



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

FLORA TEIXEIRA SALEM

Licenciada em Ciências da Engenharia

Deteção e localização de dano estrutural numa estrutura de três andares sujeita a diferentes severidades de dano

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2025

Deteção e localização de dano estrutural numa estrutura de três andares sujeita a diferentes severidades de dano

FLORA TEIXEIRA SALEM

Licenciada em Ciências da Engenharia Mecânica

Orientadora: Doutora Raquel Albuquerque Soares Brás de Almeida,
Professora Auxiliar, FCT-UNL

Coorientador: Doutor Hugo Filipe Diniz Policarpo,
Professor Auxiliar da Escola Naval, Marinha Portuguesa

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2025

Deteção e localização de dano estrutural numa estrutura de três andares sujeita a diferentes severidades de dano

Copyright © Flora Salem, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à professora Raquel Almeida e ao professor Hugo Policarpo, pela dedicação e pelo apoio ao longo destes meses de trabalho. Tantas horas passadas no laboratório e tantas adversidades ao longo do caminho, que não teriam sido possíveis ultrapassar se não fosse pela paciência e pelo comprometimento de ambos.

À minha família, meus pais e meu irmão, que são os grandes responsáveis por toda a minha educação e por quem eu sou hoje. Pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim, mesmo quando eu mesma não acredito.

Ao Afonso, que também foi uma peça chave ao longo desta dissertação. O meu companheiro de curso até ao fim, obrigada por tudo.

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

RESUMO

A detecção precoce de danos estruturais é um desafio no âmbito da monitorização estrutural, uma vez que pequenas alterações nas propriedades dinâmicas podem comprometer o desempenho e a segurança das estruturas. Os métodos baseados em vibrações, particularmente as Funções de Resposta em Frequência (FRFs), têm sido cada vez mais estudados e têm-se mostrado eficazes na identificação de danos estruturais.

Esta dissertação tem como objetivo avaliar o desempenho de uma metodologia de identificação de dano baseada em vibrações, aplicada à detecção, localização e quantificação relativa de dano numa estrutura experimental de três andares. A metodologia em estudo utiliza o Indicador Razão (*Ratio Indicator*, RI), um indicador sensível ao efeito acumulado das pequenas alterações introduzidas nas Funções de Resposta em Frequência (FRFs) da estrutura, resultantes da presença de dano. A aplicação e validação experimental da metodologia foram realizadas numa estrutura desenvolvida e construída no Laboratório de Mecânica Estrutural da NOVA FCT.

A estrutura utilizada é composta por 12 vigas e 4 placas de alumínio, instrumentada com 9 acelerómetros e excitada através de um martelo de impacto. Foram aplicados 19 cenários diferentes de dano, consistindo na remoção de massas em diferentes posições das vigas e placas, com severidades que variaram entre 0,07% e 9,77% da massa total da estrutura.

A identificação do dano foi realizada pelo cálculo do RI entre as FRFs da estrutura de referência (sem dano) e as da estrutura com dano. A presença de dano foi confirmada através do *Damage Indicator* (DI), com valores superiores a 1 em todos os casos.

A localização do dano, determinada a partir do índice *Force-Averaged Ratio Indicator* (FARI), revelou-se precisa para severidades de dano nas vigas até 0,12%. A quantificação relativa do dano foi obtida para os casos analisados, observando-se um aumento do valor do índice de dano (DI) com o incremento da severidade do dano.

Os resultados obtidos demonstram o sucesso da metodologia para os danos aplicados nas vigas, e uma eficácia mais reduzida para danos aplicados nas placas.

Palavras-chave: Funções de Resposta em Frequência; Detecção de dano; Localização de dano, Quantificação Relativa de dano.

ABSTRACT

The early detection of structural damage is a challenge within the scope of structural health monitoring, since small changes in dynamic properties can compromise the performance and safety of structures. Vibration-based methods, particularly Frequency Response Functions (FRFs), have been increasingly studied and shown to be effective in identifying structural damage.

This dissertation aims to evaluate the performance of a vibration-based damage identification methodology applied to the detection, localization, and relative quantification of damage in a three-storey experimental structure. The methodology under study employs the Ratio Indicator (RI), a damage indicator sensitive to the cumulative effect of small changes introduced in the structure's Frequency Response Functions (FRFs) as a result of damage. The experimental application and validation of the methodology were carried out on a structure developed and built at the Structural Mechanics Laboratory of NOVA FCT.

The structure consists of 12 beams and 4 aluminum plates, instrumented with 9 accelerometers and excited by an impact hammer. Nineteen different damage scenarios were applied, consisting of the removal of masses in different positions of the beams and plates, with severities ranging from 0.07% to 9.77% of the total mass of the structure.

Damage identification was performed by calculating the *RI* between the FRFs of the reference structure (undamaged) and those of the damaged structure. The presence of damage was confirmed through the Damage Indicator (DI), with values greater than 1 in all cases. The damage localization, determined from the Force-Averaged Ratio Indicator (FARI), showed accurate results for damage severities in the beams up to 0.12%. The relative quantification of damage was obtained for the cases analyzed, with an observed increase in the value of the Damage Index (DI) as the damage severity increased.

The results demonstrate the success of the methodology in detecting damage in the beams, while showing reduced effectiveness in the plates.

Keywords: Frequency Response Functions; Damage detection; Damage localization; Relative Damage Quantification.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Revisão Bibliográfica	3
1.3 Métodos de detecção de dano que utilizam vibrações mecânicas	5
1.4 Etapas do processo de Identificação de dano	7
1.5 Trabalhos realizados no Núcleo de Mecânica Estrutural.....	8
1.6 Objetivos.....	10
1.7 Estrutura da Dissertação	12
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
2.1 Equação de Equilíbrio, Propriedades Dinâmicas da Estrutura e Funções de Resposta em Frequência.....	15
2.2 Detecção de dano utilizando as FRFs.....	17
2.3 Indicadores de detecção de dano.....	19
2.3.1 Indicadores Baseados em Matrizes de Correlação (CFDAC).....	20
2.3.2 Indicador Razão	21
3 METODOLOGIA	22
3.1 Objeto de estudo.....	22
3.1.1 Montagem experimental.....	23
3.1.2 Pontos de medição e excitação	25
3.1.3 Processo de encastramento.....	26
3.2 Metodologia aplicada para a identificação do dano.....	27
3.3 Análise modal experimental.....	31
3.3.1 Método de Excitação	32
3.3.2 Parametrização da escala do sistema de medição.....	33
3.3.3 Sistema de aquisição.....	37

3.4	Casos de dano.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	1
4.1	Deteção e quantificação relativa do dano.....	1
4.2	Localização do dano	11
5	CONCLUSÃO	24
5.1	Trabalhos futuros.....	24
	BIBLIOGRAFIA.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - FISSURA POR FADIGA NO REFORÇO INFERIOR DA LONGARINA PRINCIPAL DA ASA DE UM PIPER PA-46-350P. ADAPTADO DE [2]	2
FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DANO. ADAPTADO DE [8].....	3
FIGURA 3 - CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL DE BENCHMARK DE EDIFÍCIO DE TRÊS ANDARES. ADAPTADO DE [16]	11
FIGURA 4 - TIPOS DE DANOS APLICADOS À ESTRUTURA NO ESTUDO DE FONT-MORÉ ET AL. (2023) [16], INCLUINDO ADIÇÃO DE MASSA, FUROS, FISSURAS E REDUÇÕES DA SEÇÃO TRANSVERSAL DAS VIGAS	12
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA PARTE REAL E PARTE IMAGINÁRIA DE UMA FRF DE RECETÂNCIA PARA UM SISTEMA DE UM GRAU DE LIBERDADE. ADAPTADO DE [26]	16
FIGURA 6 - ESTRUTURA DE ESTUDO MODELADA EM SOLIDWORKS	22
FIGURA 7 - ESTRUTURA DE ESTUDO COMPLETA MONTADA EM LABORATÓRIO	24
FIGURA 8 - CHAVE DINAMOMÉTRICA DE PRECISÃO AJUSTADA AO TORQUE DE $80 \text{ cN} \cdot \text{m}$	25
FIGURA 9- ESQUEMATIZAÇÃO DOS PONTOS DE EXCITAÇÃO E PONTOS DE MEDIÇÃO DA ESTRUTURA	26
FIGURA 10 - ENCASTRAMENTO DA ESTRUTURA ATRAVÉS DE GRAMPOS DE FIXAÇÃO	27
FIGURA 11 - METODOLOGIA APLICADA, PRIMEIRA E SEGUNDA FASE	28
FIGURA 12 - METODOLOGIA APLICADA, TERCEIRA E QUARTA FASE	29
FIGURA 13 - METODOLOGIA APLICADA, QUINTA FASE	30
FIGURA 14 - ESQUEMA DO MARTELO DE IMPACTO COM TRANSDUTOR DE FORÇA, DIFERENTES PONTAS DE EXCITAÇÃO E RESPECTIVOS EFEITOS NO SINAL MEDIDO. ADAPTADO DE [31]	33
FIGURA 15 - ESQUEMA DE CALIBRAÇÃO DE UM ACELERÓMETRO UTILIZANDO UMA MASSA RÍGIDA CONHECIDA. (A) CALIBRAÇÃO UTILIZANDO SHAKER; (B) CALIBRAÇÃO UTILIZANDO MARTELO DE IMPACTO; (C) CURVA DE CALIBRAÇÃO OBTIDA APÓS TESTE; ADAPTADO DE [31].....	34
FIGURA 16 - COMPORTAMENTO IDEAL DA FUNÇÃO ACELERÂNCIA DE UMA MASSA RÍGIDA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA	35
FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO EM dB DA FUNÇÃO ACELERÂNCIA IDEAL DE UMA MASSA RÍGIDA.....	36
FIGURA 18 - MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA CALIBRAÇÃO COM MASSA DE 2 KG. ADAPTADO DE [32]	37
FIGURA 19 - SOFTWARE PULSE LABSHOP	38
FIGURA 20 - MÓDULOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS	38
FIGURA 21 - MARTELO DE IMPACTO COM UM TRANSDUTOR DE FORÇA (BRÜEL & KJÆR 8202).....	39
FIGURA 22 - ACELERÓMETROS FIXADOS À ESTRUTURA.....	39
FIGURA 23 - JANELA TRANSIENTE APLICADA	40
FIGURA 24 - JANELA EXPONENCIAL APLICADA	41
FIGURA 25 - APLICAÇÃO DE DANOS DE MASSA NAS VIGAS DA ESTRUTURA: (A) DANO DO TIPO 1; (B) DANO DO TIPO 2; (C) DANO DO TIPO 3 (D) DANO DO TIPO 4	42

FIGURA 26 - APLICAÇÃO DE DANOS NAS PLACAS. (A) CASO DE DANO 16 (MASSA DE 502,7G NA PLACA 2); (B) CASO DE DANO 17 (MASSA DE 997,8G NA PLACA 4).....	43
FIGURA 27 - FRF (A1, F5) DA ESTRUTURA SEM DANO	1
FIGURA 28 - FRF (A1, F5) DA ESTRUTURA SEM DANO E COM DANO DE 0,07% DE SEVERIDADE (DANO 12)	2
FIGURA 29 - FRF (A1, F5) DA ESTRUTURA SEM DANO E COM DANO DE 0,12% DE SEVERIDADE (DANO 9)	2
FIGURA 30 - FRF (A1, F5) DA ESTRUTURA SEM DANO E COM DANO DE 0,36% DE SEVERIDADE (DANO 6)	3
FIGURA 31 - FRF (A1, F5) DA ESTRUTURA SEM DANO E COM DANO DE 0,36% DE SEVERIDADE (DANO 3)	3
FIGURA 32 - PONTOS DE APLICAÇÃO DE DANO NA ESTRUTURA	5
FIGURA 33 - GRÁFICO DOS VALORES DE DI EM FUNÇÃO DA SEVERIDADE DO DANO PARA OS DANOS APLICADOS ENTRE OS ACELERÓMETROS 2 E 3	6
FIGURA 34 - GRÁFICO DOS VALORES DE DI EM FUNÇÃO DA SEVERIDADE DO DANO PARA OS DANOS APLICADOS ENTRE OS ACELERÓMETROS 5 E 6	7
FIGURA 35 - GRÁFICO DOS VALORES DE DI EM FUNÇÃO DA SEVERIDADE DO DANO PARA OS DANOS APLICADOS ENTRE OS ACELERÓMETROS 8 E 9	8
FIGURA 36 - GRÁFICO DOS VALORES DE DI PARA OS DANOS DE 0,65% DE SEVERIDADE EM FUNÇÃO DAS LOCALIZAÇÕES DO DANO ...	10
FIGURA 37 - GRÁFICO DOS VALORES DE DI PARA AS SEVERIDADES DE 9,77% E 4,92% EM FUNÇÃO DAS PLACAS ONDE OS DANOS FORAM APLICADOS	11
FIGURA 38 - GRÁFICOS DOS VALORES DE DLI EM FUNÇÃO DO PONTO DE MEDIÇÃO. (A) CASO DE DANO 3 - MASSA DE 66,4G (B) CASO DE DANO 6 - MASSA DE 37,1G (C) CASO DE DANO 9 - MASSA DE 12,1G (D) CASO DE DANO 12 - MASSA DE 7,3G	14
FIGURA 39 - GRÁFICOS DOS VALORES DE DLI EM FUNÇÃO DO PONTO DE MEDIÇÃO. (A) CASO DE DANO 2 - MASSA DE 66,4G (B) CASO DE DANO 5 - MASSA DE 37,1G (C) CASO DE DANO 8 - MASSA DE 12,1G (D) CASO DE DANO 11 - MASSA DE 7,3G	15
FIGURA 40 - GRÁFICOS DOS VALORES DE DLI EM FUNÇÃO DO PONTO DE MEDIÇÃO. (A) CASO DE DANO 1 - MASSA DE 66,4 G (B) CASO DE DANO 4 - MASSA DE 37,1 G (C) CASO DE DANO 7 - MASSA DE 12,1 G (D) CASO DE DANO 10 - MASSA DE 7,3 G	16
FIGURA 41 - CASO DE DANO 13 - MASSA DE 66,4 G	17
FIGURA 42 - EFEITO DE CADA FORÇA DE EXCITAÇÃO PARA O CASO DE DANO 5 (0,36% DE SEVERIDADE)	18
FIGURA 43 - EFEITO DE CADA FORÇA DE EXCITAÇÃO (A) CASO DE DANO 2 (0,65% DE SEVERIDADE) (B) CASO DE DANO 8 (0,12% DE SEVERIDADE)	19
FIGURA 44 - GRÁFICOS DOS VALORES DE DLI EM FUNÇÃO DO PONTO DE MEDIÇÃO PARA AS PLACAS NOS CASOS DE SEVERIDADE 4,92%. (A) CASO DE DANO 14 - MASSA DE 4,92 G (B) CASO DE DANO 15 - MASSA DE 4,92 G (C) CASO DE DANO 16 - MASSA DE 4,92 G.....	20
FIGURA 45 - GRÁFICOS DOS VALORES DE DLI EM FUNÇÃO DO PONTO DE MEDIÇÃO PARA AS PLACAS NOS CASOS DE SEVERIDADE 9,77%. (A) CASO DE DANO 17 - MASSA DE 9,77 G (B) CASO DE DANO 18 - MASSA DE 9,77 G (C) CASO DE DANO 19 - MASSA DE 9,77 G.....	21
FIGURA 46 - EFEITO DE CADA FORÇA DE EXCITAÇÃO PARA O CASO DE DANO 15 (MASSA DE 4,92 G).....	22

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 (A) - DISSERTAÇÕES REALIZADAS NO NME SOBRE IDENTIFICAÇÃO DE DANO	9
TABELA 1 (B) - DISSERTAÇÕES REALIZADAS NO NME SOBRE IDENTIFICAÇÃO DE DANO.....	10
TABELA 2 - VALORES DE MASSA MEDIDOS PARA CADA UMA DAS 12 VIGAS DA ESTRUTURA	24
TABELA 3 - VALORES DE MASSA E SEVERIDADE DOS DIFERENTES TIPOS DE DANO DE MASSA APLICADOS NAS VIGAS	42
TABELA 4 - CASOS DE DANO DE VIGA E RESPECTIVAS LOCALIZAÇÕES NA ESTRUTURA	43
TABELA 5 - CASOS DE DANO DE PLACA E RESPECTIVAS SEVERIDADES E LOCALIZAÇÕES NA ESTRUTURA.....	44
TABELA 6 - VALORES DE DI OBTIDOS PARA CADA CASO DE DANO DE VIGA	4
TABELA 7 - VALORES DE DI OBTIDOS PARA CADA CASO DE DANO DE PLACA	4
TABELA 8 - VALORES DE DI OBTIDOS PARA OS DANOS APLICADOS ENTRE OS ACELERÓMETROS 2 E 3	6
TABELA 9 - VALORES DE DI OBTIDOS PARA OS DANOS APLICADOS ENTRE OS ACELERÓMETROS 5 E 6	6
TABELA 10 - VALORES DE DI OBTIDOS PARA OS DANOS APLICADOS ENTRE OS ACELERÓMETROS 8 E 9	7
TABELA 11 - VALORES DE DI PARA OS DANOS DE 0,65% DE SEVERIDADE NAS DIFERENTES LOCALIZAÇÕES.....	9
TABELA 12 - RESULTADOS DA LOCALIZAÇÃO DOS DANOS APLICADOS NAS VIGAS.....	12
TABELA 13 - RESULTADOS DA LOCALIZAÇÃO DOS DANOS APLICADOS NAS PLACAS.....	12
TABELA 14 - LOCALIZAÇÃO DOS DANOS APLICADOS ENTRE OS ACELERÓMETROS 2 E 3.....	13
TABELA 15 - LOCALIZAÇÃO DOS DANOS APLICADOS ENTRE OS ACELERÓMETROS 5 E 6.....	14
TABELA 16 - LOCALIZAÇÃO DOS DANOS APLICADOS ENTRE OS ACELERÓMETROS 8 E 9.....	15
TABELA 17 - LOCALIZAÇÃO DOS DANOS DE SEVERIDADE 4,92% APLICADOS NAS PLACAS	20
TABELA 18 - LOCALIZAÇÃO DOS DANOS DE SEVERIDADE 9,77% APLICADOS NAS PLACAS	21

SIGLAS E ACRÓNIMOS

END - Ensaios Não Destrutivos

FRF - Funções de Resposta em Frequência

GDL - Graus de Liberdade

SHM - Structural Health Monitoring

NME - Núcleo de Mecânica Estrutural

RI - Ratio Indicator

DI - Damage Indicator

ARI - Average Ratio Indicator

FARI - Force-Averaged Ratio Indicator

DLI - Damage Localization Indicator

CFDAC - Complex Frequency Domain Assurance Criterion

SCI - Spectral Correlation Index

NOMENCLATURA

ω	Frequência angular
K	Rigidez
M	Massa
C	Amortecimento
x	Deslocamento
$\dot{x}$	Velocidade
$\ddot{x}$	Aceleração
F	Força de excitação
H	Recetância
Y	Mobilidade
A	Acelerância
i	Ponto de medição
j	Ponto de excitação
t	Instante de tempo
$\bar{X}$	Amplitude complexa da resposta
H''	Segunda derivada da FRF

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e motivação

O estudo dos danos estruturais tem sido cada vez mais desenvolvido pela comunidade científica, dada a sua relevância para todos os tipos de estruturas. Estas estão constantemente expostas a riscos provenientes de fenômenos naturais e atividades humanas, tanto durante a operação quanto em períodos de inatividade, o que pode resultar em danos significativos ou até mesmo em colapsos catastróficos. Uma falha estrutural imprevista pode ser catastrófica, não apenas em termos de perdas humanas e económicas, mas também em relação aos impactos sociais e ambientais subsequentes. Por isto, é importante a detecção do dano estrutural na sua fase mais precoce possível de forma a otimizar o uso da estrutura, evitar catástrofes e minimizar os tempos de inatividade e os custos associados à manutenção [1].

O aparecimento do dano pode ser devido a fatores ambientais, ou utilização incorreta da estrutura. O dano estrutural, quando detetado a olho nu, geralmente indica que o processo de degradação já atingiu um estágio crítico, comprometendo a integridade da estrutura e potencialmente resultando no seu colapso. Surge então a necessidade de métodos de detecção de danos que permitam a identificação do dano estrutural na sua fase inicial, podendo isto ser conseguido através da análise contínua da estrutura. A identificação precoce do dano possibilita a manutenção ou substituição da peça ou zona comprometida, minimizando a possibilidade do colapso integral da estrutura.

A Figura 1 [2] faz referência a um caso que ocorreu durante uma inspeção a uma aeronave Piper PA-46-350P, onde foi identificada uma fissura por fadiga no reforço inferior da longarina principal da asa. A fissura, com 1,53 polegadas de comprimento, surgiu após cerca de 5 273 horas de operação, valor significativamente inferior ao limite de vida certificado da aeronave (15 580 horas). A análise laboratorial confirmou ser um dano causado por fadiga, demonstrando como este tipo de falha pode desenvolver-se de forma gradual e impercetível, até atingir um estado crítico.

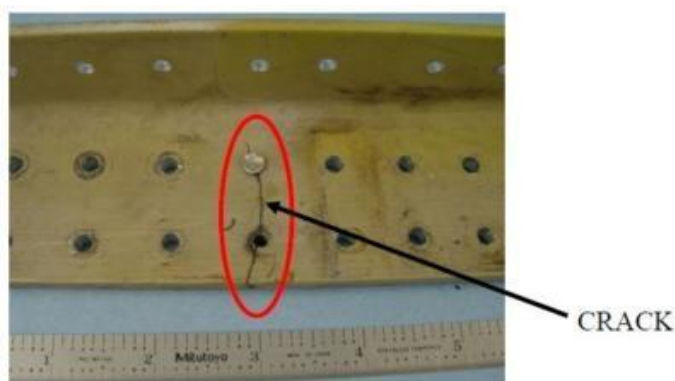


Figura 1 - Fissura por fadiga no reforço inferior da longarina principal da asa de um Piper PA-46-350P. Adaptado de [2]

De forma a prosseguir à análise e contextualização dos métodos de detecção de danos estruturais, começa-se por definir dano. Segundo Zaher [1], o dano é um enfraquecimento indesejável da estrutura que causa um efeito negativo no seu desempenho, o que implica um risco à segurança do sistema estrutural. O dano pode ainda ser definido como qualquer desvio nas propriedades geométricas ou materiais originais da estrutura, podendo causar tensões, deslocamentos ou vibrações indesejadas. À luz de Wang et al. [3], entende-se por dano, qualquer uma das seguintes ocorrências: falha estrutural do material (como fadiga, fissuras, fenómenos de delaminação); variação na rigidez de elementos de ligação (como parafusos, juntas coladas, rebites); perda de elementos de ligação; defeitos, vazios, fissuras, etc., causados durante a operação.

Os efeitos do dano numa estrutura podem ser classificados como lineares ou não lineares, de acordo com Doebling et al. [4]. Uma situação de dano linear é caracterizada pelo fato de que a estrutura inicialmente linear-elástica, continua a exibir um comportamento linear-elástico após o surgimento do dano. Por outro lado, o dano não linear é definido como o cenário em que a estrutura, embora inicialmente linear-elástica, apresenta um comportamento não linear após a ocorrência do dano. Vale ressaltar que a maioria dos casos de estudos presentes na literatura se concentram em casos de dano linear.

De maneira geral, o dano pode ser definido como modificações induzidas num sistema que prejudicam o seu desempenho, tanto no estado atual quanto na sua evolução futura. Implícito nesta definição está o conceito de que o dano só é considerado significativo quando comparado entre dois estados distintos do sistema, sendo um deles tipicamente considerado o estado inicial, frequentemente livre de danos. Esta discussão centra-se no estudo da identificação de danos em sistemas estruturais e mecânicos. Portanto, a definição de dano será limitada a alterações nas propriedades materiais e/ou geométricas destes sistemas, incluindo mudanças nas

condições de contorno e na conectividade do sistema, que impactem negativamente o desempenho atual ou futuro dos mesmos [5].

O principal desafio enfrentado por investigadores e engenheiros na área da detecção de danos estruturais é desenvolver sistemas de monitorização contínua que sejam eficientes e financeiramente sustentáveis, capazes de identificar danos na sua fase mais precoce, sem interferir no funcionamento normal das estruturas [6]. Neste sentido, surgem os métodos de identificação de dano, que vêm evoluindo continuamente com os avanços tecnológicos a nível de sensores, métodos numéricos, entre outros, com o objetivo de identificar mudanças que venham a aparecer ao longo da vida útil da estrutura e que possam comprometer a sua integridade.

1.2 Revisão Bibliográfica

Atualmente existem diversas tecnologias de detecção do dano, destacando-se os Métodos não Destrutivos, que, como a nomenclatura indica, têm como principal característica a não danificação do material no seu processo. A Figura 2 ilustra uma esquematização dos métodos existentes, os quais podem ser divididos em dois grandes grupos: os métodos locais e os métodos SHM baseados em vibrações (*Vibration-Based Structural Health Monitoring*).

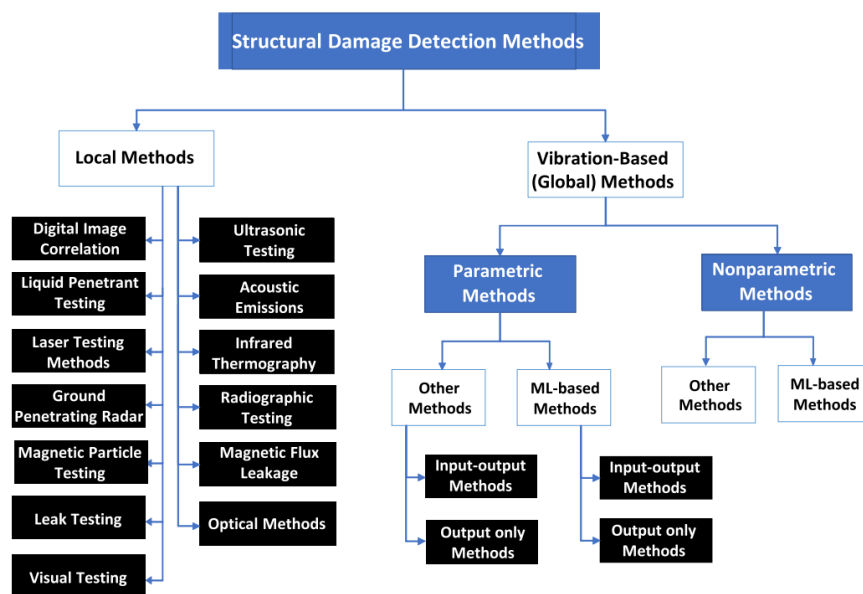


Figura 2 - Classificação dos métodos de detecção de dano. Adaptado de [8]

Os métodos de detecção de danos estruturais baseados em vibrações são tradicionalmente classificados como métodos globais, enquanto os métodos locais são baseados na detecção e quantificação de danos estruturais numa escala relativamente menor, não tendo em conta a resposta vibratória da estrutura [7]. Os END, Ensaios Não Destrutivos, por serem técnicas localizadas, têm como *input* medições diretas, pelo que implica que seja previamente conhecida a localização do dano e que esta seja de fácil acesso. Por estas razões são processos de examinação longos e dispendiosos, pelo que não permitem a monitorização contínua da estrutura. Ferramentas como correntes induzidas, raio-X, ultrassons, radiografia, líquidos penetrantes, partículas magnéticas e inspeção visual são utilizadas para inspecionar componentes e conjuntos estruturais em áreas locais de uma estrutura [8].

A necessidade de métodos quantitativos de detecção global de danos que possam ser aplicados a estruturas complexas levou ao desenvolvimento e à contínua pesquisa de técnicas que analisam alterações nas características vibratórias da estrutura [5]. Diversas metodologias foram introduzidas em algoritmos desenvolvidos para a detecção de dano baseada em vibrações nos campos da engenharia civil, mecânica e aeroespacial.

Os métodos SHM baseados em vibrações baseiam-se na análise da variação das respostas dinâmicas das estruturas. As propriedades dinâmicas de uma estrutura variam na presença de dano, podendo o dano ser devido à variação da massa, ou da rigidez ou do amortecimento da estrutura, a análise da variação destas respostas dinâmicas pode permitir identificar o dano. Estes métodos dependem de uma rede de sensores que podem ser acelerómetros ou extensómetros que são posicionados em pontos estratégicos da estrutura monitorada para registar a sua resposta vibratória. São utilizados métodos numéricos para traduzir as respostas medidas em índices que refletem a presença ou ausência de dano, para além de localizar e quantificar a sua severidade. O conceito de diagnóstico de dano baseado em vibrações era uma prática utilizada no século XIX, quando trabalhadores ferroviários avaliavam qualitativamente a condição das rodas dos comboios através do som emitido ao impactá-las com martelos. No entanto, o desenvolvimento de abordagens quantitativas para a detecção global de falhas estruturais só foi possível na década de 1980, com a evolução das tecnologias de computação e de sensores [7]. Comparativamente aos métodos locais, as metodologias de SHM baseadas em vibrações têm como vantagens: a dispensabilidade de uma rede de sensores próximos entre si, pelo que um número limitado de acelerómetros é geralmente suficiente para identificar as propriedades dinâmicas, mesmo em estruturas grandes e complexas; não é necessário conhecer previamente a localização do dano e permitem uma monitorização contínua da estrutura; e os instrumentos necessários para a aplicação da maioria dos métodos baseados em vibração são facilmente transportáveis e manuseáveis.

Os métodos de SHM baseados em vibrações podem ainda ser classificados como métodos paramétricos ou não paramétricos. Nos métodos paramétricos, a estrutura é representada por um modelo numérico cujo comportamento dinâmico depende de parâmetros físicos, como massa, rigidez e amortecimento. Por outro lado, os métodos não paramétricos trabalham diretamente com os sinais medidos, como acelerações ou respostas em frequência, sem recorrer à construção de um modelo paramétrico da estrutura. Estes métodos utilizam técnicas de processamentos de sinais ou algoritmos de *machine learning* que não dependem de modelos físicos da estrutura [7].

1.3 Métodos de detecção de dano que utilizam vibrações mecânicas

Diferentes autores propuseram classificações para os métodos de Identificação de Dano Baseados em Vibrações. Segundo Park e Park [9], os métodos podem ser:

- Métodos de Referência
- Métodos Experimentais

Os Métodos de Referência baseiam-se num modelo numérico teórico da estrutura em estudo para a detecção de dano, enquanto os Métodos Experimentais baseiam-se apenas na utilização de dados experimentais.

Yan et al. [10] defendem ainda que os métodos baseados em vibrações podem ser agrupados em:

- Métodos Tradicionais
- Métodos *Data-Driven*

A diferenciação entre os Métodos Tradicionais e os Métodos *Data-Driven* é feita com base no tipo de *input* utilizado para a detecção de danos. Os Métodos Tradicionais baseiam-se na análise das propriedades dinâmicas intrínsecas da estrutura, tais como as frequências naturais, os modos de vibração e as Funções de Resposta em Frequência (FRF). A detecção de danos ocorre pela comparação entre o estado inicial da estrutura e as alterações observadas nestes parâmetros ao longo do tempo, inferindo a presença de degradação estrutural. Os Métodos *Data-Driven* recorrem a técnicas avançadas de processamento de dados, incluindo inteligência artificial ou algoritmos de aprendizagem automática (*machine learning*). Estes métodos utilizam grandes volumes de dados adquiridos por redes de sensores, analisando-os sem a necessidade de um modelo físico explícito.

Os Métodos Tradicionais são métodos relativamente sensíveis e pouco dispendiosos, pelo que são muito utilizados pela comunidade científica de mecânica estrutural [6]. Utilizam regra geral como inputs os valores das frequências naturais, dos modos de vibração e das FRFs.

Alguns autores defendem que o primeiro artigo relativo à investigação da deteção de dano por meio de comparação de frequências naturais de uma dada estrutura, com dano e sem dano, foi apresentado por Lifshitz e Rotem em 1969 [11], que abriram portas à investigações de outros métodos de deteção de dano através da análise da resposta vibratória das estruturas. A existência de dano estrutural num sistema leva à modificação da resposta vibratória da estrutura. Estas modificações manifestam-se como alterações nas frequências naturais e nos modos de vibração da estrutura. No caso dos modos de vibração as alterações podem ser percebidas a partir de alterações verificadas nos parâmetros modais (massa e rigidez e amortecimento), que podem ser observadas a partir dos resultados de testes dinâmicos de vibração [12]. Regra geral, os métodos de identificação de dano baseados nas vibrações comparam as diferenças verificadas nas propriedades dinâmicas da estrutura nas situações, com e sem dano, sejam estas propriedades frequências naturais ou modos de vibração.

No entanto, a identificação do dano através, simplesmente, da alteração das frequências naturais pode não ser viável dependendo da severidade do dano. As alterações das propriedades dinâmicas podem não ser suficientemente significativas para alterar os valores das frequências naturais, pelo que é necessário a presença de um dano severo para obter resultados fiáveis. Estes métodos de deteção podem ainda ser afetados pela resolução em frequência com que as medições experimentais são realizadas, por fatores externos, como o meio ambiente ou ruído, dificultando a obtenção de resultados precisos. Para além destes fatores, estes métodos não permitem a localização do dano na estrutura, uma vez que as frequências naturais são independentes do ponto de excitação e medição da resposta, ou seja, danos em diferentes localizações da estrutura podem provocar a mesma alteração das frequências naturais.

Constatada esta limitação apresentada pelos métodos de deteção de dano baseados nas alterações das frequências naturais da estrutura surgiram os métodos de deteção de dano baseados em modos de vibração, que são uma representação espacial da forma como a estrutura se deforma a uma determinada frequência natural. Estes apresentam a desvantagem de ser necessária a obtenção de um elevado número de pontos de medição experimental para obter uma definição aceitável dos modos de vibração, principalmente, os de mais elevada frequência, tornando esta uma técnica mais dispendiosa e complexa [6].

Existem ainda os métodos baseados em curvaturas, que recorrem à segunda derivada dos modos de vibração ou das FRFs, para comparar estruturas danificadas com estruturas intactas.

