



**Nova**  
NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

JOANA FILIPA CRUZ RAMOS

Licenciada em Ciências da Engenharia Mecânica

# DETEÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS TUBULARES UTILIZANDO FUNÇÕES DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa  
Dezembro, 2023





# NOVA

NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

## DETEÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS TUBULARES UTILIZANDO FUNÇÕES DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

**JOANA FILIPA CRUZ RAMOS**

Licenciada em Ciências da Engenharia Mecânica

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

**Coorientador:** Hugo Filipe Diniz Policarpo,  
Professor Auxiliar, Escola Naval

### **Júri:**

**Presidente:** Daniel Cardoso Vaz,  
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

**Vogais:** Tiago Alexandre Narciso da Silva,  
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Raquel Albuquerque Soares Brás de Almeida,  
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Dezembro, 2023



## **Deteção de dano em estruturas tubulares utilizando Funções de Resposta em Frequência**

Copyright © Joana Filipa Cruz Ramos, NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA.

A NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA 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 gostaria de agradecer à Professora Raquel Almeida e ao Professor Hugo Policarpo por todo o tempo, apoio e motivação que me deram durante este período de elaboração da tese.

Agradeço aos meus pais, Maria de Fátima Cruz e Francisco Ramos, por estarem sempre lá quando preciso e por me darem a oportunidade e todas as condições para construir um futuro promissor. Agradeço à minha irmã, Francisca Ramos, por ser, desde sempre, a melhor amiga que eu poderia pedir. Um agradecimento especial ao Kiko.

Por último um agradecimento aos meus amigos, por estarem lá nos melhores momentos e nos mais difíceis também. Sem dúvida que tornaram os últimos anos inesquecíveis.



# RESUMO

---

Estruturas tubulares de paredes finas, de secção circular ou prismática são amplamente utilizadas na indústria. A grande maioria são fabricadas em material metálico, no entanto, com o aparecimento dos materiais compósitos e impressão 3D, novas oportunidades de utilização têm vindo a surgir.

Ao longo do seu tempo de vida estas estruturas estão sujeitas a vários tipos de esforços e expostas a ambientes que podem levar ao surgimento de dano estrutural. Os tipos de defeitos verificados em materiais compósitos costumam ser diferentes dos encontrados em metais e os mecanismos de falha são mais complexos. Torna-se então importante estudar métodos eficazes de deteção de dano que permitam uma monitorização contínua e a identificação do dano precocemente, nestas estruturas, de modo a evitar a ocorrência de falhas catastróficas.

Neste trabalho, pretende-se estudar a utilização das Funções de Resposta em Frequência (FRFs) na deteção e localização de danos em estruturas tubulares de parede fina feitas em material compósito. As FRFs descrevem a resposta dinâmica do sistema quando é aplicada uma força excitadora, dentro de uma gama de frequência previamente definida. A sua utilização apresenta várias vantagens, destacando-se a facilidade de obtenção.

Para testar a sua aplicabilidade, foi realizado um estudo numérico. Começou por ser realizada uma simulação numérica de uma estrutura tubular de apoio livre-livre, na qual foram introduzidos danos por redução de massa. Este processo foi repetido utilizando o elemento finito de viga e utilizando o elemento finito de casca com o objetivo de perceber se ambos os elementos eram adequados para a simulação da estrutura.

As simulações numéricas para obtenção de resultados são realizadas com o auxílio do programa *Ansys APDL*. São criados nove casos de dano ao longo do comprimento da estrutura, variando os mesmos de localização e severidade e obtidas as FRFs em termos de translação em nove pontos de medição distribuídos ao longo da superfície da estrutura.

Posteriormente, para a utilização e gestão dos dados das FRFs, foi aplicada uma metodologia, através do programa *MATLAB*, que considera como *input* as FRFs e recorre a indicadores que permite relacionar as curvas obtidas com e sem dano, possibilitando assim a identificação do dano.

Adicionalmente, é estudada a influência que alguns fatores têm na correta localização do dano, nomeadamente, a severidade do dano, a quantidade e posição das forças a aplicar para a localização do dano e a presença de ruído nas respostas obtidas.

**Palavras-chave:** Deteção e localização de dano, Funções de Resposta em Frequência, Estrutura tubular de parede fina.



# ABSTRACT

---

Thin-walled, circular or prismatic tubular structures are widely used in industry. The majority are made of metallic material, however, with the advent of composite materials and 3D printing, new opportunities have arisen.

Throughout their lifetime, these structures are subjected to various types of stress and exposed to environments that can lead to structural damage. The types of defects found in composite materials are often different from those found in metals and the failure mechanisms are more complex. Therefore, it is important to study effective damage detection methods that allow continuous monitoring and identification of early damage in these structures to prevent failures or catastrophes.

This work aims to study the use of Frequency Response Functions (FRFs) in the detection and localization of damage in thin-walled tubular structures made of composite materials. FRFs describe the dynamic response of the system when an exciting force is applied within a previously defined frequency range. Their use has several advantages, the biggest being the ease with which they can be obtained.

To test their applicability, a numerical study was carried out. First, a numerical simulation of a free-standing tubular structure was carried out, in which mass reduction damage was introduced. This process was repeated using a beam finite element and a shell finite element to determine whether both elements were suitable for simulating the structure.

Numerical simulations are carried out using the Ansys APDL program to obtain the results. Nine damage cases were created along the length of the structure, changing their location and severity, and the FRFs were obtained in terms of translation at nine measurement points distributed along the surface of the structure.

Subsequently, to use and manage the FRF data, a methodology was applied using the MATLAB program, which takes the FRFs as input and uses indicators to relate the curves obtained with and without damage, thus making it possible to identify the damage.

In addition, the influence that certain factors have on the correct location of the damage is studied, namely the severity of the damage, the amount and position of the forces to be applied to locate the damage and the presence of noise in the responses obtained.

**Keywords:** Damage detection and localization, Frequency Response Functions, Thin-walled tubular structure.



# ÍNDICE

Agradecimentos.....	vii
Resumo .....	ix
Abstract.....	xi
Índice.....	xiii
Índice de Figuras .....	xv
Índice de Tabelas .....	xvii
Nomenclatura .....	xix
1 Introdução .....	1
1.1 Contextualização e Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	3
2 Revisão bibliográfica.....	5
2.1 Métodos e conceitos associados à identificação de dano.....	5
2.2 Métodos tradicionais.....	6
2.2.1 Frequências Naturais .....	6
2.2.2 Modos de Vibração .....	6
2.2.3 Funções de respostas em frequência (FRF).....	7
2.3 Outros Métodos.....	8
2.3.1 <i>Wavelet Analysis</i> .....	8
2.3.2 Redes Neurais Artificiais .....	8
2.3.3 Algoritmos Genéticos .....	9
2.4 Materiais Compósitos .....	9
2.4.1 O que são? .....	9
2.4.2 Vantagens e Aplicações .....	9
2.4.3 Danos em compósitos.....	11
3 Fundamentos Teóricos.....	13
3.1 Equação de equilíbrio .....	13
3.2 Método dos Elementos Finitos .....	14
3.2.1 Elemento finito de viga e elemento finito de casca.....	17
3.3 Ruído.....	19
3.4 Indicador razão.....	19

4	Metodologia .....	21
4.1	Objeto de estudo.....	21
4.2	Simulação Numérica – Método dos Elementos Finitos .....	22
4.3	Modelação da estrutura tubular.....	22
4.3.1	Elemento finito BEAM188.....	22
4.3.2	Elemento finito SHELL181 .....	23
4.3.3	Estudo da convergência da malha .....	24
4.3.4	Propriedades modais da estrutura.....	25
4.4	Implementação do Amortecimento .....	27
4.5	Implementação de Dano.....	27
4.6	Posicionamento dos pontos de medição/excitação.....	28
4.7	Casos de estudo .....	28
4.8	Implementação do ruído .....	29
4.9	Metodologia aplicada para a deteção e localização de dano .....	30
5	Resultados .....	35
5.1	Severidade do dano.....	35
5.2	Quantidade e posição das forças a aplicar para a localização do dano .....	40
5.3	Presença de ruído .....	45
6	Conclusões.....	53
6.1	Trabalhos propostos.....	54
	Bibliografia .....	55
	Anexos .....	59
	Anexo A1 - Estudo de convergência da malha .....	59
	Anexo A2 .....	61
	Anexo A3 .....	65

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Carcaça sólida em fibra de carbono .....	1
Figura 1.2- Derramamento de petróleo no Golfo do México .....	2
Figura 1.3- Fotografia da estrutura tubular de fibra de carbono a estudar.....	3
Figura 2.1- Montagem da fuselagem do cargueiro X-55A.....	10
Figura 2.2- Evolução do peso [%] de estruturas em material compósito em aviões Airbus .....	10
Figura 2.3- Exemplos de danos em materiais compósitos.....	12
Figura 3.1- Elemento viga com 6GDL .....	15
Figura 3.2- Geometria do elemento finito BEAM188 .....	18
Figura 3.3- Geometria do elemento finito SHELL181 .....	18
Figura 4.1- Modelo da estrutura tubular quadrática.....	21
Figura 4.2- Keypoints.....	22
Figura 4.3- Linhas.....	22
Figura 4.4- Malha.....	23
Figura 4.5- Keypoints.....	23
Figura 4.6- Linhas.....	24
Figura 4.7- Malha.....	24
Figura 4.8- Gráfico das FRFs diretas H1,1 sem dano obtidas para as simulações com elemento finito de viga e de casca.....	25
Figura 4.9- Gráfico das FRFs diretas H1,1 com dano obtidas para as simulações com elemento finito de viga e de casca.....	26
Figura 4.10- Modos de vibração para a simulação utilizando o elemento de viga (BEAM188) e o elemento de casca (SHELL181) .....	26
Figura 4.11- Representação do perfil em estudo com indicação da posição dos casos de dano (CD) e sensores (S).....	29
Figura 5.1- Gráficos das FRFs diretas H1,1 correspondentes aos casos sem dano e com dano de severidade 2%, 5%, 10%, 15% e 20% para a simulação com o elemento finito de viga.....	36
Figura 5.2- Gráficos das FRFs diretas H1,1 correspondentes aos casos sem dano e com dano de severidade 2%, 5%, 10%, 15% e 20% para a simulação com o elemento finito de casca .....	37
Figura 5.3- Estudo do CD1 para os 5 níveis de severidade para o elemento finito de viga .....	38
Figura 5.4- Estudo do CD1 para os 5 níveis de severidade para o elemento finito de casca .....	38
Figura 5.5- Gráfico de comparação entre FRFs H1,1 sem ruído e com 2% de ruído adicionado.....	45
Figura 5.6- Estudo do CD1 para os 5 níveis de severidade para o elemento de viga, considerando o caso sem ruído (a) e com ruído para uma percentagem de 0,5% (b), de 1% (c) e de 2% (d) .....	46

Figura 5.7- Estudo do CD1 para os 5 níveis de severidade para o elemento de casca, considerando o caso sem ruído (a) e com ruído para uma percentagem de 0,5% (b), de 1% (c) e de 2% (d) .....	47
Figura 5.8- FRFs diretas H1,1 obtidas para o CD1 com dano de severidade de 5% e sem dano, para 2% de ruído adicionado.....	50
Figura 5.9- Valores da aplicação do vetor Razão para o CD1 com dano de 5% de severidade .....	50
Figura 5.10- Gráfico com a sobreposição das FRFs obtidas para o caso sem dano (cinzento) e CD1 com severidade 5% (azul) e da curva obtida pela aplicação do indicador Razão (laranja) .....	51

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Vantagens e desvantagens de compósitos em relação aos materiais metálicos .....	11
Tabela 4.1- Dimensões da estrutura tubular quadrática.....	21
Tabela 4.2- Propriedades materiais da estrutura tubular quadrática .....	21
Tabela 4.3- Frequências naturais obtidas experimentalmente para a simulação, com o elemento de viga (BEAM188) e o elemento de casca (SHELL181) .....	25
Tabela 4.4- Percentagem de dano de acordo com a massa adicionada .....	27
Tabela 4.5- Localização dos pontos de excitação/medição .....	28
Tabela 4.6- Localização em mm dos casos de dano (CD) a ser estudados e indicação dos sensores (S) mais próximos a cada.....	29
Tabela 4.7- Resumo das etapas da 1ªfase da Metodologia a aplicar para a obtenção e análise de resultados.....	31
Tabela 4.8- Resumo das etapas da 2ªfase da Metodologia a aplicar para a obtenção e análise de resultados (Parte 1) .....	32
Tabela 4.9- Resumo das etapas da 2ªfase da Metodologia a aplicar para a obtenção e análise de resultados (Parte 2) .....	33
Tabela 5.1- Resultados da influência da severidade do dano para todos os casos de dano para o elemento de viga .....	39
Tabela 5.2- Resultados da influência da severidade do dano para todos os casos de dano para o elemento de casca.....	39
Tabela 5.3- Resultados da influência da aplicação do somatório de diferentes forças para todos os casos de dano e para 3 níveis de severidade para o elemento finito de viga...	41
Tabela 5.4- Resultados da influência da aplicação do somatório de diferentes forças para todos os casos de dano e para 3 níveis de severidade para o elemento finito de casca .	42
Tabela 5.5- Resultados da influência da aplicação de cada força individualmente para todos os casos de dano e para 3 níveis de severidade para o elemento de viga .....	43
Tabela 5.6- Resultados da influência da aplicação de cada força individualmente para todos os casos de dano e para 3 níveis de severidade para o elemento finito de casca .	44
Tabela 5.7- Resultados da influência da percentagem de 0,5% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento BEAM188.....	48
Tabela 5.8- Resultados da influência da percentagem de 1% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento BEAM188.....	48
Tabela 5.9- Resultados da influência da percentagem de 2% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento BEAM188.....	48
Tabela 5.10- Resultados da influência da percentagem de 0,5% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento SHELL181.....	49

Tabela 5.11- Resultados da influência da percentagem de 1% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento SHELL181 .....	49
Tabela 5.12- Resultados da influência da percentagem de 2% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento SHELL181 .....	49

# NOMENCLATURA

<b><math>M</math></b>	Massa
<b><math>C</math></b>	Amortecimento Viscoso
<b><math>K</math></b>	Rigidez
<b><math>x</math></b>	Deslocamento
<b><math>\dot{x}</math></b>	Velocidade
<b><math>\ddot{x}</math></b>	Aceleração
<b><math>F</math></b>	Força de excitação
<b><math>\omega</math></b>	Frequência
<b><math>H</math></b>	Recetância
<b><math>i</math></b>	Ponto de medição
<b><math>j</math></b>	Ponto de excitação
<b><math>t</math></b>	Instante de tempo
<b><math>Y</math></b>	Mobilidade
<b><math>A</math></b>	Acelerância
<b><math>d_e</math></b>	Vetor de deslocamento
<b><math>K_e</math></b>	Rigidez do elemento
<b><math>M_e</math></b>	Massa do elemento
<b><math>\alpha</math></b>	Coefficiente de amortecimento de massa
<b><math>\beta</math></b>	Coefficiente de amortecimento de rigidez
<b><math>IR</math></b>	Indicador Razão
<b><math>L</math></b>	Comprimento

<b><i>R</i></b>	Altura
<b><i>W</i></b>	Largura
<b><i>a</i></b>	Área da secção transversal
<b><i>b</i></b>	Espessura
<b><i>E</i></b>	Modulo de Young
<b><math>\rho</math></b>	Densidade
<b><i>m</i></b>	Massa da estrutura tubular
<b><i>v</i></b>	Coefficiente de Poisson
<b><i>mi</i></b>	Massa inicial
<b><i>S</i></b>	Sensor
<b><i>CD</i></b>	Caso de dano

# SIGLAS E ACRÓNIMOS

<b>2D</b>	Duas Dimensões
<b>3D</b>	Três Dimensões
<b>APDL</b>	<i>Ansys Parametric Design Language</i>
<b>COMAC</b>	<i>Co-ordinate Modal Assurance Criterion</i>
<b>END</b>	Ensaio Não Destrutivo
<b>FRF</b>	Função de Resposta em Frequência
<b>IDBV</b>	Identificação de Dano Baseado em Vibrações
<b>IR</b>	Indicador Razão
<b>MAC</b>	<i>Modal Assurance Criterion</i>
<b>MEF</b>	Método dos Elementos Finitos
<b>MSE</b>	<i>Modal Strain Energy</i>
<b>NFN</b>	Normalização de frequências naturais
<b>GDL</b>	Grau de Liberdade
<b>S</b>	Sensor
<b>SD</b>	Sem dano
<b>SM</b>	Sem massa adicional
<b>CD</b>	Com dano
<b>CM</b>	Com massa adicional



# 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

Estruturas tubulares de paredes finas, de secção circular ou prismática são amplamente utilizadas nas indústrias de construção civil, automóvel, naval, aeroespacial e petrolífera. A grande maioria são fabricadas em material metálico, no entanto, devido às vantagens que apresentam, tem vindo a aumentar a utilização de materiais compósitos nestas estruturas. Como é o exemplo da figura 1.1 [1], onde se pode ver uma carcaça sólida de um motor de uma aeronave produzida em fibra de carbono.



Figura 1.1- Carcaça sólida em fibra de carbono

O dano é uma das principais causas de falha estrutural. Um dos danos mais comuns em estruturas tubulares em materiais metálicos é a corrosão [2]. Este é um dos motivos porque se substituí os materiais metálicos pelos compósitos. No entanto, também os materiais compósitos são suscetíveis à presença de dano, sendo um dos mais graves a delaminação. Existem ainda outros danos, de superfície interna, por exemplo, como redução de espessura da parede e fissuras que são comuns a tubos de aço e materiais compósitos usados em várias aplicações e indústrias [3].

A propagação de danos pode provocar diversas consequências desde interrupção de serviços, prejuízos financeiros até casos graves de instabilidade estrutural que podem resultar em colapso da estrutura, causando perda de vidas humanas e impactos ambientais negativos.

Um exemplo significativo destas consequências foi o caso do derramamento de petróleo no Golfo do México, em 2010, causado pelo colapso da plataforma *Deepwater Horizon* (Figura 1.2) [4]. De acordo com relatos, havia sinais de danos estruturais no poço, incluindo fissuras e deformações na coluna de perfuração, que foram ignorados ou não detetados antes do acidente. Estes danos provocaram uma perda de integridade estrutural no poço e levaram,

posteriormente, ao derramamento de petróleo. Estes fatores aliados a um conjunto de falhas de segurança e erros humanos levaram a um dos maiores desastres ambientais da história dos EUA.



