     data = readtable(file_path, "NumHeaderLines", 18);          % Ignora
46     as 18 primeiras linhas
47     dataStruct.(sprintf('node_%d_com_dano', N_NODE)) = data; %
48     Armazena dados com dano
49
50     % Le o ficheiro sem dano
51     file_path = sprintf('Caminho ficheiro',forca_input, N_NODE);
52     data = readtable(file_path, "NumHeaderLines", 18);          % Ignora
53     as 18 primeiras linhas
54     dataStruct.(sprintf('node_%d_sem_dano', N_NODE)) = data; %
55     Armazena dados sem dano
56
57     % Acesso aos dados com e sem dano para um no especifico
58     dano = dataStruct.(sprintf('node_%d_com_dano', N_NODE));
59     semdano = dataStruct.(sprintf('node_%d_sem_dano', N_NODE));
60     matriz_dano_real(:,h)=table2array([dano(gama_freq,"Var2")]) ;
61     matriz_sem_dano_real(:,h)=table2array([semdano(gama_freq,"Var2")])
62 ;
63     matriz_dano_imag(:,h)=table2array([dano(gama_freq,"Var3")]);
64     matriz_sem_dano_imag(:,h)=table2array([semdano(gama_freq,"Var3")])
65 ;
66
67 end
68
69 %Formar matriz de numeros imaginarios atraves das duas colunas Re e Im
70 matriz_dano=matriz_dano_real+matriz_dano_imag.*i;
71 matriz_sem_dano=matriz_sem_dano_real+matriz_sem_dano_imag.*i;
72
73 %Aplicacao de ruido
74 if perc_ruido~=0
75     matriz_dano=matriz_dano.*(1+((perc_ruido/100)*(2*(0.5-rand(tamanho
76 ,1)))));
77     matriz_sem_dano=matriz_sem_dano.*(1+((perc_ruido/100)*(2*(0.5-rand
78 (tamanho,1)))));

```

```

70     end
71
72     %Construcao de matriz Dano(i,j)
73     for n=1:n_pontos_medicao
74         Dano_store{n,d}=matriz_dano(:,n);
75         Sem_dano_store{n,d}=matriz_sem_dano(:,n);
76     end
77
78     %Aplicacao do RVAC (para cada nivel dano)
79     for k=1:4
80         a(:,k)=matriz_dano(:,k).*conj(matriz_sem_dano(:,k));
81         b(:,k)=matriz_dano(:,k).*conj(matriz_dano(:,k));
82         c(:,k)=matriz_sem_dano(:,k).*conj(matriz_sem_dano(:,k));
83         soma_a=sum(a,2);
84         soma_b=sum(b,2);
85         soma_c=sum(c,2);
86         RVAC(:,d)=(abs(soma_a)).^2./(soma_b.*soma_c);
87     end
88
89 end %Fim do ciclo para o mesmo nivel de dano
90
91 DRQ=(sum(RVAC,1))/(size(RVAC,1));
92
93 %Maximas ocorrencias
94 for d1 = 1:size(RVAC, 1)
95     [~, sorted_indices] = sort(RVAC(d1, :), 'ascend');
96     Maximas_ocorrenciasRVAC(d1, sorted_indices(1)) = 1;
97     Maximas_ocorrenciasRVAC(d1, sorted_indices(2)) = 2;
98     Maximas_ocorrenciasRVAC(d1, sorted_indices(3)) = 3;
99     Maximas_ocorrenciasRVAC(d1, sorted_indices(4)) = 4;
100 end
101
102 DRQ_maximas=(sum(Maximas_ocorrenciasRVAC,1))/(size(Maximas_ocorrenciasRVAC
    ,1)*4);
103
104 %Graficos
105 figure;
106 x = [10, 15, 25, 50];
107 plot(x, DRQ, '-o');
108 ylim([0.997 1]);

```

```

109 xticks(x);
110 xticklabels({'10%', '15%', '25%', '50%'});
111 xlim([5 55]);
112 grid on;
113 xlabel('Percentagem de dano');
114 ylabel('DRQ');
115
116 figure;
117 x = [10, 15, 25, 50];
118 plot(x, DRQ_maximas, '-o');
119 ylim([0.2 1]);
120 xticks(x);
121 xticklabels({'10%', '15%', '25%', '50%'});
122 xlim([5 55]);
123 grid on;
124 xlabel('Percentagem de dano');
125 ylabel('DRQ com maximas ocorrencias');
126
127 %Grava ficheiros com o nome desejado
128 nome1=sprintf('DRQ_%d_%d_ruido.txt', forca_input, local_dano);
129 DRQ_latex=[x',DRQ'];
130 writematrix(DRQ_latex, nome1 , 'Delimiter', 'tab');
131
132 nome2=sprintf('DRQmaximas_%d_%d_ruido.txt', forca_input, local_dano);
133 DRQ_latex_maximas=[x',DRQ_maximas'];
134 writematrix(DRQ_latex_maximas, nome2, 'Delimiter', 'tab');

```


Apêndice I - Lista de código *MATLAB* para DRQ experimental