O método da Curvatura dos Modos de Vibração foi desenvolvido por Pandey, Biswas e Samman, em 1991 [13], que concluíram que curvatura é obtida através do cálculo da segunda derivada do modo de vibração num ponto da estrutura e a localização do dano é realizada através da comparação direta entre as curvaturas da estrutura danificada e da estrutura sem dano, utilizando o módulo da diferença entre ambas. No entanto, uma das limitações deste método

é a incapacidade de detetar danos em pontos extremos da estrutura, uma vez que para o cálculo da curvatura, é utilizado o método das diferenças finitas para a obtenção da segunda derivada de um ponto, o que requer o conhecimento dos valores do deslocamento modal em três pontos adjacentes. Além disto, a necessidade de modelos numéricos complexos e a dificuldade em quantificar o dano estrutural levaram ao desenvolvimento de métodos baseados nas FRFs.

No caso das FRFs, o princípio é semelhante. A curvatura das FRFs é determinada aplicando a segunda derivada ao conjunto de respostas em frequência, o que permite uma análise mais detalhada da resposta dinâmica da estrutura. No entanto, para maximizar a eficácia deste método, é necessário considerar toda a gama de frequências e os diversos pontos de aplicação de força, ao invés de se limitar a uma única frequência ou localização. Esta abordagem permite uma avaliação mais abrangente do comportamento da estrutura na presença de dano.

Verificou-se que a determinação das curvaturas, a partir dos modos de vibração ou das Funções de Resposta em Frequência (FRFs), que requer o cálculo da segunda derivada, é particularmente sensível às variações induzidas pela presença de dano. No entanto, essa abordagem também se mostra altamente suscetível ao ruído presente nas medições, o que pode comprometer ou até inviabilizar a identificação precisa do dano. Isso ocorre porque as perturbações introduzidas pelo ruído podem ter um impacto mais significativo no cálculo da segunda derivada do que a própria presença do dano, especialmente em casos de danos de baixa severidade.

O método de deteção de dano adotado nesta dissertação irá utilizar como input no processo de identificação de dano as Funções de Resposta em Frequência.

1.4 Etapas do processo de Identificação de dano

Em 1993, Rytter [14] sugere um método para a classificação do dano constituído por quatro níveis:

- Nível 1 - Deteção: indicação da presença de dano na estrutura;
- Nível 2 - Localização: informação sobre a localização do dano na estrutura;
- Nível 3 - Quantificação: informação sobre a severidade do dano;
- Nível 4 - Previsão: informação sobre o tempo de vida útil da estrutura.

Os métodos de identificação de dano baseados em vibração que não utilizam algum modelo numérico estrutural, fornecem principalmente identificação de danos de Nível 1 e Nível 2. Quando os métodos baseados em vibração são combinados com um modelo numérico, a identificação de danos de Nível 3 pode ser obtida em alguns casos. A previsão de Nível 4 está

geralmente associada aos campos de mecânica da fratura, análise de vida útil por fadiga ou avaliação de projeto estrutural [15]. Esta dissertação ira forca-se nas três primeiras etapas: detecção, localização e quantificação, não absoluta, mas relativa, baseada na comparação entre diferentes cenários de severidade do dano simulados na estrutura, de forma a avaliar se o método permite identificar variações progressivas no seu comportamento dinâmico.

1.5 Trabalhos realizados no Núcleo de Mecânica Estrutural

O estudo da detecção de dano é um tema que apresenta uma extensa bibliografia, muito explorado por diversos autores e investigadores de diversas partes do mundo, mas também em muitos projetos realizados na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, no Núcleo de Mecânica Estrutural. A Tabela 1 apresenta as dissertações realizadas por alunos no NME no âmbito da identificação de dano, por ordem cronológica e as respetivas metodologias aplicadas na realização dos projetos.

É de destacar que desde 2014, os métodos mais utilizados no NME para detecção de dano passam pelo estudo das FRFs, tendo-se alcançado os objetivos propostos em todas as dissertações. Na maior parte dos estudos disponíveis na literatura, as validações experimentais de métodos que utilizam as FRFs são conduzidas em elementos estruturais simples, principalmente estruturas do tipo viga, com alta informação modal, o que permite que a maioria dos métodos alcancem altos desempenhos [16]. Nas dissertações realizadas no NME, temos exemplos de estudos realizados em vigas (Raquel Rodrigues, 2021 [6] e João Medeiros, 2022 [17]), em placas (João Berardo, 2021 [18]) e em estruturas tubulares (Joana Ramos, 2023 [19]). No entanto, ainda não foi realizado nenhum estudo no NME sobre a utilização de FRFs para detecção e localização de dano numa estrutura complexa, composta por placas e vigas, que é o objetivo desta dissertação.

Tabela 1 (a) - Dissertações realizadas no NME sobre identificação de dano

Desenvolvimento de um método para a deteção e determinação da localização de dano em estruturas, Santos, Carlos Henrique Fonseca dos (2009) [20]			Funções de Resposta em Frequência
Deteção, localização e quantificação de danos em estruturas, Saraiva, Bruno Ricardo Fonseca (2012) [21]	Modos de vibração		
Deteção e localização de dano em estruturas, Moraes, Jorge Daniel Pereira (2014) [22]		Transmissibilidades	Funções de Resposta em Frequência
Deteção de dano em estruturas reticuladas utilizando análise de vibrações, Sa-fara, Mário José Calisto (2016) [23]			
Localização e quantificação de dano com recurso às FRFs, Amaral, Carlos Maria Reynolds de Souza Parreira (2017) [24]			
Deteção e localização de dano em estruturas utilizando a resposta dinâmica de translação e rotação, Colaço, Jorge Sousa (2018) [25]			
Avaliação de vários indicadores na deteção e localização de dano em estruturas, utilizando as Funções de Resposta em Frequência, Fernandes, Pedro Jorge Lopes (2019) [26]			
Deteção de dano em juntas soldadas por análise de vibrações, correntes induzidas e ultrassons, Vicente, Ana Sofia Ferrão (2019) [27]			
Identificação de dano numa viga utilizando respostas dinâmicas, Rodrigues, Raquel Sofia Torrão (2021) [6]			
Desenvolvimento e validação de uma nova metodologia para a deteção de dano em placas, Berardo, João Henrique Ribeiro (2022) [18]			
Deteção de dano estrutural em vigas utilizando as respostas dinâmicas medidas com acelerómetros e extensómetros, Medeiros, João Pedro Gomes Franco (2022) [17]			

Tabela 1 (b) - Dissertações realizadas no NME sobre identificação de dano

Avaliação de vários indicadores na deteção e localização de dano em estruturas utilizando transmissibilidade de deslocamento/rotação, Pinto, Miguel Dias Duarte Parraça (2022) [28]		Transmissibilidades	
On the use of virtual sensing for damage identification on wind turbine blades, Mendes, Andreia Sofia da Silva Mendes (2022) [29]	Modos de Vibração		
Deteção de dano em estruturas tubulares utilizando Funções de Resposta em Frequência, Ramos, Joana Filipa Cruz (2023) [19]			Funções de Resposta em Frequência
Identificação de dano estrutural em placas construídas em diferentes materiais compósitos, Sousa, Ricardo Pereira de (2023) [30]			

1.6 Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo a deteção, localização e quantificação relativa de diferentes severidades de dano, associados à perda de massa, numa estrutura desenvolvida e construída para o estudo.

A estrutura é composta por 12 vigas de alumínio e 4 placas fixadas por ligações aparafusadas, cujos desenhos técnicos encontram-se nos Apêndices A.1 - A.5. A estrutura assemelha-se à utilizada num estudo realizado em 2023 na Universidade Ramon Llull, em Barcelona [16],

apresentada na Figura 3, com a diferença de ter a sua base encastrada. No artigo citado, Font-Moré et al. avaliaram o desempenho de vários indicadores de danos, que utilizam FRFs na detecção de dano (Nível 1 segundo Rytter) em estruturas com baixa informação modal, utilizando três tipos de estruturas: uma placa de alumínio, uma estrutura treliçada e um *benchmark* de edifício de três andares.

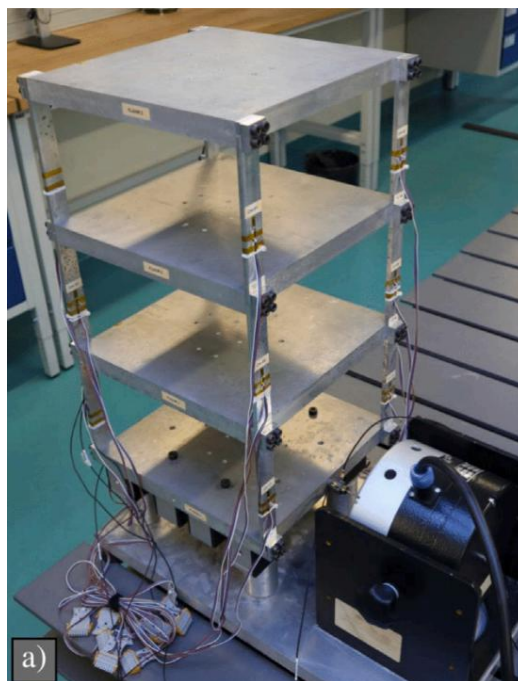


Figura 3 - Configuração experimental de benchmark de edifício de três andares. Adaptado de [16]

A Figura 4 ilustra a massa utilizada no estudo de Font-Moré et al., assim como exemplos dos danos que foram aplicados à estrutura.

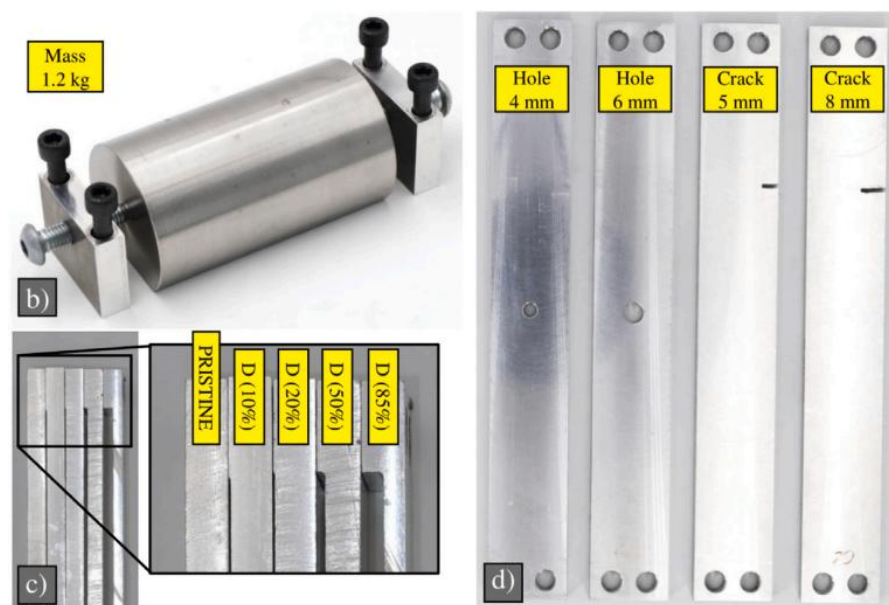


Figura 4 - Tipos de danos aplicados à estrutura no estudo de Font-Moré et al. (2023) [16], incluindo adição de massa, furos, fissuras e reduções da seção transversal das vigas

A estrutura desenvolvida no presente estudo foi submetida a diversos cenários de danos. Foram retiradas massas, previamente adicionadas nas vigas e placas da estrutura, de forma a simular danos em diferentes localizações e com diferentes severidades. Para os ensaios experimentais foram colocados 9 acelerômetros em diferentes localizações da estrutura, esta foi excitada em 14 pontos diferentes, através de um martelo de impacto equipado com um sensor de forças. Através de um sistema de aquisição de dados, foram obtidas FRFs da estrutura considerada sem dano e com dano. O principal objetivo do estudo é então, através de uma metodologia pensada e implementada em GNU Octave, baseada na análise das Funções de Resposta em Frequência, determinar e avaliar a eficácia do método na detecção, localização e quantificação relativa de danos na estrutura.

1.7 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos distintos, brevemente descritos em seguida:

- Capítulo 1: Introdução - Contextualização do tema da dissertação, bem como a apresentação da revisão bibliográfica e dos objetivos.

- Capítulo 2: Fundamentos teóricos - Apresentação das bases teóricas nas quais se baseiam a metodologia utilizada e para a obtenção e interpretação dos resultados.
- Capítulo 3: Metodologia - Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada, bem como o processo experimental adotado para obter os resultados estudados.
- Capítulo 4: Resultados e discussão - Apresentação e análise dos resultados obtidos.
- Capítulo 5: Conclusão - Conclusões finais da dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Equação de Equilíbrio, Propriedades Dinâmicas da Estrutura e Funções de Resposta em Frequência

A equação que traduz o equilíbrio dinâmico de um sistema com N graus de liberdade (GDL) é ditada pelas propriedades dinâmicas do sistema, massa $[M]$, amortecimento viscoso $[C]$ e rigidez $[K]$ e é dada por (1) [31]:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

Onde $\{x(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$ e $\{\ddot{x}(t)\}$ correspondem aos vetores de deslocamento, velocidade e aceleração para o instante t , respetivamente e $\{f(t)\}$ representa o vetor de forças externas aplicadas ao sistema [31].

No caso de uma excitação do tipo harmónica, o vetor de forças pode ser definido por:

$$\{f(t)\} = Fe^{i\omega t} \quad (2)$$

Onde F representa a amplitude da força e ω a frequência de excitação.

Desta forma, a resposta do sistema também será do tipo harmónica sendo traduzida, em regime estacionário, por:

$$\{x(t)\} = \bar{X}e^{i\omega t} \quad (3)$$

Sendo $\bar{X}$ um número complexo definido por $\bar{X} = Xe^{i\theta}$.

Substituindo as equações (2) e (3), na equação de equilíbrio dinâmico (1), obtém-se a equação que traduz a relação entre a resposta e a excitação do sistema para cada frequência:

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K])\{\bar{X}(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (4)$$

Onde a primeira parcela da equação $(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K])$ é denominada matriz de Rigidez Dinâmica, $[Z(\omega)]$, sendo o seu inverso, $[Z(\omega)]^{-1}$, designado por matriz de Recetância $[H(\omega)]$. Desta forma, pode-se escrever a equação de equilíbrio da seguinte forma:

$$[H(\omega)]\{F(\omega)\} = \{\bar{X}(\omega)\} \quad (5)$$

A matriz de Recetância descreve a relação entre as entradas (forças aplicadas) e as saídas (deslocamento, velocidade ou aceleração) no domínio da frequência. Cada elemento $H_{i,j}(\omega)$ da matriz corresponde à resposta no ponto i devido a uma excitação no ponto j , para uma determinada frequência ω .

$$H_{i,j}(\omega) = \frac{\bar{X}_i(\omega)}{F_j(\omega)} \quad (6)$$

Sendo uma função complexa, suas partes reais e imaginárias fornecem informações sobre a rigidez e o amortecimento do sistema, respetivamente, como pode ser observado na Figura 5. Quando obtida para uma gama de frequências, resulta num conjunto de FRFs que descrevem o comportamento dinâmico do sistema.

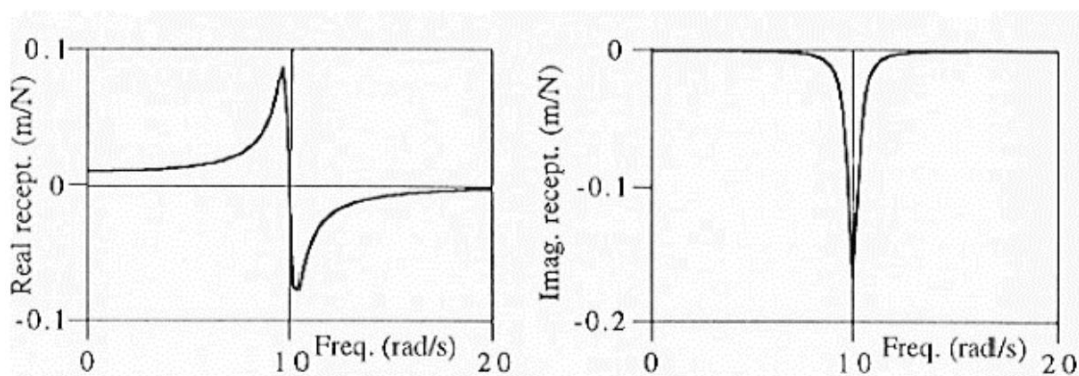


Figura 5 - Representação gráfica da parte real e parte imaginária de uma FRF de Recetância para um sistema de um grau de liberdade. Adaptado de [26]

As frequências naturais de uma estrutura, identificadas pelos picos ou valores máximos nas FRFs, podem sofrer alterações na presença de dano, comparativamente aos valores observados no seu estado sem dano. Os picos correspondem às frequências de ressonância, fenómeno que

ocorre quando a frequência de excitação coincide com uma frequência natural do sistema, resultando em amplitudes de vibração máximas. Em situações críticas, a ressonância pode induzir deslocamentos significativos, podendo levar ao colapso da estrutura.

Uma FRF pode ser descrita através de deslocamento, velocidade e aceleração, originando, respectivamente, as funções Recetância $H(\omega)$, Mobilidade $Y(\omega)$ e Acelerância $A(\omega)$, descritas nas equações (7), (8) e (9):

$$H(\omega) = \frac{\text{deslocamento}}{\text{força de excitação}} \quad (7)$$

$$Y(\omega) = i\omega \cdot H(\omega) = \frac{\text{velocidade}}{\text{força de excitação}} \quad (8)$$

$$A(\omega) = -\omega^2 \cdot H(\omega) = \frac{\text{aceleração}}{\text{força de excitação}} \quad (9)$$

Métodos de identificação de dano baseados em FRFs envolvem a comparação entre as respostas da estrutura intacta e danificada, permitindo a deteção e localização do dano através de diferenças nas curvas. No entanto, a eficácia destes métodos pode ser limitada por fatores externos, como a presença de ruído, que pode comprometer a identificação de danos de pequena magnitude quando os seus efeitos são da mesma ordem de grandeza que os induzidos pelo ruído.

2.2 Deteção de dano utilizando as FRFs

A análise vibratória, mais especificamente os métodos baseados em FRFs, são muito utilizados pela comunidade científica da mecânica estrutural por serem métodos eficazes e com bons resultados a nível de identificação de dano, como já antes mencionado. Wang et al. [3] ressaltam as vantagens inerentes ao uso das FRFs em relação à análise baseada em frequências naturais e modos de vibração. Uma das principais vantagens é que a aplicação das FRFs elimina a necessidade de realizar uma identificação modal da estrutura. Utilizando apenas modos de vibração, a análise é restrita à informação sobre o modo associado à frequência natural, limitando o espectro de dados disponíveis para a avaliação da estrutura, enquanto as FRFs podem ser obtidas numa gama de frequências preestabelecida, garantindo um conjunto de informação mais relevante. No entanto, as FRFs são algo sensíveis a fatores externos ou à presença de ruído. Wang et al. [3] (1997) propuseram um algoritmo para deteção de dano que utiliza um modelo analítico original associado à análise das FRFs obtidas antes e após a ocorrência do

dano. O algoritmo baseia-se em equações de perturbação não lineares derivadas das FRFs, com o intuito de gerar um vetor indicativo que contenha informações sobre a localização e a magnitude do dano na estrutura. Num estudo subsequente, Araújo dos Santos et al. (2005) [32] demonstraram que a gama de frequência considerada e o ponto de aplicação da força são fatores críticos para a detecção do dano.

Park et al. [32] propuseram a análise de danos de forma segmentada, dividindo a estrutura original em subestruturas para a realização de análises independentes, de forma reduzir a quantidade de ensaios experimentais.

Limongelli [33] investigou o efeito dos fatores externos, como variações de temperatura e ruído numa ponte, desenvolvendo um método denominado *Interpolation Damage Detection Method* (IDDM). Este método identifica o dano por meio da diferença entre o deslocamento medido num ponto e o deslocamento estimado por interpolação para a mesma localização, utilizando dados provenientes de sensores distribuídos pela estrutura. Os resultados indicaram que, para níveis baixos de ruído, a temperatura não compromete significativamente os resultados do método proposto.

O conceito de curvatura aplicado às FRFs ($H_{i,j}$) foi introduzido por Maia et al. [34], por meio da seguinte expressão:

$$H''_{i,j}(\omega) = \frac{H_{i+1,j}(\omega) - 2H_{i,j}(\omega) + H_{i-1,j}(\omega)}{h^2} \quad (10)$$

Onde H'' representa a segunda derivada da FRF, $H_{i,j}$, obtida por meio do método das diferenças finitas e h representa a distância entre os pontos de medição consecutivos.

Com base neste conceito, Maia et al. [34] desenvolveram diversos indicadores para a detecção de dano (Nível 1 segundo Rytter) com base nas Funções de Resposta em Frequência. Inicialmente, sugeriu-se a utilização da diferença absoluta entre as curvaturas das FRFs obtidas para a estrutura íntegra e danificada, considerada para cada frequência. Esta diferença local é expressa por (11):

$$\Delta H'' = |H''^d_{i,j}(\omega) - H''_{i,j}(\omega)| \quad (11)$$

onde $H''_{i,j}(\omega)$ representa a curvatura da FRF no ponto i , associada à excitação no ponto j , sendo o índice d referente à condição danificada.

A partir deste critério local, definiu-se o indicador global *FRF-based Mode-Shaped Curvature* (*FRF_MSC*), que consolida as diferenças de curvatura ao longo da gama de frequência analisada para todas as forças de excitação aplicadas, por meio do somatório duplo (12):

$$FRF_MSC_i = \sum_{\omega} \sum_j \Delta H''_{i,j}(\omega) \quad (12)$$

Para aumentar a sensibilidade do método na detecção de danos de pequena escala, Maia et al. [34] sugerem uma variação do critério anterior, baseada na diferença entre os quadrados das curvaturas nas condições com e sem dano. Esta versão, denominada *FRF-based Mode-Shaped Curvature Square* (*FRF_MSCS*), é definida por (13):

$$\Delta(H''_{i,j}(\omega))^2 = \left| (H''^d_{i,j}(\omega))^2 - (H''_{i,j}(\omega))^2 \right| \quad (13)$$

O valor do indicador *FRF_MSCS* no ponto i é então calculado através do somatório dessas diferenças ao longo de todos os pontos de excitação e gama de frequência (14):

$$FRF_MSCS_i = \sum_{\omega} \sum_j \Delta(H''_{i,j}(\omega))^2 \quad (14)$$

No entanto, destaca-se a limitação do cálculo da curvatura depender da existência de medições nos pontos anterior e posterior ao ponto de interesse, passando a ser inviável aplicar estes critérios às extremidades, por exemplo, de uma viga, onde não há vizinhança suficiente para a aplicação das fórmulas diferenciais (como evidenciado na equação 10).

2.3 Indicadores de detecção de dano

Os indicadores de dano permitem fazer a análise e a comparação entre duas curvas de FRFs com e sem dano, tendo como objetivo alcançar um, ou mais níveis do processo de identificação de dano. Os resultados dos indicadores são analisados de formas diferentes para os vários níveis de detecção de dano. Para o primeiro nível, a presença de dano pode ser confirmada caso se verifique que uma FRF medida num determinado instante de tempo é diferente da FRF medida no instante inicial. Para localizar o dano, deve-se analisar as respostas obtidas em vários pontos da estrutura, para perceber se existem alterações mais severas numa determinada localização. Para quantificá-lo, deve-se comparar as FRFs obtidas ao longo de um período de

tempo com medições anteriores, de forma a avaliar a progressão do dano em relação ao momento inicial em que foi feita a primeira medição, que não necessariamente corresponde à estrutura intacta, como no caso de a estrutura já estar em funcionamento.

No estudo realizado por Font-Moré et al. [16], anteriormente mencionado, os indicadores que se destacam para a deteção e quantificação relativa de dano na estrutura de três andares (*Three-story Building Benchmark - 3SBB*), que se assemelha à estrutura utilizada na presente dissertação são: SCIr (*Spectral Correlation Index real part*) FRFSM (*FRF Similarity Metric*) AIGAC (*Average Integration of Global Amplitude Criterion*) e R^2 (*Coefficiente de Determinação*). O SCIr é o indicador que apresenta melhores resultados na maior parte das condições de testes aplicadas à estrutura, seguido pelo indicador FRFSM. No entanto, o método FRFSM contém um parâmetro selecionado pelo operador, o que pode afetar o desempenho da deteção e, consequentemente, tornar o método mais difícil de automatizar. Ao analisar especificamente o impacto do ruído, a redução da relação sinal-ruído diminui o desempenho de todos os indicadores de dano, exceto o R^2 , que se mostra resistente a este tipo de variação. Por outro lado, outros indicadores, como SCIr, SCli, FRFSM e AIGAC, superam o R^2 nas restantes situações.

2.3.1 Indicadores Baseados em Matrizes de Correlação (CFDAC)

A matriz CFDAC (*Complex Frequency Domain Assurance Criterion*) constitui a base para a obtenção dos índices SCIr e SCli e serve para quantificar a similaridade entre dois conjuntos de FRFs, comparando o estado de referência (estrutura sem dano) com o estado potencialmente danificado. Esta matriz é construída através de uma correlação entre as FRFs obtidas em diferentes frequências. Para cada par de frequências ω_f e ω_g , o elemento da matriz é definido como (15):

$$CFDAC_{fg} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H_{ij}^{(p)}(\omega_f) \cdot H_{ij}^{(d)*}(\omega_g) \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H_{ij}^{(p)}(\omega_f) \cdot H_{ij}^{(p)*}(\omega_f) \right) \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H_{ij}^{(d)}(\omega_g) \cdot H_{ij}^{(d)*}(\omega_g) \right)} \quad (15)$$

onde $H_{i,j}^{(d)}(\omega)$ representa a FRF da estrutura danificada $H_{i,j}^{(p)}(\omega)$ e a do estado de referência, os índices i e j correspondem aos pontos de excitação e medição, respetivamente. A partir da matriz CFDAC, obtém-se o *Spectral Correlation Index* (SCI) para avaliar o grau de correlação

entre os dois estados estruturais. Este índice pode ser decomposto em dois componentes principais:

- SCIr (*Spectral Correlation Index* – parte real):

O SCIr é obtido a partir dos valores reais da matriz CFDAC e reflete a correlação dos picos de amplitude das FRFs entre os dois estados da estrutura. Valores do SCIr próximos ao valor de referência (geralmente zero) indicam que as amplitudes das respostas vibratórias da estrutura não sofreram alterações significativas, sugerindo a ausência de dano. Por outro lado, desvios consideráveis nos valores reais apontam para modificações na dinâmica estrutural, possivelmente devido a danos que alteram a rigidez ou a distribuição de massa da estrutura.

- SCII (*Spectral Correlation Index* – parte imaginária):

O SCII é obtido a partir da parte imaginária da matriz CFDAC e traduz as variações de fase entre as FRFs do estado sem dano e do estado com dano. Alterações na fase podem ocorrer mesmo quando as amplitudes permanecem relativamente iguais. Desta forma, o SCII complementa o SCIr, fornecendo um estudo mais completo das alterações estruturais no sistema.

2.3.2 Indicador Razão

Nesta dissertação é utilizada uma metodologia que recorre ao indicador denominado de Indicador Razão, mais detalhadamente referida na secção seguinte ("Metodologia"). Este indicador traduz-se no cálculo do módulo do quociente entre duas FRFs, sendo uma correspondente ao estado danificado da estrutura, $H_{i,j}^d(\omega)$, e outra ao estado sem dano, $H_{i,j}(\omega)$. Para cada valor de frequência, ω , da gama utilizada, o Indicador Razão (RI, *Ratio Indicator*) é definido por (16):

$$RI(\omega) = \left| \frac{H_{i,j}^d(\omega)}{H_{i,j}(\omega)} \right| \quad (16)$$

Na situação onde não há presença de dano, as duas FRFs coincidem perfeitamente, resultando num valor do indicador razão igual a 1 para todas as frequências. No entanto, a ocorrência de dano altera a resposta dinâmica da estrutura, resultando num valor de RI diferente de 1.

3 METODOLOGIA

UNeste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para identificar o dano nos três primeiros níveis mencionados: detecção, localização e quantificação relativa. Como referido anteriormente, o objetivo desta dissertação passa por verificar a eficácia da metodologia utilizada a nível de grandes e pequenas severidades de danos. Para isto, foi desenvolvido e implementado um código da metodologia em GNU Octave.

3.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo é uma estrutura de três andares composta por placas e vigas de alumínio, onde serão instalados nove acelerómetros para verificar a sua resposta vibratória em diferentes casos de dano. Na Figura 6 está representada a modelação da estrutura em *SolidWorks* e, nos Apêndices A.1 - A.5, pode ser consultado os seus desenhos técnicos.



Figura 6 - Estrutura de estudo modelada em SolidWorks

3.1.1 Montagem experimental

A estrutura de estudo, representada na Figura 7 é constituída por:

- 4 placas 240 x 240 x 15 mm em alumínio (Apêndice A.1)
- 8 vigas 200 x 25 x 5 mm em alumínio (Apêndice A.2)
- 4 vigas 192,5 x 25 x 5 mm em alumínio (Apêndice A.3)
- 16 batentes 25 x 15 x 10 mm em alumínio (Apêndice A.4)
- 64 parafusos PH1 $\varnothing$ 2,5 mm x 10 mm
- 64 porcas sextavadas M2.5
- 64 anilhas lisas para M2.5
- Clipes de montagem para acelerómetros (mounting clips UA-1407)
- 4 grampos de fixação



Figura 7 - Estrutura de estudo completa montada em laboratório

Foram numeradas e pesadas cada uma das 12 vigas da estrutura, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 2. As 3 placas têm um peso de 2327 g e os 16 batentes 9,1 g, resultando num peso total da estrutura de 10,2 kg.

Tabela 2 - Valores de massa medidos para cada uma das 12 vigas da estrutura

Viga	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Massa (g)	63,8	63,7	63,8	63,9	61,8	61,5	61,6	61,4	63,9	63,9	63,7	63,7

Foram utilizados batentes nas ligações entre as vigas e as placas da estrutura com o objetivo de impedir o movimento relativo entre os componentes, aumentar a estabilidade durante os ensaios e aumentar a rigidez nas ligações. A montagem da estrutura foi realizada manualmente com a utilização de uma chave dinamométrica de precisão, ajustada a um torque de 80

$cN \cdot m$, como é possível observar na Figura 8. É importante o ajuste correto do torque da ferramenta, de forma a garantir que a estrutura esteja estável, evitando danificar ou partir os parafusos em utilização.

Os nove acelerômetros foram fixados à estrutura através de cliques de montagem e foram igualmente distribuídos entre as vigas 2, 6 e 10, dispostas verticalmente no mesmo plano, com três sensores por andar.



Figura 8 - Chave dinamométrica de precisão ajustada ao torque de $80 \text{ cN} \cdot m$

3.1.2 Pontos de medição e excitação

As excitações foram realizadas em 14 pontos da estrutura, com exceção aos primeiros 2 casos de dano, que foram feitos com apenas 9 pontos. Os primeiros 9 pontos de excitação foram aplicados nas vigas 2, 6 e 10, na parte dianteira das mesmas (assinalados na Figura 9 por um X"), e os acelerômetros foram colocados nas mesmas localizações na parte traseira das mesmas vigas. Dos 5 pontos restantes, dois deles foram posicionados nas vigas 5 e 9, e também foram excitadas as três placas, em pontos na parte traseira da estrutura, permitindo a excitação de diferentes modos de vibração. Foram utilizados 9 pontos de medição, correspondentes às localizações dos 9 acelerômetros instalados nas vigas 2, 6 e 10.

A esquematização dos pontos de excitação da estrutura pode ser verificada na Figura 9, onde a numeração V1 a V12 representam as vigas e P1 a P14 representam os pontos de excitação.

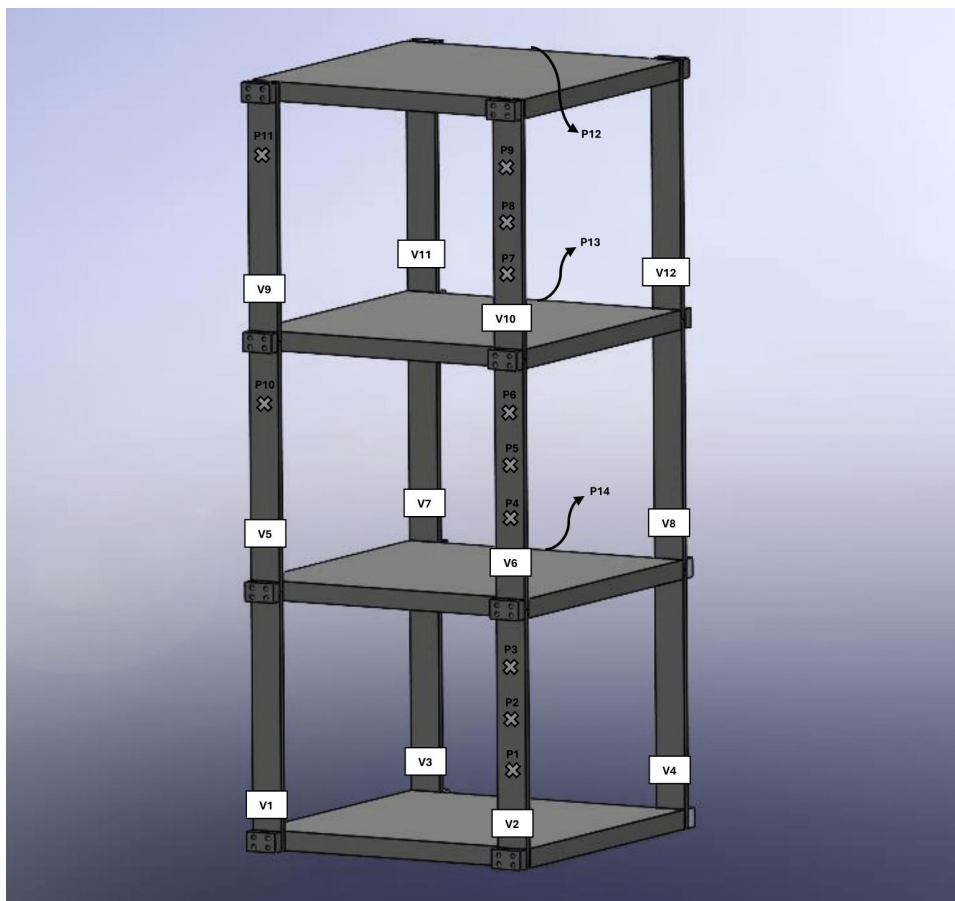


Figura 9- Esquematização dos pontos de excitação e pontos de medição da estrutura

3.1.3 Processo de encastramento

De forma a simular o encastramento da base da estrutura, fixou-se a estrutura a uma viga em I através de grampos de fixação, como pode ser verificado na Figura 10. Como a abertura dos grampos não era suficiente para alcançar completamente a superfície da viga, foi necessário inserir uma barra de madeira como calço, de forma a compensar o desnível e fixar a estrutura.