Figura 1.2- Derramamento de petróleo no Golfo do México

De modo a evitar este tipo de desastres, é fundamental a utilização de técnicas de deteção de dano que permitam identificar a sua presença de forma precoce e contínua.

Este tema tem enfrentado vários desafios, uma vez que à medida que o mundo se torna mais complexo, a análise de falhas torna-se também mais complexa. Também a crescente aplicação dos materiais compósitos em componentes estruturais obriga a que se proceda a uma investigação científica cada vez mais profunda. Devido à sua natureza heterogénea, o tipo de defeitos verificados nestes costumam ser diferentes dos encontrados em metais e os mecanismos de falha são mais complexos [5].

De uma forma geral, a grande parte dos estudos de identificação de dano utilizam como objeto de estudo o dano em vigas e placas. Um dos desafios da aplicação de métodos baseados nas vibrações em estruturas tubulares é a possível presença de fluido que pode afetar as propriedades modais da estrutura [2].

## 1.2 OBJETIVOS

Neste trabalho, pretende-se estudar a utilização das FRFs na deteção e localização de dano em estruturas tubulares recorrendo a dados obtidos pela via numérica. Como objeto de estudo será utilizada uma estrutura tubular de fibra de carbono como a que se encontra na figura 1.3 [6].

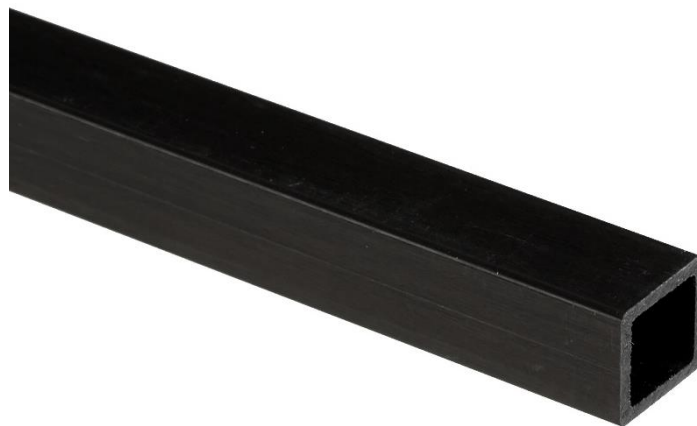


Figura 1.3- Fotografia da estrutura tubular de fibra de carbono a estudar

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação em questão será dividida em seis capítulos, os quais serão brevemente descritos nesta seção.

- Capítulo 1 – *Introdução*: neste capítulo, é apresentada uma breve síntese que introduz o leitor aos objetivos e motivação da dissertação, apresentando a contextualização em que a mesma se insere.
- Capítulo 2 – *Revisão Bibliográfica*: neste capítulo, realiza-se uma revisão do estado atual das metodologias utilizadas na identificação de dano, procede-se à apresentação de conceitos teóricos fundamentais, tais como o conceito de dano e FRFs, e faz-se uma introdução às características dos materiais compósitos, nomeadamente à presença de danos nesses materiais. Estes conceitos são relevantes para a compreensão dos capítulos seguintes.
- Capítulo 3 – *Fundamentos teóricos*: exposição dos princípios teóricos essenciais para a formulação da metodologia empregue na obtenção e interpretação de resultados.

- Capítulo 4 – *Metodologia*: descrição da metodologia desenvolvida para a detecção, localização e quantificação do dano recorrendo à medição de FRFs.
- Capítulo 5 – *Resultados*: exposição e análise dos resultados obtidos numericamente.
- Capítulo 6 – *Conclusões*: resumo da interpretação dos resultados, exposição das conclusões obtidas e apresentação de propostas para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 MÉTODOS E CONCEITOS ASSOCIADOS À IDENTIFICAÇÃO DE DANO

Segundo Zaher [7], o dano é definido como um enfraquecimento indesejado da estrutura que provoca um efeito negativo no seu desempenho e compromete a segurança estrutural do sistema.

Novas tecnologias de monitorização têm sido desenvolvidas durante as últimas duas décadas, estimuladas pelos avanços recentes em tecnologias sensoriais, comunicação e algoritmos computacionais [7]. Os métodos de identificação de dano que utilizam estas tecnologias podem ser divididos em dois grupos: os Ensaios Não Destrutivos (END) e os métodos de Identificação de Dano Baseados em Vibrações (IDBV).

Os END estão entre as primeiras ferramentas de controlo de qualidade e monitorização de materiais e componentes. Dentro destes métodos, destacam-se as correntes induzidas, raio X, ultrassons, termografia, radiografia, líquidos penetrantes, partículas magnéticas e inspeção visual [8]. Apesar da sua existência continuam a verificar-se a ocorrência de catástrofes. Isto pode ser explicado pelo facto de os END serem técnicas que necessitam do conhecimento prévio da localização do dano. Para além disso, podem ser de difícil aplicação, uma vez que é necessário que o dano se localize num local de fácil acesso. São técnicas dispendiosas, lentas e não permitem uma monitorização contínua da estrutura [9].

Surge então a necessidade de encontrar outros métodos que superem as limitações mencionadas anteriormente. Os IDBV, ao contrário dos métodos END, não necessitam de conhecer *a priori* a localização do dano e permitem uma monitorização contínua da estrutura.

Os métodos IDBV baseiam-se nas medições periódicas (no domínio do tempo ou frequência) das propriedades dinâmicas da estrutura, podendo esta estar em serviço ou não. A presença de dano provoca alterações nas propriedades físicas da estrutura, como massa, rigidez ou o amortecimento, que por sua vez modificam as suas propriedades dinâmicas (frequências naturais, modos de vibração, FRFs e transmissibilidades). Estas alterações podem ser utilizadas para detetar, localizar e quantificar a extensão do dano [10].

Com o objetivo de categorizar e classificar métodos de deteção de dano, em 1990, Rytter [11] considera um sistema com quatro níveis:

- Nível 1: detetar a existência de dano;
- Nível 2: localizar o dano;
- Nível 3: quantificar o dano;
- Nível 4: prever o tempo de vida da estrutura.

Em 2005, Park e Park [12] divide os métodos que utilizam vibrações mecânicas em dois grupos principais:

- Métodos de referência;
- Métodos experimentais.

Enquanto que os métodos de referência necessitam de um modelo numérico teórico prévio da estrutura em estudo de forma a detetar o dano, os métodos experimentais baseiam o seu funcionamento apenas na utilização de dados experimentais. A obtenção destes tipos de dados acarreta alguns inconvenientes, como por exemplo, a presença de ruído, a elevada experiência que a pessoa que os adquire necessita ter e o custo dos equipamentos utilizados.

*Yan et al.* [13] apresenta ainda uma divisão com base no *input* que cada técnica utiliza:

- Métodos Tradicionais – baseiam-se na alteração das características dinâmicas de um sistema com e sem dano;
- Outros Métodos – utilizam ferramentas de tratamento de sinal avançadas ou inteligência artificial.

Pelo facto de serem relativamente fáceis de aplicar e monetariamente acessíveis, os métodos tradicionais recebem especial atenção.

## **2.2 MÉTODOS TRADICIONAIS**

Como referido anteriormente os métodos tradicionais baseiam-se no estudo da identificação das alterações das características dinâmicas de um sistema com e sem dano. Destacam-se as frequências naturais, modos de vibração e Funções de Resposta em Frequência.

### **2.2.1 Frequências Naturais**

A presença de dano tem impacto direto nas frequências naturais e modos de vibração, pois afeta a massa e a rigidez modais da estrutura.

Em comparação com outros parâmetros modais, as frequências naturais são menos suscetíveis a variações causadas por fontes de erro aleatório, como o ruído [14]. Outra vantagem é o número reduzido de pontos de medição necessários.

*Sinou* [15] sugere o critério de Normalização de Frequências Naturais (NFN) para a identificação de dano. Este critério tem por base o quociente entre a *i*-ésima frequência natural da estrutura danificada e da estrutura não danificada.

No entanto, a utilização de frequências naturais tem limitações práticas significativas. A baixa sensibilidade que apresentam requer medições muito precisas ou grandes níveis de dano para que a alteração de valores revele presença de dano. Para além disso, danos em diferentes localizações podem provocar as mesmas variações nas frequências naturais, o que dificulta a localização do dano. Este método verifica-se ineficiente para estruturas complexas ou deteção de danos múltiplos [16].

### **2.2.2 Modos de Vibração**

Em seguida surgiu a identificação com base nos modos de vibração que são uma representação espacial da forma como a estrutura se deforma quando vibra a uma das suas frequências naturais.

Apesar de ser capaz de identificar o dano com sucesso, uma das desvantagens deste método é a necessidade de um grande número de pontos de medição para obter os modos de vibração

de forma precisa. Para além disso, é uma técnica dispendiosa, complexa e morosa, uma vez que é necessário recorrer à análise modal para obter os modos de vibração.

Em relação aos métodos desenvolvidos com base nos modos de vibração, pode-se distinguir alguns tipos: os que apresentam como objetivo o estudo da alteração dos modos de vibração; nas curvaturas destes; no indicador *Modal Strain Energy* (MSE); e nas sensibilidades.

West [17] apresenta um método de utilização sistemática dos modos de vibração na localização de dano em estruturas. O autor utiliza o *Modal Assurance Criterion* (MAC) para determinar o nível de correlação entre os modos de vibração de um componente de um veículo espacial não danificado e os modos de vibração do mesmo componente depois de ter sido exposto a cargas acústicas. Apesar do critério MAC providenciar um bom indicador para a deteção do dano, este apresenta dificuldades na localização deste. Surge então o *Coordinate Modal Assurance Criterion* (COMAC) que permite identificar a coordenada onde dois modos de vibração não coincidem.

Baseado nos modos de vibração surge o método de deteção de dano designado por Curvatura dos Modos de Vibração [18]. Corresponde à segunda derivada do modo de vibração. A presença de dano causa uma diminuição da rigidez levando ao aumento da curvatura. Uma desvantagem deste método é a dificuldade de deteção de dano em pontos extremos da estrutura, uma vez que os valores são obtidos por aproximação através do método das diferenças finitas.

### **2.2.3 Funções de respostas em frequência (FRF)**

A vantagem mais significativa da utilização de FRFs é que estas permitem obter informações sobre o comportamento dinâmico da estrutura numa gama de frequências em vez de apenas em faixas específicas. Os dados das FRFs podem ser usados diretamente para a avaliação de danos, sem necessidade de etapas intermédias, enquanto que os outros métodos obrigam a que seja realizada uma análise modal para determinar os modos de vibração. Desta forma, evitam-se perdas de informação no processo [19]. Para além disso, comparando com outros métodos, é de fácil aplicação e permite não só a localização de dano, como também a avaliação da sua severidade. Contudo, as FRFs são bastante sensíveis a fatores externos como a adição de ruído.

*Lee e Shin* [20] desenvolveram um método de deteção de dano baseado em FRFs medidas experimentalmente. Os autores consideraram que o dano corresponde à alteração no módulo de elasticidade. A estratégia utilizada é baseada na redução do domínio do problema onde, as zonas intactas são excluídas restando apenas as zonas suspeitas de dano. Uma vantagem da aplicação deste método é o facto de utilizar os modos de vibração da estrutura intacta e as FRFs da estrutura danificada. A viabilidade do método foi testada com modelos numéricos, tendo sido afirmado que este permite a deteção de dano desde que o ruído presente nas FRFs não ultrapasse um determinado limite, neste estudo 9%.

*Park e Park* [12] propõem um método de deteção de dano na subestrutura, onde a análise não é realizada na estrutura completa, mas nas subestruturas que a compõem. Esta metodologia tem como objetivo reduzir o volume de experimentação.

Araújo dos Santos et al [21] propõem um método de identificação de dano baseado nas sensibilidades das FRFs. Ao testar a metodologia numa estrutura laminada, os autores verificaram que a gama de frequências a avaliar e o ponto de aplicação da excitação são fatores determinantes para o sucesso da mesma.

Em alternativa às FRFs, podem ser utilizadas as *Strain* FRFs, uma vez que estas também têm informação da forma como a estrutura se comporta às suas frequências naturais, ou seja, os *Strain Mode shapes*. Estas são obtidas através da utilização de extensómetros em vez de acelerómetros apresentando a vantagem de não modificarem localmente a massa e rigidez da estrutura [22].

Outro método são as transmissibilidades que apresentam a vantagem de não ser necessário conhecer a força aplicada. Assim permite evitar dificuldades no controlo nos dados de *input*. Este método tem maior sensibilidade em comparação com as FRFs, como demonstrado por *Johnson e Adams* em [23].

## **2.3 OUTROS MÉTODOS**

Com os avanços tecnológicos e com o objetivo de ultrapassar as limitações dos métodos tradicionais surgiram outros métodos que utilizam ferramentas de tratamento de sinal avançadas ou inteligência artificial. Destacam-se a *wavelet analysis*, as redes neuronais artificiais e os algoritmos genéticos.

### **2.3.1 Wavelet Analysis**

A *Wavelet Analysis* pode ser usada para detetar danos em estruturas a partir da comparação dos sinais de vibração gerados por uma estrutura saudável e uma estrutura danificada. Esta ferramenta permite a identificação da localização e gravidade do dano.

Como permite a deteção de um sinal singular e a separação do ruído do sinal obtido em experimentação é frequentemente utilizada para o melhoramento dos indicadores de dano [24].

A *Wavelet Analysis* é uma técnica de alta precisão e eficiência, e é amplamente utilizada na indústria. Pode comprovar-se a sua eficácia em [3], onde esta técnica combinada com análise modal é utilizada para a deteção de danos como redução de espessura e fissuras em estruturas tubulares.

### **2.3.2 Redes Neuronais Artificiais**

As redes neuronais artificiais utilizam algoritmos avançados para processamento paralelo de informação baseados em sistemas nervosos biológicos. Estas redes utilizam um conjunto de neurónios que passam por um processo de “aprendizagem”, à semelhança de uma inteligência artificial, de modo a serem capazes de conseguir detetar e localizar o dano em estruturas [25].

Através da capacidade da rede neural artificial para modelar tanto funções lineares simples como não lineares complexas, este algoritmo pode ser aplicado para uma ampla gama de

questões, cujas soluções são difíceis de obter aplicando apenas métodos comuns. Estas aplicações consistem na identificação, classificação, reconhecimento de padrões, sistema de controlo e processamento de imagem [18].

### **2.3.3 Algoritmos Genéticos**

A aplicação de algoritmos genéticos consegue fornecer a localização do dano em diversas situações sendo especialmente úteis em situações em que as informações sobre o dano são limitadas ou incertas. Resumidamente, no processo é gerada uma população de soluções candidatas que são submetidas a técnicas de seleção, cruzamento e mutação para evoluir as soluções até que se encontre a solução ótima que represente a configuração danificada. Um algoritmo genético possui alta eficiência a nível de cálculo de dados, conseguindo em simultâneo reduzir tempos de computação para a deteção de dano em estruturas complexas [24].

## **2.4 MATERIAIS COMPÓSITOS**

### **2.4.1 O que são?**

Um material compósito surge da combinação, à escala macroscópica, de dois ou mais materiais diferentes com o objetivo de criar um novo material com características superiores às propriedades individuais dos constituintes [26]. Na situação mais geral, um material compósito consiste em uma ou mais fases descontínuas distribuídas numa única fase contínua. A fase contínua é designada por matriz e a fase descontínua é designada de reforço. A matriz envolve os outros constituintes, mantendo-os na sua posição relativa, proporcionando alguma ductilidade ao compósito, transmitindo os esforços mecânicos ao material de reforço. Por sua vez, o reforço suporta os esforços aplicados ao compósito e, em geral, apresenta elevada resistência e rigidez [27].

### **2.4.2 Vantagens e Aplicações**

O uso de materiais compósitos como alternativa aos materiais convencionais, como aços metálicos revolucionou principalmente as indústrias aeronáutica e aeroespacial. Por combinarem uma baixa densidade com uma elevada resistência permitem reduzir a massa e assim o consumo de combustível dos aviões modernos. São utilizados, por exemplo, no fabrico de asas, fuselagens, estabilizadores e outros componentes, havendo em determinados casos aviões (ultraleves) essencialmente constituídos por materiais compósitos [27]. Na figura 2.1 [28] pode ver-se a montagem da fuselagem do cargueiro X-55A com 18 m de comprimento e feita com compósitos de carbono/epoxy. Com a utilização destes materiais reduziu-se em 10 vezes a quantidade de componentes e em mais de 100 vezes a quantidade de fixadores.



Figura 2.1- Montagem da fuselagem do cargueiro X-55A

Na figura 2.2 [29], é apresentado um gráfico representativo com da evolução das proporções de materiais compósitos utilizados em aviões da *Airbus* até 2010, sendo que desde então este valores são mais significativos.

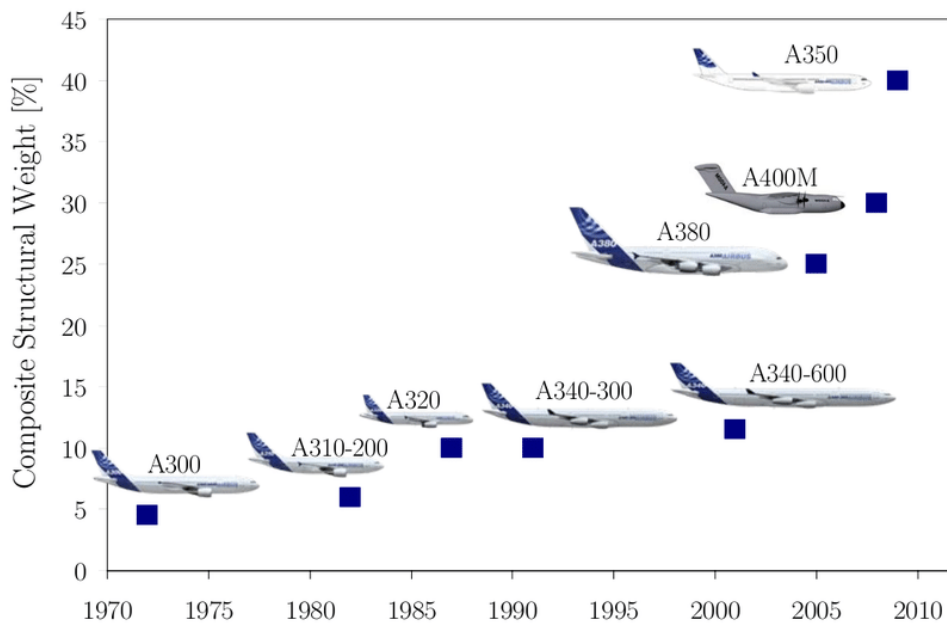


Figura 2.2- Evolução do peso [%] de estruturas em material compósito em aviões *Airbus*

Na tabela 2.1 encontram-se organizadas algumas vantagens e desvantagens dos materiais compósitos em relação aos materiais metálicos com base em [30] e [31].