```

1 %Codigo de analise de resultados obtidos Experimentalmente
2 %Caso se mude de pasta e necessario alterar os file_path
3
4 clear all
5
6 %Parametrizacao
7 n_pontos_medicao=9;
8 freq_min=1;
9 freq_max=1000;
10 substeps=1600;
11 deltaf=freq_max/substeps;
12 %Onde se limita a gama de frequencia
13 ultimosub=1600;
14 primeirosub=1;
15 %
16 gama_freq=primeirosub:ultimosub;
17 tamanho=ultimosub-primeirosub+1;
18 niveis_dano=[30,80,110];           %Niveis de dano em analise
19 forca_input=4;                     %Sensor utilizado para os calculos
20
21 %Fim parametrizacao
22
23 %j posicao da forca
24 %i posicao do no de medicao
25
26 Dano_store = cell(3,3);           % Cria um cell array para armazenar os
    valores
27 Sem_dano_store = cell(3,3);       % Cria um cell array para armazenar os
    valores
28
29 %Abertura/Leitura dos ficheiros
30 for d=1:3                         %Ciclo para o mesmo nivel de dano
31     perc_dano=niveis_dano(d);
32     for h = 1:n_pontos_medicao     %Percorre todos os pontos de medicao
33
34         % Le o ficheiro com dano
35         file_path = sprintf('Caminho ficheiro', perc_dano, h, forca_input
    );
36         fid = fopen(file_path, 'r');
```

```

37     for k = 1:84
38         fgetl(fid);
39     end
40     linhas = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', '\n');
41     fclose(fid);
42     linhas = linhas{1};
43     dados_dano = cellfun(@(linha) regexp(strtrim(linha), '\t+', '
split'), linhas, 'UniformOutput', false);
44     dano_cortada=dados_dano(1:tamanho);
45     n = length(dano_cortada);
46     dano_double = zeros(n, 4);
47     for i = 1:n
48         for j = 1:4
49             valor_str = dados_dano{i}{j};
50             valor_str = strrep(valor_str, ',', '.');
51             valor_str = regexprep(valor_str, '([0-9])D([+-]?[0-9]+)',
'$1E$2');
52             dano_double(i,j) = str2double(valor_str);
53         end
54     end
55
56     % Le o ficheiro sem dano
57     file_path = sprintf('Caminho ficheiro',h, forca_input);
58     fid = fopen(file_path, 'r');
59     for k = 1:84
60         fgetl(fid);
61     end
62     linhas = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', '\n');
63     fclose(fid);
64     linhas = linhas{1};
65     dados_sem_dano = cellfun(@(linha) regexp(strtrim(linha), '\t+',
'split'), linhas, 'UniformOutput', false);
66     sem_dano_cortada=dados_sem_dano(1:tamanho);
67     n = length(sem_dano_cortada);
68     sem_dano_double = zeros(n, 4);
69     for i = 1:n
70         for j = 1:4
71             valor_str = dados_sem_dano{i}{j};
72             valor_str = strrep(valor_str, ',', '.');

```

```

73         valor_str = regexp(valor_str, '([0-9])D([+-]?[0-9]+)',
74         '$1E$2');
75         sem_dano_double(i,j) = str2double(valor_str);
76     end
77
78     % Acesso aos dados com e sem dano para um no especifico
79     matriz_dano_real(:,h)=dano_double(gama_freq,3);
80     matriz_sem_dano_real(:,h)=sem_dano_double(gama_freq,3);
81     matriz_dano_imag(:,h)=dano_double(gama_freq,4);
82     matriz_sem_dano_imag(:,h)=sem_dano_double(gama_freq,4);
83 end
84
85 %Formar matriz de numeros imaginarios atraves das colunas Re e Im
86 matriz_dano=complex(matriz_dano_real,matriz_dano_imag);
87 matriz_sem_dano=complex(matriz_sem_dano_real,matriz_sem_dano_imag);
88
89 %Construcao de matriz Dano(i,j)
90 for n=1:n_pontos_medicao
91     Dano_store{n,d}=matriz_dano(:,n);
92     Sem_dano_store{n,d}=matriz_sem_dano(:,n);
93 end
94
95 %Aplicacao do RVAC (para cada nivel dano)
96 for k=1:3
97     a(:,k)=matriz_dano(:,k).*conj(matriz_sem_dano(:,k));
98     b(:,k)=matriz_dano(:,k).*conj(matriz_dano(:,k));
99     c(:,k)=matriz_sem_dano(:,k).*conj(matriz_sem_dano(:,k));
100     soma_a=sum(a,2);
101     soma_b=sum(b,2);
102     soma_c=sum(c,2);
103     RVAC(:,d)=(abs(soma_a)).^2./(soma_b.*soma_c);
104 end
105 end
106
107 DRQ=(sum(RVAC,1))/(size(RVAC,1));
108
109 %Maximas ocorrencias
110 for d1 = 1:size(RVAC, 1)
111     [~, sorted_indices] = sort(RVAC(d1, :), 'ascend');

```