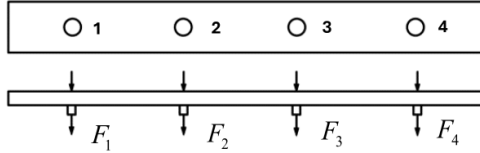
Figura 10 - Encastramento da estrutura através de grampos de fixação

3.2 Metodologia aplicada para a identificação do dano

O esquema abaixo (Figuras 11, 12 e 13) representa uma exemplificação da metodologia utilizada nesta dissertação para a detecção, localização e quantificação relativa do dano, para o caso de uma viga em que foram definidos quatro pontos de medição e excitação, o dano foi aplicado entre os pontos de medição 2 e 3.

Primeira Fase

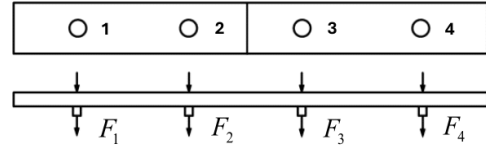
Estrutura de Referência



$$\begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & H_{12}(\omega) & H_{13}(\omega) & H_{14}(\omega) \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & H_{23}(\omega) & H_{24}(\omega) \\ H_{31}(\omega) & H_{32}(\omega) & H_{33}(\omega) & H_{34}(\omega) \\ H_{41}(\omega) & H_{42}(\omega) & H_{43}(\omega) & H_{44}(\omega) \end{bmatrix}$$

Com ω de ω_1 a ω_{final}

Estrutura com Dano



$$\begin{bmatrix} H^d_{11}(\omega) & H^d_{12}(\omega) & H^d_{13}(\omega) & H^d_{14}(\omega) \\ H^d_{21}(\omega) & H^d_{22}(\omega) & H^d_{23}(\omega) & H^d_{24}(\omega) \\ H^d_{31}(\omega) & H^d_{32}(\omega) & H^d_{33}(\omega) & H^d_{34}(\omega) \\ H^d_{41}(\omega) & H^d_{42}(\omega) & H^d_{43}(\omega) & H^d_{44}(\omega) \end{bmatrix}$$

Com ω de ω_1 a ω_{final}

4 pontos de excitação e 4 pontos de resposta – 16 FRFs



Aplicação para cada FRF, em cada frequência, do Indicador Razão (RI)

$$RI_{i,j}(\omega) = \left| \frac{H^d_{i,j}(\omega)}{H_{i,j}(\omega)} \right|$$

$$[RI(\omega)] = \begin{bmatrix} RI_{11}(\omega) & RI_{12}(\omega) & RI_{13}(\omega) & RI_{14}(\omega) \\ RI_{21}(\omega) & RI_{22}(\omega) & RI_{23}(\omega) & RI_{24}(\omega) \\ RI_{31}(\omega) & RI_{32}(\omega) & RI_{33}(\omega) & RI_{34}(\omega) \\ RI_{41}(\omega) & RI_{42}(\omega) & RI_{43}(\omega) & RI_{44}(\omega) \end{bmatrix}$$

Com ω de ω_1 a ω_{final}

Segunda Fase

Figura 11 - Metodologia aplicada, primeira e segunda fase



Terceira Fase

Aplicação para cada FRF da média
do Indicador Razão (ARI)

$$ARI_{i,j} = \frac{1}{n_{\omega}} \sum_{\omega=0}^{\omega_{final}} RI_{i,j}(\omega)$$

$n_{\omega} \rightarrow$ N° de frequências

$$[ARI] = \begin{bmatrix} ARI_{11} & ARI_{12} & ARI_{13} & ARI_{14} \\ ARI_{21} & ARI_{22} & ARI_{23} & ARI_{24} \\ ARI_{31} & ARI_{32} & ARI_{33} & ARI_{34} \\ ARI_{41} & ARI_{42} & ARI_{43} & ARI_{44} \end{bmatrix}_{n \times n_f}$$

$n \rightarrow$ N° de pontos de medição $n_f \rightarrow$ N° de forças de excitação



Efeito produzido por todas as forças
de excitação (j) em cada ponto de
resposta (i)

$$FARI_i = \frac{1}{n_f} \sum_{j=1}^{n_f} ARI_{i,j}$$

$n_f \rightarrow$ N° de forças de excitação

$$\{FARI\}_{n \times 1} = \begin{Bmatrix} FARI_1 \\ FARI_2 \\ FARI_3 \\ \vdots \\ FARI_n \end{Bmatrix}_{n \times 1}$$

$n \rightarrow$ N° de pontos de medição

Quarta Fase

Figura 12 - Metodologia aplicada, terceira e quarta fase

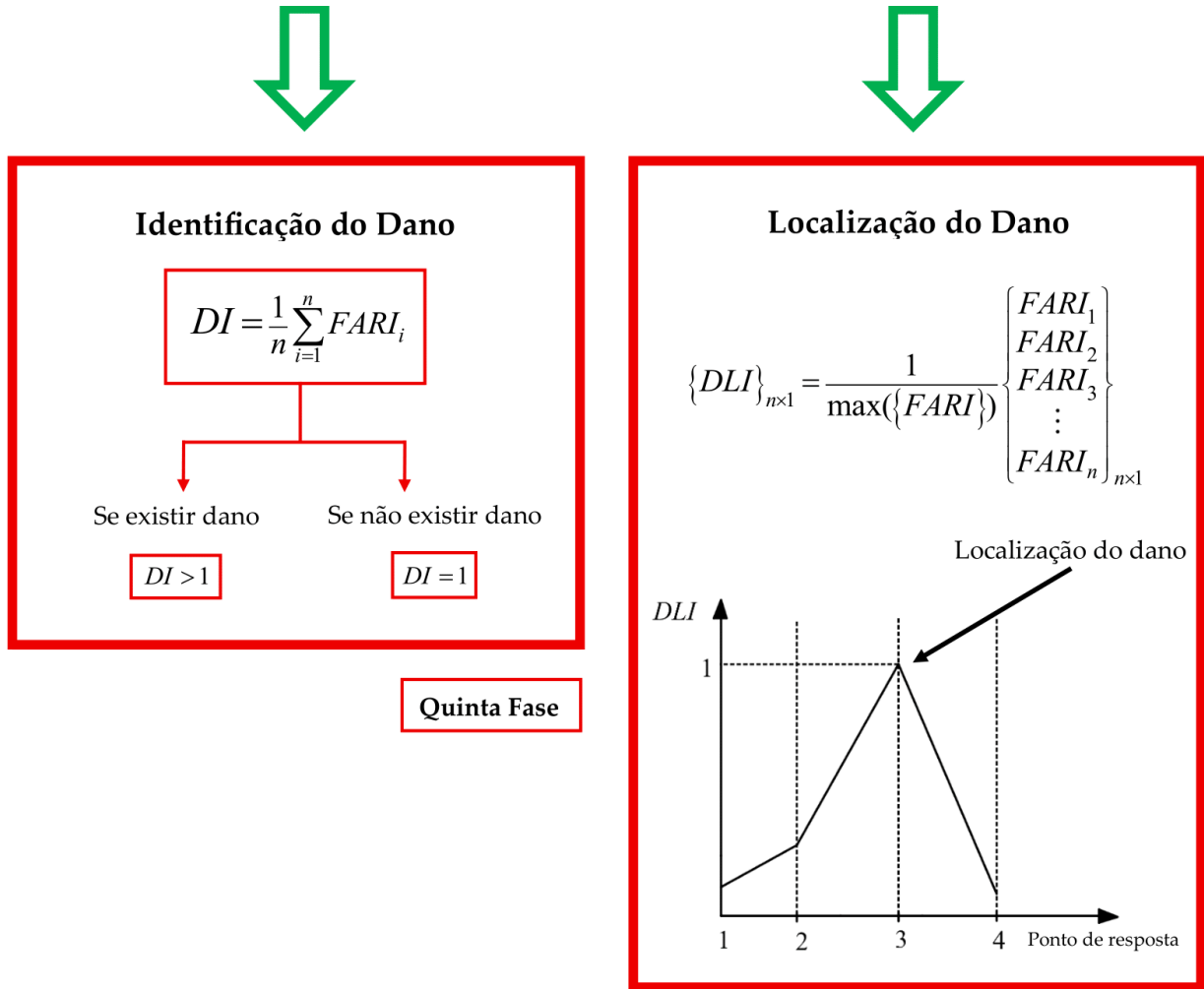


Figura 13 - Metodologia aplicada, quinta fase

A metodologia é composta por cinco fases diferentes, como pode ser observado no esquema. A primeira fase consiste em obter um conjunto de FRFs (recetância, mobilidade ou aceleração) numa gama de n_ω frequências (ω) para a estrutura de referência (sem dano) e para a estrutura considerada com dano. O número de FRFs depende do número de pontos de medição (n) e excitação considerados (n_f). A dimensão da matriz das FRFs, para a situação com e sem dano, para cada frequência será de $n \times n_f$, Figura 11 (Fase 1).

A segunda fase consiste em aplicar o Indicador Razão ($RI_{i,j}(\omega)$) a cada uma das FRFs em estudo, ou seja, calcular o valor absoluto da divisão entre as FRFs consideradas com dano e sem dano, para cada frequência considerada. Obtendo-se para cada uma das n_ω frequências a matriz denominada por $[RI(\omega)]_{n \times n_f}$, Figura 11 (Fase 2).

Na terceira fase, é calculada a média de cada $RI_{i,j}(\omega)$ para a gama de frequência em estudo aplicando-se o *Average Ratio Indicator* $ARI_{i,j}$, obtendo-se uma única matriz denominada $[ARI]_{n \times n_f}$, Figura 12 (Fase 3).

Na quarta fase obtém-se o vetor que representa o efeito produzido por todas as forças (j) em cada ponto de medição (i), $FARI_i$ (*Force-Averaged Ratio Indicator*), somando todos os elementos de cada linha da matriz $[ARI]_{n \times n_f}$ e dividindo esse valor pelo número de forças de excitação aplicadas n_f . Desta forma obtém-se o vetor $FARI$, Figura 12 (Fase 4).

Por fim, a quinta fase do procedimento é subdividida em três etapas: deteção, localização e quantificação relativa do dano (Figura 13).

Deteção: Para identificar a presença de dano, soma-se o conjunto de elementos do vetor $FARI$, obtido na quarta fase, e divide-se o resultado pelo número de pontos de medição. O valor obtido define o *Damage Indicator* (DI). A presença de dano é confirmada quando $DI > 1$; caso $DI = 1$, considera-se que a estrutura não apresenta dano.

Localização: Para determinar a localização do dano, o vetor $FARI$ é normalizado relativamente ao seu valor máximo, originando o *Damage Localization Indicator* (DLI). A representação gráfica do DLI em função dos pontos de medição permite identificar a posição do dano, que idealmente corresponde ao ponto onde $DLI = 1$, ou seja, ao sensor mais próximo da região danificada.

Quantificação relativa: A evolução do dano é avaliada pela variação temporal dos valores de DI . Um aumento progressivo desse valor sugere uma progressão do dano ao longo do tempo, enquanto valores aproximadamente constantes indicam que a condição estrutural se mantém estável. Assim, este método permite não apenas a deteção e localização de dano, mas também o acompanhamento da sua evolução em cenários de monitorização contínua.

No Apêndice C.1 apresenta-se o código GNU Octave, que utiliza a metodologia descrita para processar os dados adquiridos nesta dissertação.

3.3 Análise modal experimental

Nesta secção descreve-se o procedimento experimental adotado para a realização dos ensaios modais na estrutura em estudo. São apresentadas as técnicas de excitação e aquisição de dados, a calibração dos sensores, os parâmetros definidos no software de aquisição e os métodos utilizados para garantir a qualidade dos dados recolhidos.

3.3.1 Método de Excitação

As técnicas de excitação mais utilizadas em análise modal são a excitação com o martelo de impacto (Impact Hammer) (método utilizado na presente dissertação), ou o vibrador (Shaker). Os martelos de impacto são construídos adicionando-se um transdutor de força a um martelo e um elemento de controlo de rigidez na extremidade do transdutor (ponta) [35]. O método consiste em excitar a estrutura em pontos específicos com o martelo, enquanto se mede a resposta da estrutura com acelerómetros. Deve-se ter atenção à escolha correta da ponta do martelo, que terá impacto na força aplicada à estrutura (Figura 14). Nesta dissertação utilizou-se a ponta de metal. O martelo de impacto geralmente vem com pontas intercambiáveis (de borracha, plástico, metal, etc.), que define a gama de frequências da resposta:

Material da ponta	Resultado
• Borracha macia	Impacto longo e suave → excita frequências baixas (e.g. 500 Hz)
• Metal ou plástico duro	Impacto curto e seco → excita frequências altas (e.g. 2 kHz)

Este método apresenta vantagens significativas para estudos realizados em laboratórios, como a rapidez, a portabilidade e o custo relativamente baixo.

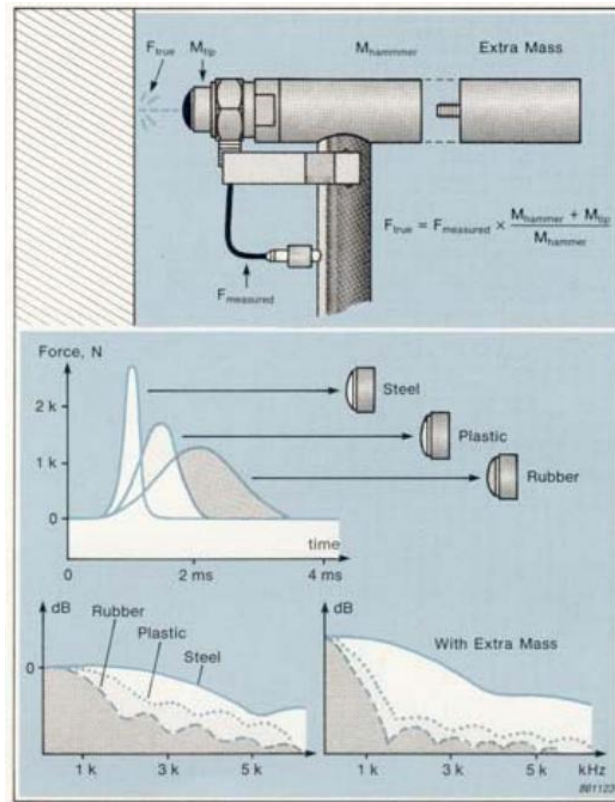


Figura 14 - Esquema do martelo de impacto com transdutor de força, diferentes pontas de excitação e respectivos efeitos no sinal medido. Adaptado de [31]

3.3.2 Parametrização da escala do sistema de medição

A parametrização da escala do sistema de aquisição utilizado neste trabalho (Figura 15) garante a precisão das medições e a qualidade das FRFs analisadas. Apesar dos acelerómetros comerciais virem acompanhados de certificados de calibração, é recomendado o ajuste prático da sensibilidade dos sensores antes das medições experimentais. Esta verificação permite confirmar a integridade dos sensores, cabos, conectores e sistema de aquisição e garantir que os transdutores utilizados estão bem emparelhados na gama de frequências de interesse [35].

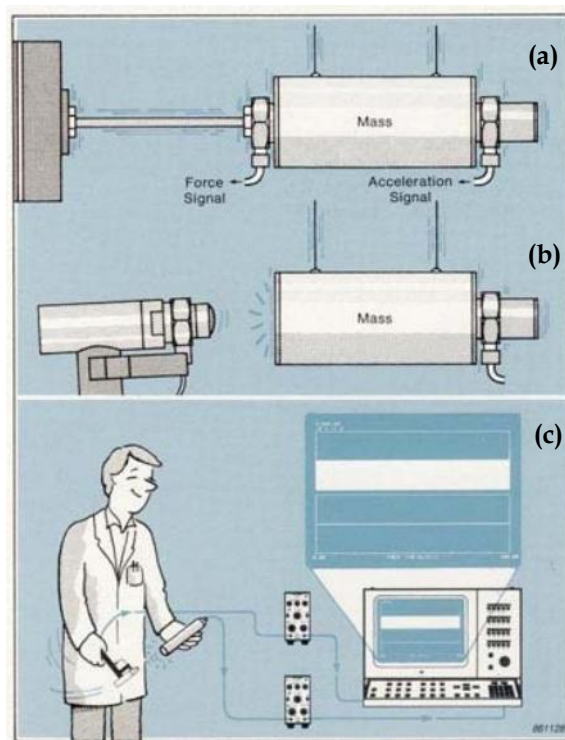


Figura 15 - Esquema de calibração de um acelerómetro utilizando uma massa rígida conhecida. (a) calibração utilizando Shaker; (b) calibração utilizando martelo de impacto; (c) curva de calibração obtida após teste; adaptado de [31]

Princípio Teórico

Com base na segunda lei de Newton:

$$F = m \ddot{x} \quad (17)$$

temos que a aceleração de um corpo rígido com massa conhecida é dada por (18):

$$A(\omega) = \frac{\ddot{x}}{F} = \frac{1}{m} \quad (18)$$

No processo de parametrização do par acelerómetro-martelo de impacto, foi utilizado um martelo de impacto e uma massa de teste considerada rígida (m) de 2 kg. O processo consistiu em suspender a massa de teste por dois fios de nylon, com a intenção de simular a situação de apoio livre-livre. Numa das extremidades da massa foi colocado um acelerómetro na outra foi aplicada uma força (Figura 15 (b)), resultando numa aceleração cujo valor deve ser de:

$$A = \frac{1}{m} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ m/s}^2/\text{N} \quad (19)$$

Isto significa que qualquer resposta obtida do acelerómetro, quando esta massa é excitada, deverá refletir este valor constante de aceleração, assumindo que a massa é perfeitamente rígida e a excitação está confinada a uma única direção.

Idealmente, este comportamento é representado graficamente como uma linha reta horizontal no gráfico da função aceleração vs. frequência (Figura 16), uma vez que a massa atua como um corpo rígido sem ressonâncias dentro da gama de interesse.

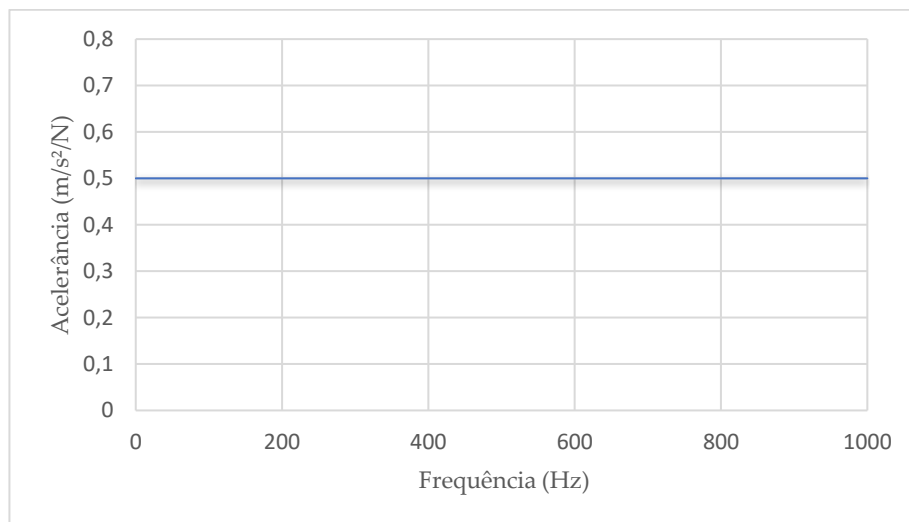


Figura 16 - Comportamento ideal da função aceleração de uma massa rígida em função da frequência

Este tipo de ensaio, conhecido como *Ratio Calibration*, não requer uma calibração absoluta de cada transdutor, mas garante a coerência do sistema de medição. De acordo com a documentação técnica da Brüel & Kjær [35], até mesmo uma massa manual (hand-held mass) pode ser suficiente para esse tipo de verificação, desde que o movimento seja unidirecional e a massa suficientemente rígida.

Representação em dB

Se o analisador estiver configurado para apresentar os resultados em decibéis (dB), a aceleração será expressa como:

$$20 \cdot \log_{10} \left(\left| \frac{\ddot{x}}{F} \right| \right) = 20 \cdot \log_{10}(0,5) \approx -6,02 \text{ dB} \quad (20)$$

Este valor constante aparece como uma linha horizontal a -6,02 dB no gráfico de resposta (Figura 17).

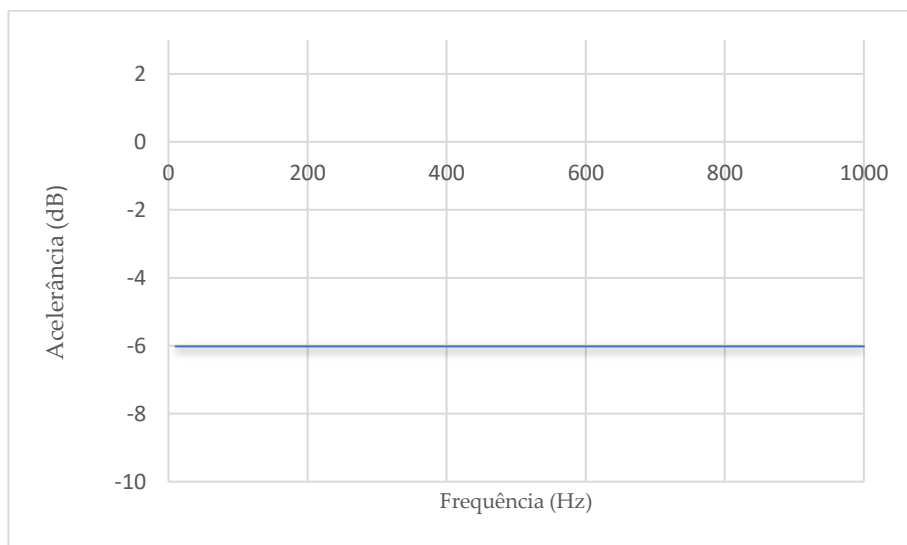


Figura 17 - Representação em dB da função aceleração ideal de uma massa rígida

Montagem Experimental

A massa de 2 kg foi suspensa por dois fios de nylon, conforme apresentado na Figura 18 e o acelerômetro foi montado na superfície da massa. A massa foi excitada com um martelo de impacto, e a resposta foi medida simultaneamente por um sistema de aquisição.



Figura 18 - Montagem experimental para calibração com massa de 2 kg. Adaptado de [32]

A sensibilidade do acelerómetro foi então ajustada de forma que a resposta obtida coincidissem com a aceleração ideal da massa conhecida ($0,5 \text{ m/s}^2/\text{N}$).

3.3.3 Sistema de aquisição

Para a aquisição dos dados, foram utilizados 9 acelerómetros, fixados às vigas 2, 4 e 6, três acelerómetros em cada viga e, do lado oposto, excitaram-se as vigas utilizando o martelo de impacto. As medições dos impactos e dos acelerómetros foram registadas por módulos de aquisição e transmitidas para um computador, onde o software PULSE LabShop [36] construiu as FRFs obtidas. Foram guardados os dados obtidos pelos 9 acelerómetros, para cada excitação aplicada, para posteriormente serem utilizados no programa desenvolvidos em GNU Octave para o processo de identificação do dano.

O equipamento utilizado para a aquisição das FRFs foi:

- Computador com o software PULSE® LabShop software (version 22.2.0.98) (Figura 19);

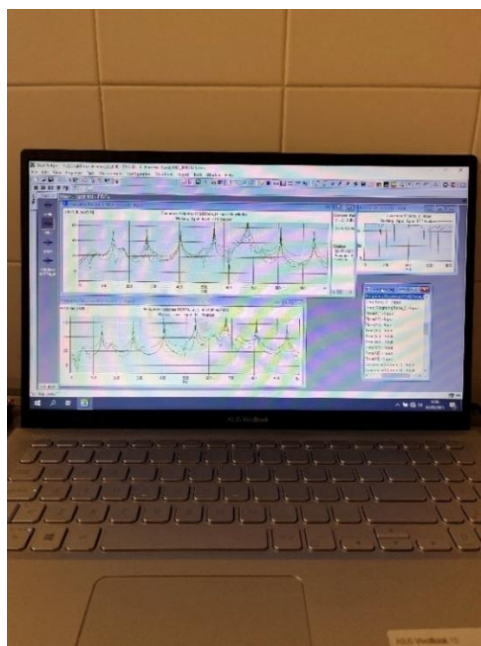


Figura 19 - Software Pulse LabShop

- Dois módulos de aquisição de dados (Brüel & Kjær 3160-A-042) (Figura 20);



Figura 20 - Módulos de aquisição de dados

- Um martelo de impacto com um transdutor de força (Brüel & Kjær 8202) (Figura 21);



Figura 21 - Martelo de impacto com um transdutor de força (Brüel & Kjær 8202)

- Nove acelerômetros (Brüel & Kjær 4508) (Figura 22);



Figura 22 - Acelerômetros fixados à estrutura

Aplicação de Janelas Temporais

A qualidade dos dados adquiridos depende da configuração das janelas a aplicar aos sinais de excitação e de resposta, feita através do *software* de aquisição de dados. Estas janelas são utilizadas para ajustar os sinais medidos no tempo e evitar fenómenos que possam surgir quando a medição é muito curta ou interrompida bruscamente (e.g., leakage).

Durante um impacto, a duração do sinal útil de força é muito curta em comparação com o comprimento total do sinal registado, pelo que após o instante de contacto, o restante do sinal tende a conter ruído. Para isolar apenas o conteúdo relevante do sinal de força, aplica-se a janela transiente (Figura 23), que contempla o sinal original durante o tempo de impacto e desconsidera o restante. Nesta janela, configura-se o *trigger*, para que a medição seja iniciada ligeiramente antes do impacto. Deve-se ainda ter atenção aos impactos duplos, que podem ocorrer durante a excitação, quando, por exemplo, a estrutura recua e provoca um segundo contacto com o martelo, gerando zeros artificiais no espectro de força. As FRFs obtidas com impacto duplo devem ser descartadas, uma vez que resultam em medições incorretas [35].

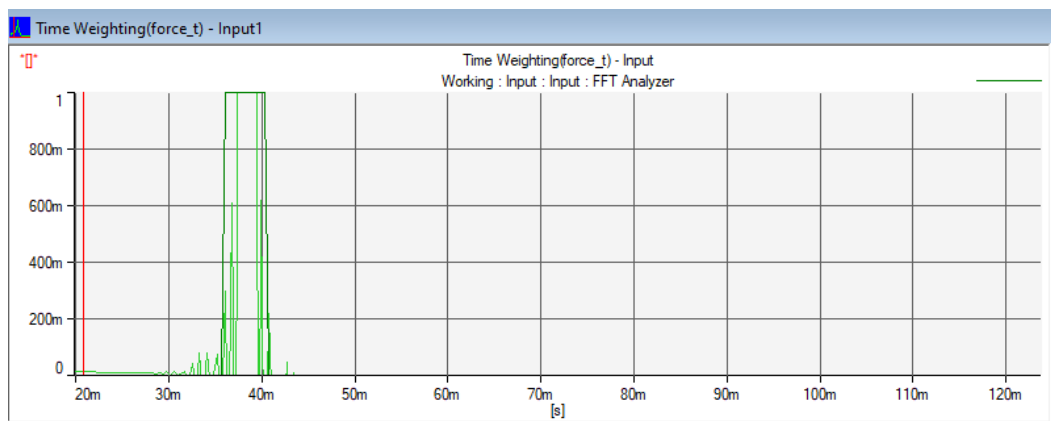


Figura 23 - Janela Transiente aplicada

O sinal de resposta da estrutura, medido com os acelerómetros, representa o decaimento livre da vibração. A forma como este sinal decai depende do amortecimento da estrutura. Para o sinal de saída, deve-se ajustar a janela exponencial (Figura 24) de forma que esta acompanhe o decaimento do sinal da resposta no tempo.

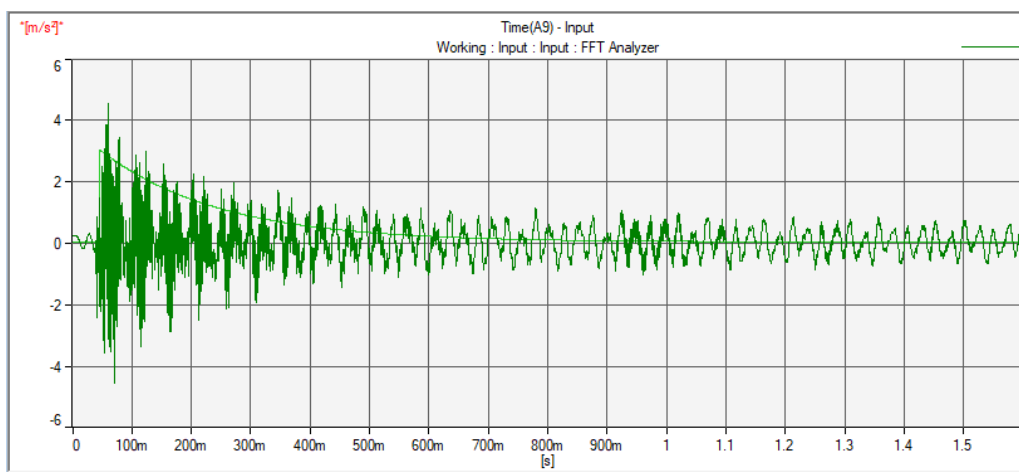


Figura 24 - Janela exponencial aplicada

3.4 Casos de dano

Foram aplicados diversos casos de dano de massa nas vigas e nas placas da estrutura. Foram utilizadas massas para a aplicação dos danos, como podem ser observados na Figura 25, com os respetivos valores de massa representados na Tabela 3, dos quais dependem a severidade do dano. As medições experimentais foram realizadas ao longo de diversos dias no Laboratório de Mecânica Estrutural da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa. Devido à necessidade de montagem e desmontagem diária do sistema de aquisição e dos nove acelerómetros aplicados à estrutura, procedeu-se, no início de cada sessão, à realização da medição das FRFs da estrutura considerada com dano (sem aplicação de massa), de forma a garantir que a medição de referência correspondia corretamente aos casos de dano medidos no respetivo dia e eliminar possíveis influências associadas à reinstalação dos sensores e do equipamento. É de ressaltar que neste trabalho o estado considerado como estado de referência corresponde à estrutura com massa adicionada, enquanto o estado danificado corresponde à estrutura sem massa, uma vez que o dano é simulado através da perda de massa.

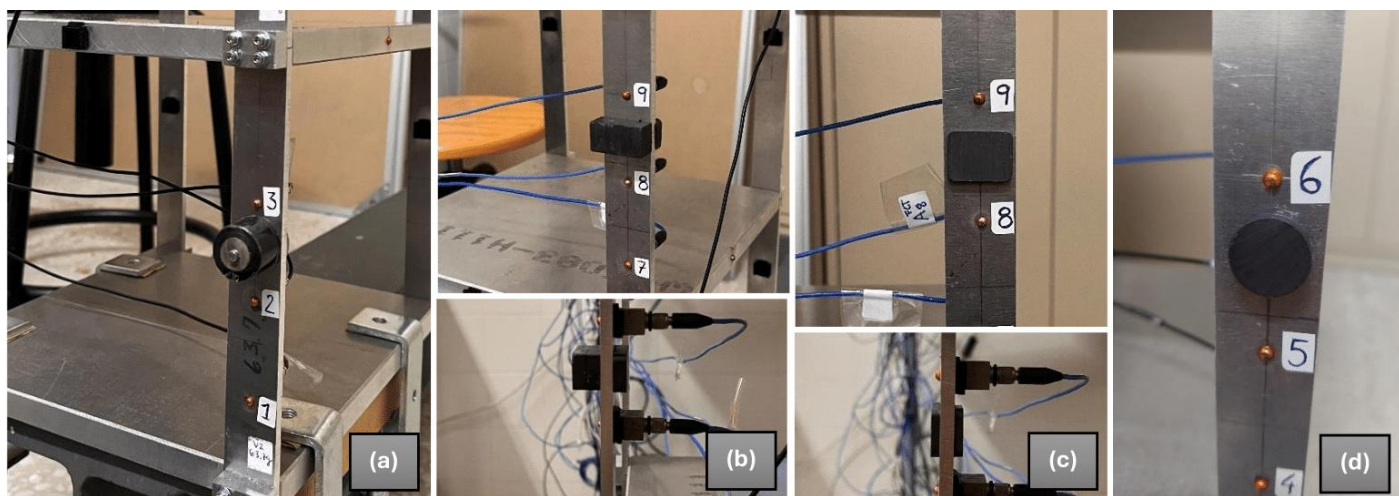


Figura 25 - Aplicação de danos de massa nas vigas da estrutura: (a) Dano do tipo 1; (b) Dano do tipo 2; (c) Dano do tipo 3 (d) Dano do tipo 4

Tabela 3 - Valores de massa e severidade dos diferentes tipos de dano de massa aplicados nas vigas

Tipo de dano	Massa (g)	Severidade (%)
1	66,4	0,65
2	37,1	0,36
3	12,1	0,12
4	7,3	0,07

A severidade do dano representa a influência relativa do dano na estrutura, sendo calculada como a razão entre a massa adicionada e a massa total da estrutura, expressa em percentagem. Os casos de dano consistem em combinações de massas e localizações diferentes, como apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Casos de dano de viga e respectivas localizações na estrutura

Dano	Massa (g)	Localização (acelerómetro)	Severidade (%)
1	66,4	Entre 8 e 9	0,65
2	66,4	Entre 5 e 6	0,65
3	66,4	Entre 2 e 3	0,65
4	37,1	Entre 8 e 9	0,36
5	37,1	Entre 5 e 6	0,36
6	37,1	Entre 2 e 3	0,36
7	12,1	Entre 8 e 9	0,12
8	12,1	Entre 5 e 6	0,12
9	12,1	Entre 2 e 3	0,12
10	7,3	Entre 8 e 9	0,07
11	7,3	Entre 5 e 6	0,07
12	7,3	Entre 2 e 3	0,07
13	66,4	Entre 6 e 7	0,65

Foram também estudados casos de dano aplicados nas placas da estrutura com massas de 502,7 g e de 997,8 g, que correspondem a severidades de dano de 4,92% e 9,77%, respetivamente, e podem ser observados na Figura 26.