Tabela 2.1- Vantagens e desvantagens de compósitos em relação aos materiais metálicos

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistência à corrosão e desgaste</li> <li>• Resistência à fadiga</li> <li>• Alta resistência mecânica</li> <li>• Design flexível</li> <li>• Bom isolamento térmico e elétrico</li> <li>• Elevada rigidez específica (razão entre a rigidez e a densidade)</li> <li>• Elevada resistência específica (razão entre a resistência e a densidade)</li> <li>• Baixo coeficiente de expansão térmica</li> <li>• Custos mais baixos durante o ciclo de vida do produto</li> <li>• Resistência a temperaturas extremas</li> <li>• Solução mais ecológica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevado custo de aquisição</li> <li>• Difícil de detetar e localizar os danos</li> <li>• Difícil de trabalhar e processar</li> <li>• Sensíveis a impactos</li> <li>• Métodos de inspeção complexos e dispendiosos</li> <li>• Não se produzem em grande escala</li> </ul>

O facto de os materiais compósitos serem feitos com a geometria e características adaptadas ao projeto faz com que sejam aplicados cada vez mais nas mais diferentes áreas desde a maior parte das indústrias, até à medicina, artigos desportivos de alta competição e até bens de consumo como em portas cadeiras, mesas, entre outros.

### 2.4.3 Danos em compósitos

Os materiais compósitos são suscetíveis à formação de vários defeitos ao longo do seu tempo de vida, devido à sua natureza heterogénea e às técnicas de fabrico de múltiplas etapas [32]. A presença de defeitos num componente em material compósito, afeta as suas propriedades mecânicas, uma vez que, limita a sua resistência à fadiga, rigidez e, conseqüentemente, o seu tempo de serviço [33]. Por este motivo, os desenvolvimentos das tecnologias de produção destes materiais têm sido acompanhados de um esforço para criar sistemas de inspeção e controlo capazes de identificar o dano no seu estágio inicial, localizá-lo e prever o tempo de vida remanescente desses componentes, de forma a prevenir a ocorrência de danos catastróficos.

Devido à sua natureza heterogénea, o tipo de defeitos verificados costumam ser diferentes dos encontrados em metais e os mecanismos de falha são mais complexos [5].

Os principais danos que podem surgir num componente estrutural em material compósito, quando este se encontra em condições de serviço são:

- Descolamento entre fibras e a matriz;
- Delaminação;
- Fissuração da matriz;
- Rotura de fibras.

Geralmente, estes danos podem resultar de solicitações de impacto, furação, fadiga ou sobrecarga [33]. Na figura 2.3 [34], encontram-se representados alguns dos tipos de danos mencionados anteriormente.

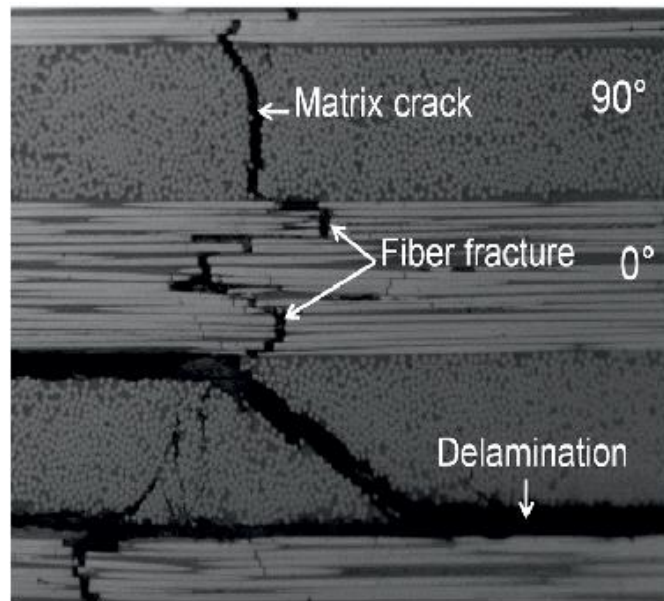


Figura 2.3- Exemplos de danos em materiais compósitos

# 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

## 3.1 EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO

O equilíbrio dinâmico de um sistema, independentemente da sua complexidade, é ditado pelas suas propriedades mecânicas: a massa que representa a inércia do sistema; o amortecimento que controla a dissipação de energia sob a forma de calor e resistência ao movimento e a rigidez que descreve a capacidade do sistema de resistir a deformações. Estes parâmetros fundamentais interagem de forma complexa, e a sua relação é expressa matematicamente pela equação 3.1, considerando que o tipo de amortecimento é o amortecimento viscoso:

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

onde  $[M]$ ,  $[K]$  e  $[C]$  correspondem às matrizes de massa, rigidez e amortecimento viscoso, respetivamente,  $\{\ddot{x}(t)\}$ ,  $\{\dot{x}(t)\}$  e  $\{x(t)\}$  representam os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento para o instante  $t$  de tempo e  $\{f(t)\}$  traduz o vetor de forças exteriores aplicadas ao sistema.

Para uma excitação do tipo harmónica, o vetor de forças pode se traduzido por:

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

onde  $F$  representa a amplitude da força e  $\omega$  a frequência de excitação.

Em regime estacionário, para uma excitação do tipo harmónica resulta uma resposta também deste tipo, como se observa pela equação 3.3.

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

onde  $\bar{X}$  é um número complexo, definido por  $\bar{X} = e^{i\theta}$ , sendo que  $\theta$  representa o ângulo de fase.

Ao substituir a equação 3.2 e a equação 3.3 na equação do equilíbrio dinâmico 3.1, obtém-se, no domínio da frequência, a equação 3.4.

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

Pode-se reescrever a equação 3.4, que traduz a relação entre a resposta  $\bar{X}$  e a excitação  $F$  no domínio da frequência, através da equação 3.5.

$$\{\bar{X}(\omega)\} = ([K] - \omega^2[M] + i\omega[C])^{-1} \{F(\omega)\} \quad (3.5)$$

onde a matriz de Rigidez Dinâmica é dada por  $[Z(\omega)] = [K] - \omega^2[M] + i\omega[C]$ . O inverso desta matriz,  $[Z(\omega)]^{-1}$  é designado por matriz de Recetância  $[H(\omega)]$ . Deste modo a equação 3.5 pode-se reescrever da seguinte forma:

$$\{\bar{X}(\omega)\} = [H(\omega)] \{F(\omega)\} \quad (3.6)$$

Na matriz de Recetância está contida a informação referente às características dinâmicas do sistema. Cada elemento  $H_{ij}(\omega)$  apresenta a razão entre a resposta obtida numa coordenada de medição  $i$  e a aplicação de uma força na coordenada de excitação  $j$ , para uma determinada frequência  $\omega$ , como se pode observar na equação 3.7.

$$H_{ij}(\omega) = \frac{\bar{X}_i(\omega)}{F_j(\omega)} \quad (3.7)$$

Quando estas relações são obtidas para uma gama de frequências considerada obtêm-se a chamada Função de Resposta em Frequência (FRF).

Uma FRF é uma função complexa no domínio da frequência, definida por uma parte real e uma parte imaginária, que também podem denominar-se uma amplitude e uma fase. Pode ser descrita em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, recebendo as designações de matriz de Recetância, Mobilidade e Acelerância, respetivamente, equações 3.8, equação 3.9 e equação 3.10.

$$\text{Recetância} = H(\omega) = \frac{\text{deslocamento}}{\text{força de excitação}} \quad (3.8)$$

$$\text{Mobilidade} = Y(\omega) = \frac{\text{velocidade}}{\text{força de excitação}} \quad (3.9)$$

$$\text{Acelerância} = A(\omega) = \frac{\text{aceleração}}{\text{força de excitação}} \quad (3.10)$$

Em contexto experimental é comum obter-se as FRFs em termos de Acelerância, devido ao amplo uso de acelerómetros para medir as respostas das estruturas. Na realização de simulações numéricas é mais comum obter-se as FRFs em termos de Recetância.

## 3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos (MEF) é uma ferramenta poderosa pelas capacidades que oferece de resolver problemas concretos de engenharia que podem envolver geometrias, comportamentos físicos ou condições fronteiras complexas.

Neste método numérico, o domínio do problema é decomposto em vários subdomínios, sendo que em cada um deles as equações que regem o fenómeno são aproximadas usando um método variacional. Desta forma, é possível representar uma função complexa como uma composição de funções polinomiais simples. O erro associado a este processo pode ser diminuído através do aumento do número de subdomínios [35].

Uma abordagem matemática que pode ser usada para fundamentar o MEF é o método de Rayleigh-Ritz, uma vez que neste método variacional se transforma a solução de um problema definido por equações diferenciais na solução de um sistema de equações algébricas.

De forma a explicar genericamente o método, considere-se o caso de um elemento finito de viga tridimensional, onde cada nó tem 6 graus de liberdade, como o representado na figura 3.1.

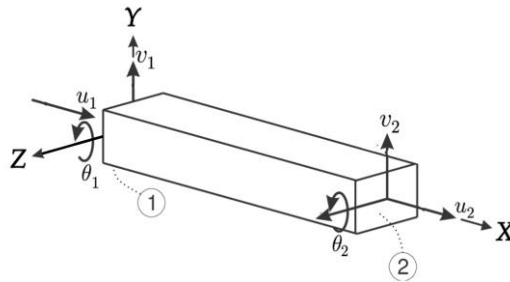


Figura 3.1- Elemento viga com 6GDL

Para esta situação o vetor de deslocamentos terá a seguinte configuração.

$$d_e = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

As matrizes de rigidez e massa do elemento são dadas por 3.12 e 3.13, respetivamente.

$$[K_e] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$[M_e] = \rho AL \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} & \frac{11L}{210} & 0 & \frac{9}{70} & -\frac{13L}{420} \\ 0 & \frac{11L}{210} & \frac{L^2}{105} & 0 & \frac{13L}{420} & -\frac{L^2}{140} \\ \frac{1}{6} & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} & \frac{13L}{420} & 0 & \frac{13}{35} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & -\frac{13L}{420} & -\frac{L^2}{140} & 0 & -\frac{11L}{210} & \frac{L^2}{105} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Estas matrizes de rigidez e massa que caracterizam cada elemento finito da estrutura, denominadas matrizes locais, são combinadas em duas matrizes globais de rigidez e massa, respetivamente, num processo denominado de assemblagem.

Numa estrutura completa existem nós onde os elementos se conectam. Na malha em que se discretiza uma viga com  $n$  elementos, haverá  $n + 1$  nós e cada nó tem um certo número de graus de liberdade (GDL). As matrizes globais têm dimensões  $m \times (n + 1)$  por  $m \times (n + 1)$ , sendo  $m$  é o número de GDL em cada nó.

As matrizes globais de rigidez  $[K]$  e massa  $[M]$  são criadas para descrever as propriedades físicas de toda a estrutura. Para isso, as matrizes locais de rigidez e massa para uma viga são colocadas ao longo da diagonal das matrizes globais, como se verifica em 3.14 e 3.15. A sua colocação é feita alinhando as coordenadas locais dos elementos com as coordenadas globais da estrutura.

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{e_1} & & \dots & & 0 \\ & K_{e_2} & & & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ & & & K_{e_{n-1}} & \\ 0 & & \dots & & K_{e_n} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_{e_1} & & \dots & & 0 \\ & M_{e_2} & & & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ & & & M_{e_{n-1}} & \\ 0 & & \dots & & M_{e_n} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Neste processo somam-se entre si todos os elementos que se intersectam das matrizes locais, garantindo que as contribuições de todos os elementos que compartilham um nó específico sejam adequadamente acumuladas nas matrizes globais.

Retomando a equação 3.1 de equilíbrio de forças:

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

onde,  $[M]\{\ddot{x}(t)\}$  corresponde às forças de inércia,  $[C]\{\dot{x}(t)\}$  às forças associadas ao amortecimento e  $[K]\{x(t)\}$  às forças associadas à deformação elástica ou forças internas.

A matriz de amortecimento incorpora a energia dissipada durante a vibração da estrutura. Na prática, essa matriz depende, quando tratamos de amortecimento do tipo viscoso, da velocidade do movimento e é difícil ou mesmo impossível de determinar para um conjunto de elementos finitos. Deste modo, a matriz de amortecimento de uma estrutura,  $[C]$ , não é obtida a partir da assemblagem das matrizes dos vários elementos que a constituem.

Uma forma de modelar o amortecimento em sistemas de elementos finitos consiste em assumir amortecimento proporcional ou de Rayleigh. Neste caso obtém-se a matriz de amortecimento a partir das matrizes de massa e de rigidez e dos coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  através da expressão:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3.17)$$

$\alpha$  e  $\beta$  são conhecidos como coeficientes de amortecimento de massa e rigidez, respetivamente, e determinam a relação entre o amortecimento, a massa e a rigidez no sistema.

### 3.2.1 Elemento finito de viga e elemento finito de casca

Neste trabalho, serão utilizados dois elementos finitos na modelação da estrutura tubular em análise: BEAM188 [36] e SHELL181 [37], do *software ANSYS*.

O elemento BEAM188 é um elemento de viga baseado na teoria de vigas de Timoshenko. Este elemento é mais adequado para vigas e apresenta uma eficiência computacional superior devido à sua natureza unidimensional e ao menor número de graus de liberdade. É especialmente eficaz na modelação de comportamentos de flexão e axial nas direções principais da viga, sendo uma escolha sólida para análises que envolvem principalmente forças axiais e momentos fletores. No entanto, pode não ser a melhor opção para representar adequadamente estruturas 2D e 3D complexas, uma vez que não considera tensões tangenciais e de torção, que podem ser críticas em algumas análises.

Como se pode verificar na figura 3.1, cada elemento BEAM188 possui 6 graus de liberdade em cada nó, 3 de translação associados aos eixos do referencial (x, y e z) e 3 de rotação associados ao movimento de rotação em redor dos mesmos eixos [36]. Na figura 3.2 encontra-se uma representação da geometria do elemento finito de viga BEAM188.

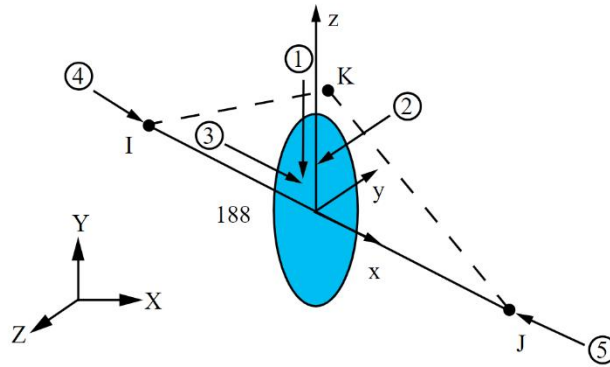


Figura 3.2- Geometria do elemento finito BEAM188

Por outro lado, o elemento SHELL181 é um elemento de casca baseado na teoria de casca de Kirchhoff, sendo mais adequado para cascas finas a moderadamente espessas, como é o caso da estrutura tubular de parede fina em estudo. Este elemento permite uma análise bidimensional que captura o comportamento em duas direções principais (normal e tangente à superfície). No entanto, o custo computacional ao utilizar elementos de casca é consideravelmente maior em comparação com elementos de viga, tornando-o menos eficiente em termos de tempo de cálculo.

A geometria do elemento finito SHELL181 encontra-se representada na figura 3.3. Trata-se de um elemento de 4 nós, cada um com 6 graus de liberdade, correspondentes às translações nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , e rotações em torno dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  [37].

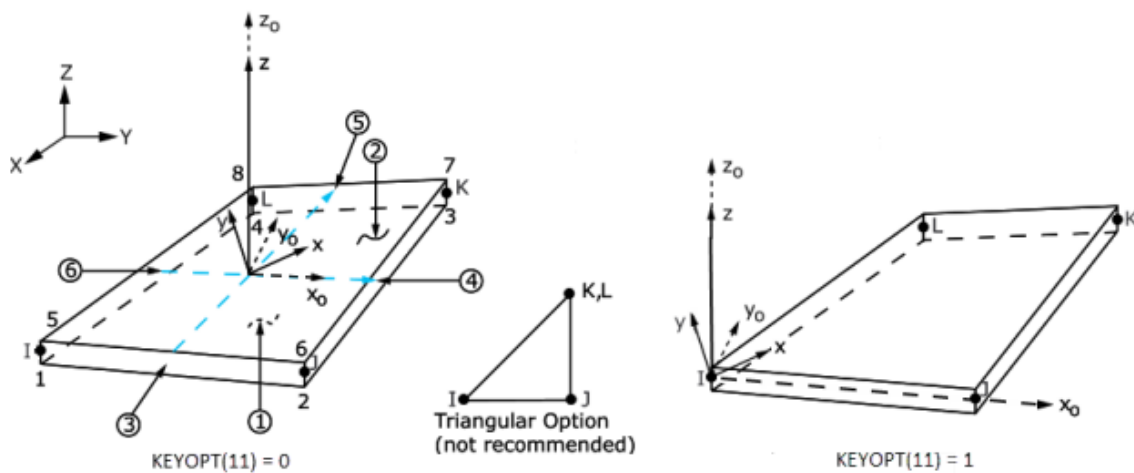


Figura 3.3- Geometria do elemento finito SHELL181

### 3.3 Ruído

A modelação matemática pode ser usada para caracterizar e prever o ruído de um determinado sistema. No processo de modelação, de modo a simplificar a representação de padrões gerais que se repetem, o ruído é classificado em duas categorias principais: baseado em frequência e não baseado em frequência (estalos, estalidos e crepitação) [38].

O ruído que se baseia em frequência é subdividido em cores de ruído, onde cada uma representa uma característica diferente na distribuição espectral do ruído. O ruído branco é caracterizado por uma densidade espectral de potência constante em todas as frequências, o ruído rosa apresenta uma queda de potência proporcional ao inverso da frequência e o ruído castanho introduz uma variação mais proeminente em frequências inferiores.

O ruído pode ainda ser classificado em relação a outras características que apresenta. O ruído gaussiano, que segue uma distribuição normal, o ruído de deriva que introduz alterações sistemáticas ao longo do tempo e o ruído de disparo que é caracterizado por explosões esporádicas e consistentes em amplitude, estando associado a eventos pontuais.

Visser [39] testa a implementação numérica de ruído aleatório em FRFs. Neste estudo concluiu que o ruído distribuído aleatoriamente nos dados experimentais simulados pode não ser uma representação adequada do ruído encontrado em dados experimentais reais.