```

112     Maximas_ocorrenciasRVAC(d1, sorted_indices(1)) = 1;
113     Maximas_ocorrenciasRVAC(d1, sorted_indices(2)) = 2;
114     Maximas_ocorrenciasRVAC(d1, sorted_indices(3)) = 3;
115 end
116
117 DRQ_maximas=(sum(Maximas_ocorrenciasRVAC,1))/(size(Maximas_ocorrenciasRVAC
    ,1)*3);
118
119 %Graficos
120 figure;
121 x = [1, 2, 3];
122 plot(x, DRQ, '-o');
123 ylim([0.4 1]);
124 xticks(x);
125 xticklabels({'30g', '80g', '110g'});
126 xlim([0 4]);
127 grid on;
128 xlabel('Percentagem de dano');
129 ylabel('DRQ');
130
131 figure;
132 plot(x, DRQ_maximas, '-o');
133 ylim([0.2 1]);
134 xticks(x);
135 xticklabels({'30g', '80g', '110g'});
136 xlim([0 4]);
137 grid on;
138 xlabel('Percentagem de dano');
139 ylabel('DRQ com maximas ocorrencias');
140
141 %Gravacao dos ficheiros com nome
142 nome1=sprintf('DRQ_rover_%d_1.txt', forca_input);
143 DRQ_latex=[x',DRQ'];
144 writematrix(DRQ_latex, nome1 , 'Delimiter', 'tab');
145
146 nome2=sprintf('DRQmaximas_rover_%d_1.txt', forca_input);
147 DRQ_latex_maximas=[x',DRQ_maximas'];
148 writematrix(DRQ_latex_maximas, nome2, 'Delimiter', 'tab');

```


Anexo I - Método de localização de dano

Fazendo uso do Indicador Razão, este método engloba as contribuições de todos os sensores para cada uma das forças aplicadas.

O Indicador Razão(IR) é definido pelo módulo do coeciente entre as FRFs da estrutura com e sem dano. Essa relação, para cada sensor i e força aplicada em j , é expressa por:

$$IR_{ij}(\omega) = \left| \frac{d\alpha_{ij}(\omega)}{\alpha_{ij}(\omega)} \right|. \quad (\text{I.1})$$

As variações nas propriedades modais das estruturas são notadas sempre que este indicador for diferente de 1, indicando que a resposta da estrutura se alterou.

Tendo em conta este indicador, o Método de localização de dano, agrupa os dados numa matriz tridimensional $i \times j \times \omega$. Ou seja, para cada frequência ω vai-se obter uma matriz $i \times j$ que contém a influência de cada força j nos diversos sensores i . Tal é evidenciado pela figura I.1:

$$A = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} IR_{11} & \cdots & IR_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ IR_{i1} & \cdots & IR_{ij} \end{bmatrix}_{\omega_1} & \begin{bmatrix} IR_{11} & \cdots & IR_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ IR_{i1} & \cdots & IR_{ij} \end{bmatrix}_{\omega_2} & \cdots & \begin{bmatrix} IR_{11} & \cdots & IR_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ IR_{i1} & \cdots & IR_{ij} \end{bmatrix}_{\omega_N} \end{bmatrix}$$

FIGURA I.1: Demonstração gráfica da matriz tridimensional

Obtida a matriz A , é calculado o IRm, ou seja, o Indicador Razão médio. De seguida, são somadas as contribuições, para cada sensor, das diferentes forças aplicadas. A matriz obtida, S , é uma matriz $i \times 1$ e pode sofrer os devidos arranjos permitindo representar as localizações físicas dos sensores da seguinte forma:

$$IRm_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^{N_\omega} IR_{ij}(\omega)}{N_\omega} \quad (\text{I.2})$$

$$S = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^j IRm_{1j} \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^j IRm_{ij} \end{bmatrix}_{i \times 1} \quad (I.3)$$

$$MC = \begin{bmatrix} S_1 & \cdots & S_l \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{(c-1) \times l + 1} & \cdots & S_{c \times l} \end{bmatrix}_{c \times l} \quad (I.4)$$

onde l representa o número de sensores por linha e c o número de sensores por coluna.

Anexo II - Máximas ocorrências- Método de localização de dano

Para o caso concreto do MLD também são aplicadas as máximas ocorrências mas com as devidas alterações. Implementar as máximas ocorrências para este método consiste em contabilizar o número de máximas ocorrências, devido a cada força aplicada a cada frequência. Ou seja, ao aplicar o MLD obtém-se a matriz A , tal como representado na figura I.1.

Desta forma, para cada frequência e cada força aplicada (coluna), é localizado o elemento onde o valor foi máximo. A esse valor é atribuído o valor de 1, sendo os restantes todos 0. Ou seja, a matriz obtida fica da seguinte forma:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{\omega_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{\omega_2} \dots \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}_{\omega_N}$$

FIGURA II.1: Ilustração da matriz B

Posteriormente, a matriz tridimensional é simplificada somando os valores obtidos ao longo da frequência. Após obter uma matriz $i \times j$, é efetuado o somatório de todas as colunas. No final, é obtido uma matriz $i \times 1$ contendo a contagem do número de máxima ocorrência em cada ponto de medição.