Figura 26 - Aplicação de danos nas placas. (a) Caso de dano 16 (massa de 502,7g na placa 2); (b) Caso de dano 17 (massa de 997,8g na placa 4)

Foram feitas as medições das FRFs para cada uma destas massas nas três placas superiores da estrutura, como pode ser consultado na Tabela 5. É importante referir que a numeração adotada para as placas segue uma ordem crescente de baixo para cima, sendo a placa nº 4 a mais elevada na estrutura. A placa inferior (placa nº 1), por estar encastrada na base, apresenta rigidez significativamente elevada e, conseqüentemente, uma resposta vibratória muito reduzida. Por este motivo, decidiu-se excluir esta região das medições, uma vez que dificulta a deteção do dano.

Tabela 5 - Casos de dano de placa e respetivas severidades e localizações na estrutura

Dano	Massa(g)	Localização (placa nº)	Severidade (%)
14	502,7	4	4,92
15	502,7	3	4,92
16	502,7	2	4,92
17	997,8	4	9,77
18	997,8	3	9,77
19	997,8	2	9,77

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O grande desafio desta dissertação está no trabalho experimental realizado na estrutura de três andares e nos resultados obtidos através da metodologia. Neste capítulo são expostos os resultados obtidos através do programa desenvolvido em GNU Octave, para as primeiras etapas de identificação de dano: detecção, localização e quantificação relativa do dano.

4.1 Detecção e quantificação relativa do dano

As FRFs foram medidas numa gama de frequências de 0 a 1000 Hz, com uma discretização de 0,625 Hz, para a estrutura com dano e sem dano, sendo que, como anteriormente referido, considera-se a estrutura com massa como a estrutura de referência e a estrutura sem massa como danificada.

Apresenta-se na Figura 27, a FRF obtida para a estrutura sem dano correspondente à força F5 medida no acelerómetro A1.

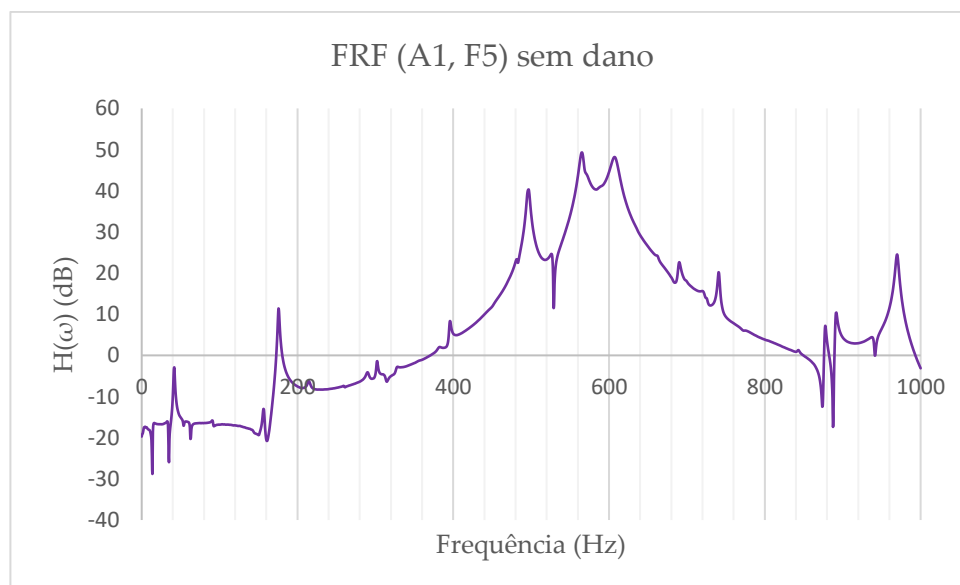


Figura 27 - FRF (A1, F5) da estrutura sem dano

Nas Figuras 28, 29, 30 e 31, é apresentada a sobreposição das curvas das FRF sem dano com quatro casos de dano de severidades diferentes: 0,65%, 0,36%, 0,12% e 0,07%, respectivamente, para a mesma força medida no mesmo acelerómetro.

Observa-se que, para danos de menor severidade (Figuras 28 e 29), as curvas comparadas apresentam variações reduzidas, evidenciando uma baixa influência na resposta da estrutura para danos de baixa severidade. A medida que a severidade aumenta, estas diferenças passam a ser progressivamente mais evidentes, traduzindo-se em alterações significativas de amplitude e deslocamentos das frequências de ressonância, refletidos nos picos das FRFs, o que facilitam a deteção do dano.

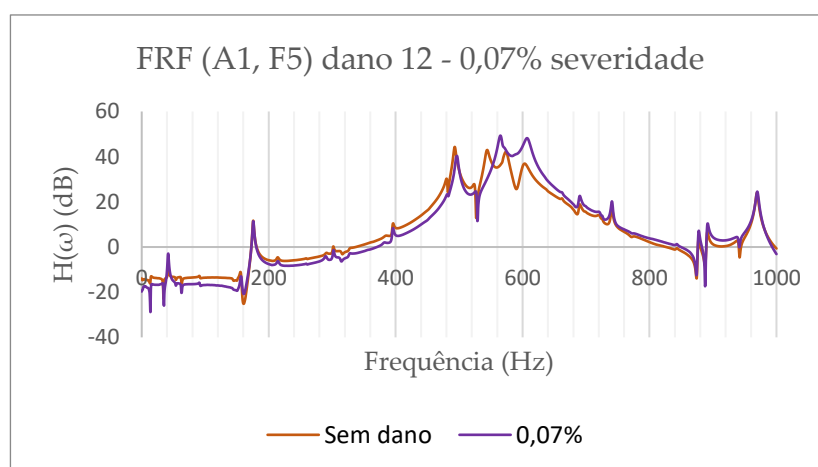


Figura 28 - FRF (A1, F5) da estrutura sem dano e com dano de 0,07% de severidade (dano 12)

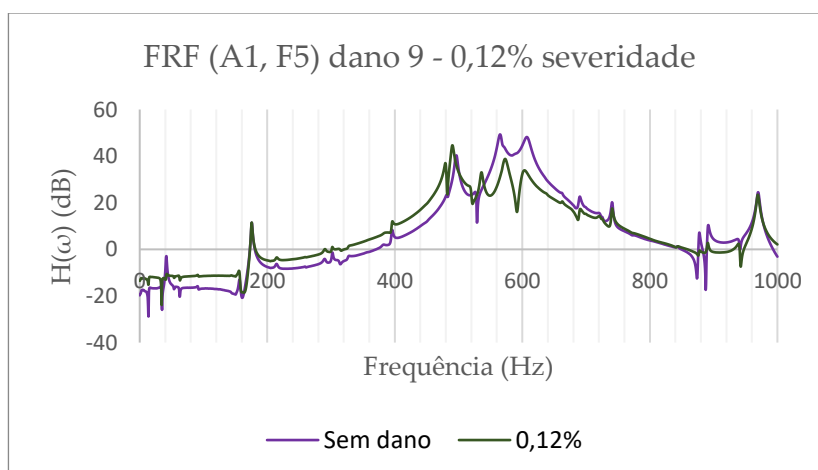


Figura 29 - FRF (A1, F5) da estrutura sem dano e com dano de 0,12% de severidade (dano 9)

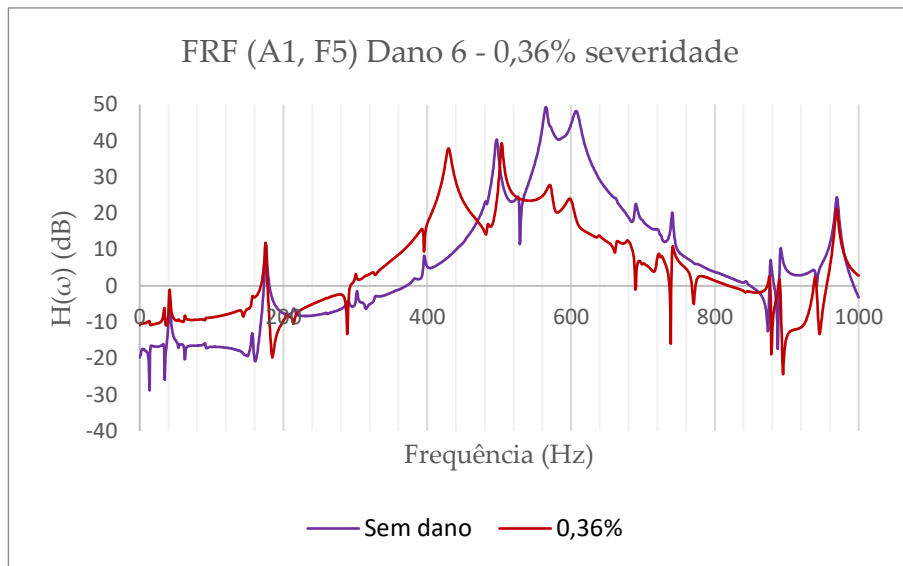


Figura 30 - FRF (A1, F5) da estrutura sem dano e com dano de 0,36% de severidade (dano 6)

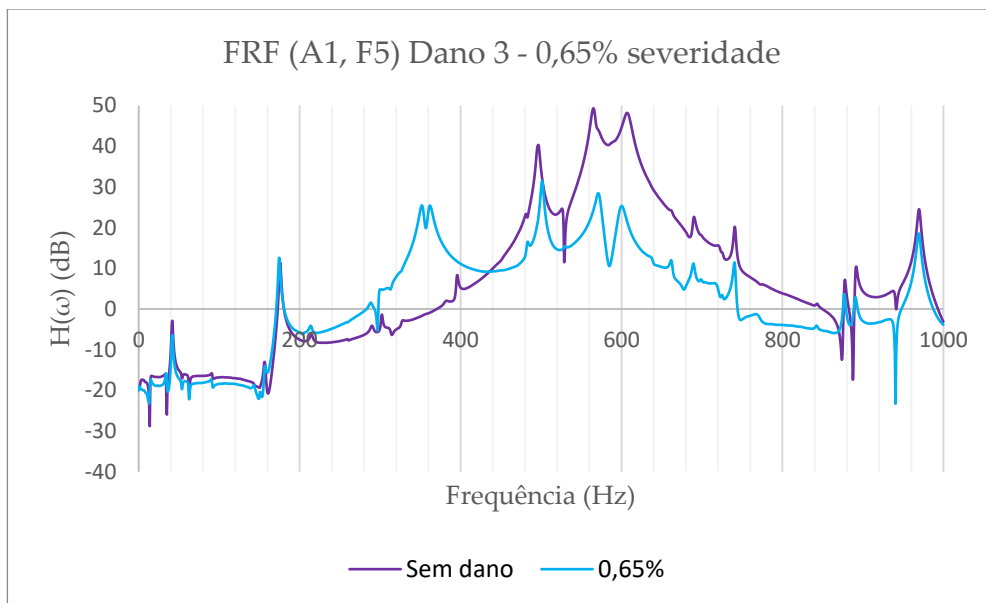


Figura 31 - FRF (A1, F5) da estrutura sem dano e com dano de 0,36% de severidade (dano 3)

Através do Indicador Razão, foi possível identificar a presença do dano de acordo com um valor de DI (*Damage Indicator*) superior a 1, como mencionado no subcapítulo 3.2. "Metodologia desenvolvida". Na Tabela 6 e 7 estão apresentados todos os valores obtidos para o índice DI para os casos de dano aplicados nas vigas e placas, respectivamente. Apresenta-se ainda,

na Figura 32, uma esquematização da estrutura com as respectivas representações e numerações de vigas, placas e pontos de medição. Os pontos sinalizados a laranja representam as localizações onde foram aplicados os danos nos ensaios nas vigas e os pontos sinalizados a azul representam as localizações onde foram aplicados os danos nos ensaios nas placas.

Tabela 6 - Valores de DI obtidos para cada caso de dano de viga

Dano	Severidade (%)	Localização (acelerómetro)	DI
1	0,65	Entre 8 e 9	4,0718
2	0,65	Entre 5 e 6	5,3405
3	0,65	Entre 2 e 3	5,1148
4	0,36	Entre 8 e 9	2,6848
5	0,36	Entre 5 e 6	3,0096
6	0,36	Entre 2 e 3	2,6287
7	0,12	Entre 8 e 9	1,5391
8	0,12	Entre 5 e 6	1,8008
9	0,12	Entre 2 e 3	1,4779
10	0,07	Entre 8 e 9	1,2771
11	0,07	Entre 5 e 6	1,4021
12	0,07	Entre 2 e 3	1,3457
13	0,65	Entre 6 e 7	2,3161

Tabela 7 - Valores de DI obtidos para cada caso de dano de placa

Dano	Severidade (%)	Localização (placa nº)	Localização (acelerómetro)	DI
14	4,92	4	9	1,0550
15	4,92	3	Entre 6 e 7	1,2582
16	4,92	2	Entre 3 e 4	1,1286
17	9,77	4	9	1,1176
18	9,77	3	Entre 6 e 7	1,4982
19	9,77	2	Entre 3 e 4	1,4454

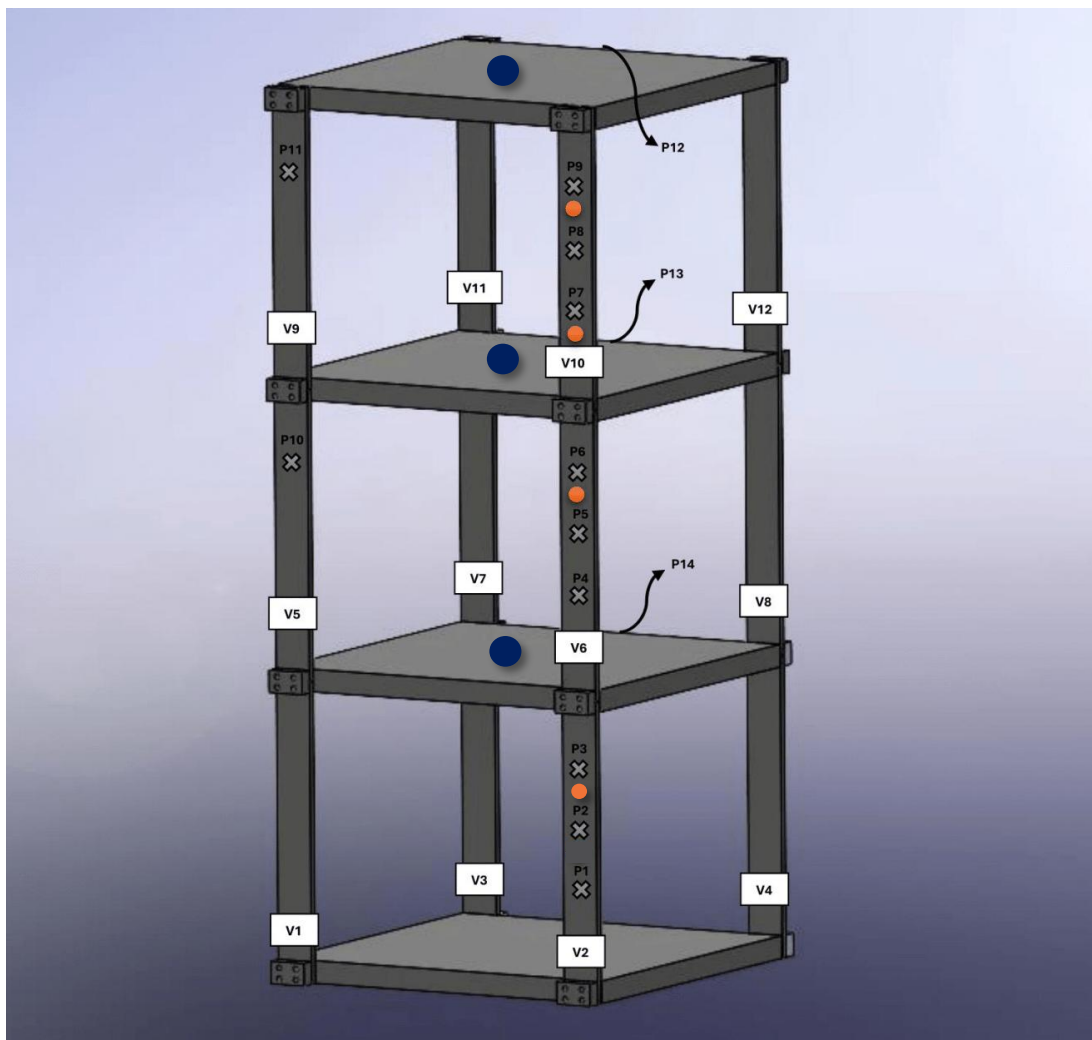


Figura 32 - Pontos de aplicação de dano na estrutura

Observa-se através dos valores apresentados na Tabela 6, para todos os 19 casos de dano, valores de DI superiores a 1, indicando com sucesso a presença de dano em todas as situações testadas.

Apresentam-se em seguida as Tabelas 8, 9 e 10, que contêm os casos de dano, valores de severidade e valores de DI para cada localização de dano aplicado nas vigas, juntamente com os gráficos representados nas Figuras 33, 34 e 35, que correspondem aos valores de DI em função da severidade do dano, em cada localização.

Danos aplicados entre os acelerómetros 2 e 3:

Tabela 8 - Valores de DI obtidos para os danos aplicados entre os acelerómetros 2 e 3

Dano	Massa (g)	Severidade (%)	DI
12	7,3	0,07	1,3457
9	12,1	0,12	1,4779
6	37,1	0,36	2,6287
3	66,4	0,65	5,1148

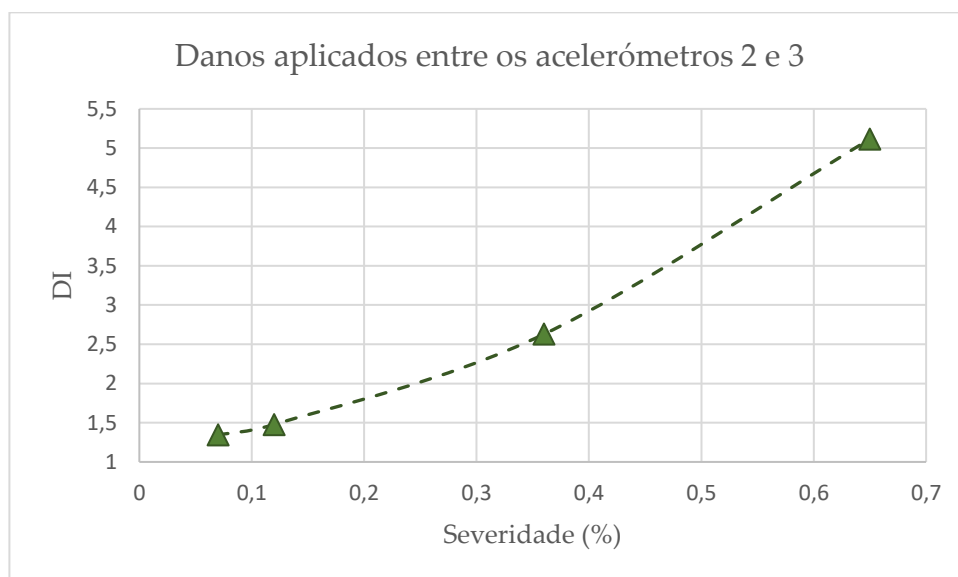


Figura 33 - Gráfico dos valores de DI em função da severidade do dano para os danos aplicados entre os acelerómetros 2 e 3

Danos aplicados entre os acelerómetros 5 e 6:

Tabela 9 - Valores de DI obtidos para os danos aplicados entre os acelerómetros 5 e 6

Dano	Massa (g)	Severidade (%)	DI
11	7,3	0,07	1,4021
8	12,1	0,12	1,8008
5	37,1	0,36	3,0096
2	66,4	0,65	5,3405

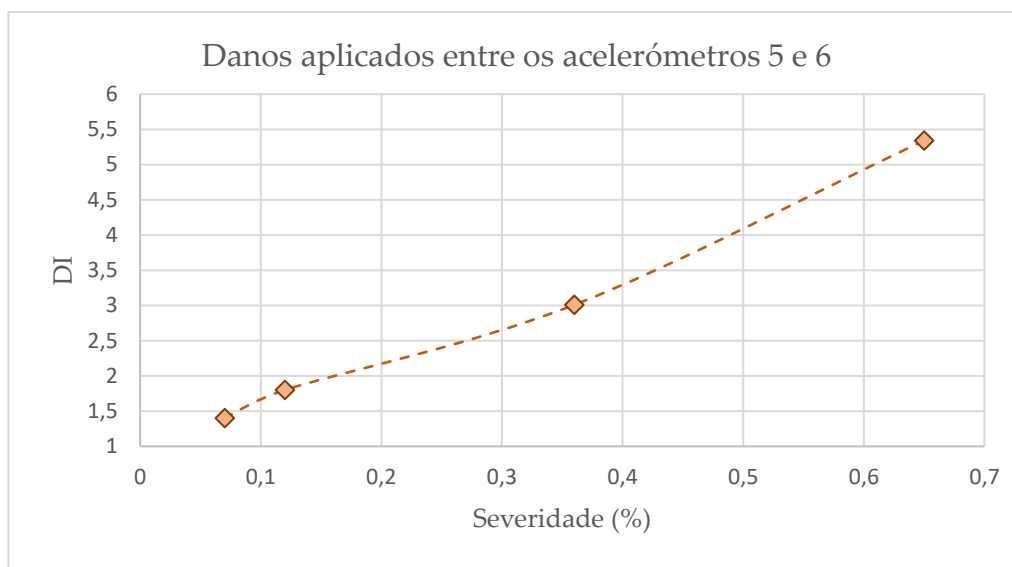


Figura 34 - Gráfico dos valores de DI em função da severidade do dano para os danos aplicados entre os acelerómetros 5 e 6

Danos aplicados entre os acelerómetros 8 e 9:

Tabela 10 - Valores de DI obtidos para os danos aplicados entre os acelerómetros 8 e 9

Dano	Massa (g)	Severidade (%)	DI
10	7,3	0,07	1,2771
7	12,1	0,12	1,5391
4	37,1	0,36	2,6848
1	66,4	0,65	4,0718

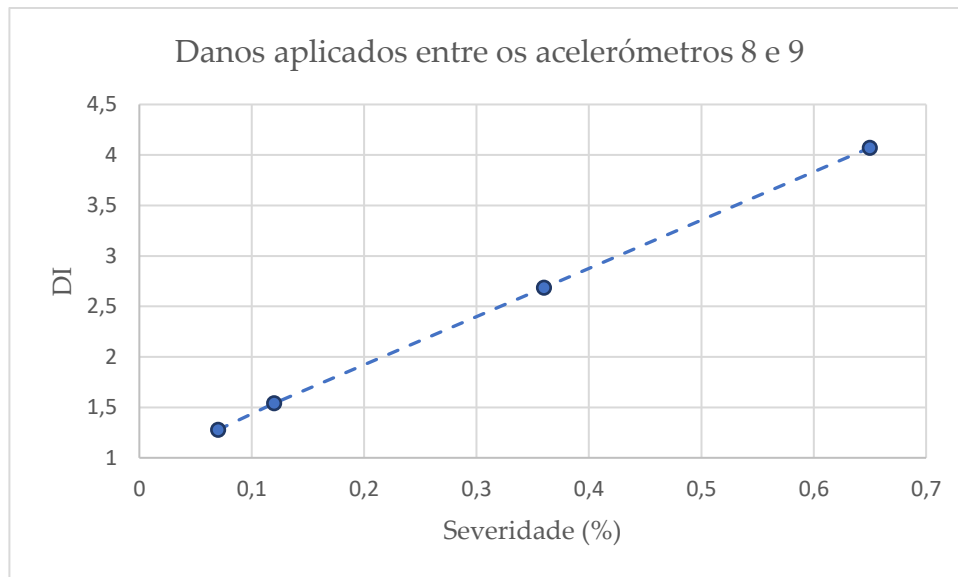


Figura 35 - Gráfico dos valores de DI em função da severidade do dano para os danos aplicados entre os acelerómetros 8 e 9

É possível observar nas três tabelas uma forte correlação entre a severidade dos danos e os valores obtidos para o índice DI . Em todas as localizações, os maiores valores de DI observados (5,3405; 5,1148; 4,0718) correspondem aos danos com maior severidade (massa de 66,4 g, equivalente a 0,65% de severidade). Danos mais severos geram alterações mais pronunciadas nas FRFs, em comparação com as FRFs de referência, aumentando os valores de FAR_i , que é o índice que representa o efeito acumulado das excitações em cada ponto de medição, e, por consequência, aumentando o valor médio que define o DI . Isto justifica o facto de que massas menores (como 7,3 g ou 12,1 g) produzem valores de DI mais próximos de 1, pois provocam apenas pequenas alterações no comportamento dinâmico da estrutura.

Nas Figuras 33, 34 e 35, verifica-se que todas as localizações seguem o mesmo padrão de acordo com o aumento da severidade do dano, o que era espectável e confirma a sensibilidade do método severidade maiores de dano, que geram maiores alterações nas propriedades dinâmicas da estrutura. Nos primeiros dois pontos dos gráficos, não há grandes variações de severidade (de 0,07% a 0,12%), no entanto, já é possível observar alguma variação nos valores de DI , indicando boa eficiência e sensibilidade do método utilizado. Nos pontos seguintes (0,36% e 0,65%), como é possível observar, estas variações são ainda mais significativas.

A partir da análise dos valores de DI em função da severidade do dano aplicado, é possível fazer uma análise de quantificação relativa do dano. Assumindo que cada cenário de dano

tenha sido medido ao longo de um intervalo de tempo, os resultados evidenciam que um aumento de DI está associado a uma progressão do dano na estrutura. Este comportamento verifica-se na tendência crescente do gráfico, onde valores mais elevados de severidade correspondem a valores crescentes de DI . Assim, o acompanhamento contínuo deste índice ao longo do tempo pode fornecer indicações importantes sobre a evolução do estado da estrutura, permitindo avaliar se o dano se agravou ou se permaneceu estável.

O caso de dano 13 foi o único caso onde o dano foi aplicado entre os acelerómetros 6 e 7, onde há uma placa a separar os dois sensores. Este ensaio teve como objetivo verificar o efeito da presença da placa na resposta da estrutura, comparativamente aos outros ensaios realizados. A Tabela 11 apresenta valores de DI obtidos para os casos de dano de severidade 0,65%, incluindo o caso de dano 13. O gráfico representado na Figura 36 apresenta os valores de DI para os danos de 0,65% de severidade nas diferentes localizações onde foram aplicados.

Tabela 11 - Valores de DI para os danos de 0,65% de severidade nas diferentes localizações

Dano	Localização	Severidade (%)	DI
4	Entre acelerómetros 2 e 3	0,65	5,1148
8	Entre acelerómetros 5 e 6	0,65	5,3405
13	Entre acelerómetros 6 e 7	0,65	2,3161
12	Entre acelerómetros 8 e 9	0,65	4,0718

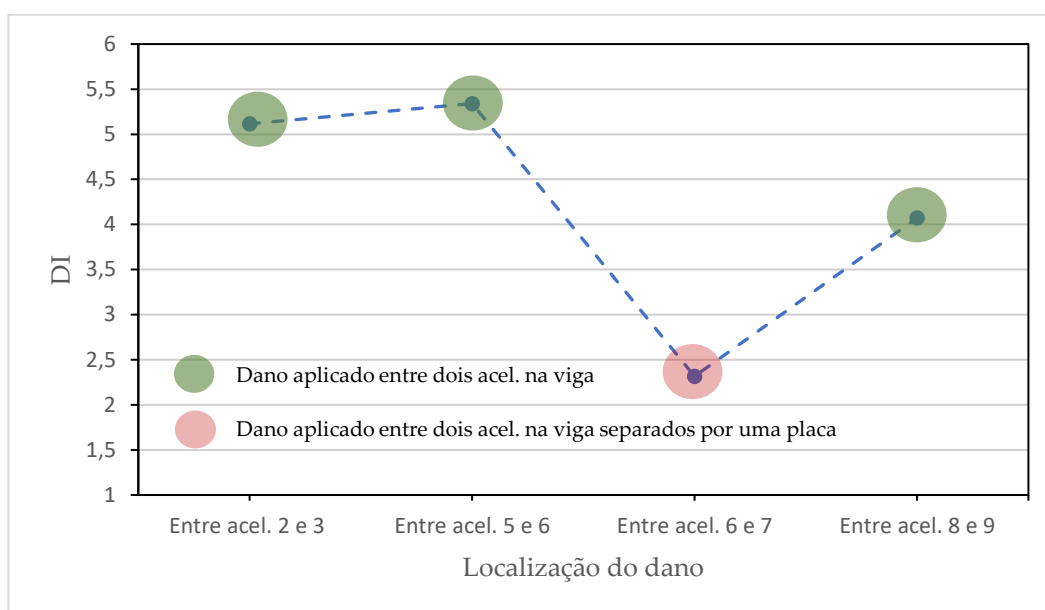


Figura 36 - Gráfico dos valores de DI para os danos de 0,65% de severidade em função das localizações do dano

Com estes dados, conseguimos observar que o valor de DI obtido para o caso de dano aplicado entre os acelerómetros 6 e 7 (dano 13, sinalizado em azul na Tabela 11) é significativamente mais baixo do que os valores obtidos nos outros casos, o que é explicado pela presença da placa entre os dois sensores, que dificulta o movimento da estrutura nesta zona, o que vai levar a valores de DI menores do que nas restantes localizações de dano estudadas.

Nos casos de dano 14 a 19, aplicados nas placas (Tabela 7), verifica-se também uma coerência entre o aumento da severidade e os valores do índice DI . Apesar das massas aplicadas nas placas terem sido significativamente mais elevadas do que aquelas aplicadas nas vigas, com pesos de até 997,8 g nas placas, comparado a um máximo de 66,4 g nas vigas, os valores de DI obtidos para os casos de dano nas placas permaneceram próximos de 1, indicando pequenas variações em relação à estrutura sem dano. Por outro lado, os casos de dano nas vigas, mesmo com massas e severidades muito inferiores, resultaram em valores de DI significativamente mais elevados, chegando a ultrapassar 5 em alguns casos.

Destacam-se os valores associados aos danos localizados na placa 4, que são muito próximos de 1, revelando que os danos nesta localização tiveram um impacto estrutural reduzido, dificultando a sua deteção. Por outro lado, através do gráfico na Figura 37, é possível observar que os valores de DI mais elevados para os danos nas placas foram verificados na placa 3, tanto para a severidade de 9,77%, quanto para a severidade de 4,92%, o que pode ser explicado

pela possibilidade desta placa apresentar deslocamentos mais significativos nos modos de vibração da estrutura, gerando alterações mais evidentes nas FRFs medidas.

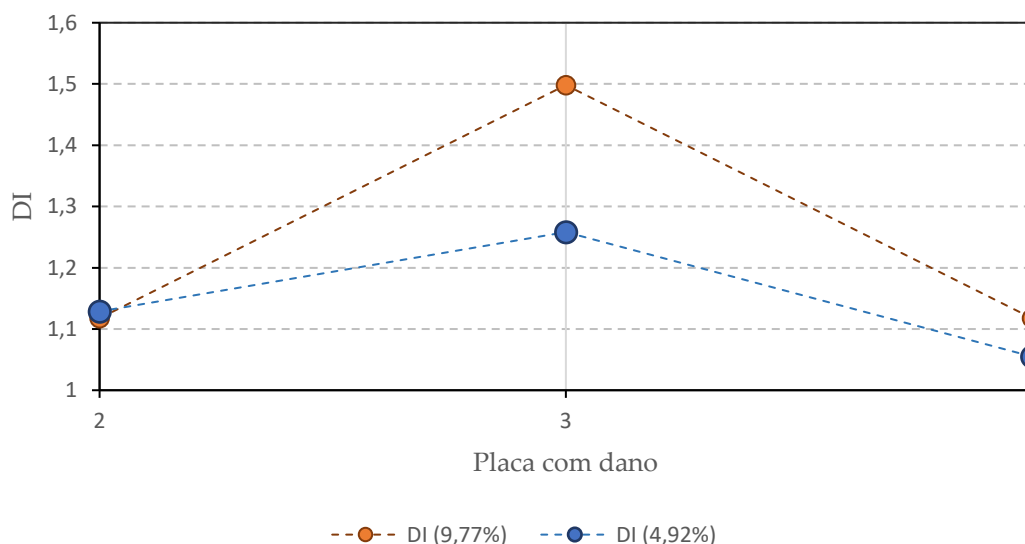


Figura 37 - Gráfico dos valores de DI para as severidades de 9,77% e 4,92% em função das placas onde os danos foram aplicados

4.2 Localização do dano

As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados obtidos pelo programa em GNU Octave para a localização dos danos aplicados nas placas e nas vigas da estrutura, respetivamente. A partir da metodologia adotada, o programa indicou o ponto da estrutura onde verificou a presença do dano. O dano é dito localizado quando o valor máximo obtido pelo índice *DLI* se apresenta num dos dois pontos de medição entre os quais o dano está aplicado. Nas tabelas estão assinalados a verde os casos onde o ponto indicado vai de acordo com a condição acima referida e a vermelho o caso onde o ponto indicado não corresponde à localização do dano.

Observa-se que, para a maioria dos casos de vigas, especialmente aqueles com severidades mais elevadas, o ponto identificado corresponde exatamente ao ponto de medição imediatamente acima ou abaixo da localização real do dano. A partir dos casos de severidade muito reduzida (a partir de 0,07%), os resultados obtidos passam a não corresponder à localização do dano. Este comportamento indica que, para o conjunto experimental analisado, o limite de localização confiável utilizando o indicador adotado situa-se em torno de 0,12% de severidade, abaixo do qual a localização do dano torna-se incorreta.

Em termos de resultados gráficos, escolheu-se para serem expostos no corpo do documento os exemplos apresentados neste capítulo, e os restantes encontram-se nos Apêndices B.1 a B.19.