Neste estudo não foram utilizadas medições experimentais. A forma como se tem vindo a simular numericamente a presença de ruído em FRFs para situações como o caso deste estudo é através da implementação de ruído branco (também chamado ruído aleatório).

### 3.4 INDICADOR RAZÃO

A capacidade de detetar, localizar e quantificar o dano através da comparação de FRFs com e sem dano será avaliada por meio do indicador razão ( $IR$ ) [40].

$$IR(\omega) = \left| \frac{H_{ij}^{CD}(\omega)}{H_{ij}^{SD}(\omega)} \right| \quad (3.20)$$

Como evidenciado na equação 3.20, o indicador razão traduz-se no módulo do quociente entre as FRFs com ( $H_{ij}^{CD}$ ) e sem dano ( $H_{ij}^{SD}$ ), para uma dada frequência ( $\omega$ ) de uma determinada gama de frequência em estudo. A ausência de dano verifica-se quando o indicador assume o valor de 1 para todas as frequências da gama de frequências estudada, ou seja, quando as curvas com e sem dano se sobrepõem na perfeição.



## 4 METODOLOGIA

Com o objetivo de identificar e localizar o dano em estruturas tubulares de parede fina, neste trabalho foi realizado um estudo numérico. Numa primeira fase é realizada uma etapa de simulação, onde é criado um modelo de elementos finitos para simulação dinâmica, no domínio da frequência, de uma estrutura tubular, em ambiente *ANSYS*. Posteriormente, é utilizado o *software MATLAB* para a implementação numérica da metodologia de identificação e localização de dano.

### 4.1 OBJETO DE ESTUDO

Na figura 4.1 são apresentadas as dimensões gerais da estrutura tubular de secção quadrática, que será o objeto de estudo nesta dissertação. Na tabela 4.1 são apresentadas as características definidas para a sua geometria. Estas propriedades encontram-se organizadas na tabela 4.2.

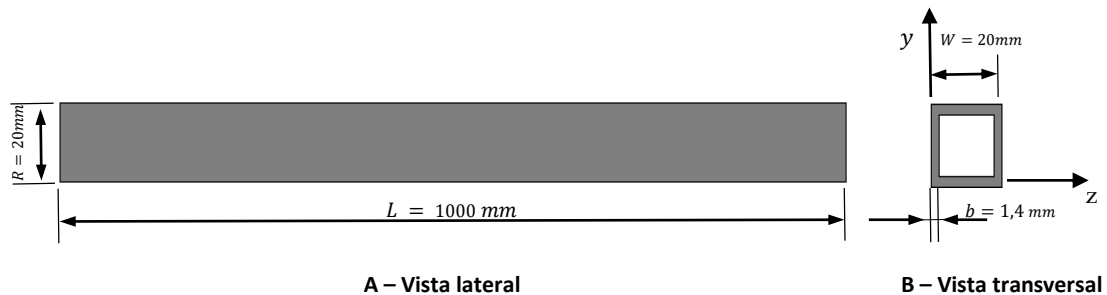


Figura 4.1- Modelo da estrutura tubular quadrática

4.1- Dimensões da estrutura tubular quadrática

<b>Comprimento (<math>L</math>)</b>	1000 mm
<b>Altura (<math>R</math>)</b>	20 mm
<b>Largura (<math>W</math>)</b>	20 mm
<b>Área da secção transversal exterior (<math>a</math>)</b>	400 mm <sup>2</sup>
<b>Espessura (<math>b</math>)</b>	1,4 mm

Tabela 4.2- Propriedades materiais da estrutura tubular quadrática

<b>Módulo de Young (<math>E</math>)</b>	60 GPa
<b>Densidade (<math>\rho</math>)</b>	1450 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa da estrutura tubular (<math>m</math>)</b>	0,5783 kg
<b>Coefficiente de Poisson (<math>\nu</math>)</b>	0,2

## 4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para a implementação do MEF recorre-se ao *Ansys Parametric Design Language (APDL)*, linguagem para programar no *software ANSYS*. O primeiro passo para a obtenção dos resultados passa pela escolha do elemento finito a utilizar. Nesta dissertação são analisados dois tipos de elemento na modelação da estrutura tubular: BEAM188, elemento de viga e SHELL181, elemento de casca. Desta forma pretende-se perceber se a utilização de elementos de casca em detrimento de elementos de viga apresenta mudanças significativas nos resultados da análise que justifiquem o custo computacional acrescido.

## 4.3 MODELAÇÃO DA ESTRUTURA TUBULAR

### 4.3.1 Elemento finito BEAM188

Utilizando o elemento finito de viga, BEAM188, a modelação é bastante simples. Começa-se por definir os keypoints que serão os pontos onde estão situados os pontos de medição (sensores) e onde serão aplicadas as forças de excitação. Unem-se os keypoints através de retas e finalmente faz-se a malha. Todas as etapas encontram-se representadas nas imagens 4.2, 4.3 e 4.4.

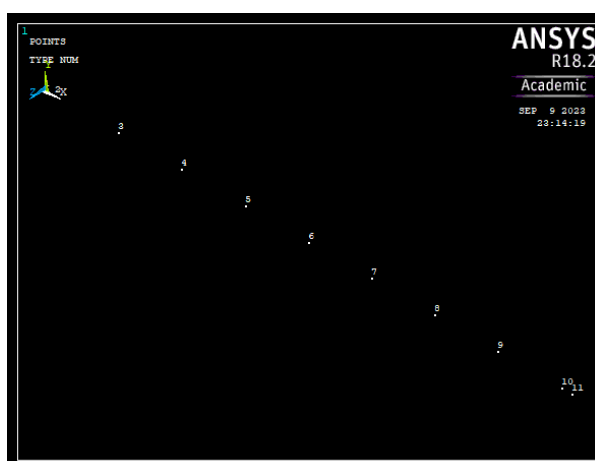


Figura 4.2- Keypoints

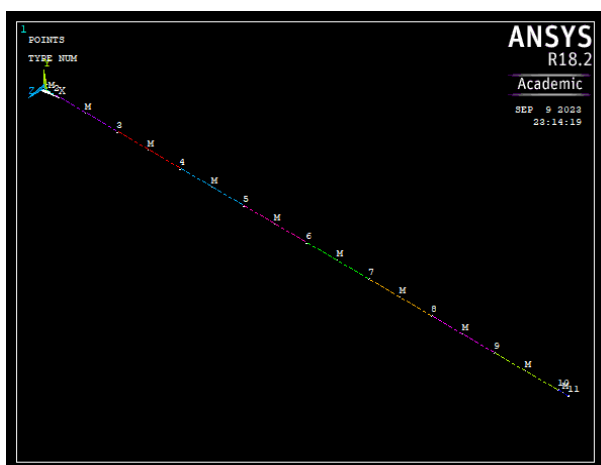


Figura 4.3- Linhas

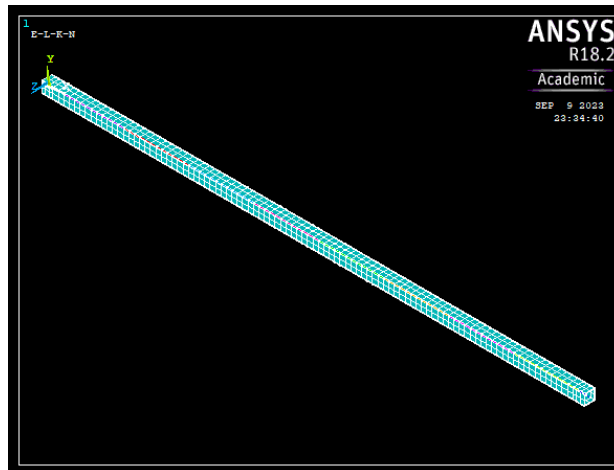


Figura 4.4- Malha

### 4.3.2 Elemento finito SHELL181

Utilizando o elemento finito de casca, SHELL181, para a modelação começou-se por definir os keypoints iniciais que correspondem aos limites exteriores da estrutura. Posteriormente, uniram-se os keypoints através de linhas e procedeu-se à sua divisão em elementos. Finalmente criam-se planos a partir dos keypoints e faz-se a malha. Todas as etapas encontram-se representadas nas imagens 4.5, 4.6 e 4.7.



Figura 4.5- Keypoints

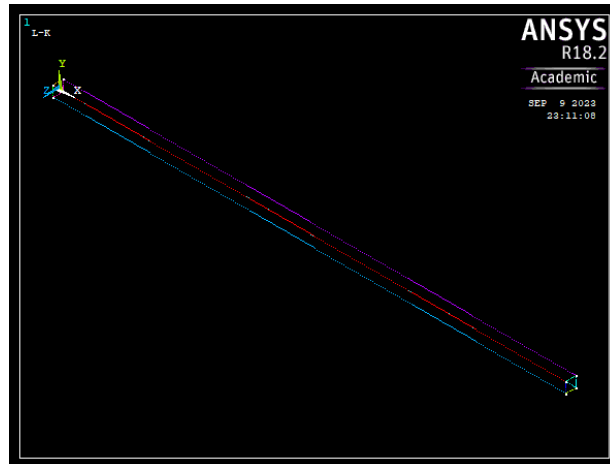


Figura 4.6- Linhas

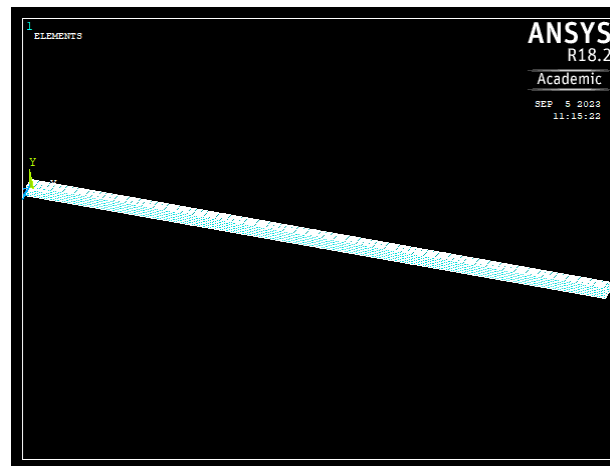


Figura 4.7- Malha

### 4.3.3 Estudo da convergência da malha

Foi conduzida uma análise de convergência de malha para determinar o número apropriado de elementos finitos a serem usados em cada uma das simulações. Para isso, realizaram-se análises modais com elementos de dimensões progressivamente menores, com o objetivo de identificar os valores para os quais as frequências se estabilizavam. Além disso, o custo computacional também foi considerado, uma vez que se pretende efetuar a análise de um amplo número de casos de estudo, considerando as restrições de tempo e os recursos disponíveis, especialmente o desempenho do computador onde as simulações numéricas foram executadas. Este fator é particularmente crítico para o elemento finito de casca, que requer recursos computacionais consideráveis.

Após o estudo determinou-se que se iria utilizar uma malha com elementos de 0,01mm no caso da simulação com o elemento finito de viga e 4 mm no caso da simulação com o elemento finito de casca. No Anexo 1 encontram-se com mais detalhe os resultados obtidos.

### 4.3.4 Propriedades modais da estrutura

Para este estudo, foi selecionado um intervalo de frequência de 0 a 1000 Hz. Dentro desse intervalo, foram determinadas experimentalmente as três primeiras frequências naturais da estrutura tubular que se pretendia estudar experimentalmente. As propriedades de ambos os modelos numéricos foram ajustadas com base nesses valores. Numericamente foram realizadas sucessivas análises modais em vibração livre para determinar as propriedades que melhor aproximavam as simulações ao caso real. Na tabela 4.3, encontram-se os valores das frequências naturais obtidos experimentalmente e nas duas simulações:

Tabela 4.3- Frequências naturais obtidas experimentalmente para a simulação, com o elemento de viga (BEAM188) e o elemento de casca (SHELL181)

Freq. natural	Experimental	BEAM188	SHELL181
1ª	182,0	173,1	177,6
2ª	476,0	474,0	485,3
3ª	854,0	919,9	939,4

Nas figuras 4.8 e 4.9, encontram-se representadas as FRFs diretas H1,1 para ambas as simulações e para o caso sem dano e para o caso de dano 1, respectivamente.

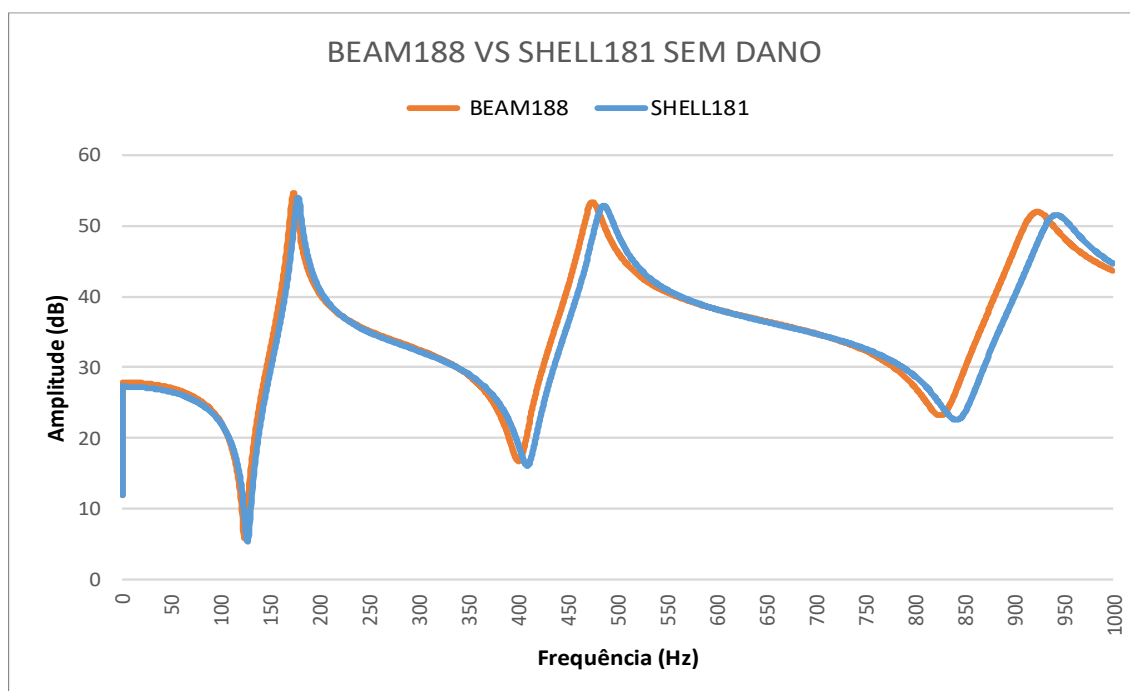


Figura 4.8- Gráfico das FRFs diretas H1,1 sem dano obtidas para as simulações com elemento finito de viga e de casca



## 4.4 IMPLEMENTAÇÃO DO AMORTECIMENTO

Conforme mencionado anteriormente, uma das características dinâmicas a ter em consideração é o amortecimento, uma vez que tem um impacto direto no comportamento da estrutura, tanto em regime livre quanto em regime forçado. Deste modo, é essencial definir um valor de amortecimento para a simulação numérica da estrutura em estudo, garantindo assim que os resultados numéricos sejam compatíveis com os esperados no contexto experimental.

Para adequar o modelo experimental à realidade prática, foi implementado o amortecimento usando o comando **MPDATA**. A propriedade de amortecimento histerético de fator linear do material foi estabelecida utilizando o **DMPR** (Coeficiente de Amortecimento Estrutural), especificamente para o elemento de viga, sendo o valor atribuído de 0,02. Para a modelação utilizando elemento de casca, empregou-se o comando **DMPRST** e o valor que lhe foi atribuído foi de 0,04. Estes valores foram definidos com base nos resultados obtidos na obtenção de uma FRF experimental para a estrutura tubular que é objeto de estudo neste trabalho.

## 4.5 IMPLEMENTAÇÃO DE DANO

Para o presente trabalho, o dano considerado ocorre sob a forma de redução de massa. À estrutura tubular modelada inicialmente é acrescentada uma massa adicional, num determinado ponto ao longo do comprimento da estrutura. Esta será considerada a estrutura intacta sem dano (SD). Posteriormente, para simular a estrutura com dano (CD), a massa adicional é retirada, o que provoca uma diferença nas propriedades físicas dos elementos danificados em relação aos demais.

A análise numérica é realizada para ambas as estruturas, SD e CD. As respostas dinâmicas (FRFs) obtidas são comparadas, permitindo a identificação de possíveis alterações.

A severidade do dano é expressa através da percentagem de redução de massa. A massa inicial do perfil ( $m_i$ ), isto é, sem massa adicional, é de aproximadamente 0,5783 kg. Os diferentes valores de massa adicional que vão corresponder a diferentes níveis de severidade de dano foram calculados a partir da equação 4.1.

$$\text{Massa adicional} = m_i \times \% \text{dano} \quad (4.1)$$

Na tabela 4.4 encontram-se discriminadas as reduções de massa correspondentes às percentagens de dano consideradas.

Tabela 4.4- Percentagem de dano de acordo com a massa adicionada

Percentagem de dano % <i>dano</i>	Massa adicional (kg)
2%	0,0116
5%	0,0289
10%	0,0578
15%	0,0867
20%	0,1160

Escolhida a malha e implementado o dano resta escolher os pontos de medição e excitação.

## 4.6 POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO/EXCITAÇÃO

No caso da modelação utilizando o elemento finito de viga, os pontos de medição/excitação coincidem com os nós correspondentes aos keypoints definidos inicialmente. Como referido anteriormente, como se trata de uma modelação unidimensional, os elementos são todos representados ao longo de uma linha reta (eixo do perfil).

Para o caso da modelação utilizando o elemento finito de casca, os pontos de excitação encontram-se na mesma face onde são implementados os danos e os pontos de medição sob a superfície oposta do perfil. Para tal foram determinados os nós que apresentam as coordenadas mais próximas das posições desejadas.

Durante esta dissertação, serão utilizados nove pontos de medição, que serão referidos como sensores. A distribuição desses sensores ao longo da estrutura tubular está apresentada na tabela 4.5. Note-se que os nove sensores (S) estão igualmente espaçados, com uma distância de 120 mm entre dois pontos de medição consecutivos. Além disso, os sensores S1 e S9 estão localizados a uma distância de 20 mm das extremidades da estrutura.

Tabela 4.5- Localização dos pontos de excitação/medição

Sensores (S)	Localização (mm)
1	20
2	140
3	260
4	380
5	500
6	620
7	740
8	860
9	980

Importa ainda salientar que as excitações aplicadas à estrutura foram aplicadas individualmente, ou seja, por cada excitação aplicada (F) foram obtidas nove respostas nos pontos de medição considerados.

## 4.7 CASOS DE ESTUDO

Posicionados os sensores são então escolhidos os casos de dano a ser estudados. São escolhidos nove casos de dano que irão ser distribuídos ao longo de todo o perfil. Cada caso será estudado individualmente e para todas severidades de dano apresentadas anteriormente.

Na tabela 4.6 observam-se os 9 casos de dano, as suas localizações e os sensores mais próximos que devem indicar a sua presença.

Tabela 4.6- Localização em mm dos casos de dano (CD) a ser estudados e indicação dos sensores (S) mais próximos a cada

Casos de dano (CD)	Localização (mm)	Sensores (S)
1	120	1/2
2	420	4/5
3	530	5/6
4	560	5/6
5	590	5/6
6	640	6/7
7	680	6/7
8	720	6/7
9	970	8/9

A seleção da posição dos diversos casos de dano tem como finalidade avaliar a viabilidade de identificar a sua localização ao longo do comprimento da estrutura e compreender como a proximidade ou distância do dano em relação aos sensores pode influenciar a sua detecção. Foram, por isso, posicionados os casos de dano em vários pontos do comprimento do perfil e a diferentes proximidades dos sensores, estando os casos de dano CD4 E CD7 exatamente à mesma distância dos sensores S5 e S6 e S6 e S7, respetivamente.

A representação figurativa dos casos de dano e dos sensores é observada na figura 4.11.

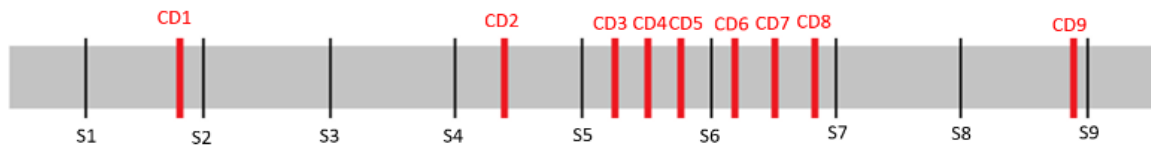


Figura 4.11- Representação do perfil em estudo com indicação da posição dos casos de dano (CD) e sensores (S)

## 4.8 IMPLEMENTAÇÃO DO RUÍDO

Um dos maiores obstáculos na correta detecção e localização do dano utilizando medições experimentais é a presença de ruído [41].

Uma vez que um dos propósitos deste estudo envolve uma análise numérica que poderá ser futuramente validada experimentalmente, foi introduzida uma componente de ruído aleatório (também conhecido como ruído branco) nas FRFs, a fim de possibilitar uma aproximação do caso numérico ao caso experimental.

Como referido em [40] e [24], vários autores sugerem uma poluição de dados numéricos na ordem dos 2-3%. Deste modo, no programa desenvolvido em *MATLAB*, optou-se por introduzir 3 percentagens de ruído aleatório (0.5%, 1 % e 2%) às FRFs, com e sem dano, obtidas a partir do *Ansys*. Para a introdução de ruído utilizou-se a equação 4.2.

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

Onde  $H_{ij}^{ruído}$  e  $H_{ij}$  correspondem às matrizes de FRFs com e sem ruído e *rand* à função responsável por atribuir  $x$  números aleatórios, compreendidos entre 0 e 1, considerando a gama de frequências utilizada.

Uma vez que o ruído implementado é aleatório, para cada FRF foi repetido o processo de implementação de ruído três vezes. A FRF com ruído finalizada resulta da média das três FRFs com ruído obtidas.

## **4.9 METODOLOGIA APLICADA PARA A DETEÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DANO**

Com o intuito de esclarecer as diferentes fases da metodologia a ser implementada para detetar e localizar o dano, apresentam-se as tabelas 4.7, 4.8 e 4.9. A metodologia pode ser dividida em duas etapas principais: a primeira envolve a obtenção das FRFs para diversos cenários de dano, enquanto a segunda fase se concentra na aplicação do indicador para posterior análise e interpretação de resultados.

Tabela 4.7- Resumo das etapas da 1ª fase da Metodologia a aplicar para a obtenção e análise de resultados

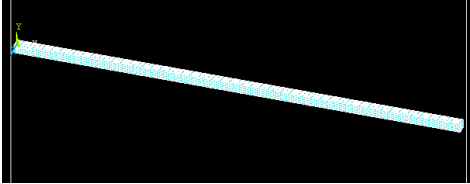
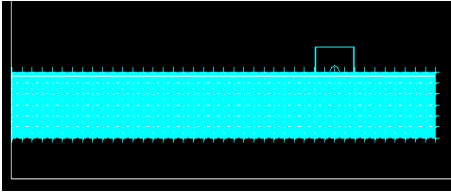
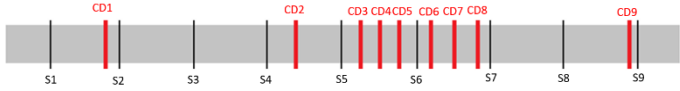
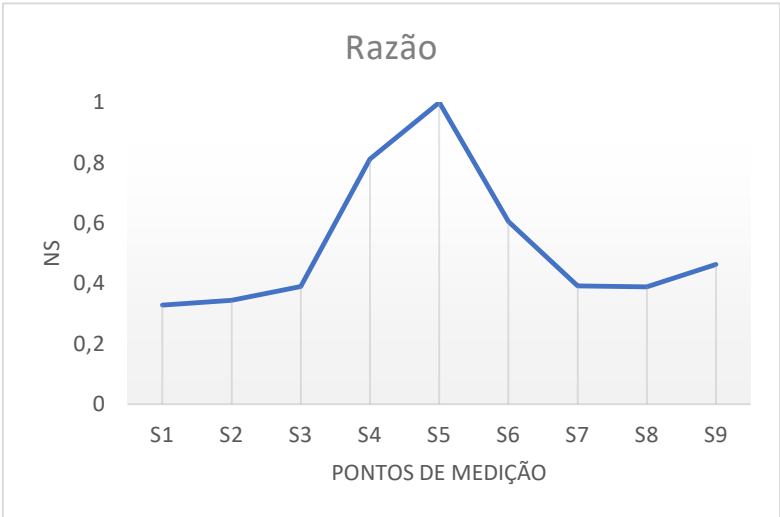
Fase	Etapa
<p>1. Todas as etapas desta fase são efetuadas considerando uma gama de frequências que vai de 0 a <math>\omega_f</math>, e são repetidas para dois cenários: sem dano (SD) e com dano (CD). O processo é repetido tanto para a modelação com elementos finitos de viga quanto para a modelação com elementos finitos de casca.</p>	<p><b>1ª:</b> Modelação da estrutura tubular em ambiente ANSYS</p> 
	<p><b>2ª:</b> Introdução do dano</p> 
	<p><b>3ª:</b> Definição dos pontos de medição e excitação</p> 
	<p><b>4ª:</b> Obtenção das FRFs de cada identidade</p> $\{H_{ij}^{SD}(\omega)\}_{n_{freq} \times 1} = \left\{ \begin{matrix} H_{ij}^{SD}(\omega_i) \\ \vdots \\ H_{ij}^{SD}(\omega_f) \end{matrix} \right\}_{n_{freq} \times 1}$ $\{H_{ij}^{CD}(\omega)\}_{n_{freq} \times 1} = \left\{ \begin{matrix} H_{ij}^{CD}(\omega_i) \\ \vdots \\ H_{ij}^{CD}(\omega_f) \end{matrix} \right\}_{n_{freq} \times 1}$ <p>Onde <math>i</math> e <math>j</math> correspondem respetivamente ao ponto de medição e de excitação e <math>n_{freq}</math> corresponde ao número de frequências.</p>

Tabela 4.8- Resumo das etapas da 2ª fase da Metodologia a aplicar para a obtenção e análise de resultados (Parte 1)

Fase	Etapa
<p>2. Tratamento de dados e aplicação do indicador razão</p>	<p style="text-align: center;"><b>5ª: Tratamento de dados</b></p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div> FRF_UY_1_4597_CD</div> <div> FRF_UY_1_4597_SD</div> <div> FRF_UY_1_4747_CD</div> <div> FRF_UY_1_4747_SD</div> <div> FRF_UY_2_3547_CD</div> <div> FRF_UY_2_3547_SD</div> </div> <div style="font-size: 3em; margin: 0 10px;">}</div> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div> Hij_UY_CD</div> <div> Hij_UY_SD</div> </div> </div> <p>As matrizes Hij_UY_CD e Hij_UY_SD representam as respostas em frequência para os casos com e sem danos, respetivamente. Cada linha destas matrizes corresponde a um valor de <math>\omega</math> (frequência), enquanto as colunas representam as respostas num ponto de medição <math>i</math> devido à aplicação de uma força em <math>j</math>. No contexto deste estudo, em que temos 9 pontos de medição e 9 pontos de excitação, a matriz resultante possui 1600 linhas (gama de frequência de 0 a 1000Hz com definição de 0,625Hz) e 81 colunas (funções de resposta).</p>
	<p style="text-align: center;"><b>6ª: Aplicação do indicador <i>Razão</i> na gama de frequência em estudo e determinação da média</b></p> $IR(\omega) = \left  \frac{H_{ij}^{CD}(\omega)}{H_{ij}^{SD}(\omega)} \right $ $[IR_m]_{n_p \times n_f} = \left[ \begin{array}{ccc} \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} IR_{11}(\omega)}{n_f} & \dots & \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} IR_{1j}(\omega)}{n_f} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} IR_{i1}(\omega)}{n_f} & \dots & \frac{\sum_{\omega=\omega_i}^{\omega_f} IR_{ij}(\omega)}{n_f} \end{array} \right]_{n_p \times n_f}$ <p>Sendo <math>[IR_m]</math> a matriz com a média dos valores resultantes da aplicação do indicador <i>Razão</i> e <math>n_p</math> o número de pontos de medição</p>

Tabela 4.9- Resumo das etapas da 2ª fase da Metodologia a aplicar para a obtenção e análise de resultados (Parte 2)

Fase	Etapa																				
	<p><b>7ª:</b> Contabilização dos resultados da aplicação de todas as forças obtendo-se um valor para cada ponto de aplicação</p> $\{S\}_{n_p \times 1} = \left\{ \begin{array}{c} \sum_{j=1}^{n_f} IRm_{1j} \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^{n_f} IRm_{ij} \end{array} \right\}_{n_p \times 1}$																				
	<p><b>8ª:</b> Normalização dos valores através da divisão pelo valor máximo obtido no conjunto dos 9 sensores</p> $\{NS\}_{n_p \times 1} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{S_1}{S_{max}} \\ \vdots \\ \frac{S_p}{S_{max}} \end{array} \right\}_{n_p \times 1}$																				
	<p><b>9ª:</b> Representação gráfica da curva, indicando o ponto máximo o local do dano</p>  <table border="1"> <caption>Dados do Gráfico 'Razão'</caption> <thead> <tr> <th>Pontos de medição</th> <th>NS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>S1</td><td>0,32</td></tr> <tr><td>S2</td><td>0,35</td></tr> <tr><td>S3</td><td>0,40</td></tr> <tr><td>S4</td><td>0,80</td></tr> <tr><td>S5</td><td>1,00</td></tr> <tr><td>S6</td><td>0,60</td></tr> <tr><td>S7</td><td>0,40</td></tr> <tr><td>S8</td><td>0,40</td></tr> <tr><td>S9</td><td>0,48</td></tr> </tbody> </table>	Pontos de medição	NS	S1	0,32	S2	0,35	S3	0,40	S4	0,80	S5	1,00	S6	0,60	S7	0,40	S8	0,40	S9	0,48
Pontos de medição	NS																				
S1	0,32																				
S2	0,35																				
S3	0,40																				
S4	0,80																				
S5	1,00																				
S6	0,60																				
S7	0,40																				
S8	0,40																				
S9	0,48																				



# 5 RESULTADOS

---

O objetivo desta dissertação é a correta deteção e identificação da localização do dano, utilizando a medição direta das FRFs da estrutura tubular em estudo. Deste modo, foi realizado um estudo numérico utilizando dois elementos finitos (de viga e de casca) para a modelação do perfil a analisar. Aos resultados obtidos foi aplicada a metodologia mencionada na secção 4.9.

Deste modo, para além de avaliar se a metodologia para a identificação da localização do dano é aplicável a estruturas tubulares, pretende-se também fazer uma comparação entre a utilização de cada um dos elementos finitos (de viga e de casca). O objetivo é perceber se é possível simular o problema referido e tirar conclusões viáveis utilizando o elemento finito de viga, uma vez que este, como referido anteriormente, para além de ser mais simples em termos de modelação, tem com uma eficiência computacional muito superior.

Outro dos objetivos é tentar perceber a influência que alguns fatores possam ter na correta deteção e localização do dano. Os fatores cujo o efeito se pretende estudar são:

- Severidade do dano;
- Quantidade e posição das forças a aplicar para a localização do dano;
- Ruído.

De seguida são apresentados os resultados, obtidos para ambos os tipos de elementos finitos utilizados e para cada um dos fatores atrás mencionados. Para a análise de todos os fatores foi aplicado o indicador *Razão*, uma vez que demonstrou ser o indicador com maior eficácia em estudos feitos anteriormente [40] [42].

## 5.1 SEVERIDADE DO DANO

Como referido anteriormente, a severidade do dano é traduzida pela percentagem de redução de massa, sendo que quanto maior esta redução, maior a dimensão do dano e possivelmente mais fácil será a identificação do mesmo. De forma a comprovar a relação entre a severidade do dano e a eficácia de identificação, nesta secção, é apresentado um estudo que engloba 5 níveis de severidade diferentes: 2%; 5%; 10%; 15% e 20%. A gama de frequências utilizada é de 0 a 1000Hz. Os resultados do indicador *Razão* para todos os casos de dano e as diferentes percentagens de redução de massa podem ser consultados no Anexo 2.

Nas figuras 5.1 e 5.2 encontram-se os gráficos referentes às FRFs diretas H1,1 obtidas para a simulação utilizando elementos de viga e para a simulação utilizando elementos de casca, respetivamente. Nos gráficos é possível ver a influência da severidade através da comparação entre as FRFs obtidas para a situação sem massa adicional (SM) e para as situações com massa adicional em diferentes percentagens (CM).

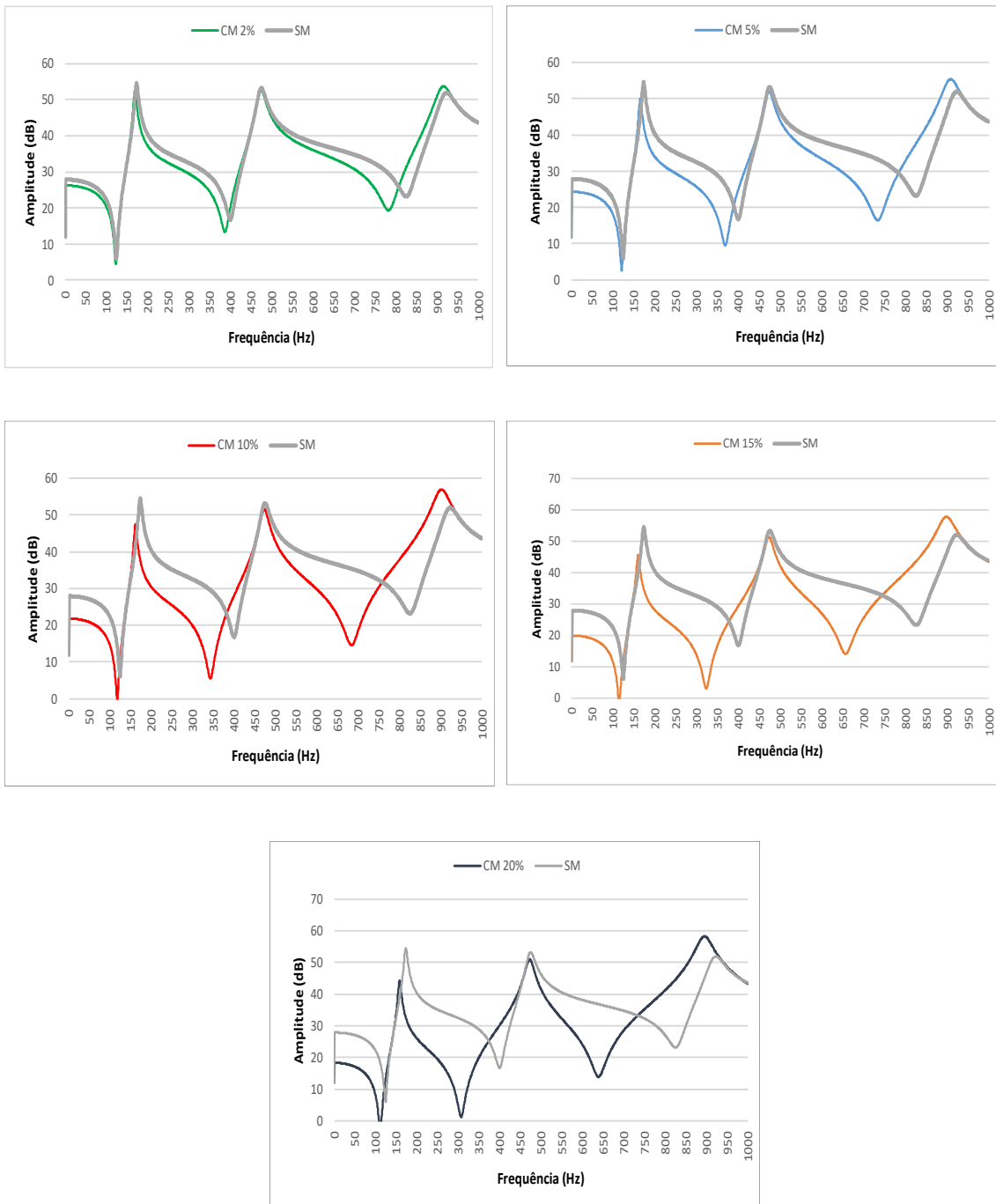


Figura 5.1- Gráficos das FRFs diretas H1,1 correspondentes aos casos sem dano e com dano de severidade 2%, 5%, 10%, 15% e 20% para a simulação com o elemento finito de viga



Figura 5.2- Gráficos das FRFs diretas H1,1 correspondentes aos casos sem dano e com dano de severidade 2%, 5%, 10%, 15% e 20% para a simulação com o elemento finito de casca

Da observação dos gráficos é possível perceber que as FRFs com dano apresentam uma translação acentuada em relação ao caso sem dano, principalmente nas zonas de antirressonância. Essa translação aumenta com o aumento da severidade, no entanto já é notória para o caso de 2% de severidade. É possível verificar também que este comportamento é transversal a ambas as simulações (com elementos de viga e com elementos de casca).