Tabela 12 - Resultados da localização dos danos aplicados nas vigas

Dano	Severidade (%)	Localização (acelerómetros)	Ponto localizado
1	0,65	Entre 8 e 9	8
2	0,65	Entre 5 e 6	5
3	0,65	Entre 2 e 3	3
4	0,36	Entre 8 e 9	7
5	0,36	Entre 5 e 6	5
6	0,36	Entre 2 e 3	3
7	0,12	Entre 8 e 9	9
8	0,12	Entre 5 e 6	5
9	0,12	Entre 2 e 3	3
10	0,07	Entre 8 e 9	7
11	0,07	Entre 5 e 6	4
12	0,07	Entre 2 e 3	1
13	0,65	Entre 6 e 7	5

-  - Ponto imediatamente acima ou abaixo da localização do dano
 - Ponto não correspondente à localização do dano

Tabela 13 - Resultados da localização dos danos aplicados nas placas

Dano	Severidade (%)	Localização (placa nº)	Localização (acelerómetro)	Ponto localizado
14	4,92	4	9	6
15	4,92	3	Entre 6 e 7	7
16	4,92	2	Entre 3 e 4	6
17	9,77	4	9	8
18	9,77	3	Entre 6 e 7	8
19	9,77	2	Entre 3 e 4	2

-  - Ponto imediatamente acima ou abaixo da placa onde foi aplicado o dano
 - Ponto não correspondente à localização do dano

Os gráficos apresentados nas Figuras 38, 39 e 40 foram obtidos através da metodologia aplicada em GNU Octave e representam os valores do índice *DLI*, definido como a normalização

do vetor FAR_i em relação ao seu valor máximo, medido para cada ponto de resposta em todas as localizações de aplicação de dano. Este índice representa a intensidade relativa do efeito do dano em cada ponto, sendo que a localização do dano corresponde ao ponto onde $DLI = 1$. Para auxiliar a leitura dos gráficos, apresentam-se as Tabelas 14, 15 e 16, com a referência de cada caso de dano e onde este foi localizado.

Danos aplicados entre os acelerómetros 2 e 3:

Tabela 14 - Localização dos danos aplicados entre os acelerómetros 2 e 3

Dano	Massa (g)	Severidade (%)	Ponto localizado
3	66,4	0,65	3
6	37,1	0,36	3
9	12,1	0,12	3
12	7,3	0,07	1

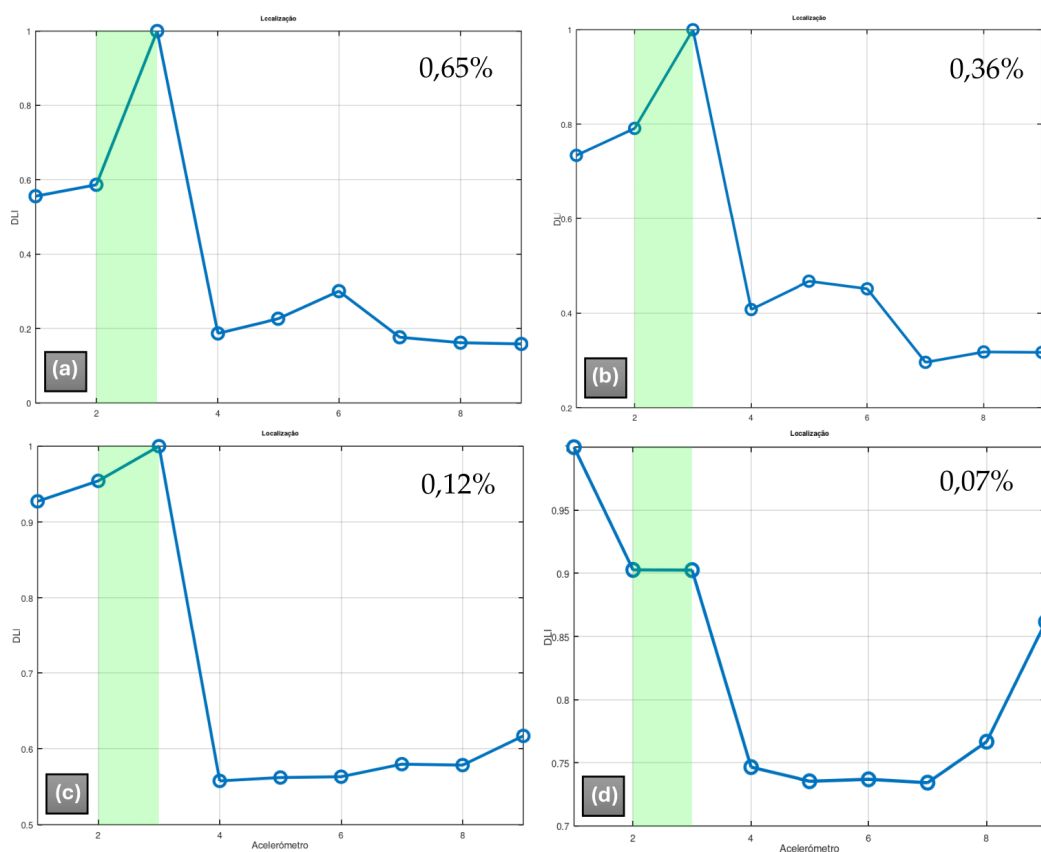


Figura 38 - Gráficos dos valores de DLI em função do ponto de medição. (a) Caso de dano 3 - massa de 66,4g (b) Caso de dano 6 - massa de 37,1g (c) Caso de dano 9 - massa de 12,1g (d) Caso de dano 12 - massa de 7,3g

Danos aplicados entre os acelerómetros 5 e 6:

Tabela 15 - Localização dos danos aplicados entre os acelerómetros 5 e 6

Dano	Massa (g)	Severidade (%)	Ponto localizado
2	66,4	0,65	5
5	37,1	0,36	5
8	12,1	0,12	5
11	7,3	0,07	4

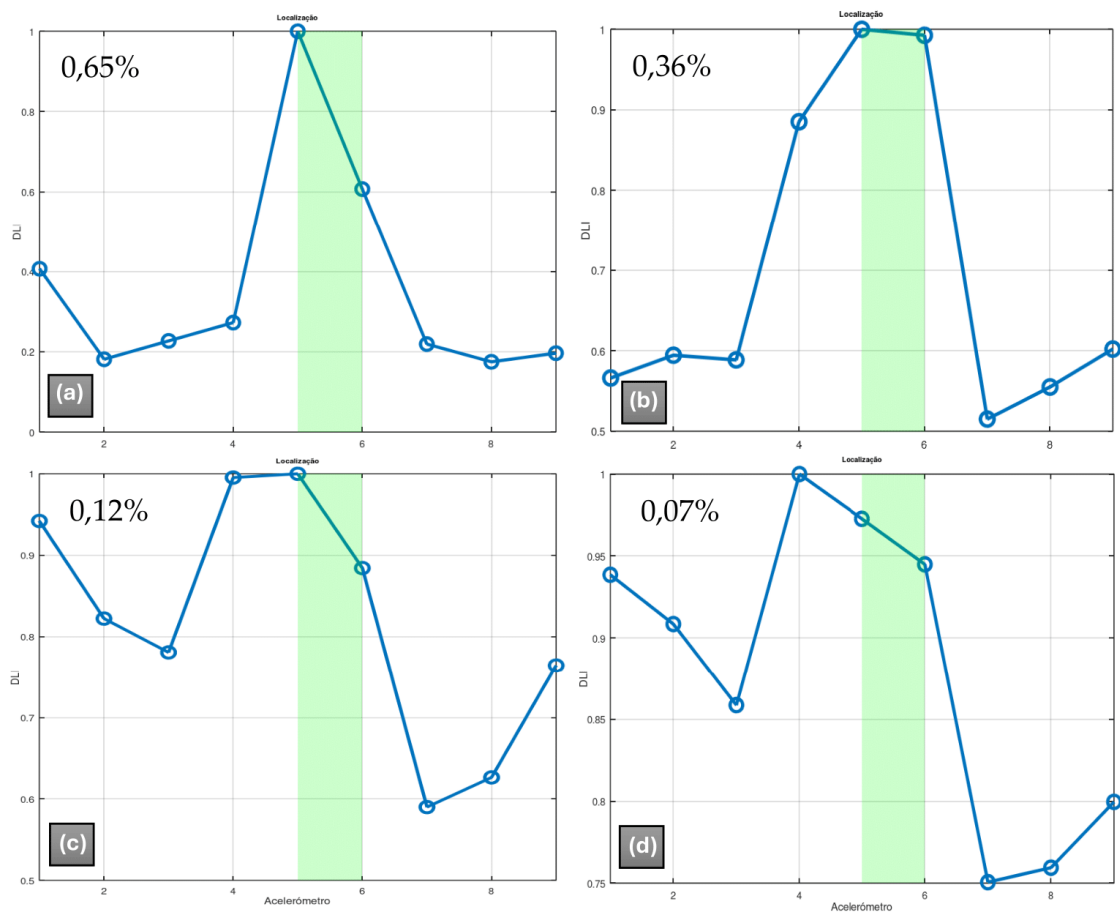


Figura 39 - Gráficos dos valores de DLI em função do ponto de medição. (a) Caso de dano 2 - massa de 66,4g (b) Caso de dano 5 - massa de 37,1g (c) Caso de dano 8 - massa de 12,1g (d) Caso de dano 11 - massa de 7,3g

Danos aplicados entre os acelerômetros 8 e 9:

Tabela 16 - Localização dos danos aplicados entre os acelerômetros 8 e 9

Dano	Massa (g)	Severidade (%)	Ponto localizado
1	66,4	0,65	8
4	37,1	0,36	7
7	12,1	0,12	9
10	7,3	0,07	7

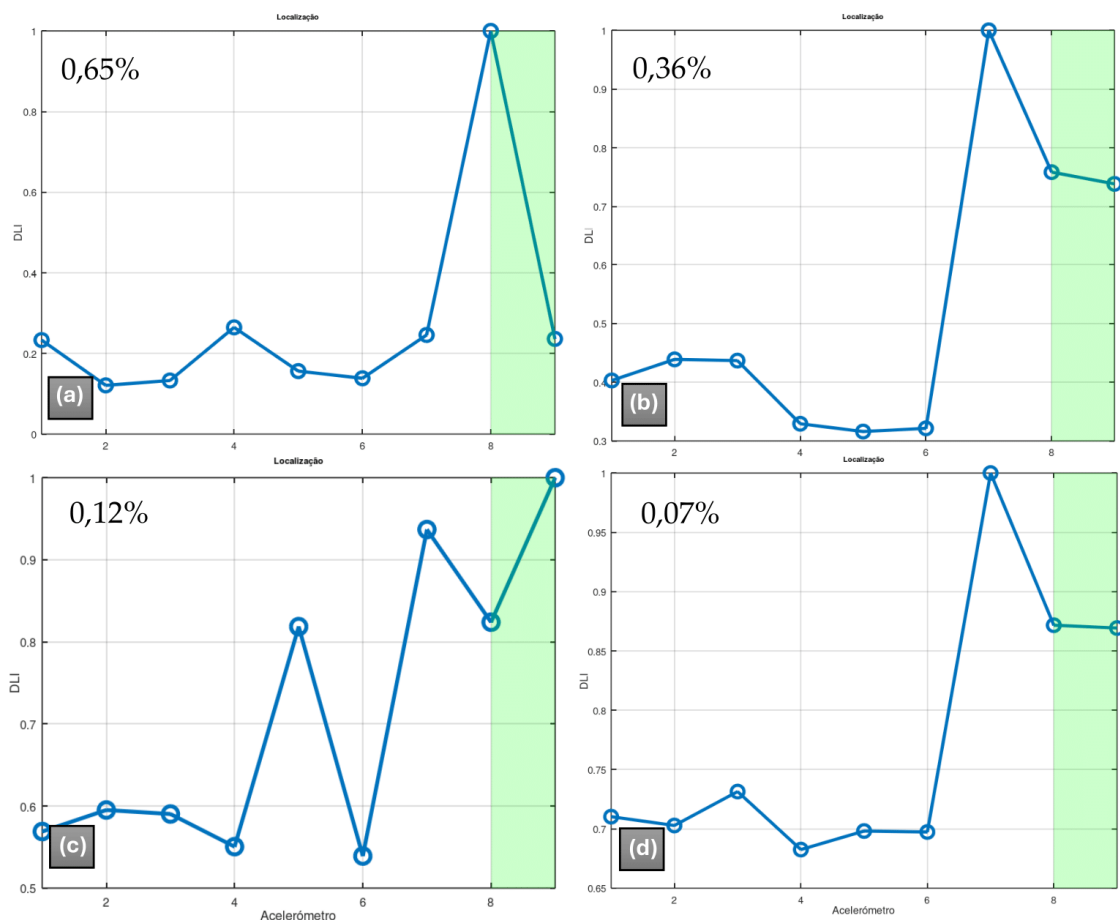


Figura 40 - Gráficos dos valores de DLI em função do ponto de medição. (a) Caso de dano 1 - massa de 66,4 g (b) Caso de dano 4 - massa de 37,1 g (c) Caso de dano 7 - massa de 12,1 g (d) Caso de dano 10 - massa de 7,3 g

Observa-se que, com a exceção do caso de dano 4 (Figura 40 (b)), os danos foram todos bem localizados nos casos de severidade 0,65%, 0,36% e 0,12%, apresentando corretamente os picos dentro das respectivas faixas verdes do gráfico, sinalizado os acelerômetros entre os quais o dano foi aplicado. Os danos de 0,07% de severidade já não foram corretamente localizados, apresentando os resultados em pontos não correspondentes ao intervalo sinalizado pela faixa verde, indicando um limite na capacidade da metodologia de localizar danos muito reduzidos.

O caso de dano 4, com uma severidade de 0,36%, não apresentou a mesma precisão nos resultados observada nos outros casos com a mesma severidade, possivelmente devido a algum erro experimental ocorrido durante a medição ou aplicação do dano.

O caso de dano 13, cujo gráfico está representado na Figura 41, apresentou o seu pico no acelerómetro 5 e na realidade foi aplicado entre os acelerómetros 6 e 7. Apesar de ser um dano de 0,65% de severidade, havia uma placa restringindo o movimento da estrutura entre os dois sensores onde o dano estava localizado. Esta condição poderá justificar o facto de os resultados obtidos não corresponderem à localização correta do dano, como nos restantes casos com severidade de 0,65%.

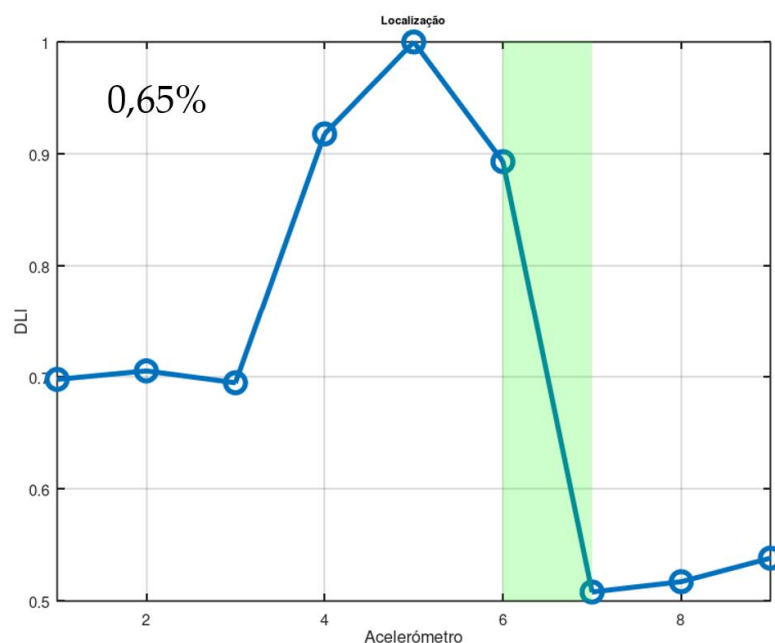


Figura 41 - Caso de dano 13 - massa de 66,4 g

A Figura 42 apresenta a variação do *Average Ratio Indicator*, $ARI_{i,j}$, ao longo dos pontos de medição para cada uma das forças de excitação no caso de dano 5, dano presente entre os acelerómetros 5 e 6 para uma severidade de dano de 0,36% (Figura 39 (b)), permitindo avaliar individualmente como cada força influencia a resposta medida e contribui para a identificação do dano. Nota-se que a maioria das excitações apresenta um pico, ainda que em alguns casos de baixas magnitudes, na região entre os acelerómetros 5 e 6, coincidindo com a localização real do dano, como é o caso das forças F1, F2, F3, F5, F6, F8, F10, F11 e F12. Este comportamento indica que estas forças contribuem diretamente para identificação da zona danificada e as restantes forças, cuja resposta apresenta picos deslocados desta região, não contribuem para a

localização correta do dano. O resultado para a localização do dano provem da média do efeito de todas as forças apresentadas.

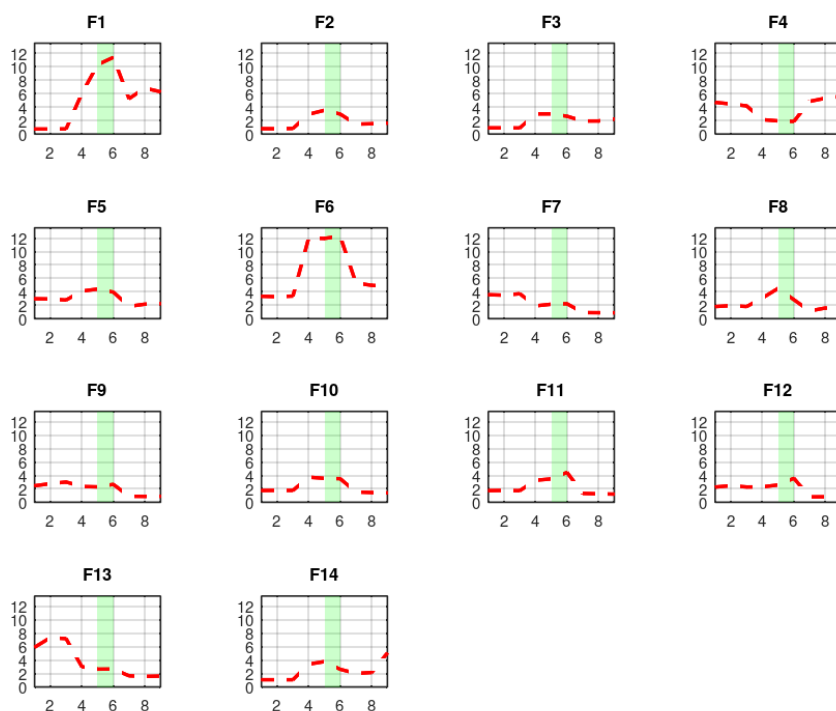


Figura 42 - Efeito de cada força de excitação para o caso de dano 5 (0,36% de severidade)

A Figura 43 apresenta os gráficos correspondentes aos casos de dano 2 e 8, localizados também entre os acelerómetros 5 e 6, mas severidade de respetivamente de 0,65% e 0,12%. Para algumas forças de excitação, nota-se um comportamento semelhante entre os três casos, com os picos concentrados na região do dano. A principal diferença é a magnitude destes picos, que diminui progressivamente com a redução da severidade: valores mais baixos para o dano 8 (0,12% de severidade), intermediários para o dano 5 (0,36% de severidade) e significativamente mais elevados para o dano 2 (0,65% de severidade).

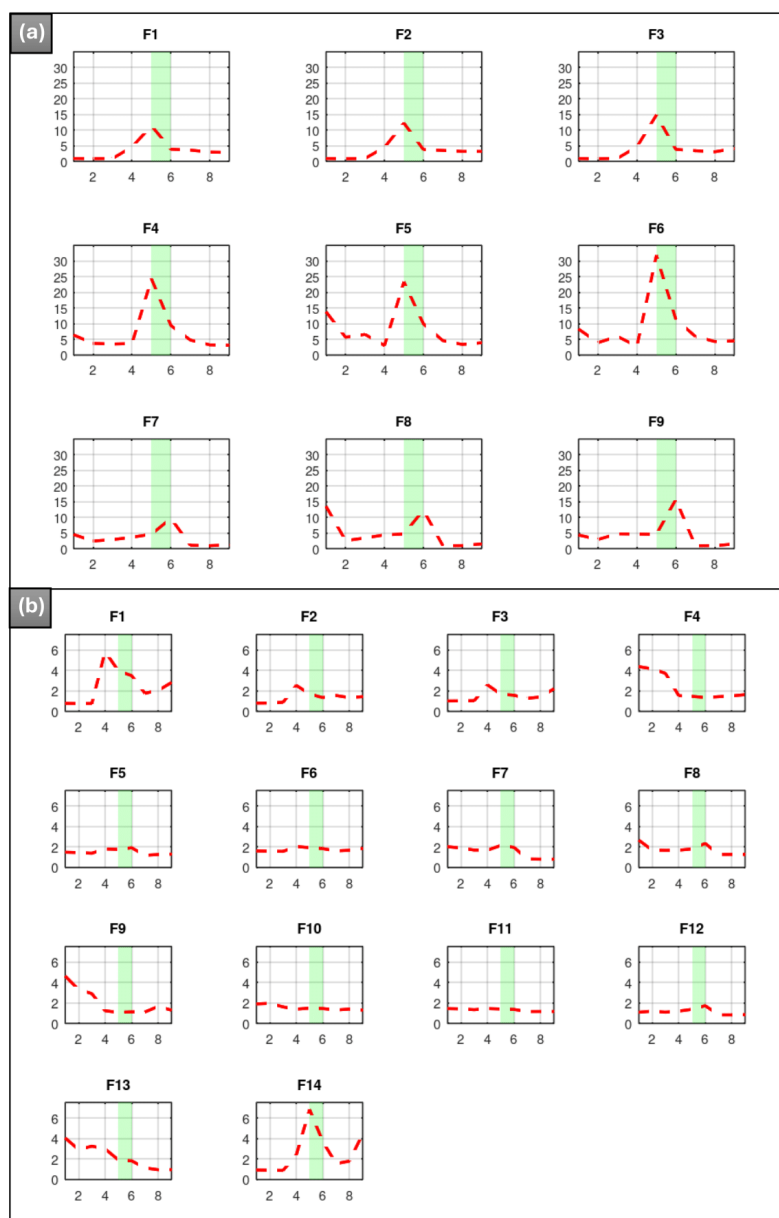


Figura 43 - Efeito de cada força de excitação (a) Caso de dano 2 (0,65% de severidade) (b) Caso de dano 8 (0,12% de severidade)

Os resultados obtidos para os danos aplicados nas placas evidenciam uma maior dificuldade na localização em comparação com os danos aplicados nas vigas, o que pode ser observado através dos gráficos apresentados nas Figuras 44 e 45 e nas Tabelas 17 e 18. Isto é particularmente evidente no caso 14 (Figura 44 (a)), localizado na placa 4, que se encontra no topo da estrutura e não possui nenhum acelerômetro instalado diretamente acima, apenas um

ponto de medição imediatamente abaixo. Esta configuração limita a sensibilidade do método, dificultando a identificação precisa da posição do dano, o que é refletido no gráfico obtido.

Dos casos de dano nas placas, o dano 15 foi o único localizado corretamente, como mostra a Figura 44 (b), apresentando o seu pico no ponto do acelerômetro 7, imediatamente acima da localização da placa. No entanto, no gráfico presente na Figura 46, observa-se que a intensidade dos picos nos gráficos das forças individuais nas placas, quando o dano está presente nestas, é significativamente mais baixa do que a observada nos danos presentes nas vigas, indicando que a resposta dinâmica da estrutura é menos influenciada pela presença de dano nas placas. Para uma detecção de dano nas placas mais precisa, seria recomendável a utilização de um maior número de acelerômetros ao longo da estrutura, idealmente posicionados diretamente sobre as próprias placas.

Danos nas placas de severidade 4,92%:

Tabela 17 - Localização dos danos de severidade 4,92% aplicados nas placas

Dano	Localização (placa nº)	Localização (acelerômetro)	Ponto localizado
14	4	9	6
15	3	Entre 6 e 7	7
16	2	Entre 3 e 4	6

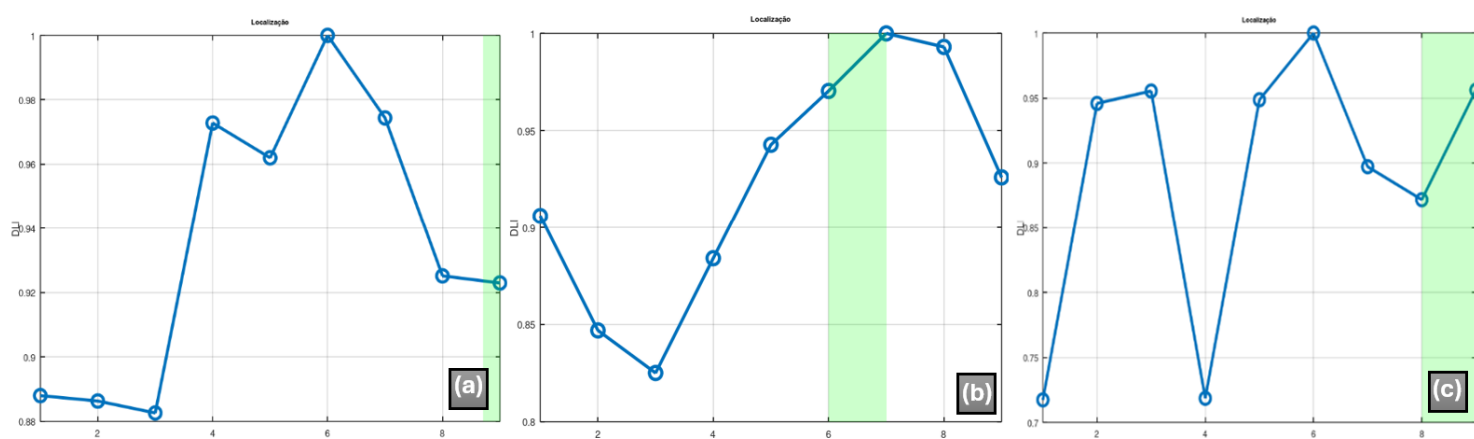


Figura 44 - Gráficos dos valores de DLI em função do ponto de medição para as placas nos casos de severidade 4,92%. (a) Caso de dano 14 - massa de 4,92 g (b) Caso de dano 15 - massa de 4,92 g (c) Caso de dano 16 - massa de 4,92 g

Danos nas placas de severidade 9,77%:

Tabela 18 - Localização dos danos de severidade 9,77% aplicados nas placas

Dano	Localização (placa nº)	Localização (acelerômetro)	Ponto localizado
17	4	9	8
18	3	Entre 6 e 7	8
19	2	Entre 3 e 4	2

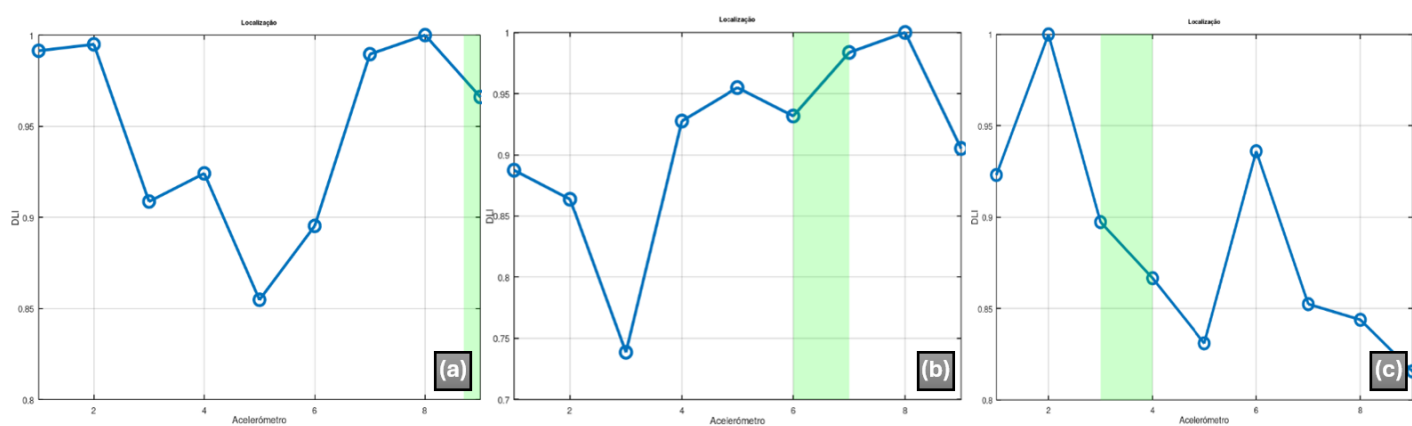


Figura 45 - Gráficos dos valores de DLI em função do ponto de medição para as placas nos casos de severidade 9,77%. (a) Caso de dano 17 - massa de 9,77 g (b) Caso de dano 18 - massa de 9,77 g (c) Caso de dano 19 - massa de 9,77 g

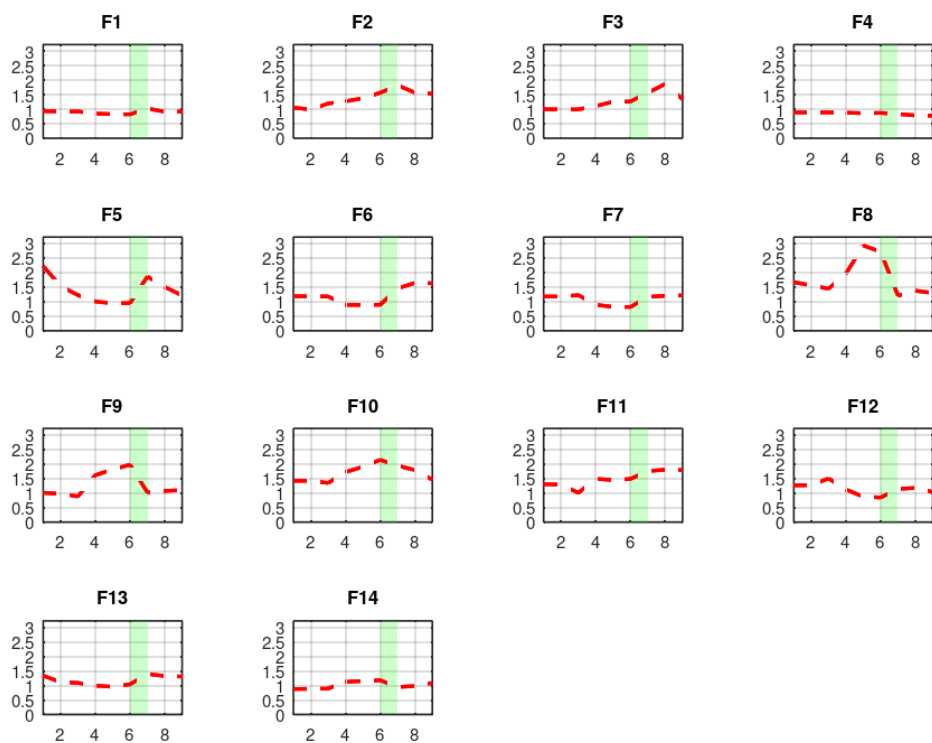


Figura 46 - Efeito de cada força de excitação para o caso de dano 15 (massa de 4,92 g)

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal desta dissertação foi validar uma metodologia para a detecção, localização e quantificação relativa de danos estruturais com base na análise de Funções de Resposta em Frequência (FRFs) numa estrutura do tipo "três andares", composta por 12 vigas e 4 placas de alumínio, instrumentada com 9 acelerómetros e excitada através de um martelo de impacto.

Esta metodologia permitiu:

1) Detecção: Foi possível detetar todos os cenários de dano, confirmando a presença de dano na estrutura, inclusive nos casos de baixa severidade, independentemente de este ocorrer nas vigas ou nas placas. Observou-se uma clara correlação entre a severidade do dano e os valores de DI obtidos, i.e., evidenciando que valores mais elevados de DI correspondem a danos de maior severidade.

2) Localização: Para as vigas, foi possível localizar corretamente todos os danos, com exceção dos danos de menor severidade (0,07%) e um outro caso em que o dano estava localizado entre os acelerómetros 2 e 3 e a sua severidade era de 0,36%. No caso das placas, apenas um dos seis cenários de dano foi corretamente localizado, resultado que já era expectável dada a ausência de acelerómetros montados diretamente nas placas por limitações de hardware, sendo estas apenas excitadas durante os ensaios.

Quantificação relativa: Verificou-se que foi possível quantificar de forma relativa a severidade dos danos, tanto nas vigas quanto nas placas, uma vez que se observou um aumento consistente do DI com o incremento da severidade do dano.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam que a metodologia baseada na análise de FRFs é eficaz e aplicável a sistemas estruturais de maior complexidade. Estes resultados reforçam o potencial de utilização prática desta abordagem em sistemas reais de monitorização e diagnóstico estrutural.

5.1 Trabalhos futuros

Dando continuidade ao trabalho desenvolvido, uma possível vertente é a aplicação de outros tipos de dano estrutural, em particular os danos de perda de rigidez, de forma a estudar cenários associados à degradação estrutural.

Outra possibilidade seria aprofundar o estudo do posicionamento dos sensores na estrutura, nomeadamente através da colocação de acelerómetros em diferentes regiões. Por exemplo para avançar com o estudo dos danos nas placas, utilizando um maior número de acelerómetros e posicionando-os diretamente nas próprias placas.

Também se propõe a realização de ensaios com diferentes referências, montando e desmontando a estrutura, de forma a avaliar a variabilidade nos diferentes estados de referência e perceber o efeito na identificação do dano.

Por fim, seria ainda possível estudar o efeito da temperatura na resposta da estrutura, comparando ensaios realizados em condições ambientais distintas, como no verão e no inverno, para avaliar se esta variável influencia os resultados.

BIBLIOGRAFIA

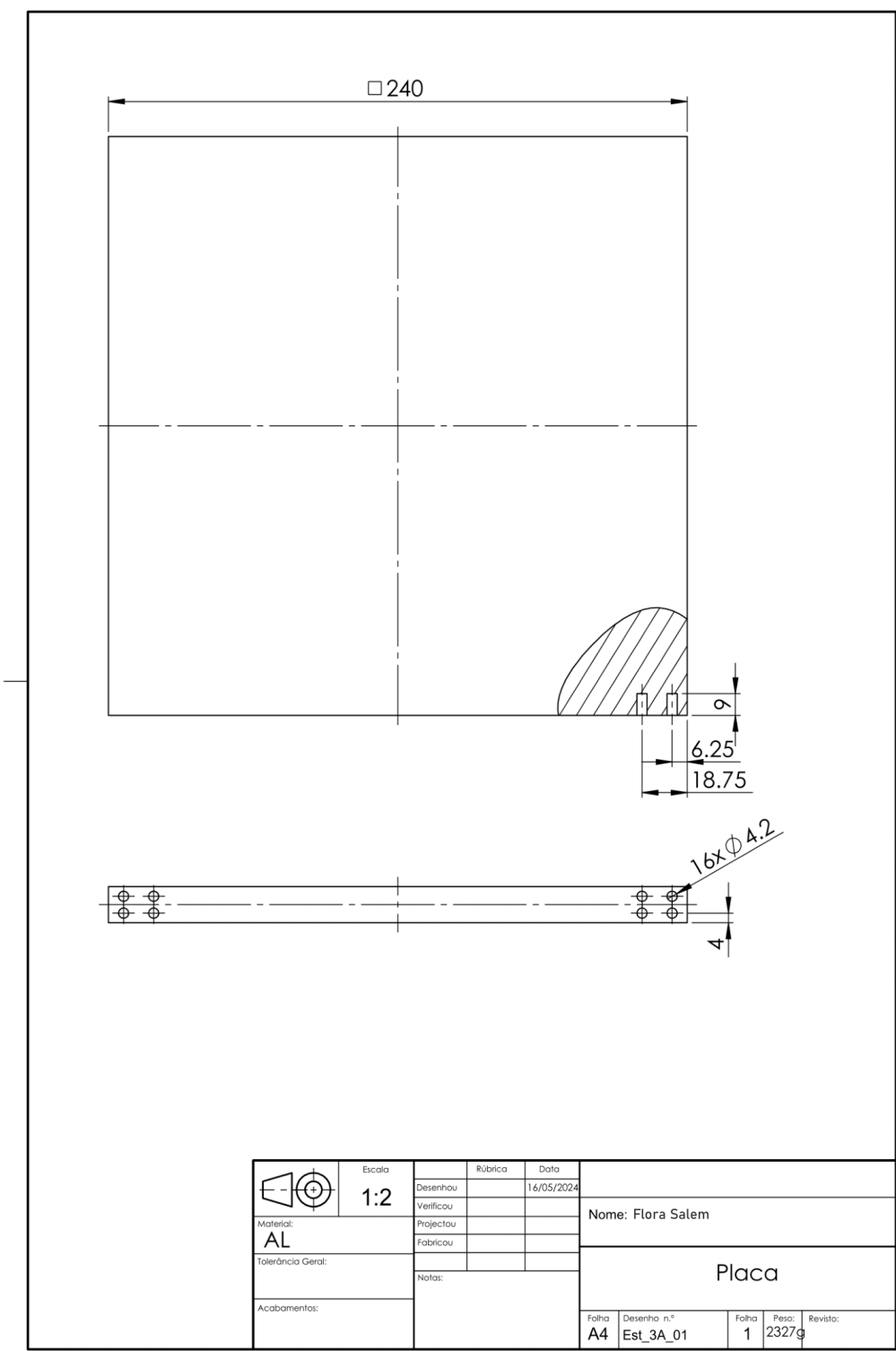
- [1] M. S. Amin Abdel Zaher, *An integrated vibration-based structural health monitoring system*, Carleton University, Ottawa, Canada, 2002.
- [2] Federal Aviation Administration, *FAA Issues SAIB for Piper PA-46 Aircraft*. Disponível em: <https://www.aero-news.net/bannertransfer.cfm?do=main.textpost&id=7ba6dcbb-aeb7-41b2-a8e1-3754e6ff94b9>
- [3] Z. Wang, R. M. Lin, e M. K. Lim, *Structural damage detection using measured FRF data*, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 147, n.º 1, pp. 187–197, 1997, doi: 10.1016/S0045-7825(97)00013-3.
- [4] Scott W. Doebling, Charles R. Farrar, Michael B. Prime, e Daniel W. Shevitz, *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems From Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review*, Los Alamos National Laboratory, University of California, for the United States Department of Energy, Los Alamos, NM, LA-13070-MS, 1996.
- [5] C. R. Farrar, S. W. Doebling, e D. A. Nix, *Vibration-based structural damage identification*, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 359, n.º 1778, pp. 131–149, 2001, doi: 10.1098/rsta.2000.0717.
- [6] R. S. T. Rodrigues, *Identificação de dano numa viga utilizando respostas dinâmicas*, M.Sc. dissertation, Universidade NOVA de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Caparica, Portugal, 2021.
- [7] Avci, Onur, Abdeljaber, Osama, Kiranyaz, Serkan, Hussein, Mohammed, Gabbouj, Moncef, e Inman, Daniel J., *A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021
- [8] Ferreira, Pedro M., Machado, Miguel A., Carvalho, Marta S., e Vidal, Catarina, *Embedded sensors for structural health monitoring: Methodologies and applications review*, *Sensors*, 2024.
- [9] N.-G. Park e Y. Park, *Identification of damage on a substructure with measured frequency response functions*, *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 19, n.º 10, pp. 1891–1901, 2005, doi: 10.1007/BF02984268.
- [10] Y. J. Yan, L. Cheng, Z. Y. Wu, e L. H. Yam, *Development in vibration-based structural damage detection technique*, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, n.º 5, pp. 2198–2211, 2007, doi: 10.1016/j.ymssp.2006.10.002.

- [11] J. M. Lifshitz e A. Rotem, *Determination of Reinforcement Unbonding of Composites by a Vibration Technique*, *J. Compos. Mater.*, vol. 3, n.º 3, pp. 412–423, 1969, doi: 10.1177/002199836900300305.
- [12] O. S. Salawu, *Detection of structural damage through changes in frequency: a review*, *Eng. Struct.*, vol. 19, n.º 9, pp. 718–723, 1997, doi: 10.1016/S0141-0296(96)00149-6.
- [13] A. K. Pandey, M. Biswas, e M. M. Samman, *Damage detection from changes in curvature mode shapes*, *J. Sound Vib.*, vol. 145, n.º 2, pp. 321–332, 1991, doi: 10.1016/0022-460X(91)90595-B.
- [14] A. Rytter, *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*, 1993.
- [15] S. W. Doebling, C. R. Farrar, e M. B. Prime, *A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods*, *Shock Vib. Dig.*, vol. 30, n.º 2, pp. 91–105, 1998, doi: 10.1177/058310249803000201.
- [16] J. Font-Moré, G. Reyes-Carmenaty, R. Lado-Roigé, e M. A. Pérez, *Performance analysis of vibration-based damage indicators under low-modal information structures*, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 190, p. 110166, 2023, doi: 10.1016/j.ymssp.2023.110166.
- [17] J. P. G. F. Medeiros, *Deteção de dano estrutural em vigas utilizando as respostas dinâmicas medidas com acelerómetros e extensómetros*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2022.
- [18] J. H. R. Berardo, *Desenvolvimento e validação de uma nova metodologia para a deteção de dano em placas*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2021.
- [19] J. F. C. Ramos, *Deteção de dano em estruturas tubulares utilizando Funções de Resposta em Frequência*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2024.
- [20] Carlos Henrique Fonseca dos Santos, *Desenvolvimento de um método para a detecção e determinação da localização de dano em estruturas*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2009.
- [21] B. R. F. Saraiva, *Deteção, localização e quantificação de dano em estruturas*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2012.
- [22] J. D. P. Morais, *Deteção e localização de dano em estruturas*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2014.
- [23] M. J. C. Safara, *Deteção de dano em estruturas reticuladas utilizando análise de vibrações*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2016.

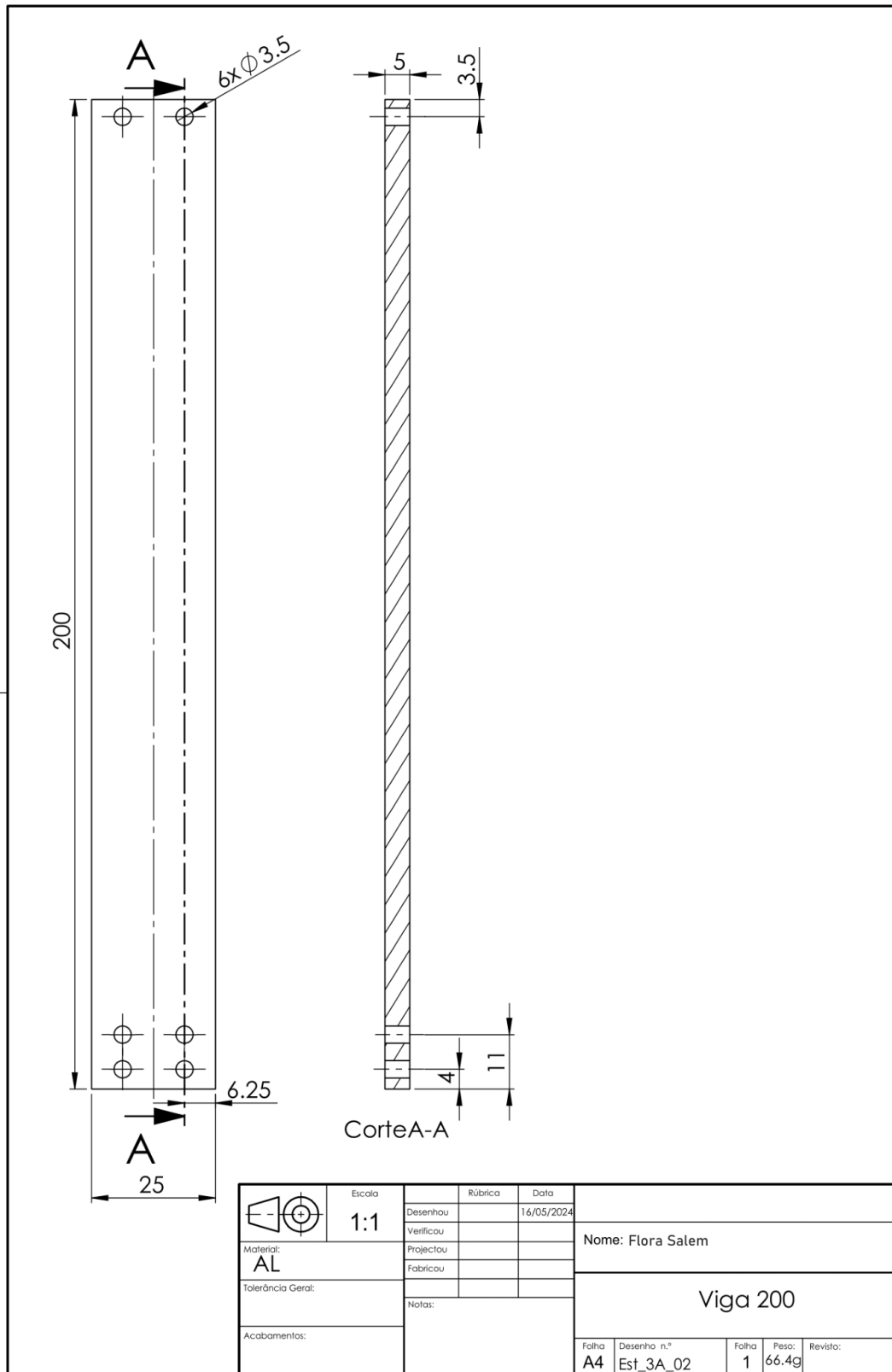
- [24] C. M. R. de S. P. do Amaral, «Localização e Quantificação de Dano com recurso às FRFs», M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2017.
- [25] J. S. Colaço, *Deteção e localização de dano em estruturas utilizando a resposta dinâmica de translação e de rotação*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2018.
- [26] P. J. L. Fernandes, *Avaliação de vários indicadores na deteção e localização de dano em estruturas, utilizando as Funções de Resposta em Frequência*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2019.
- [27] A. S. F. Vicente, *Deteção de dano em juntas soldadas por análise de vibrações, correntes induzidas e ultrassons*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2019.
- [28] M. D. D. P. Pinto, *Avaliação de vários indicadores na deteção e localização de dano em estruturas utilizando transmissibilidades de deslocamento/rotação*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2021.
- [29] A. S. da S. Mendes, *On the use of virtual sensing for damage identification on wind turbine blades*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2022.
- [30] R. P. de Sousa, *Identificação de Dano Estrutural em Placas Construídas em Diferentes Materiais Compósitos*, M.Sc. dissertation, Univ. NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal, 2023.
- [31] Maia, N. M. M. e Silva, Júlio M. M., *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Taunton, UK: Research Studies Press, 1997.
- [32] J. V. Araújo dos Santos, C. M. Mota Soares, C. A. Mota Soares, e N. M. M. Maia, *Structural damage identification in laminated structures using FRF data*, *Compos. Struct.*, vol. 67, n.º 2, pp. 239–249, 2005, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.09.011.
- [33] M. P. Limongelli, *Frequency response function interpolation for damage detection under changing environment*, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 24, n.º 8, pp. 2898–2913, 2010, doi: 10.1016/j.ymssp.2010.03.004.
- [34] N. M. M. M. R. P. C. Sampaio, *Localization of damage using curvature of the frequency response functions*, em 1997, Orlando, FL.
- [35] Ole Døssing, *Structural Testing, Part 1: Mechanical Mobility Measurements*, Brüel & Kjær, Nærum, Dinamarca, 1988.
- [36] Brüel & Kjær, *PULSE LabShop*, Version 22.2.0.98 [software]. Nærum, Denmark.

A APÊNDICE

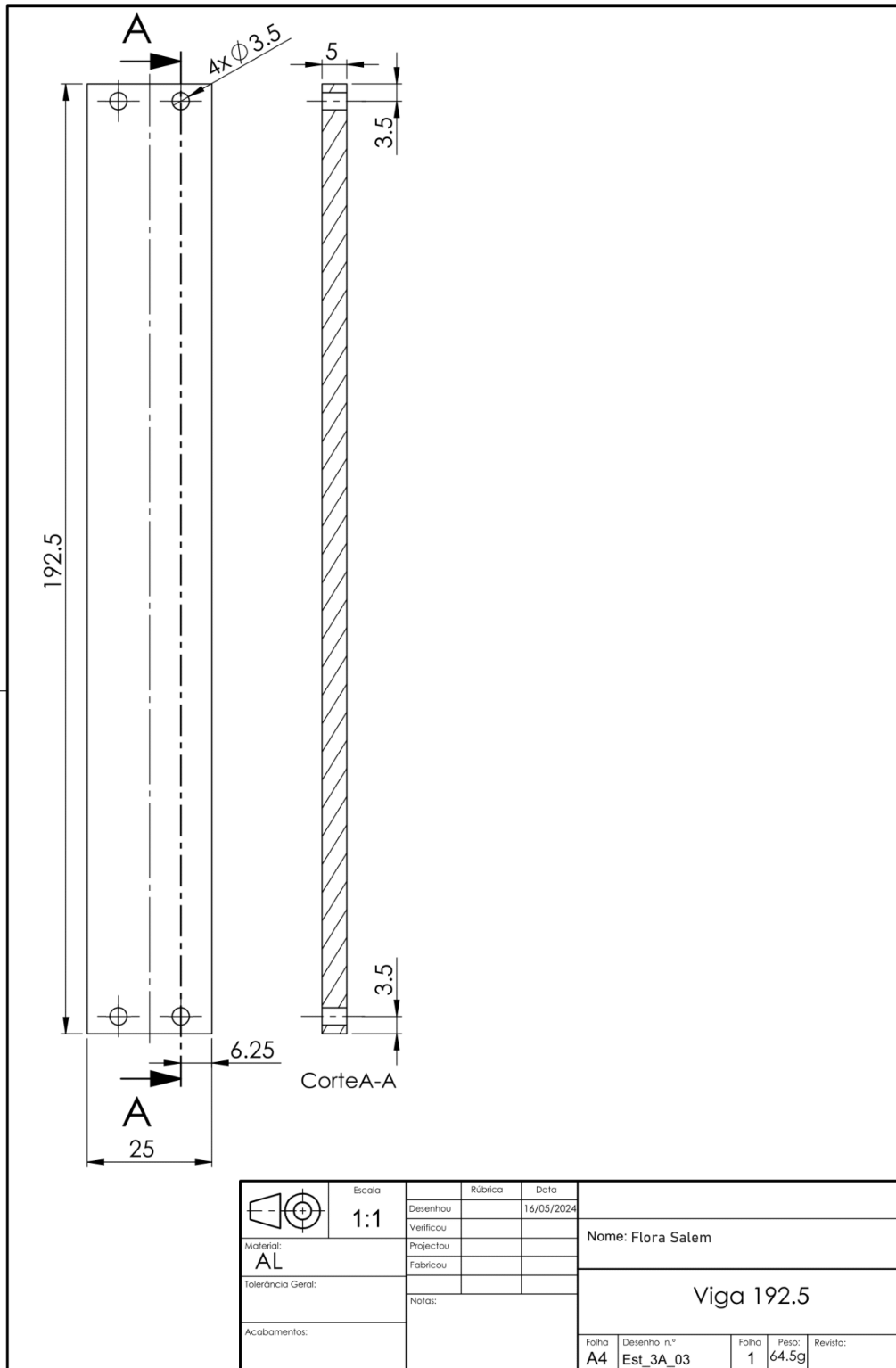
A.1 Desenho técnico Placa



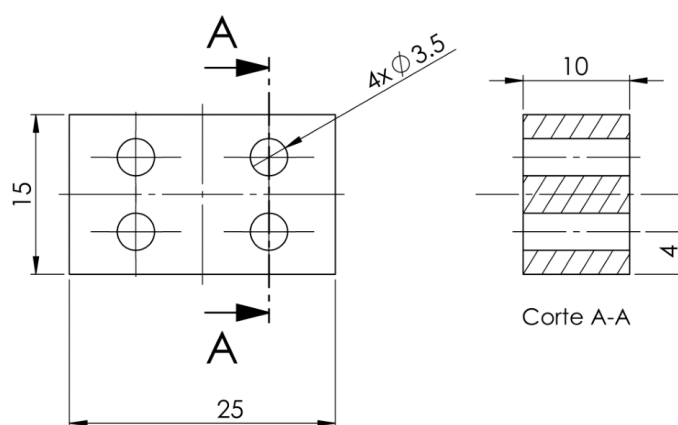
A.2 Desenho técnico viga 200 x 25 x 5 mm



A.3 Desenho técnico viga 192,5 x 25 x 5 mm

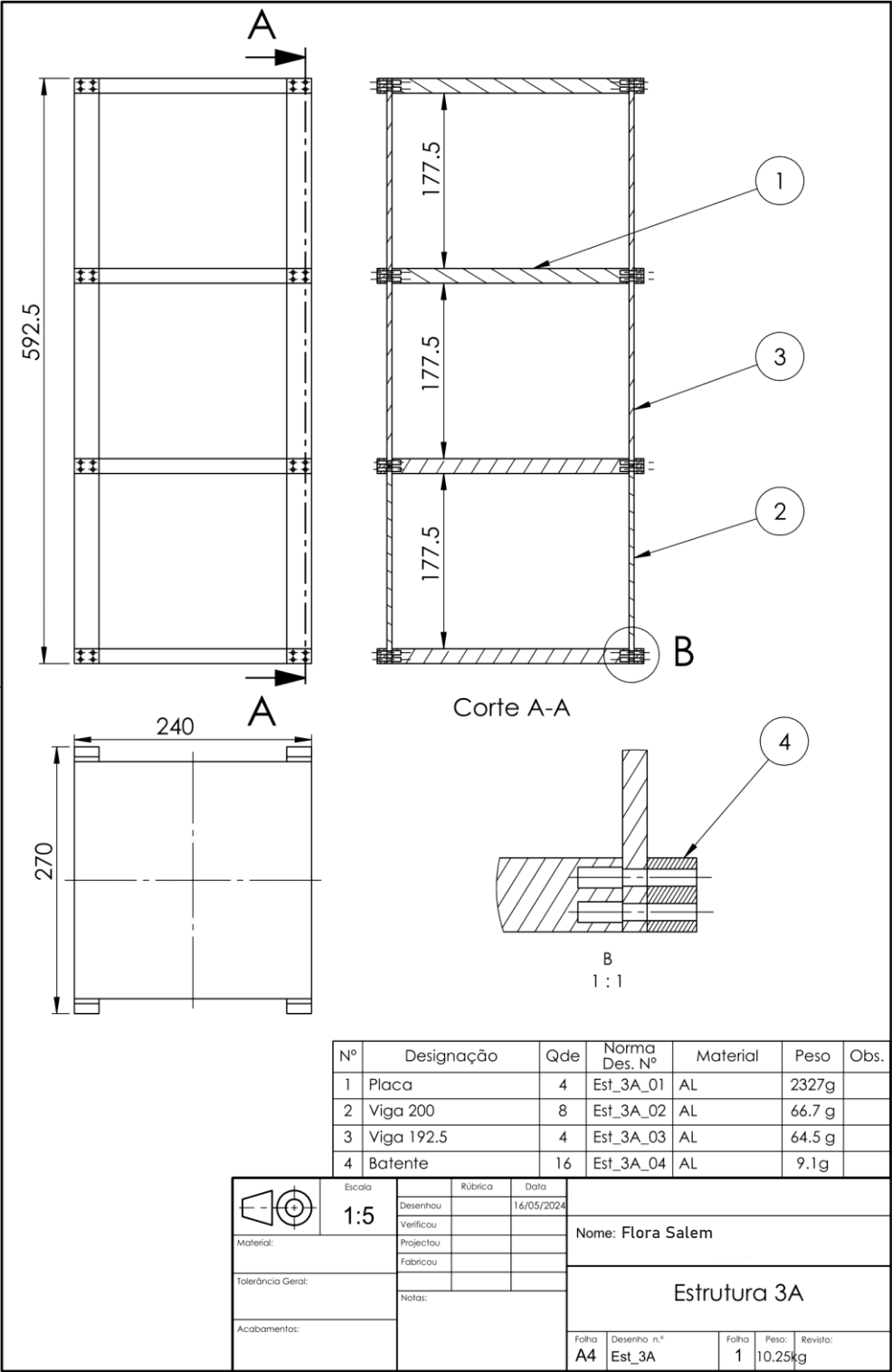


A.4 Desenho técnico ba- tente



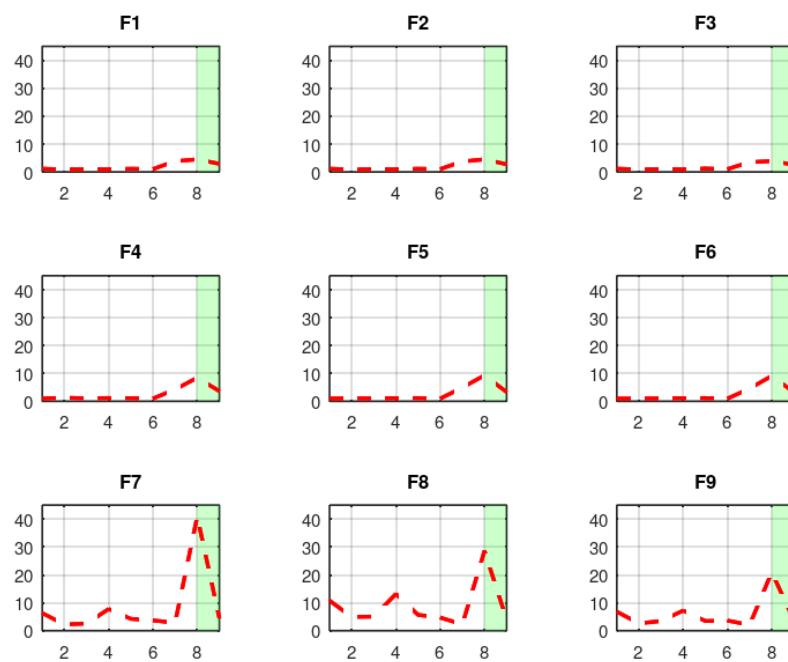
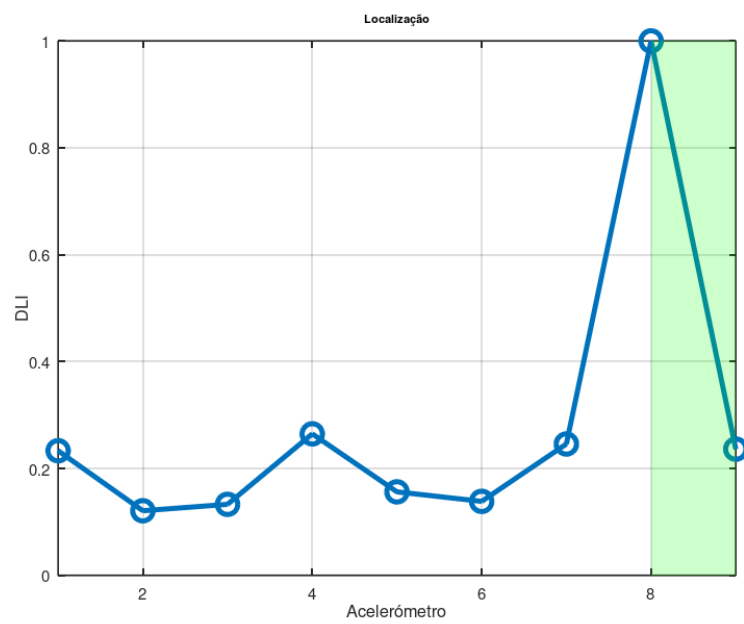
	Escala		Rúbrica	Data						
	2:1	Desenhou		16/05/2024						
		Verificou			Nome: Flora Salem					
		Projectou								
Material:	AL	Fabricou			Batente					
Tolerância Geral:										
		Notas:								
Acabamentos:						Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisto:
						A4	Est_3A_04	1	9.1g	

A.5 Desenho técnico estrutura completa

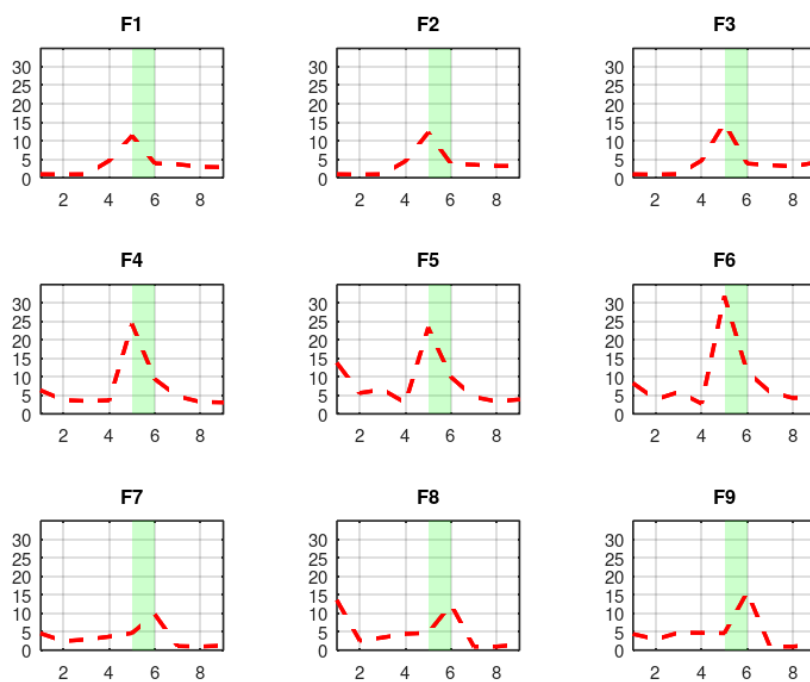
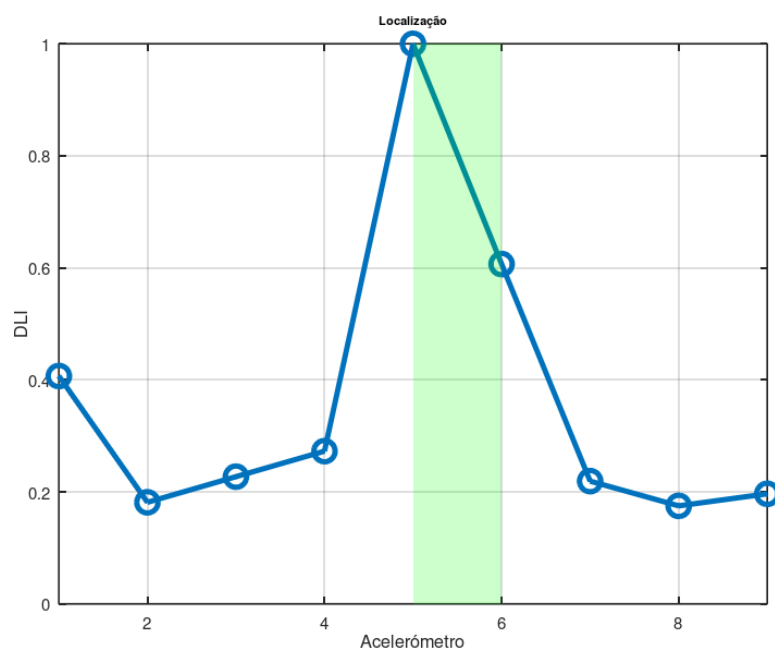


BAPÊNDICE

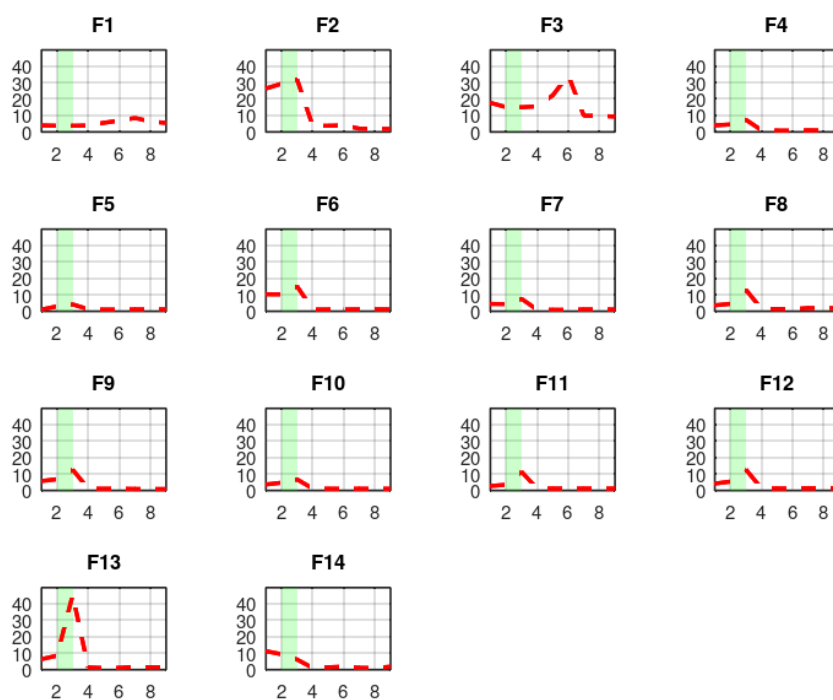
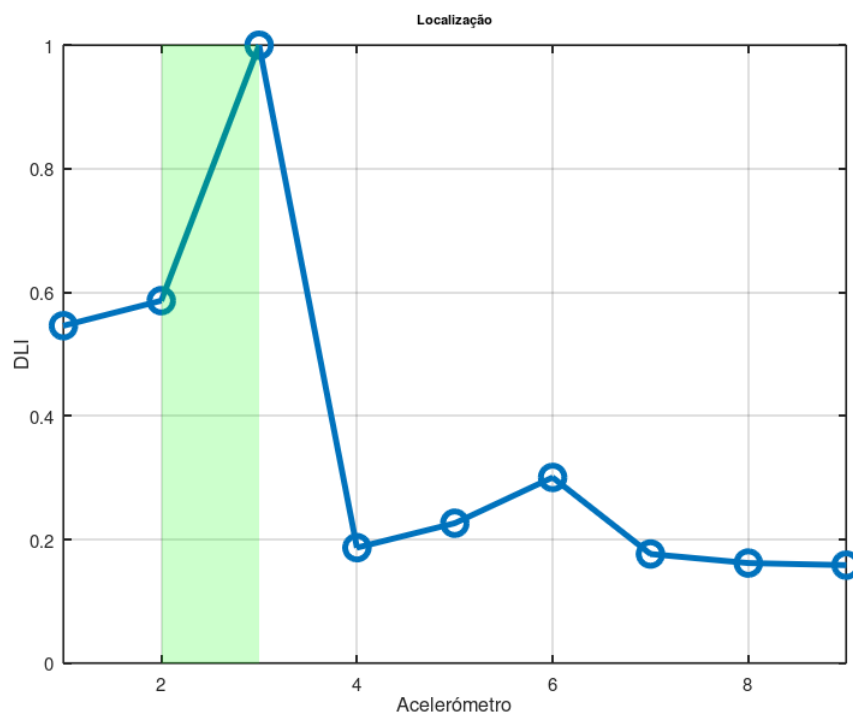
B.1 Caso de dano 1 (sev. 0,65%)