Em seguida, nas figuras 5.3 e 5.4, apresentam-se os resultados obtidos para o CD1, dano aplicado aos 120 mm, para ambos os casos de simulação.

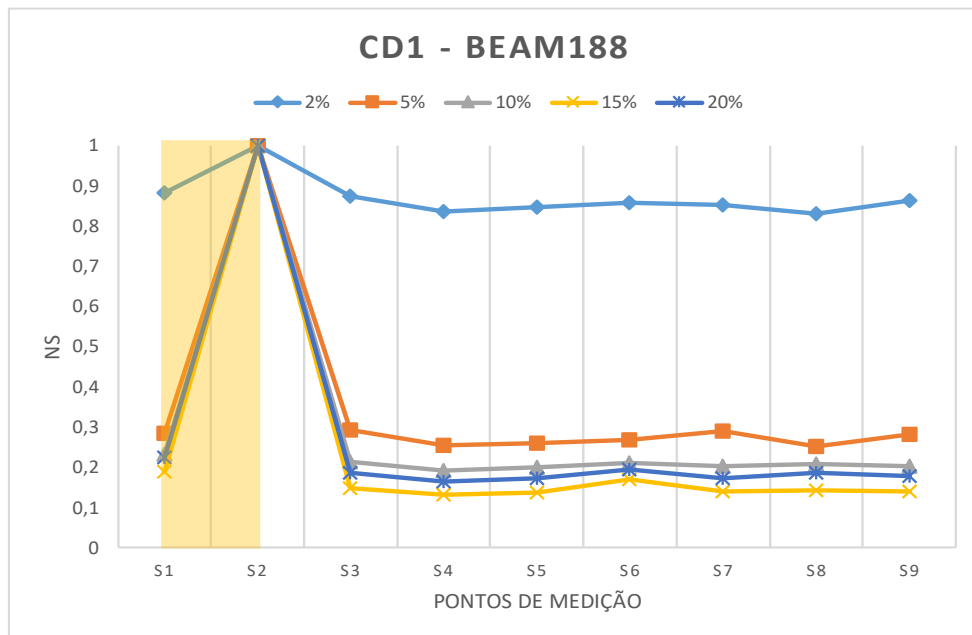


Figura 5.3- Estudo do CD1 para os 5 níveis de severidade para o elemento finito de viga

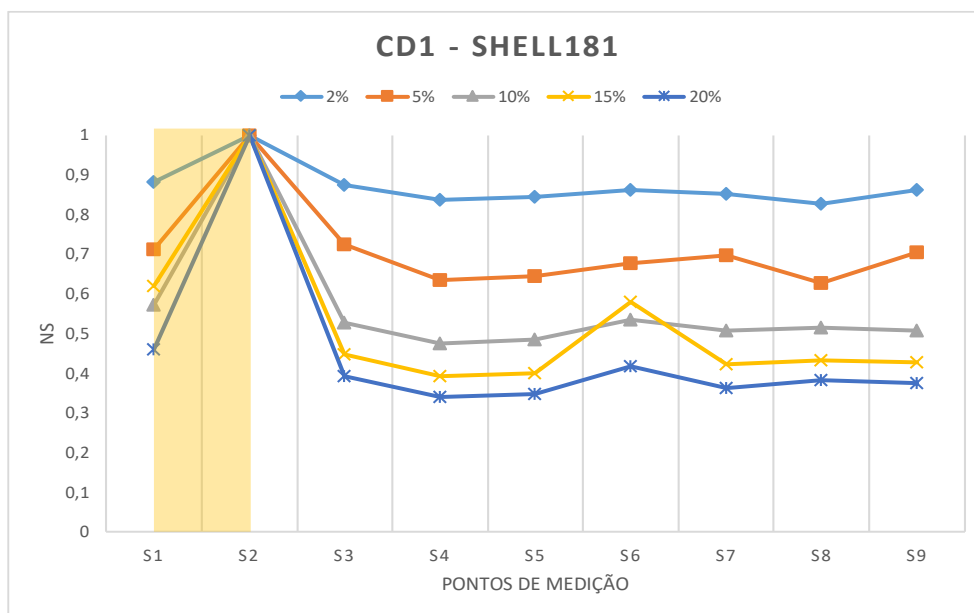


Figura 5.4- Estudo do CD1 para os 5 níveis de severidade para o elemento finito de casca

Como se pode constatar pelas figuras 5.3 e 5.4, quando a percentagem de dano aumenta, a diferença entre o valor máximo registado no ponto mais próximo do dano torna-se significativamente maior em comparação com o observado nos restantes pontos, independentemente do tipo de simulação em causa. Pode concluir-se também que essa discrepância se torna mais significativa no caso da simulação utilizando o elemento finito de viga.

Estes resultados vêm ao encontro do que era espectável, dado que, danos mais graves vão causar uma alteração mais significativa nas propriedades dinâmicas da estrutura, o que facilita a sua deteção.

Em seguida, apresentam-se duas tabelas, tabela 5.1 e tabela 5.2, com um resumo dos resultados obtidos para a simulação com o elemento finito de viga e para a simulação com o elemento finito de casca, respetivamente. Para tornar a sua leitura mais fácil, é utilizado um esquema de cores. A célula da tabela é verde nos casos em que o dano foi detetado corretamente pelo ponto de medição mais próximo deste, amarela quando detetado pelo segundo ponto de medição mais próximo, dentro dos dois pontos em que se insere o dano, e vermelha quando não foi detetado por nenhum dos pontos de medição entre os quais o dano está presente. O caso ideal é o representado a verde quando o sensor que identifica a localização do dano é o mais próximo do mesmo, no entanto os casos representados a amarelo também são considerados como uma correta identificação da localização do dano, uma vez que, por estarem próximos, identificam a área em que este se localiza.

Tabela 5.1- Resultados da influência da severidade do dano para todos os casos de dano para o elemento de viga

Severidade	2%	5%	10%	15%	20%
CD1	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD2	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo
CD3	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD4	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD5	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD6	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD7	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD8	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde
CD9	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

Tabela 5.2- Resultados da influência da severidade do dano para todos os casos de dano para o elemento de casca

Severidade	2%	5%	10%	15%	20%
CD1	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD2	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo
CD3	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde
CD4	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD5	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo
CD6	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD7	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD8	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde
CD9	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde

Da análise das tabelas 5.1 e 5.2 é possível notar que, na maioria dos casos, é possível detetar o dano pelo sensor mais próximo deste, exceto em alguns casos sinalizados a amarelo, onde o dano foi identificado pelo segundo ponto de medição mais próximo, identificando corretamente a área em que se insere. É relevante destacar o resultado obtido para o CD8, que está localizado a 720 mm, onde em ambas as simulações (elemento finito de viga e de casca) o dano só foi detetado pelo sensor mais próximo (S7, localizado a 740 mm) quando a severidade do dano foi de 20%. No entanto, em nenhuma das simulações ocorreu a situação em que não fosse possível identificar a área em que o dano estava localizado.

Também se observa que, na modelação utilizando o elemento de casca, há mais casos em que o dano não foi detetado pelo ponto de medição mais próximo, como acontece nos CD8 e CD9.

## **5.2 QUANTIDADE E POSIÇÃO DAS FORÇAS A APLICAR PARA A LOCALIZAÇÃO DO DANO**

Até ao momento, o estudo realizado baseou-se em FRFs que consideram as contribuições das 9 forças aplicadas à estrutura. Nesta secção, o objetivo é compreender qual o impacto que o número e posição de aplicação da força na estrutura, têm na correta localização do dano.

Deste modo, foram recolhidas as contribuições de todas as forças individualmente para os 9 casos de dano, considerando 3 níveis de severidade de dano: 2%, 5% e 15%.

Nas tabelas 5.3 e 5.4, apresentam-se os resultados obtidos para o caso da simulação utilizando o elemento finito de viga e para o caso da simulação utilizando o elemento finito de casca, respetivamente. Na primeira coluna, considera-se a contribuição da aplicação apenas da força 1. Na segunda coluna, considera-se a contribuição do somatório da força 1 com a força 2, na terceira coluna, a contribuição do somatório das forças 1, 2 e 3, e assim sucessivamente até se considerar o somatório do efeito das 9 forças aplicadas. Foi aplicado o mesmo esquema de cores utilizado na secção anterior para a interpretação da tabela.

Tabela 5.3- Resultados da influência da aplicação do somatório de diferentes forças para todos os casos de dano e para 3 níveis de severidade para o elemento finito de viga

BEAM		F1	F1-F2	F1-F3	F1-F4	F1-F5	F1-F6	F1-F7	F1-F8	F1-F9
CD1	2%	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	5%	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	15%	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
CD2	2%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	5%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	15%	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green
CD3	2%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	5%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	15%	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
CD4	2%	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	5%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	15%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
CD5	2%	Red	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	5%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Green
	15%	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green
CD6	2%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	5%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	15%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
CD7	2%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	5%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	15%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
CD8	2%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	5%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	15%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
CD9	2%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green
	5%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green
	15%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

Tabela 5.4- Resultados da influência da aplicação do somatório de diferentes forças para todos os casos de dano e para 3 níveis de severidade para o elemento finito de casca

SHELL		F1	F1-F2	F1-F3	F1-F4	F1-F5	F1-F6	F1-F7	F1-F8	F1-F9
CD1	2%	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	5%	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	15%	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD2	2%	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	5%	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	15%	Verde	Verde	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Verde	Verde	Verde
CD3	2%	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Amarelo
	5%	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	15%	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD4	2%	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Verde	Verde
	5%	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	15%	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD5	2%	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Verde	Verde
	5%	Vermelho	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde
	15%	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD6	2%	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	5%	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Verde	Verde
	15%	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD7	2%	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	5%	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	15%	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
CD8	2%	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo
	5%	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo
	15%	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo
CD9	2%	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo
	5%	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo
	15%	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

Da análise das tabelas é possível concluir que, em muitos casos, é possível identificar corretamente a localização do dano mesmo sem considerar todas as 9 forças aplicadas. Existem casos de localização do dano em que só aplicando uma única força foi possível localizar o dano, para todas as severidades estudadas, como acontece para o CD6 e o CD7 considerando o elemento finito de viga e o CD7 considerando o elemento finito de casca. No entanto, a taxa de sucesso na identificação da localização diminui significativamente quando não se consideram todas as 9 forças, como é evidente na última coluna das tabelas, onde todas as forças são consideradas.

Além disso, pode também concluir-se que com a utilização do elemento de casca, há mais casos em que não foi possível detetar o dano (casos sinalizados a vermelho) ou em que apenas foi detetada a área em que o dano se insere (casos sinalizados a amarelo).

Uma vez que, como referido, em alguns casos bastou a aplicação da força 1 para a correta localização do dano, fez-se um estudo da influência da aplicação de cada uma das 9 forças individualmente para os 9 casos de dano e para 3 níveis de severidade. Deste modo, pretende-

se perceber se existem mais casos em que seja possível localizar o dano com apenas uma força e de que maneira a localização da mesma terá influência na localização de dano.

Assim, nas tabelas 5.5 e 5.6, apresentam-se os resultados obtidos para o caso da simulação utilizando o elemento finito de viga e para o caso da simulação utilizando o elemento finito de casca, respetivamente. Cada coluna da tabela é referente à contribuição da aplicação apenas de uma força de cada vez, começando na força 1 (F1) e terminando na força 9 (F9).

Tabela 5.5- Resultados da influência da aplicação de cada força individualmente para todos os casos de dano e para 3 níveis de severidade para o elemento de viga

BEAM		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
CD1	2%	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	5%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	15%	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
CD2	2%	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Yellow	Red	Red
	5%	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow
	15%	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow
CD3	2%	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Yellow
	5%	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Red	Red
	15%	Yellow	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Yellow	Yellow
CD4	2%	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	5%	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Green
	15%	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green
CD5	2%	Red	Red	Yellow	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	5%	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Red	Red	Green	Green	Green
	15%	Yellow	Yellow	Red	Green	Red	Red	Red	Green	Green
CD6	2%	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Yellow
	5%	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Yellow
	15%	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Yellow
CD7	2%	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green
	5%	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green
	15%	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green
CD8	2%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Green
	5%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Green
	15%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Red	Yellow	Green
CD9	2%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Red	Green
	5%	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green
	15%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

Tabela 5.6- Resultados da influência da aplicação de cada força individualmente para todos os casos de dano e para 3 níveis de severidade para o elemento finito de casca

SHELL		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
CD1	2%	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	5%	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Red
	15%	Red	Red	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green
CD2	2%	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Yellow	Red	Red
	5%	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Yellow	Yellow	Yellow
	15%	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Red	Yellow	Yellow
CD3	2%	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow
	5%	Red	Red	Yellow	Yellow	Red	Red	Yellow	Red	Red
	15%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Green	Red
CD4	2%	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	5%	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green
	15%	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Green
CD5	2%	Red	Red	Yellow	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	5%	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Red	Red	Green	Green	Green
	15%	Yellow	Yellow	Red	Green	Red	Red	Red	Green	Green
CD6	2%	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Yellow
	5%	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Yellow
	15%	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Yellow
CD7	2%	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green
	5%	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green
	15%	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green
CD8	2%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Green
	5%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Green
	15%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Red	Yellow	Green
CD9	2%	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Red	Green
	5%	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green
	15%	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

Da observação das tabelas 5.5 e 5.6 é possível concluir que, quando a força é aplicada nas proximidades da área danificada, os resultados obtidos por essa força em particular não permitem, na maioria dos casos, a identificação precisa do dano (ver caixas colocadas a azul). Por exemplo, nos CD6 e CD7 que estão localizados entre os sensores S6 e S7, onde são aplicadas as forças F6 e F7, não foi possível localizar o dano com a contribuição da aplicação individual das forças F6, F7 e F8 (que estão mais próximas da localização do dano). O mesmo se verificou no CD2, localizado entre os sensores S4 e S5, onde o dano não foi possível de identificar pelas forças F4 e F5. No geral verificou-se este padrão para todos os casos de dano de forma mais ou menos evidente (CD9) e para ambas as simulações (com o elemento finito de viga e de casca).

Comparando estes resultados com os das primeiras duas tabelas desta mesma secção é possível concluir que com a contribuição das 9 forças aplicadas à estrutura a probabilidade da identificação correta da localização do dano aumenta significativamente.

### 5.3 PRESENÇA DE RUÍDO

Como mencionado anteriormente, a presença de ruído nas FRFs medidas experimentalmente pode dificultar/impedir a detecção e localização de danos em estruturas. Pretende-se perceber como o ruído afeta as FRFs e até que ponto a sua presença inviabiliza a correta localização do dano. Para tal, empreendeu-se um estudo com o objetivo de avaliar o impacto que o ruído presente nas FRFs pode ter na correta localização do dano. Neste estudo foram consideradas 3 percentagens de ruído adicionado distintas: 0,5%; 1% e 2%. Os resultados do indicador *Razão* para todos os casos de dano e para as 3 percentagens de ruído adicionadas podem ser consultados no Anexo 3.

Na figura 5.5 encontram-se representadas as FRFs sem ruído (curva laranja) e com ruído (curva azul) adicionado de 2%.

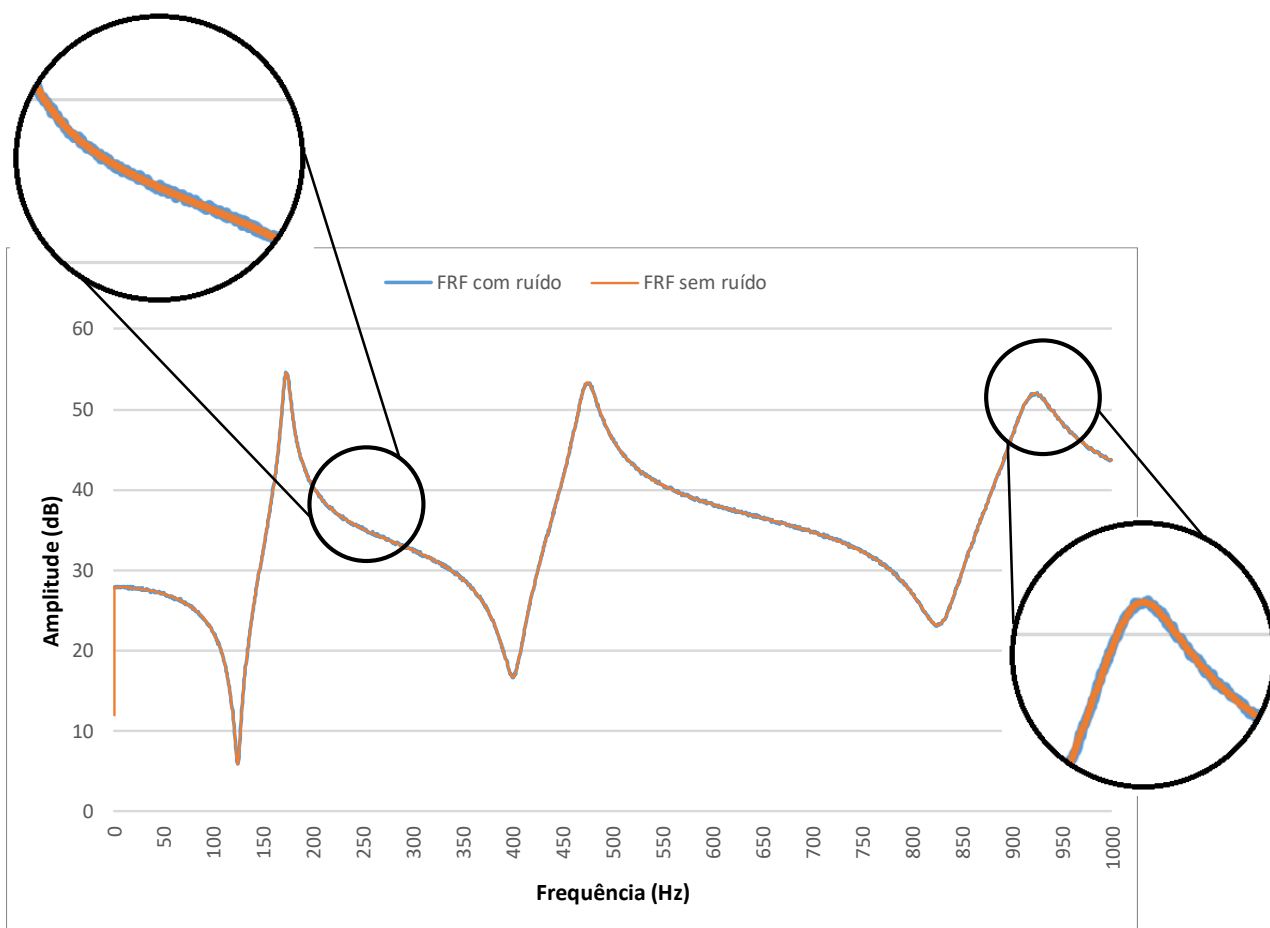


Figura 5.5- Gráfico de comparação entre FRFs H1,1 sem ruído e com 2% de ruído adicionado

Sendo o CD1 um dos casos que apresentou uma detecção clara da localização do dano, apresentam-se os resultados obtidos para a implementação de ruído no mesmo, para o elemento finito de viga.

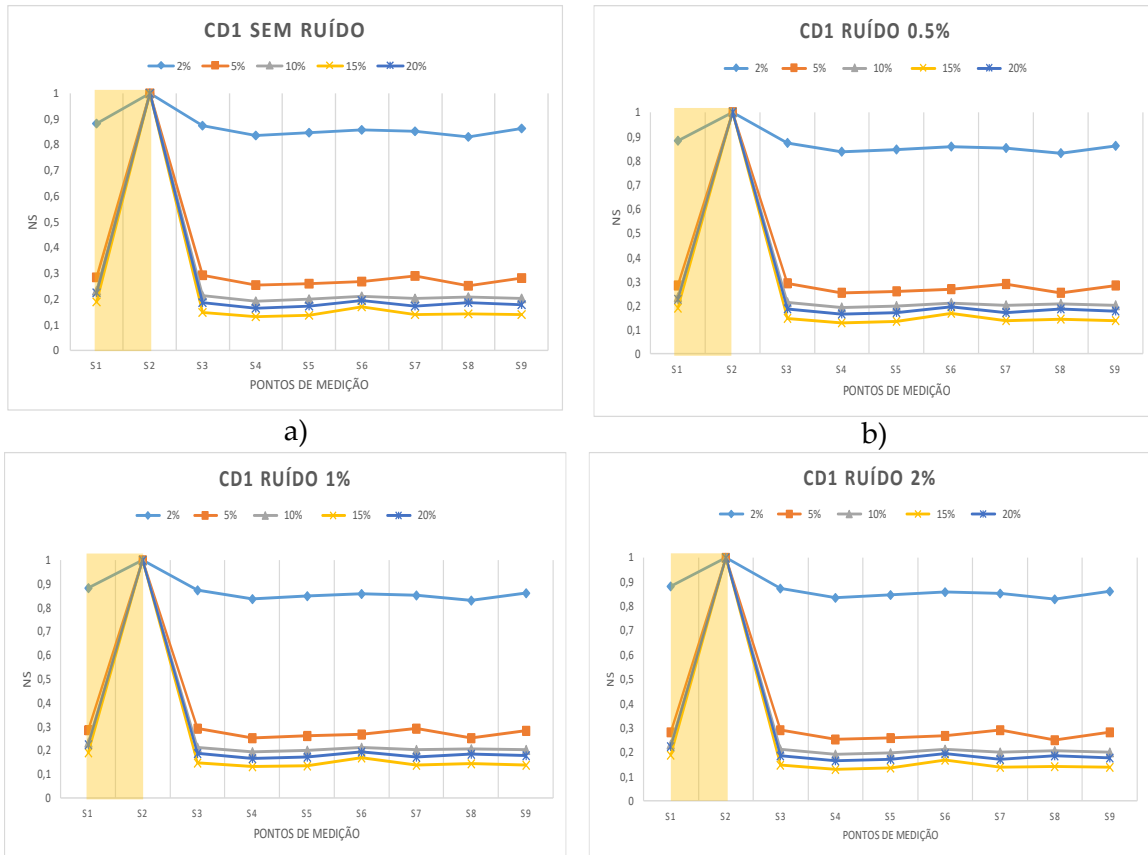


Figura 5.6- Estudo do CD1 para os 5 níveis de severidade para o elemento de viga, considerando o caso sem ruído (a) e com ruído para uma percentagem de 0,5% (b), de 1% (c) e de 2% (d)

Observando a figura 5.6, verifica-se que, neste caso, para qualquer uma das percentagens de ruído implementadas não se verificam alterações significativas em comparação ao caso sem ruído.

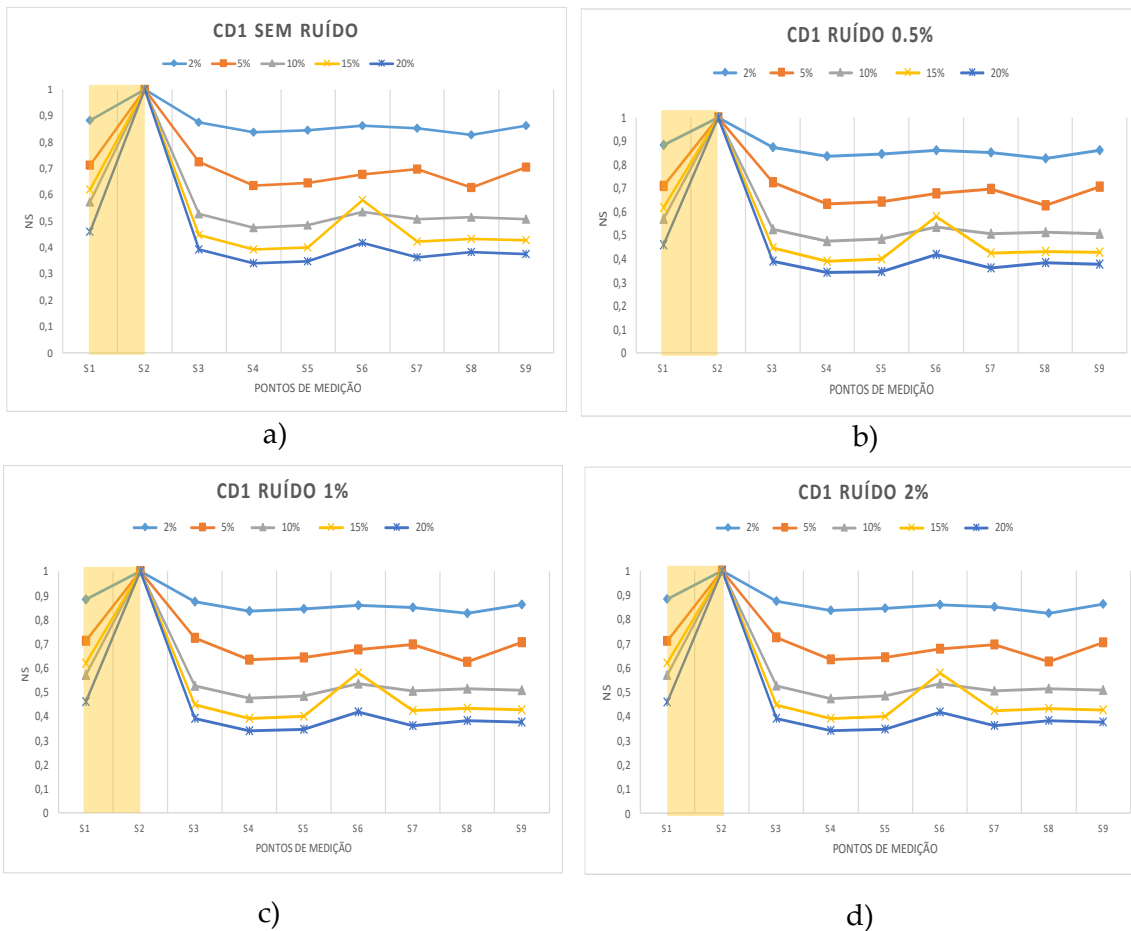


Figura 5.7- Estudo do CD1 para os 5 níveis de severidade para o elemento de casca, considerando o caso sem ruído (a) e com ruído para uma percentagem de 0,5% (b), de 1% (c) e de 2% (d)

Conforme se pode observar na figura 5.7, para modelação utilizando o elemento de casca, a poluição das FRFs com ruído aleatório também não provoca alterações significativas em comparação ao caso sem ruído.

Em seguida encontram-se organizados os resultados obtidos através da interpretação de todos os gráficos. Nas tabelas 5.7, 5.8 e 5.9 encontram-se os dados obtidos para a simulação utilizando o elemento de viga para as percentagens de ruído de 0,5%, 1% e 2%, respetivamente. Adicionalmente, nas tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 encontram-se os dados obtidos para a simulação utilizando o elemento de casca para as percentagens de ruído de 0,5%, 1% e 2%, respetivamente.

Tabela 5.7- Resultados da influência da percentagem de 0,5% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento BEAM188

Ruído_0.5%	2%	5%	10%	15%	20%
CD1					
CD2					
CD3					
CD4					
CD5					
CD6					
CD7					
CD8					
CD9					

Tabela 5.8- Resultados da influência da percentagem de 1% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento BEAM188

Ruído_1%	2%	5%	10%	15%	20%
CD1					
CD2					
CD3					
CD4					
CD5					
CD6					
CD7					
CD8					
CD9					

Tabela 5.9- Resultados da influência da percentagem de 2% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento BEAM188

Ruído_2%	2%	5%	10%	15%	20%
CD1					
CD2					
CD3					
CD4					
CD5					
CD6					
CD7					
CD8					
CD9					

Tabela 5.10- Resultados da influência da percentagem de 0,5% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento SHELL181

Ruído_0.5%	2%	5%	10%	15%	20%
CD1					
CD2					
CD3					
CD4					
CD5					
CD6					
CD7					
CD8					
CD9					

Tabela 5.11- Resultados da influência da percentagem de 1% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento SHELL181

Ruído_1%	2%	5%	10%	15%	20%
CD1					
CD2					
CD3					
CD4					
CD5					
CD6					
CD7					
CD8					
CD9					

Tabela 5.12- Resultados da influência da percentagem de 2% de ruído para todos os casos de dano e para todos os níveis de severidade para a simulação utilizando o elemento SHELL181

Ruído_2%	2%	5%	10%	15%	20%
CD1					
CD2					
CD3					
CD4					
CD5					
CD6					
CD7					
CD8					
CD9					

Pode verificar-se que as tabelas obtidas são exatamente iguais às obtidas na secção 5.1, para a situação sem ruído. Conclui-se que a eficácia na localização do dano não foi afetada pela introdução de ruído nos dados inicialmente obtidos.

Uma possível justificação para este comportamento poderá ser o facto de a presença de dano na estrutura tubular afetar significativamente as FRFs. Na figura 5.8 encontram-se representadas as FRFs diretas H1,1 obtidas para o CD1, com dano de severidade 5% e sem dano,

para 2% de ruído adicionado. Na figura 5.9 encontram-se os valores da aplicação do vetor razão para esse mesmo caso.

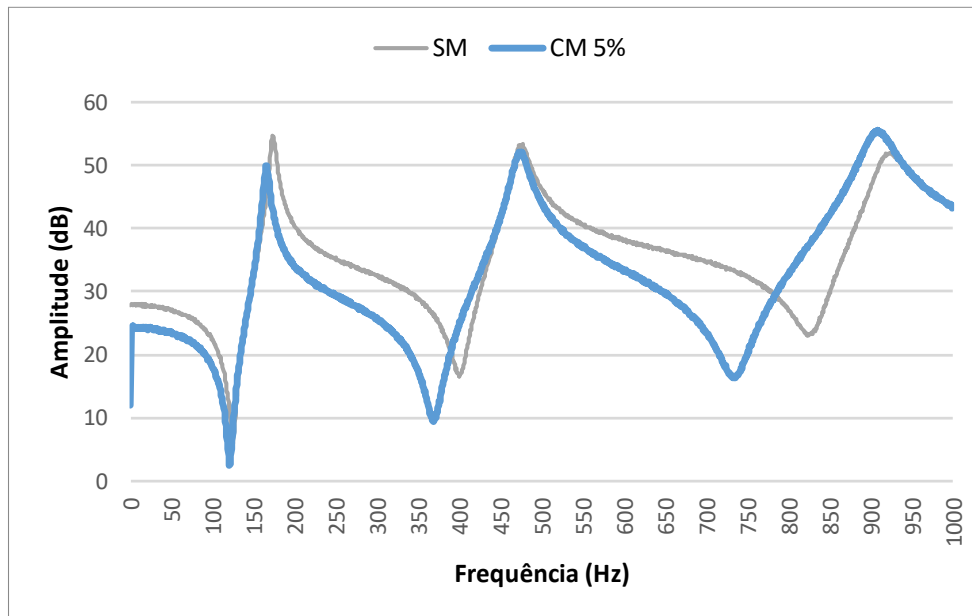


Figura 5.8- FRFs diretas H1,1 obtidas para o CD1 com dano de severidade de 5% e sem dano, para 2% de ruído adicionado

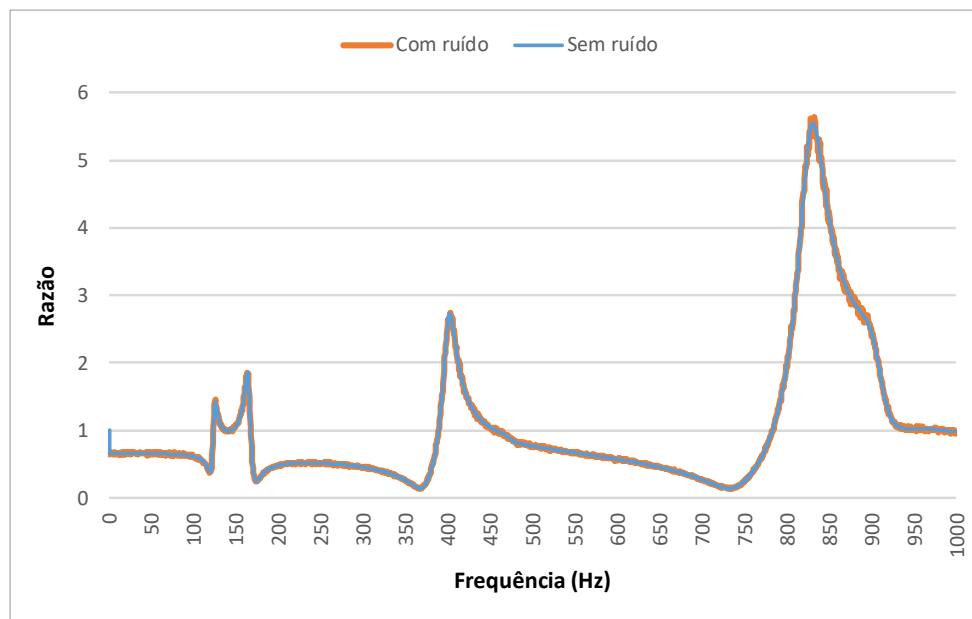


Figura 5.9- Valores da aplicação do vetor Razão para o CD1 com dano de 5% de severidade

Com a sobreposição dos dois gráficos, representada esquematicamente na figura 5.10, é possível perceber que os valores da aplicação do indicador Razão apresentam 3 picos máximos

significativos próximos das zonas de antirressonância. Como referido anteriormente, nestas zonas a translação verificada entre a FRF sem dano e a FRF com dano é mais acentuada.

A diferença entre os valores máximos (picos) e restantes valores resultantes da aplicação do indicador *Razão* é tão acentuada que a poluição das FRFs para as percentagens de ruído aleatório estudadas acaba por não afetar a localização do dano.

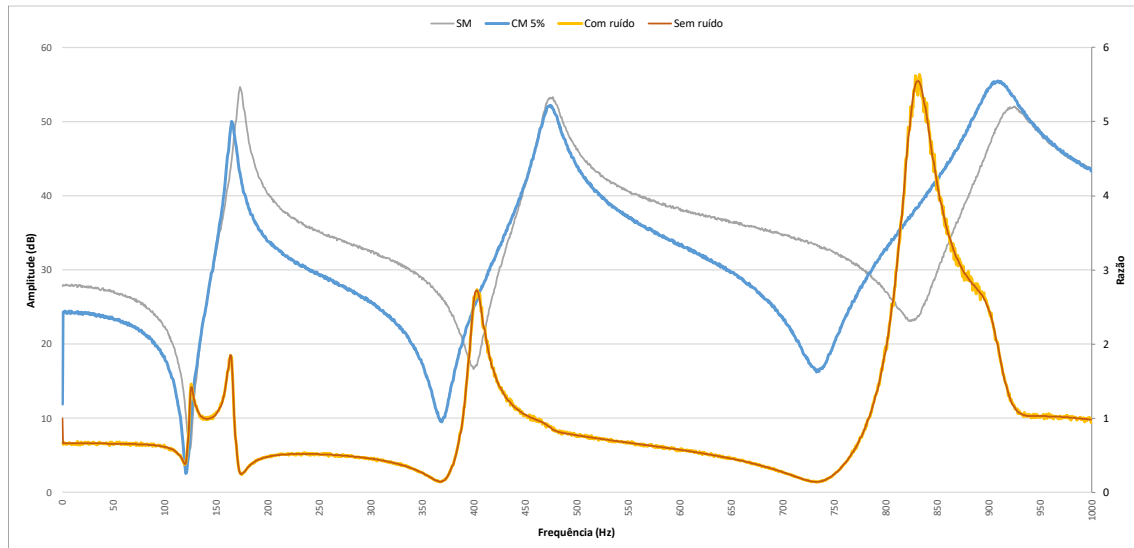


Figura 5.10- Gráfico com a sobreposição das FRFs obtidas para o caso sem dano (cinzento) e CD1 com severidade 5% (azul) e da curva obtida pela aplicação do indicador *Razão* (laranja)



## 6 CONCLUSÕES

---

O propósito deste trabalho foi avaliar a eficácia da utilização das FRFs na deteção e localização de danos em estruturas tubulares de parede fina. Para alcançar este objetivo, adotou-se uma metodologia que se baseia na comparação das respostas da estrutura com e sem dano, usando, neste caso, o indicador Razão. Para investigar a viabilidade da aplicação das respostas dinâmicas mencionadas anteriormente, realizou-se um estudo numérico.

Primeiramente, realizou-se a modelação numérica da estrutura tubular considerada livre-livre, com base no Método dos Elementos Finitos, obtendo-se assim as FRFs da mesma, considerando inicialmente que eram aplicadas à viga tantas forças (uma de cada vez) quanto os pontos de medição considerados (9 pontos de medição). Este processo foi repetido para dois tipos de elementos finitos diferentes: de viga (BEAM188) e de casca (SHELL181), com o objetivo de perceber se os resultados obtidos com a utilização destes dois elementos finitos se assemelhavam. Isto porque, apesar de apresentar limitações em termos da simulação de estruturas tubulares, o elemento finito de viga tem a vantagem de ter um custo computacional muito inferior ao verificado quando se utiliza o elemento finito de casca, o que pode ser benéfico no caso de existirem limitações de tempo e/ou recursos, como o computador.