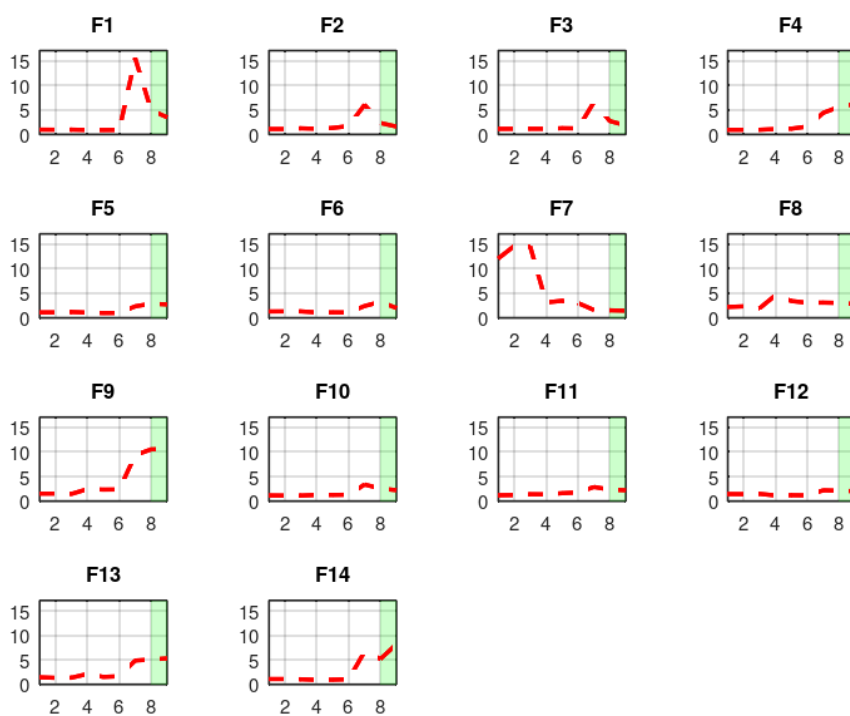
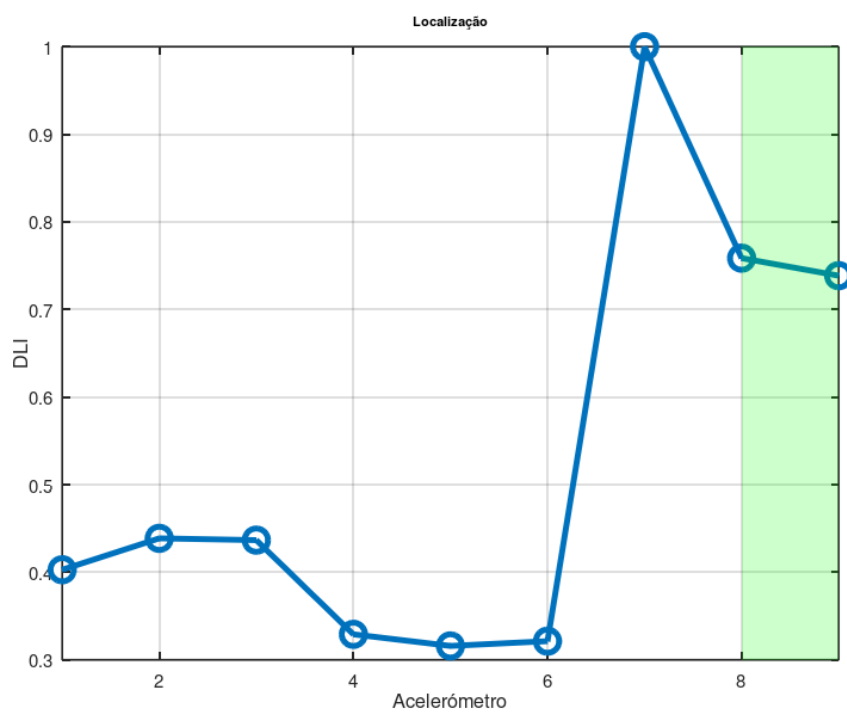
B.2 Caso de dano 2 (sev. 0,65%)



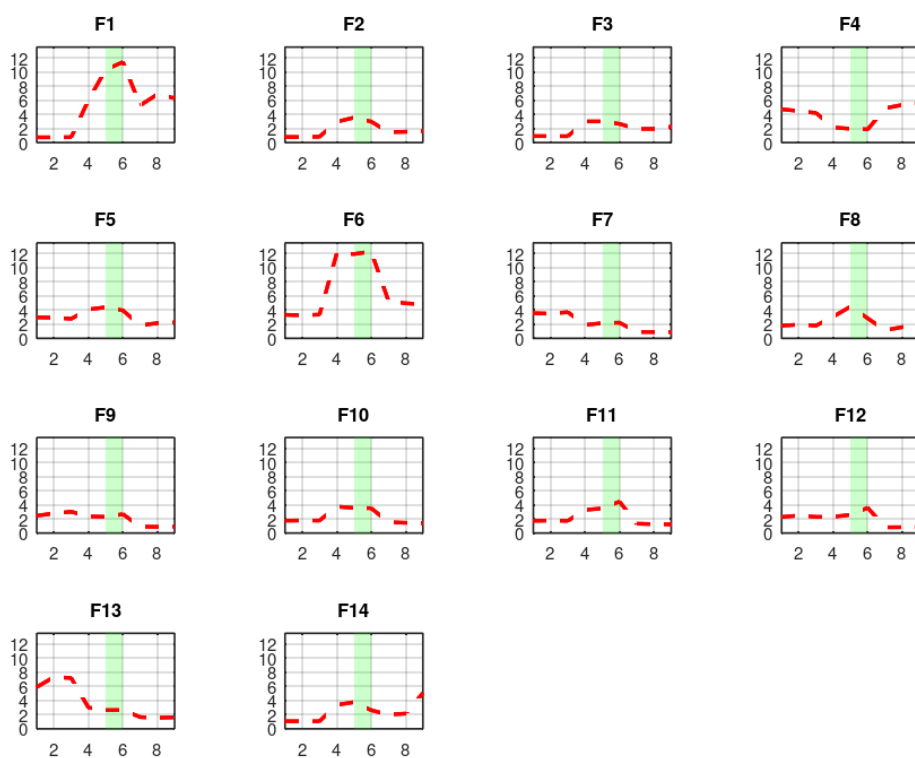
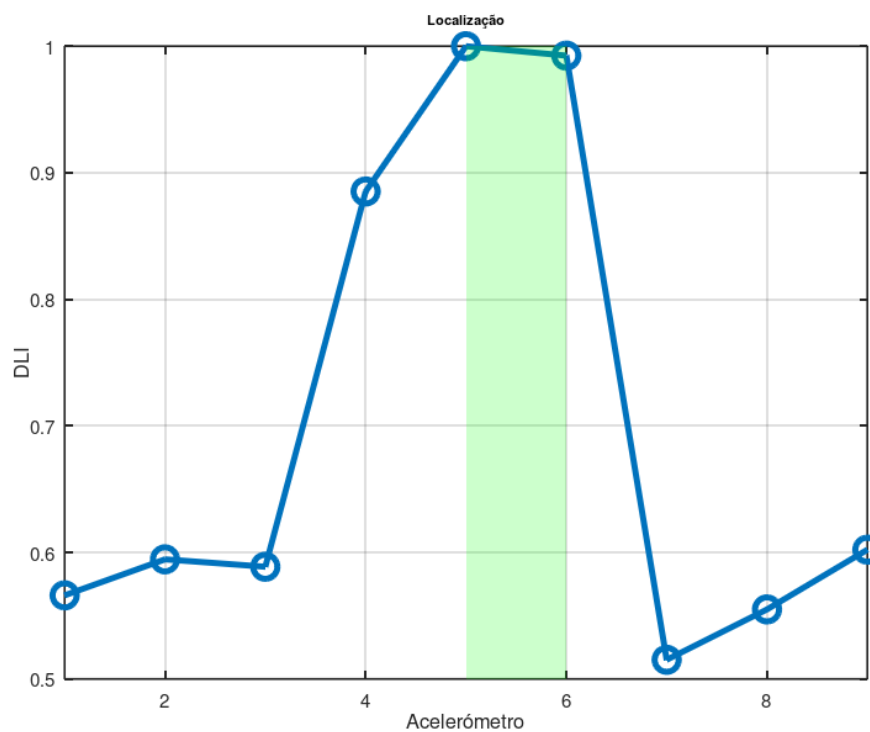
B.3 Caso de dano 3 (sev. 0,65%)



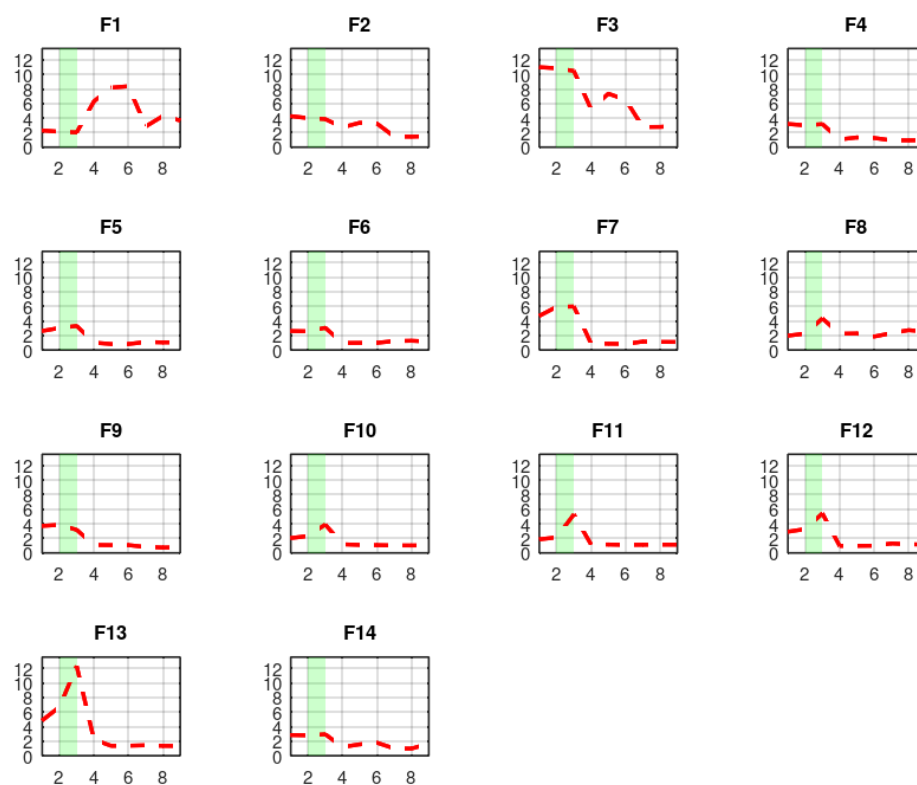
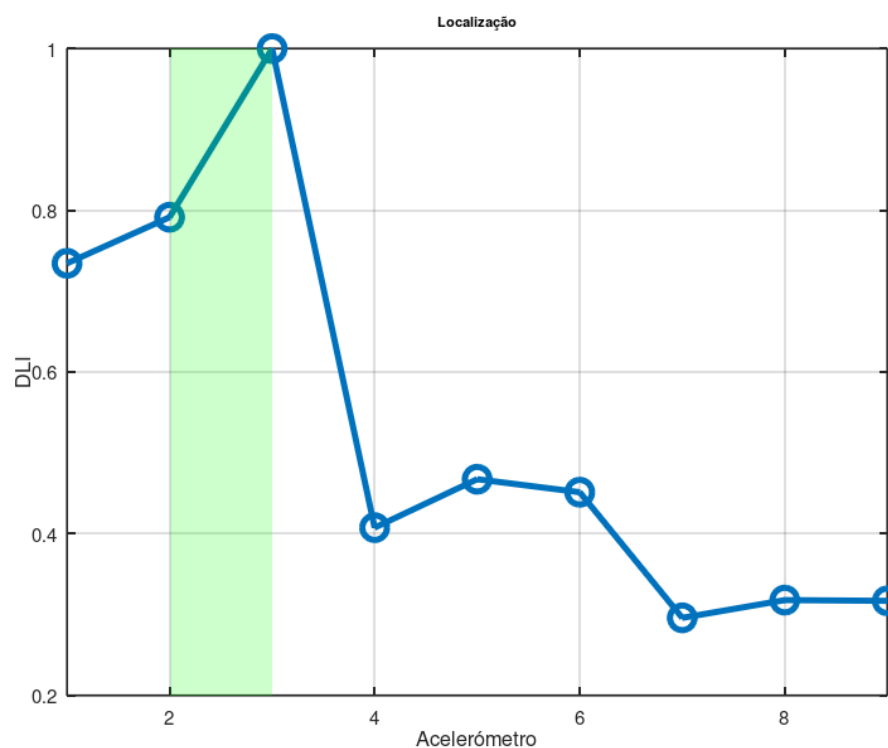
B.4 Caso de dano 4 (sev. 0,36%)



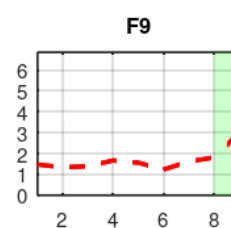
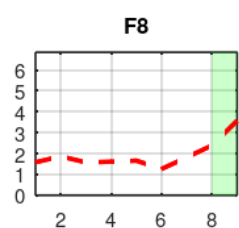
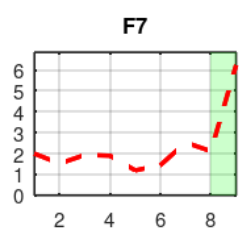
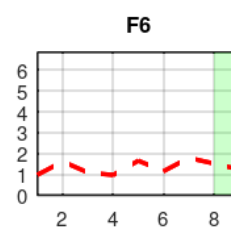
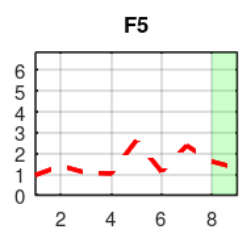
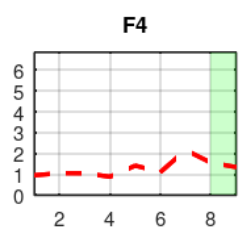
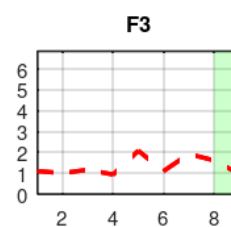
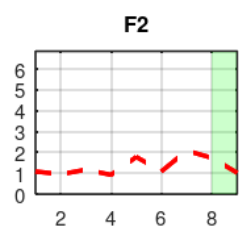
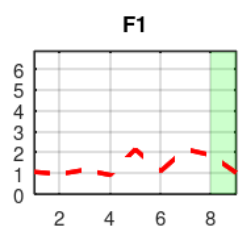
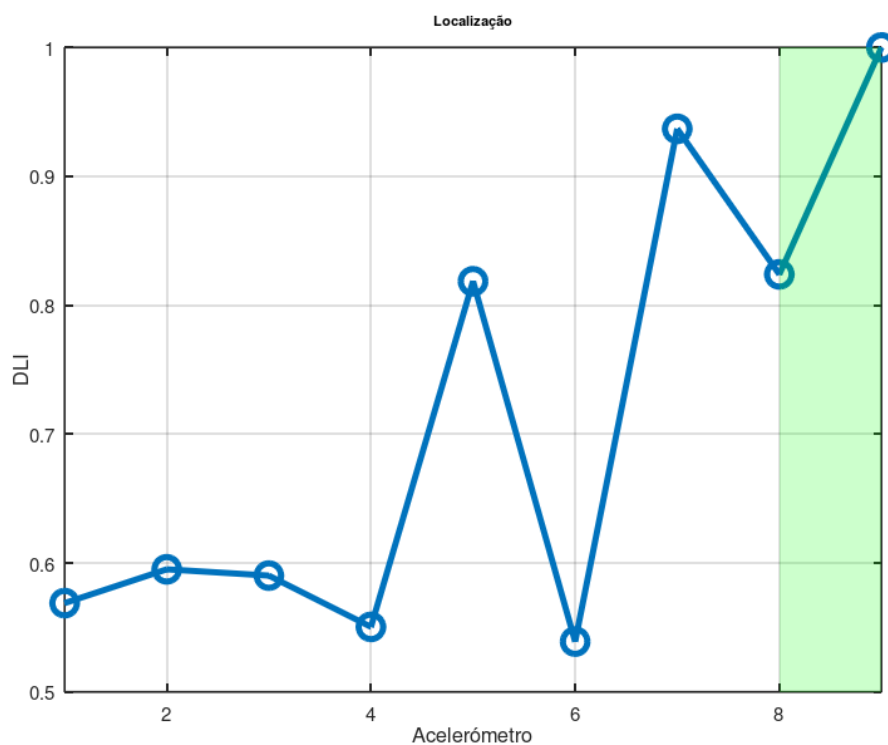
B.5 Caso de dano 5 (sev. 0,36%)



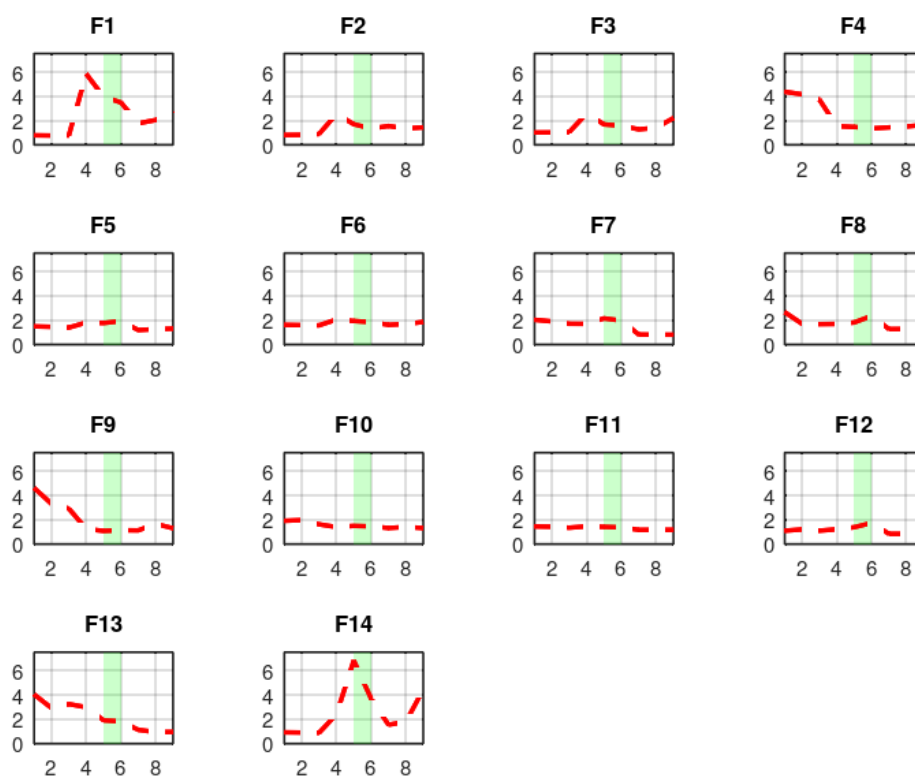
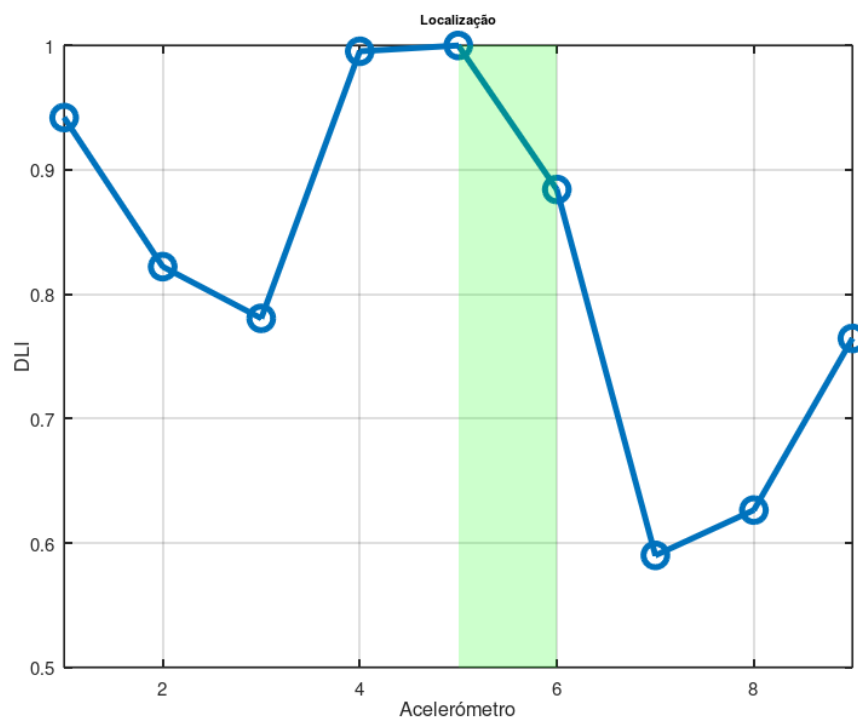
B.6 Caso de dano 6 (sev. 0,36%)



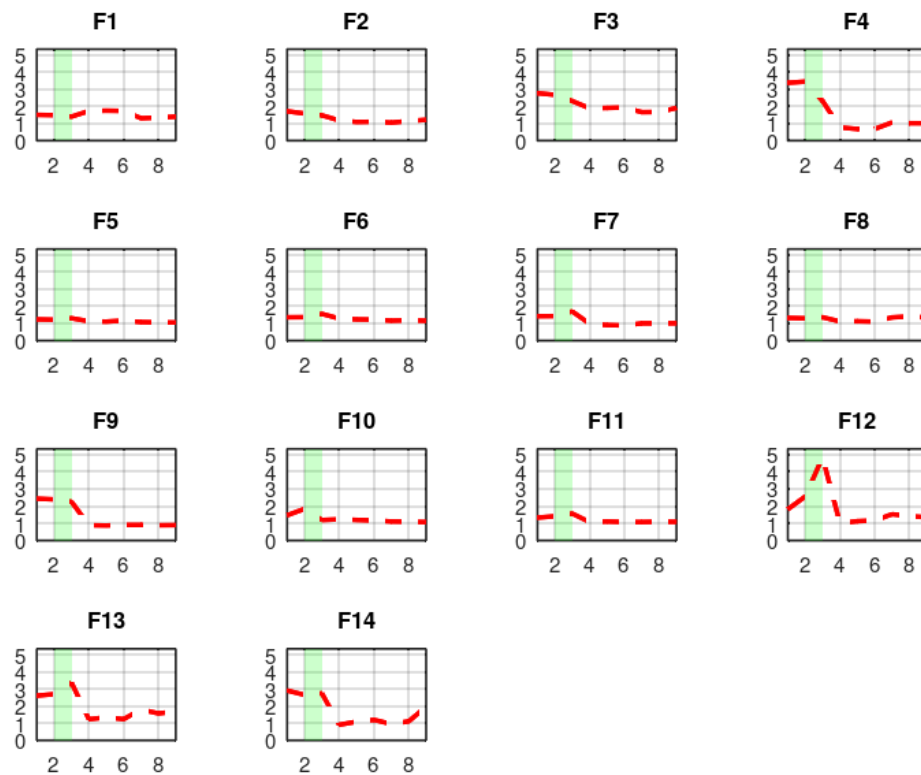
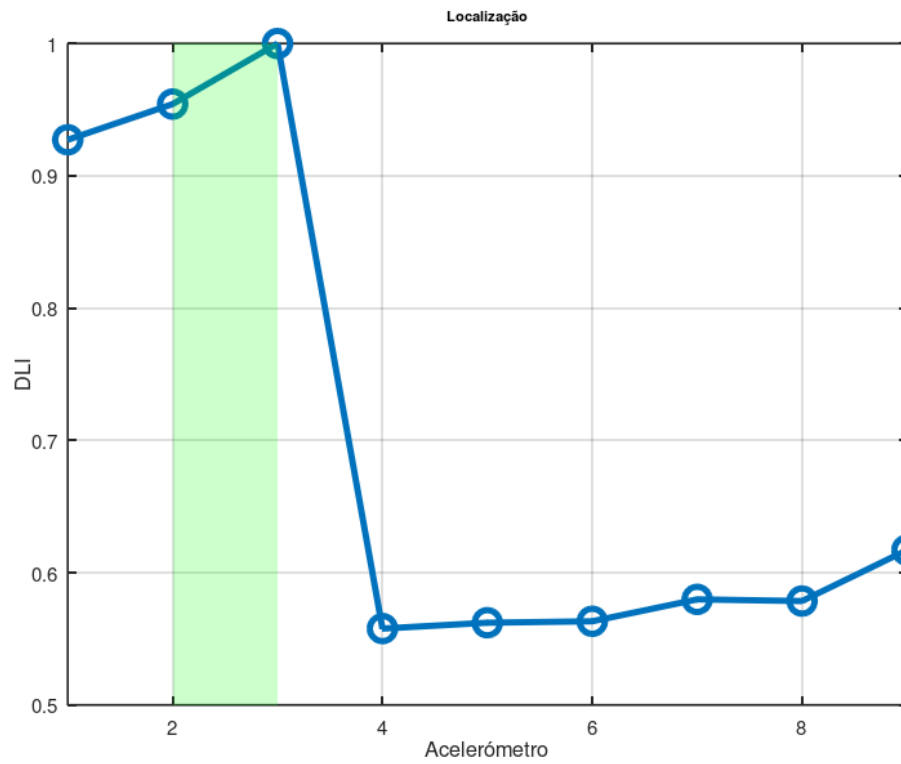
B.7 Caso de dano 7 (sev. 0,12%)



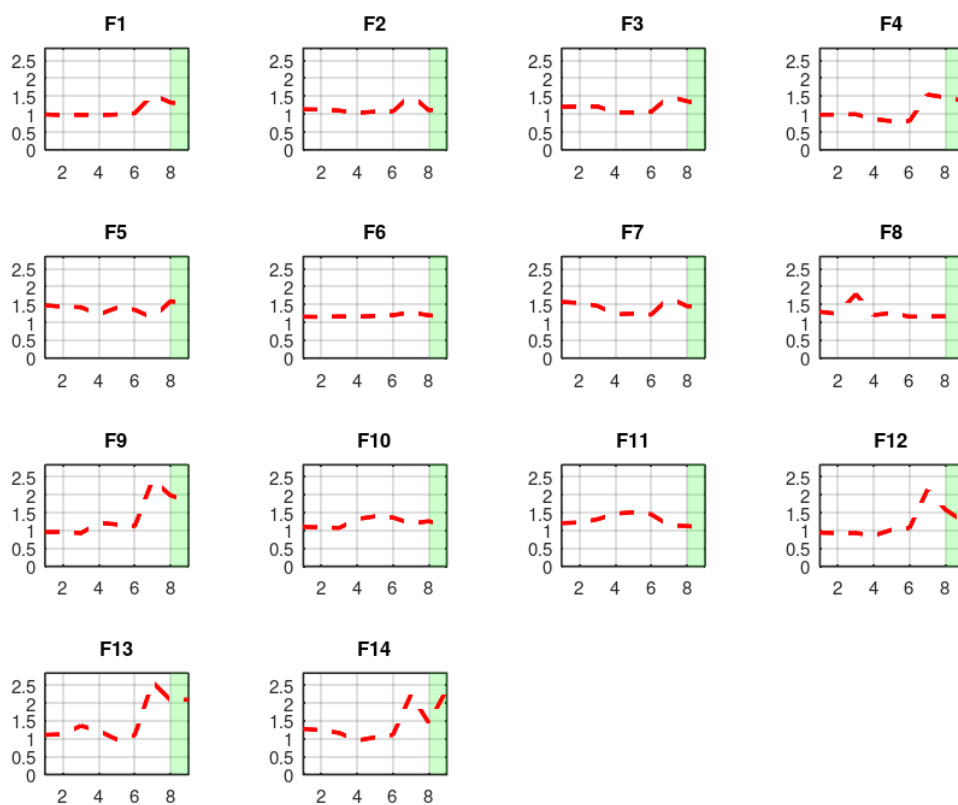
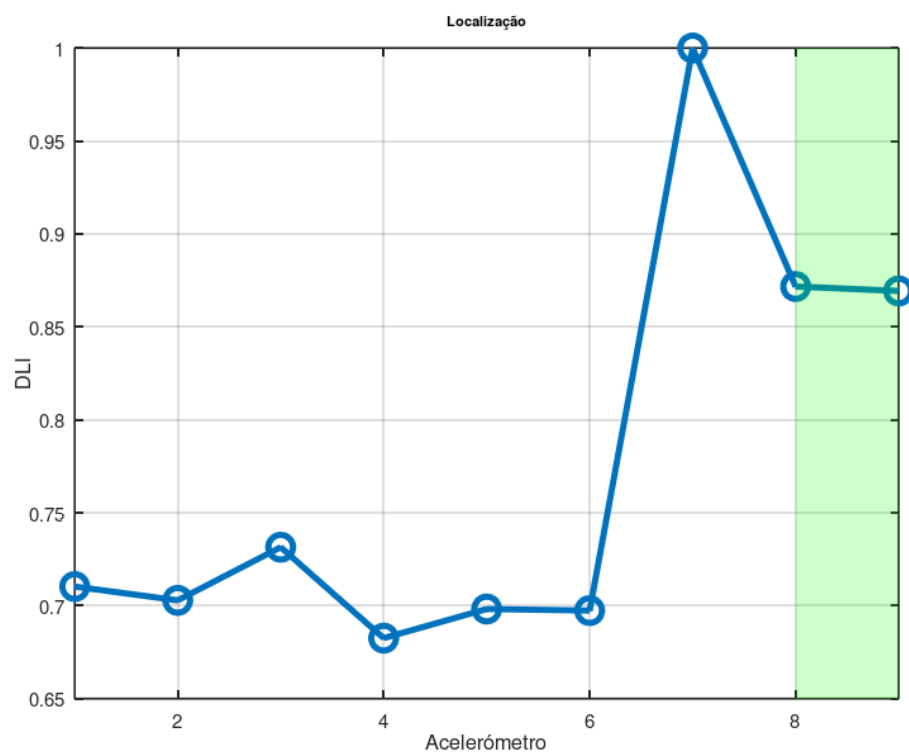
B.8 Caso de dano 8 (sev. 0,12%)



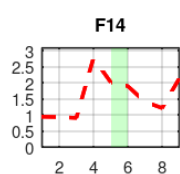
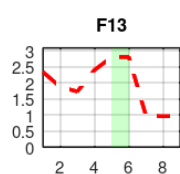
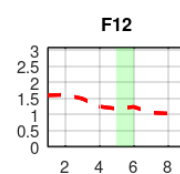
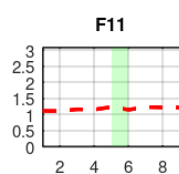
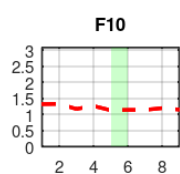
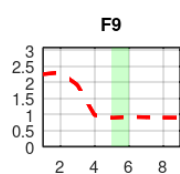
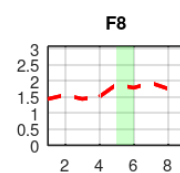
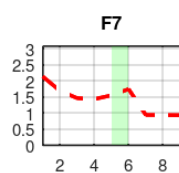
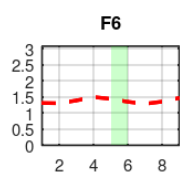
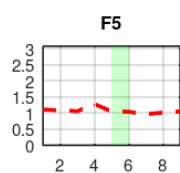
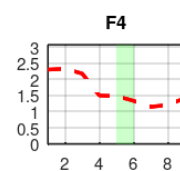
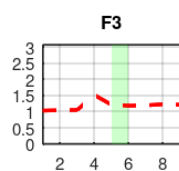
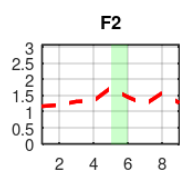
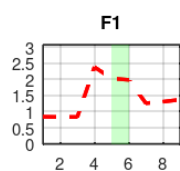
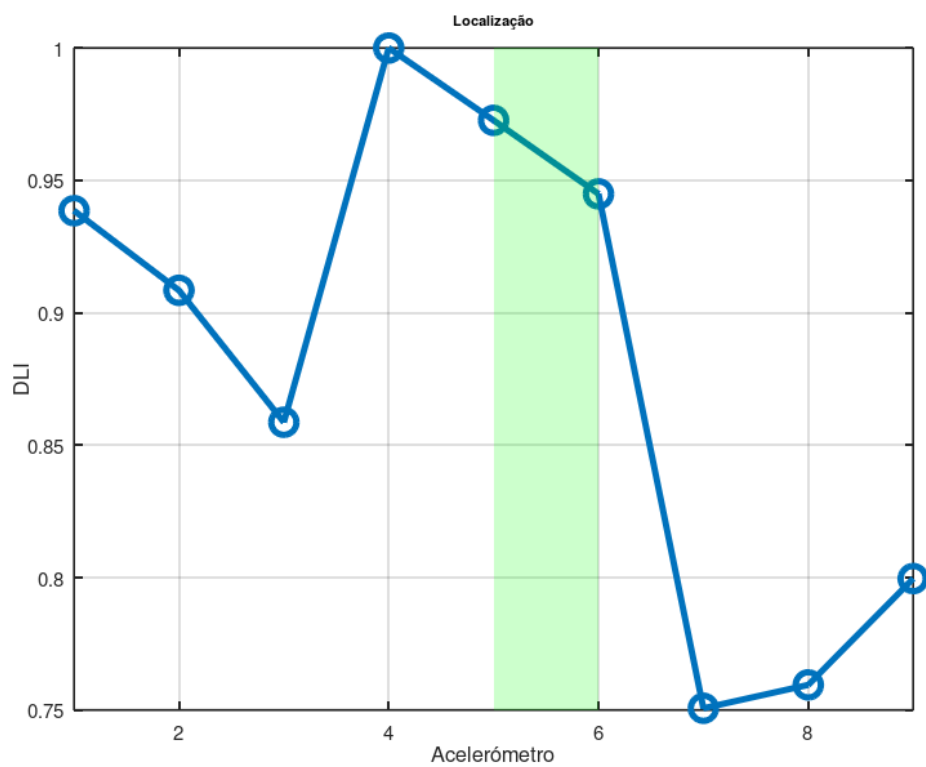
B.9 Caso de dano 9 (sev. 0,12%)



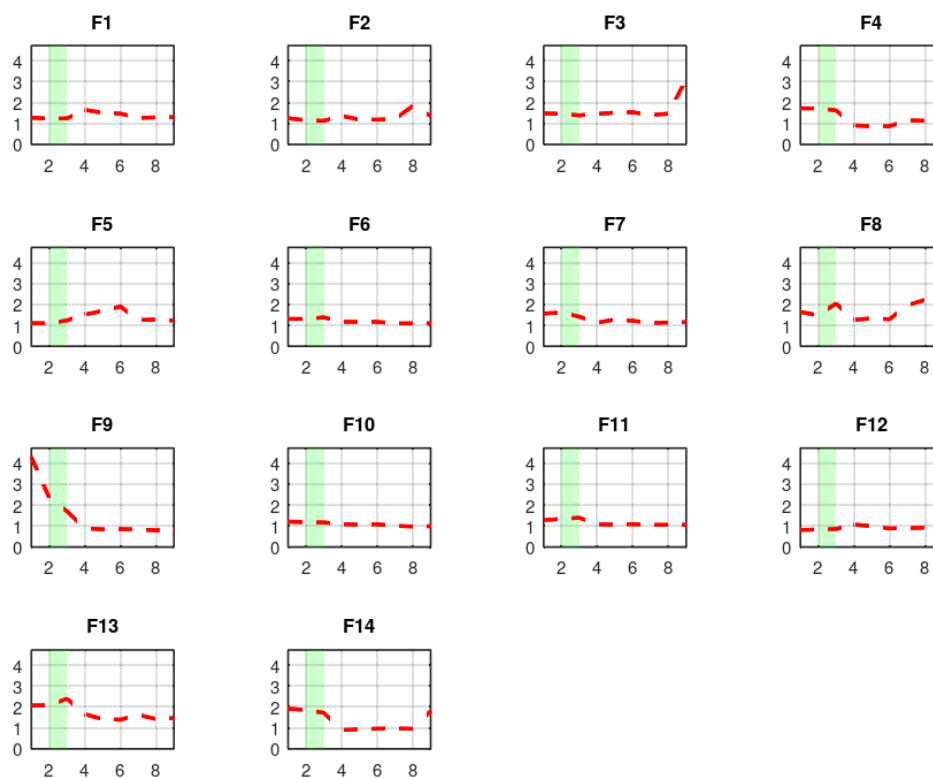
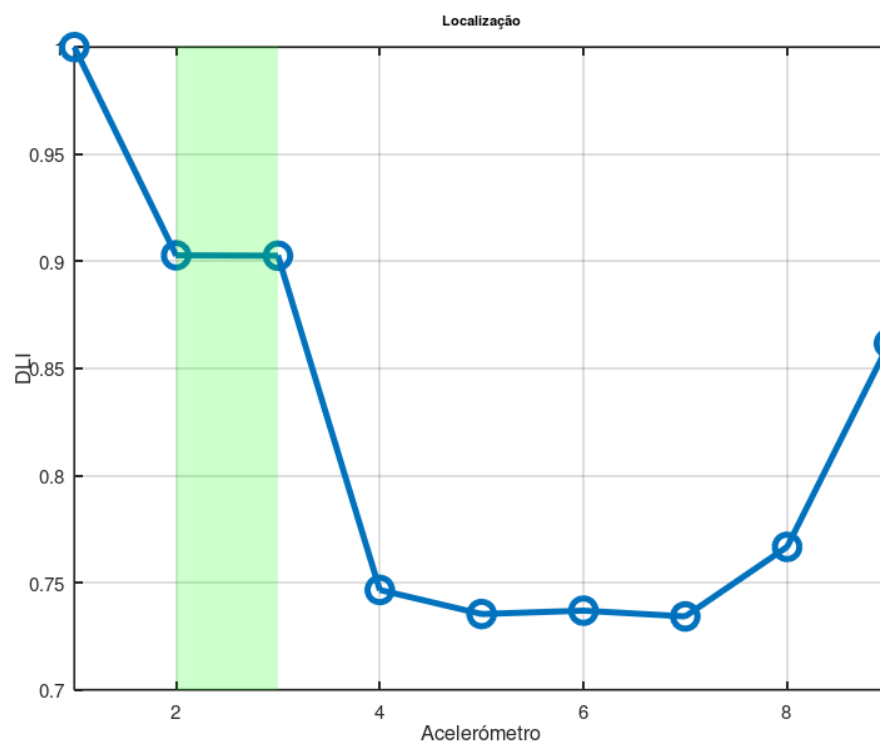
B.10 Caso de dano 10 (sev. 0,07%)



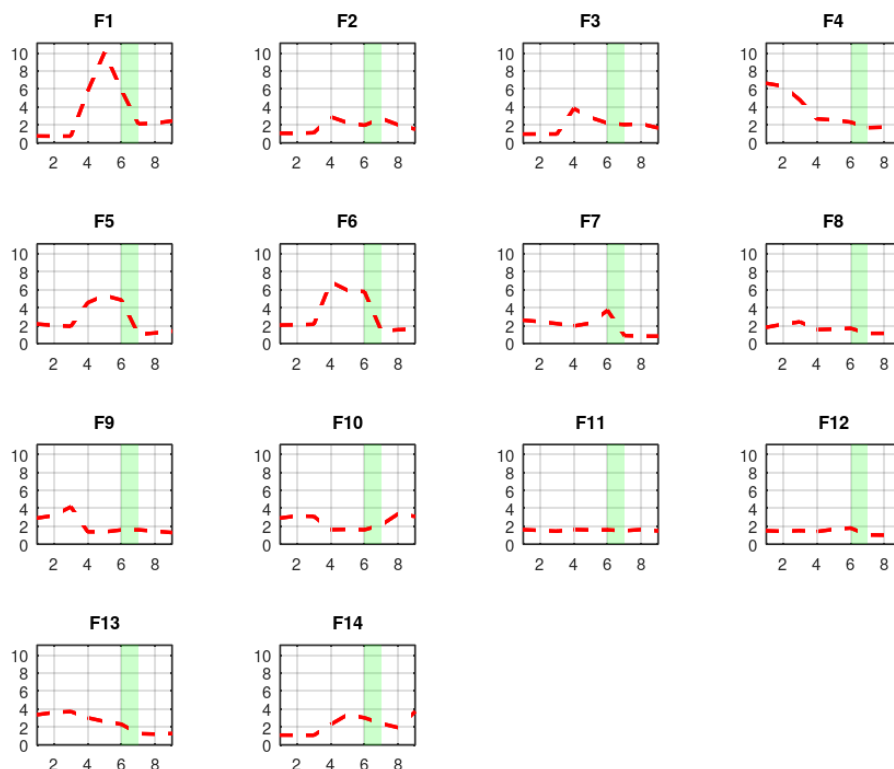
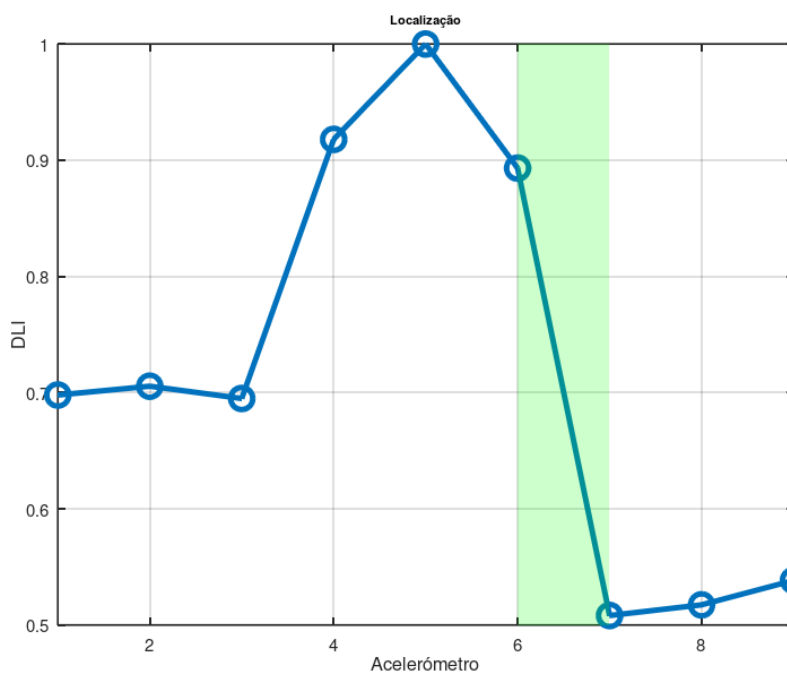
B.11 Caso de dano 11 (sev. 0,07%)



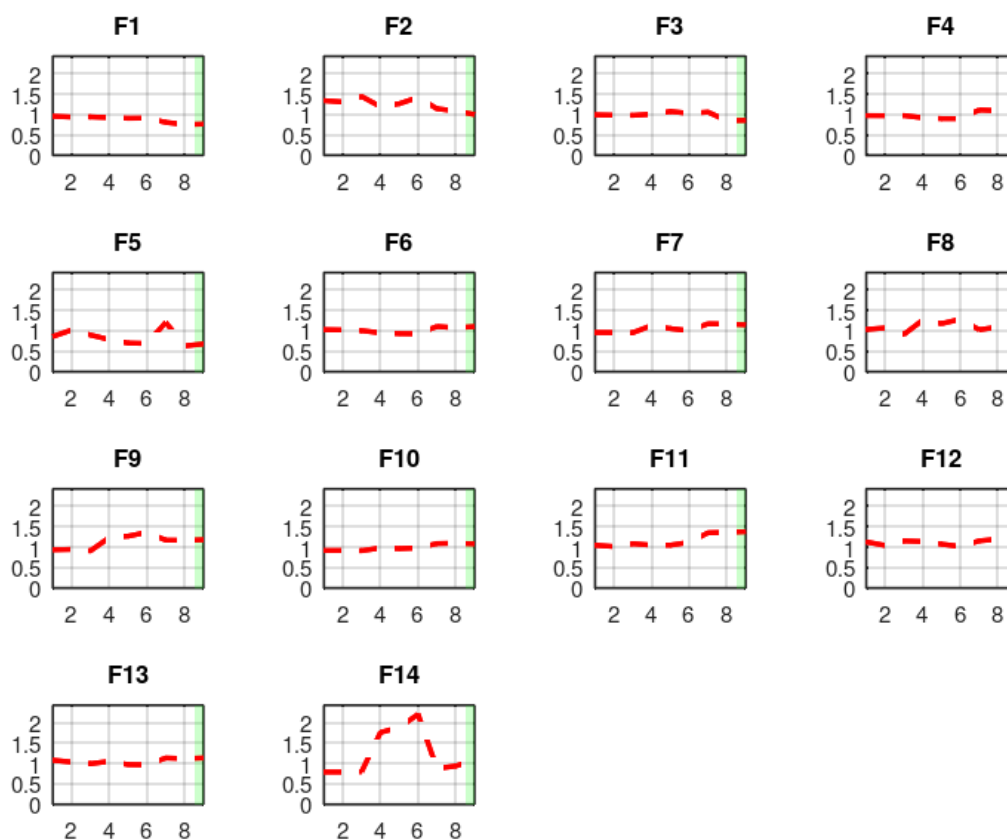
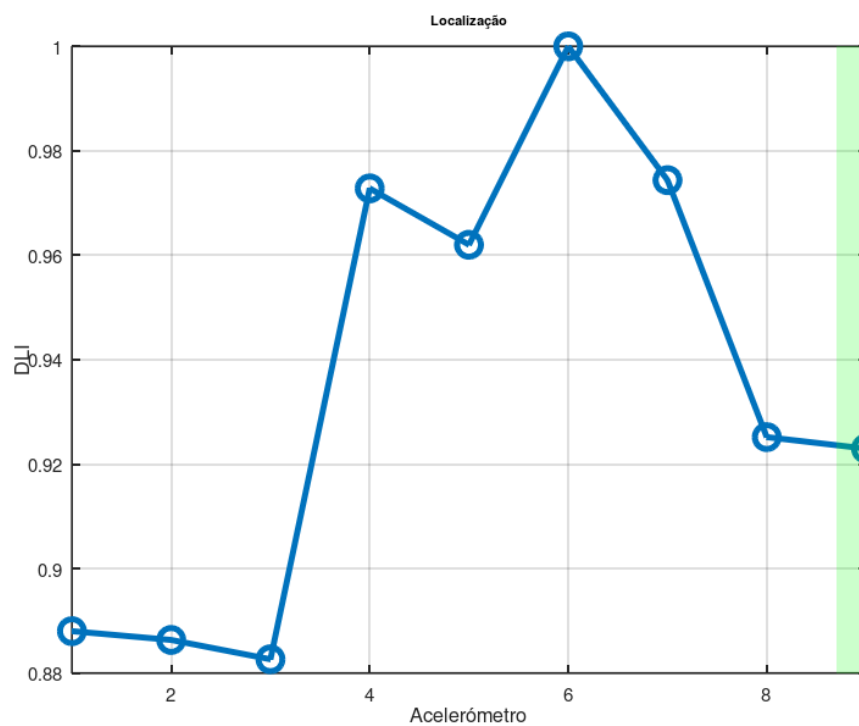
B.12 Caso de dano 12 (sev. 0,07%)



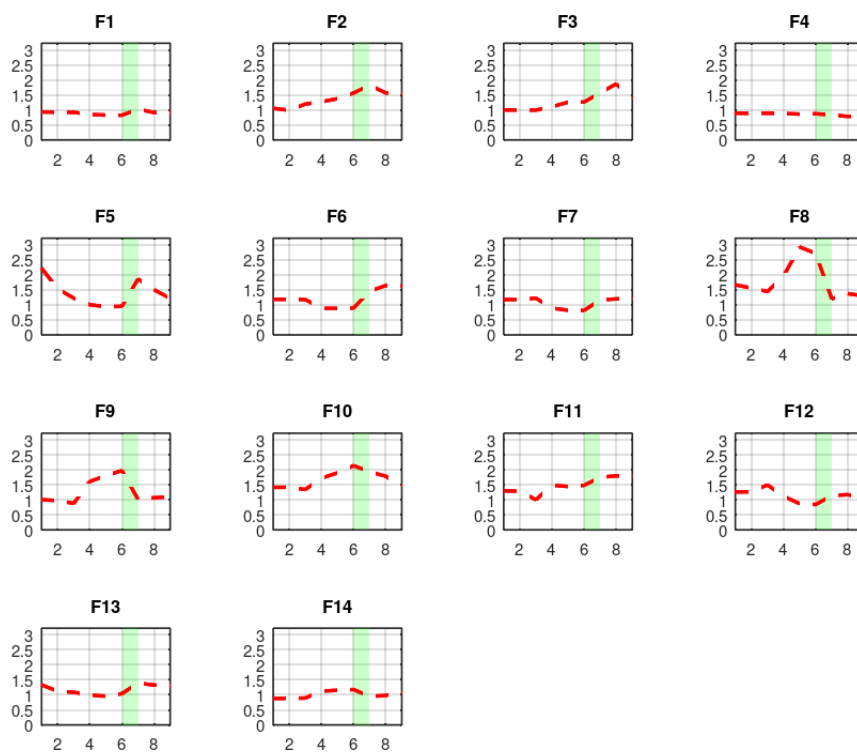
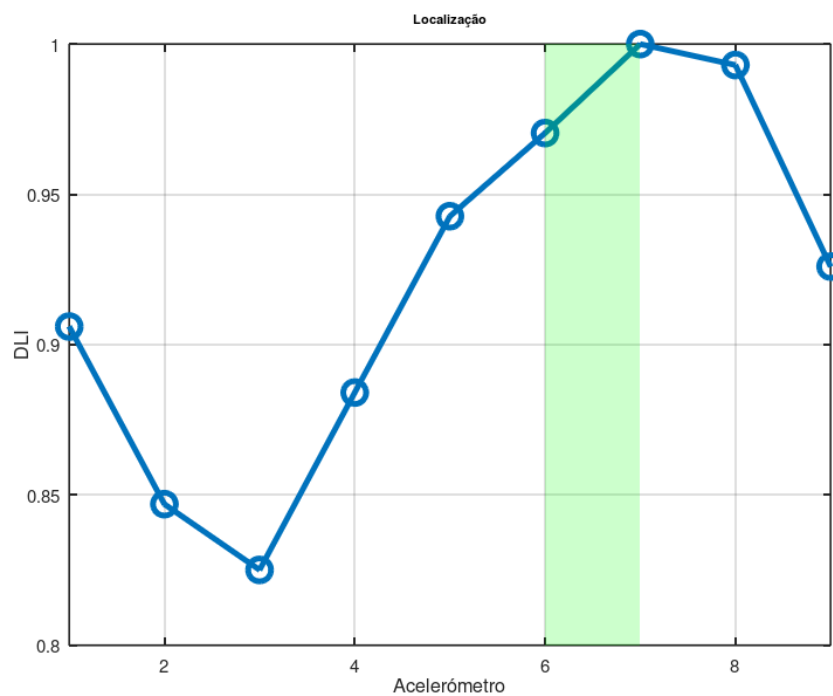
B.13 Caso de dano 13 (sev. 0,65 %)



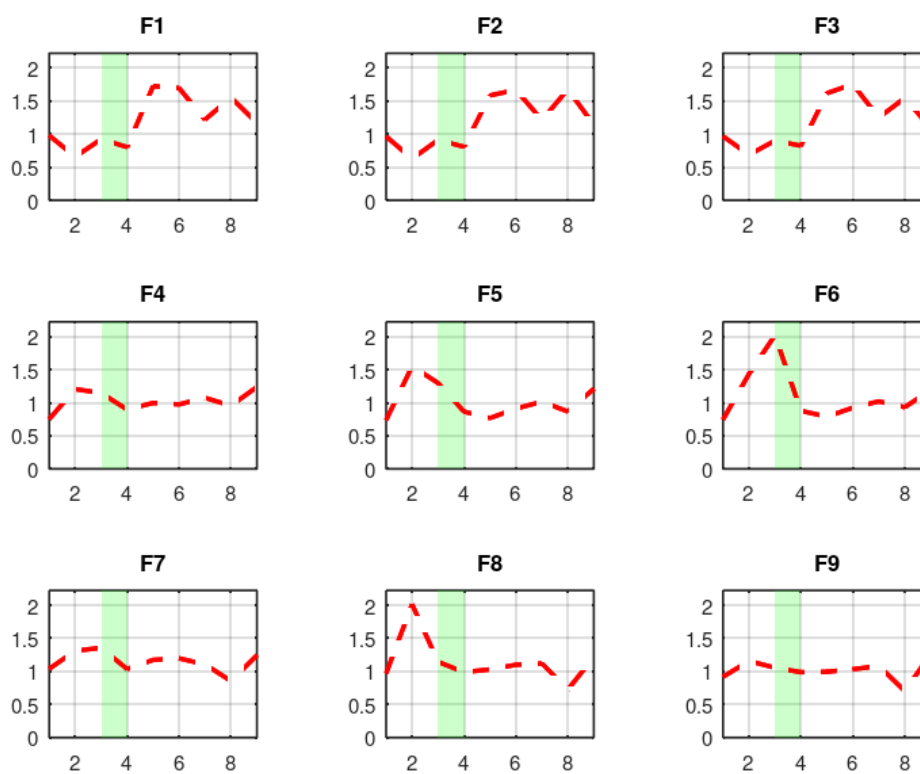
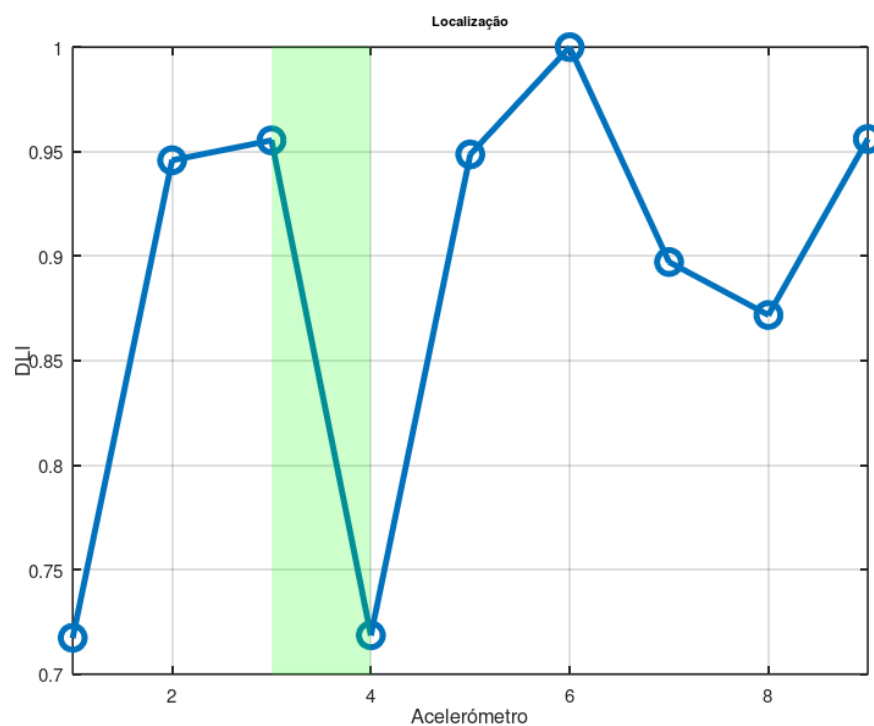
B.14 Caso de dano 14 (sev. 4,92%)



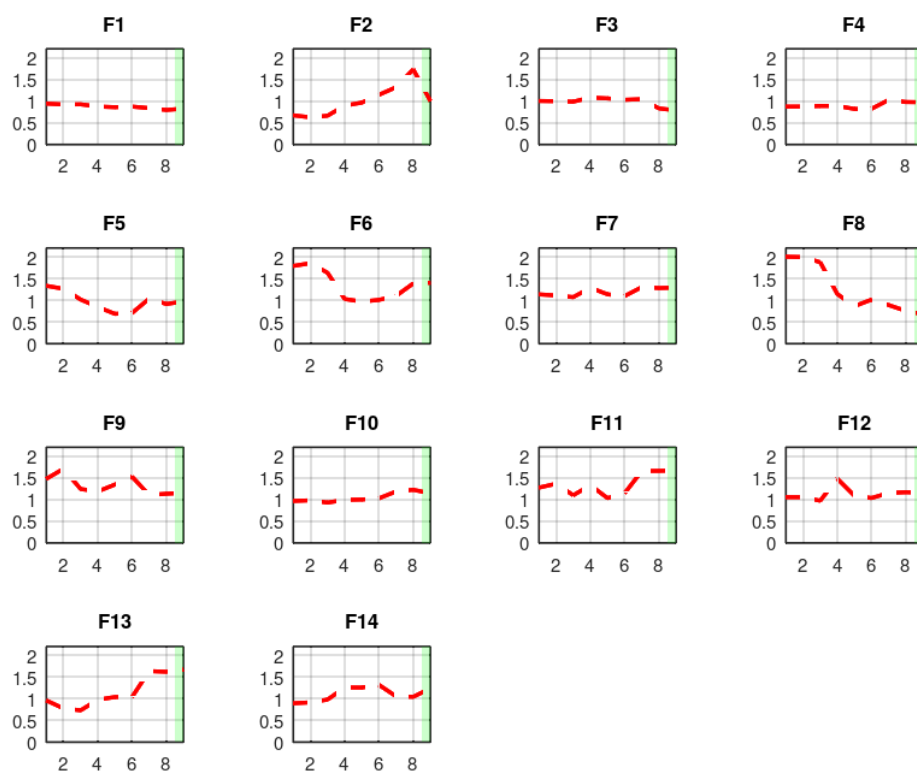
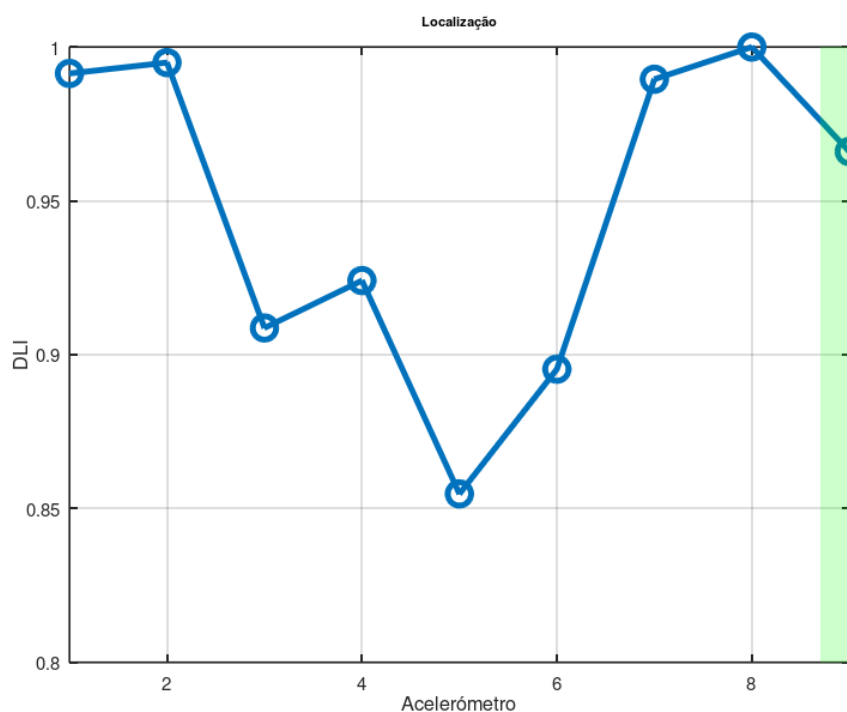
B.15 Caso de dano 15 (sev. 4,92%)



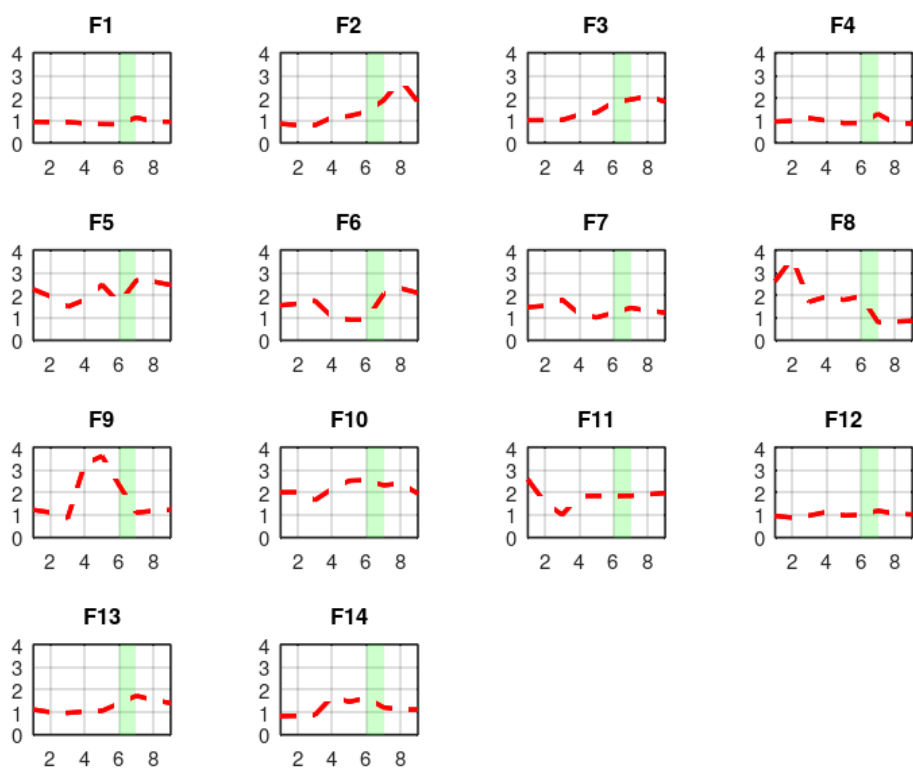
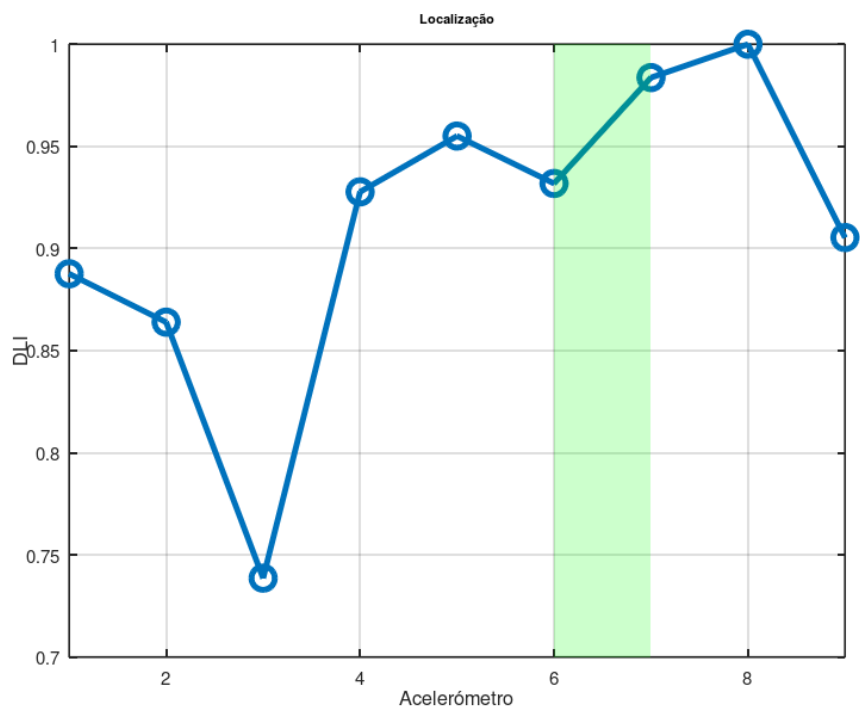
B.16 Caso de dano 16 (sev. 4,92%)



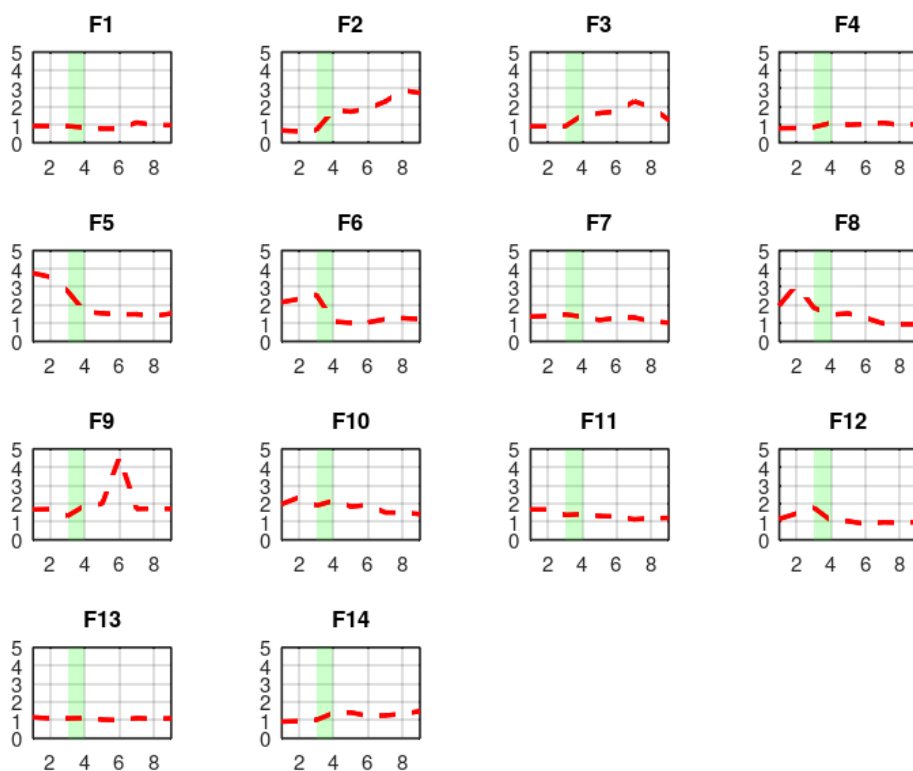
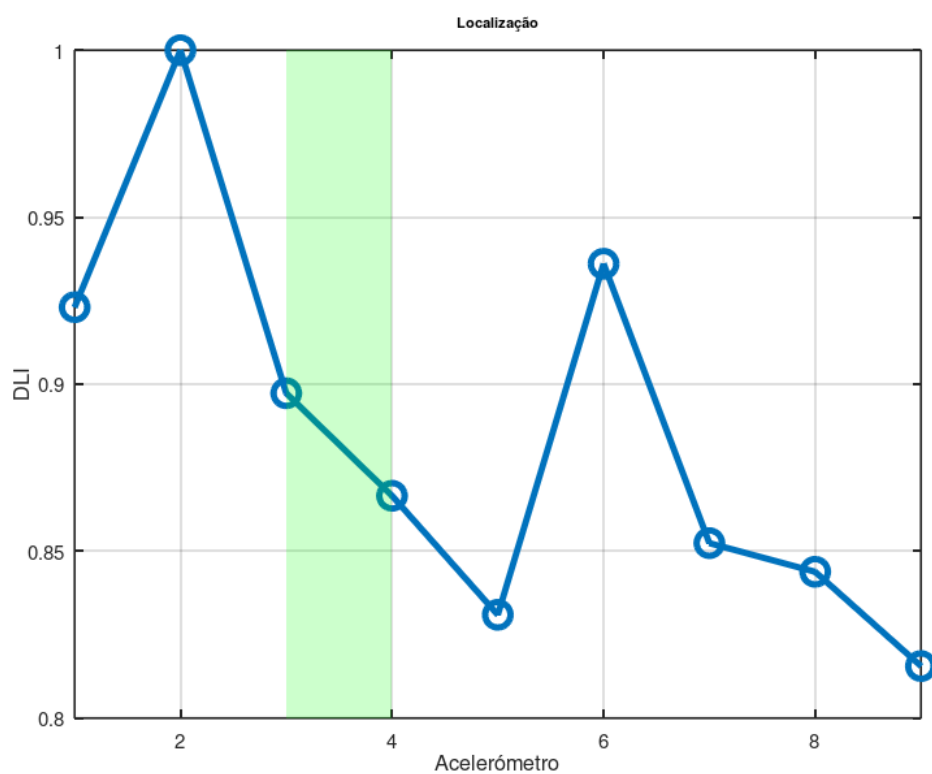
B.17 Caso de dano 17 (sev. 9,77%)



B.18 Caso de dano 18 (sev. 9,77%)



B.19 Caso de dano 19 (sev. 9,77%)



C APÊNDICE

C.1 Metodologia em GNU Octave

```
1 clc;
2 clear all;
3
4 load('FRF_CD_14P.mat')      % FRFs da estrutura com dano
5 load('FRF_SD_14P.mat')      % FRFs da estrutura sem dano
6
7
8 % Cálculo do Ratio Indicator
9 div = FRF_CD_14P ./ FRF_SD_14P;
10 RI = abs(div);
11
12 media = mean(RI,1);          % Média ao longo das frequências para cada excitação
13 ARI = reshape(media,9,14);   % Matriz 9x14:
14 FAR = mean(ARI,2);           % Média de todas as forças em cada acelerômetro
15 DI = mean(FAR);
16 disp(DI);
17 DLI = FAR / max(FAR);        % FAR normalizado
18
19 % Plot do gráfico de DLI
20 x = 1:9;
21 figure;
22 plot(x, DLI, '-o','LineWidth',1.5);
23 xlabel('Acelerômetro');
24 ylabel('DLI');
25 title('Localização');
26 grid on;
27
28 % Faixa verde na região do dano
29 yl = ylim;
30 patch([2 3 3 2], [yl(1) yl(1) yl(2) yl(2)], [0 1 0], ...
31       'FaceAlpha', 0.2, 'EdgeColor', 'none');
32
33 hold off;
34
35 % Plot dos gráficos de força individuais
36 x = 1:9;
37 numForcas = 14;
38
39 numCols = ceil(sqrt(numForcas));
40 numRows = ceil(numForcas / numCols);
41
42 figure;
43 for f = 1:numForcas
44     subplot(numRows, numCols, f);
45     plot(x, ARI(:, f), 'r--', 'LineWidth', 1);
46     title(['F' num2str(f)]);
47     xlim([1 9]);
48     ylim([0 max(ARI(:)) * 1.1]);
49     grid on;
50 end
51
52
```