Posteriormente, empregou-se uma metodologia que permitiu aplicar o indicador Razão às FRFs determinadas para a estrutura considerando ou não a existência de dano na mesma.

Procurou entender-se a influência que alguns fatores têm na correta localização do dano, nomeadamente, a severidade do dano, a quantidade e posição das forças a aplicar para a localização do dano e a presença de ruído nas respostas obtidas.

Relativamente ao estudo da severidade do dano, verificou-se que um aumento desta não impossibilitava a localização do dano, no entanto dificultava-a, sendo que para todos os casos de dano e para 5 níveis de severidade diferentes foi possível localizar, pelo menos, a área em que o dano se encontrava.

Quanto à análise da quantidade e posição das forças a aplicar para a localização do dano começou por analisar-se a contribuição da força F1, em seguida considerou-se o somatório da força F1 e F2, e assim sucessivamente até se considerar o somatório do efeito das 9 forças aplicadas. O estudo foi feito para 3 níveis de severidade. Conclui-se que em maior parte dos casos é possível identificar corretamente a localização ou a área em que se insere o dano, mesmo sem considerar todas as 9 forças aplicadas. No entanto, a taxa de sucesso na identificação da localização diminui significativamente quando não se consideram todas as forças. De seguida, considerou-se a contribuição individual de cada uma das forças. Os resultados do estudo, mostram que, apesar de em vários casos ser possível detetar danos com a aplicação de apenas uma força, a probabilidade da identificação da localização do dano diminui significativamente. Também é possível concluir que, quando a força é aplicada nas proximidades da área danificada, os resultados obtidos por essa força em particular não permitem, na maioria dos casos, a identificação precisa do dano.

Por último, realizou-se um estudo da influência da presença de ruído nas respostas obtidas, introduzindo-se percentagens de ruído de 0,5%, 1% e 2%. Os resultados deste estudo mostram que a presença de dano não afetou a correta localização do dano. Isto pode ser explicado pelo facto da presença de dano na estrutura provocar um grande impacto nas FRFs obtidas,

verificando-se uma traslação significativa da curva com dano em relação à curva sem dano, principalmente nas zonas de antirressonância.

Como referido, para todos os estudos foi efetuada a análise para a simulação utilizando o elemento finito de viga e para a simulação utilizando o elemento finito de casca. Uma vez que os modelos apresentam valores de frequências naturais próximas e que em todos os estudos se obtiveram resultados semelhantes, considera-se que a utilização do elemento de viga é adequada para fazer este tipo de análise.

Adicionalmente, é também possível concluir com este estudo que é possível a deteção e localização de dano em estruturas tubulares utilizando FRFs.

## **6.1 TRABALHOS PROPOSTOS**

A deteção de dano é um tópico de grande relevância tanto científica quanto industrial, e, como consequência, é um campo em constante evolução. Esta dissertação representa o primeiro estudo sobre a deteção de danos em estruturas tubulares de parede fina realizado no Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Nova School of Science & Technology, da Universidade Nova de Lisboa. Como tal, há ainda muito a ser explorado neste domínio.

Deste modo, para trabalhos futuros sugere-se primeiramente a validação experimental das conclusões retiradas dos resultados obtidos numericamente neste trabalho. Experimentalmente, propõe-se uma análise de um maior número de casos de dano provocados não só por redução de massa, como também por alteração da rigidez local da estrutura.

Também o estudo para estruturas tubulares de diferentes dimensões e material é importante para verificar a utilidade do método estudado, bem como a utilização de diferentes gamas de frequência.

Mostra-se igualmente interessante analisar experimentalmente a influência do ruído, uma vez que este é difícil de simular de forma rigorosa numericamente e é um dos maiores obstáculos na correta deteção e localização do dano utilizando medições experimentais.

# BIBLIOGRAFIA

---

- [1] «Composites in the race to space». Acedido: 17 de fevereiro de 2023. Disponível em: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-in-space>
- [2] O. E. Esu, Y. Wang, e M. K. Chryssanthopoulos, «Local vibration mode pairs for damage identification in axisymmetric tubular structures», *J. Sound Vib.*, vol. 494, p. 115845, mar. 2021, doi: 10.1016/j.jsv.2020.115845.
- [3] M. El-Gebeily e Y. A. Khulief, «Identification of wall-thinning and cracks in pipes utilizing vibration modes and wavelets», *Appl. Math. Model.*, vol. 40, n.º 9–10, pp. 5335–5348, mai. 2016, doi: 10.1016/j.apm.2015.12.031.
- [4] T. Serafim, «Quanto custou o derrame da plataforma Deepwater Horizon à natureza?», PÚBLICO. Acedido: 12 de fevereiro de 2023. Disponível em: <https://www.publico.pt/2017/04/25/ciencia/noticia/quanto-custou-a-natureza-o-derrame-da-plataforma-deepwater-horizon-1769901>
- [5] H. T. Yolken e George A Matzkanin, «Nondestructive Evaluation of Advanced Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites», 2001.
- [6] «10mm (8mm) Carbon Fibre Box Section; 1m, 2m - Easy Composites». Acedido: 17 de fevereiro de 2023. Disponível em: <https://www.easycomposites.co.uk/10mm-8mm-carbon-fibre-box-section>
- [7] A. A. Zaher e M. Seleem, «An integrated vibration-based structural health monitoring system», Article, Carleton University, 2002.
- [8] T. G. Santos *et al.*, *Reliability and NDT Methods*, vol. 129. 2020, pp. 265–295. doi: 10.1007/978-3-030-44522-5\_8.
- [9] K. Rezvani, N. M. M. Maia., e H. S. Mohammad., «A Comparison of Some Methods for Structural Damage Detection», *Sci. Iran.*, set. 2017, doi: 10.24200/sci.2017.4494.
- [10] R. A. B. Almeida, A. P. V. Urgueira, J. D. P. Morais, N. M. M. Maia, «An assessment of frequency response curvature methods for damage localization», Article, International Conference on Noise and Vibration Engineering», Belgium, 2014.
- [11] A. Rytter, «Vibration based inspection of civil engineering structures», PhD thesis, Aalborg University, 1993.
- [12] 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, out. 2005, doi: 10.1007/BF02984268.
- [13] 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, jul. 2007, doi: 10.1016/j.ymsp.2006.10.002.
- [14] 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, mar. 1998, doi: 10.1177/058310249803000201.
- [15] J.-J. Sinou, «A Review of Damage Detection and Health Monitoring of Mechanical Systems from Changes in the Measurement of Linear and Non-linear Vibrations», em *Mechanical Vibrations: Measurement, Effects and Control*, 2009, pp. 643–702.
- [16] W. Fan e P. Qiao, «Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study», *Struct. Health Monit.- Int. J. - STRUCT Health MONIT*, vol. 9, fev. 2010, doi: 10.1177/1475921710365419.
- [17] W. M. West, «Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an Orbiter test specimen», presented at the IN: International Modal Analysis Conference, 4th, Los Angeles, CA, 1986, vol. 1, pp. 1–6.

- [18] W. Lestari, P. Qiao, e S. Hanagud, «Curvature Mode Shape-based Damage Assessment of Carbon/Epoxy Composite Beams», *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 18, pp. 189–208, mar. 2007, doi: 10.1177/1045389X06064355.
- [19] R. P. Bandara, T. H. Chan, e D. P. Thambiratnam, «Structural damage detection method using frequency response functions», *Struct. Health Monit.*, vol. 13, n.º 4, pp. 418–429, jul. 2014, doi: 10.1177/1475921714522847.
- [20] U. Lee e J. Shin, «A frequency response function-based structural damage identification method», *Comput. Struct.*, vol. 80, n.º 2, pp. 117–132, jan. 2002, doi: 10.1016/S0045-7949(01)00170-5.
- [21] 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, fev. 2005, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.09.011.
- [22] J. Medeiros, «Deteção de dano estrutural em vigas utilizando as respostas dinâmicas medidas com acelerómetros e extensómetros», MSc, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2021.
- [23] T. J. Johnson e D. E. Adams, «Transmissibility as a Differential Indicator of Structural Damage», *J. Vib. Acoust.*, vol. 124, n.º 4, pp. 634–641, out. 2002, doi: 10.1115/1.1500744.
- [24] J. Morais, «Deteção e localização de dano em estruturas», MSc, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [25] R. Ghiasi, M. R. Ghasemi, e M. Noori, «Comparative studies of metamodeling and AI-Based techniques in damage detection of structures», *Adv. Eng. Softw.*, vol. 125, pp. 101–112, nov. 2018, doi: 10.1016/j.advengsoft.2018.02.006.
- [26] R. M. Jones, *Mechanics of composite materials*, 2nd ed. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1999.
- [26] R. Ferreira Fernandes, «Compósito», *Rev. Ciênc. Elem.*, vol. 2, n.º 4, dez. 2014, doi: 10.24927/rce2014.285.
- [27] R. Zanatta, «Materiais compósitos na aviação». Acedido: 6 de fevereiro de 2023. Disponível em: <http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/>
- [28] D. Bettebghor, S. Grihon, J. Morlier, D. Onera, S. Grihon, «Bilevel optimization of large composite structures based on lamination parameters and post-optimal sensitivities. Part 1: Theoretical aspects», mai. 2018.
- [29] I. M. Daniel e O. Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, 1994. Disponível em: <https://books.google.pt/books?id=-7DHAQAACAAJ>
- [30] R. Nascimento, «Produção e Caracterização de Compósitos Inteligentes», Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 2009.
- [31] D. B. Miracle, Ed., *ASM handbook. 21: Composites / Daniel B. Miracle, Volume chairs*, 5. print. Materials Park, Ohio: ASM International, 2007.
- [32] N. Angelopoulos, «Damage detection and damage evolution monitoring of composite materials for naval applications using acoustic emission testing», 2017.
- [34] G. A. O. Davies e R. Olsson, «Impact on composite structures», *Aeronaut. J.*, vol. 108, n.º 1089, pp. 541–563, nov. 2004, doi: 10.1017/S0001924000000385.
- [34] J. Cardoso, «Métodos Computacionais em Engenharia Mecânica», Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, Portugal, 2018.
- [36] «BEAM188». Acedido: 28 de setembro de 2023. Disponível em: [https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans\\_help\\_v182/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_BEAM188.html](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_BEAM188.html)
- [37] «SHELL181». Acedido: 28 de setembro de 2023. Disponível em: [https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans\\_help\\_v182/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_SHELL181.html](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html)
- [38] «2.5: Noise Modeling - White, Pink, and Brown Noise, Pops and Crackles», Engineering LibreTexts. Acedido: 19 de dezembro de 2023. Disponível em: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Chemical\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Controls\\_\(Woelfl\)/02%3A\\_Modeling\\_Basics/2.05%3A\\_Noise\\_modeli](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woelfl)/02%3A_Modeling_Basics/2.05%3A_Noise_modeli)

- ng\_more\_detailed\_information\_on\_noise\_modeling-  
\_white%2C\_pink%2C\_and\_brown\_noise%2C\_pops\_and\_crackles
- [39] W. J. Visser, «UPDATING STRUCTURAL DYNAMICS MODELS USING FREQUENCY RESPONSE DATA», set 1992.
- [40] P. Fernandes, «Avaliação de vários indicadores na deteção e localização de dano em estruturas, utilizando as Funções de Resposta em Frequência», MSc, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 2019.
- [41] D. He, X. Wang, M. I. Friswell, e J. Lin, «Identification of modal parameters from noisy transient response signals», *Struct. Control Health Monit.*, vol. 24, n.º 11, p. e2019, 2017, doi: 10.1002/stc.2019.
- [42] R. Rodrigues, «Identificação de dano numa viga utilizando as respostas dinâmicas», MSc, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, Portugal, 2021.



## ANEXO A1 - ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DA MALHA

Na tabela A1.1, são apresentadas as frequências naturais obtidas de acordo com a variação do tamanho de elementos finitos utilizados na modelação com elemento finito de viga (BEAM188).

Foi utilizado o comando **ELEM\_SIZE** para controlar o tamanho dos elementos ao longo das linhas definidas.

Tabela A1.1- Estudo de convergência da malha para a modelação com o elemento finito de viga

Frequências Naturais [Hz]	Tamanho do elemento [mm]			
	0,1	0,01	0,001	0,0001
173,148	173,148	173,148	173,148	173,148
474,010	474,010	474,010	474,010	474,010
919,872	919,871	919,871	919,871	919,871
1500,524	1500,517	1500,517	1500,517	1500,517
1833,600	1833,600	1833,600	1833,600	1833,600
2205,718	2205,684	2205,684	2205,684	2205,684
3024,008	3023,885	3023,885	3023,885	3023,885
3209,918	3209,918	3209,918	3209,918	3209,918

Na tabela A1.2 são apresentados os resultados correspondentes à diferença entre duas colunas consecutivas da tabela A1.1. Deste modo, pretende-se perceber a partir de que tamanho de elemento finito estabilizam as frequências naturais.

Tabela A1.2- Diferença correspondente à variação do número de elementos para a modelação com elemento finito de viga

Diferença [mm]		
0,1 – 0,01	0,01 – 0,001	0,001 – 0,0001
0	0	0
0	0	0
0,001	0	0
0,006	0	0
0	0	0
0,033	0	0
0,123	0	0
0	0	0

Da interpretação da tabela percebe-se que a diferença nas frequências naturais para um tamanho de malha de 0,01mm e 0,001mm é nula pelo que pode ser utilizado um tamanho de 0,01mm para cada elemento.

Da mesma forma na tabela A1.3, são apresentadas as frequências naturais obtidas de acordo com a variação do tamanho de elementos finitos utilizados na modelação com elementos finitos de casca (SHELL181).

Tabela A1.3- Estudo de convergência da malha para a modelação com o elemento finito de casca

	Tamanho do elemento [mm]				
	6,67	4,00	3,33	2,85	2,50
Frequências Naturais [Hz]	175,82	177,57	177,56	177,73	177,84
	480,80	485,28	485,26	485,69	485,95
	931,52	939,40	939,33	940,04	940,46
	1516,29	1527,39	1527,20	1528,14	1528,64
	2223,25	2236,46	2236,04	2237,02	2237,45
	3039,29	3052,51	3051,73	3052,47	3052,58
	3235,02	3237,79	3237,78	3237,73	3237,73
	3951,03	3961,20	3959,87	3959,99	3959,47

Na tabela A1.4 são apresentados os resultados correspondentes à diferença entre duas colunas consecutivas da tabela 8.3.

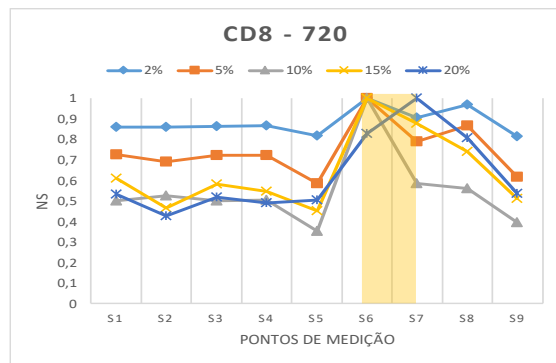
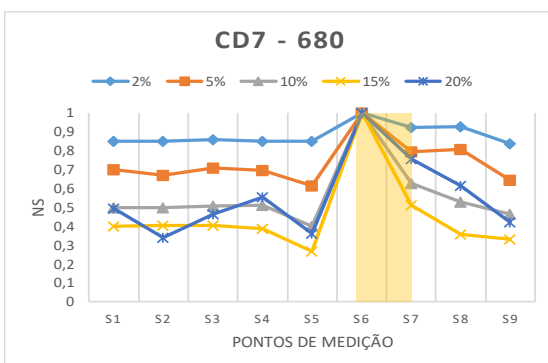
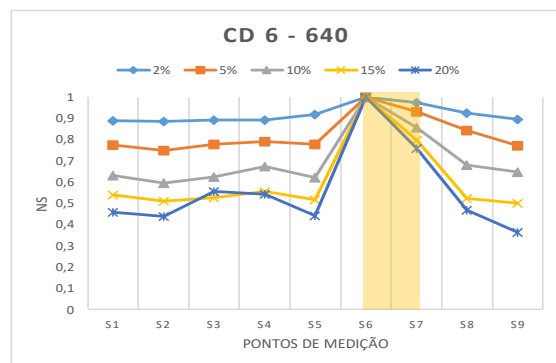
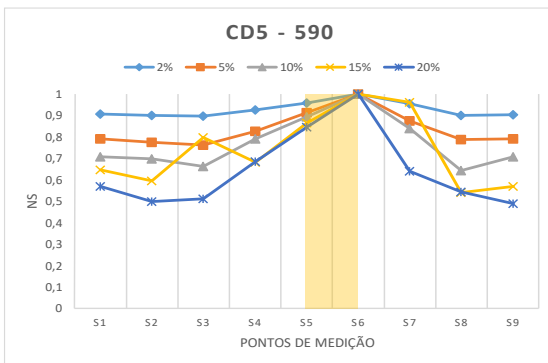
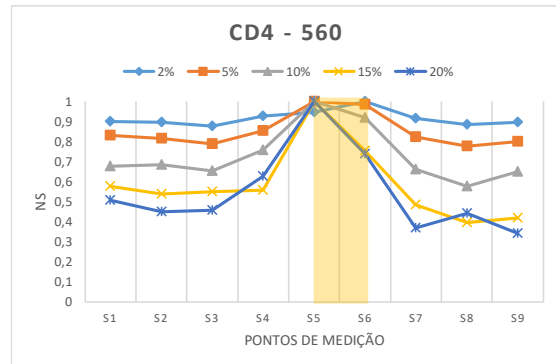
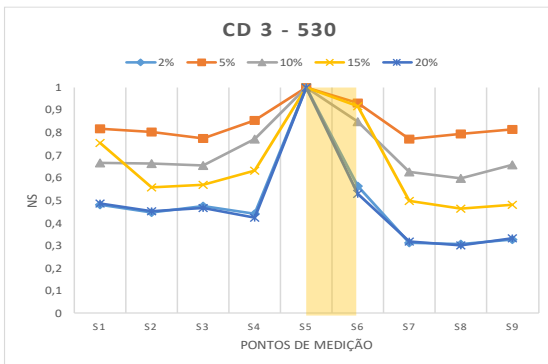
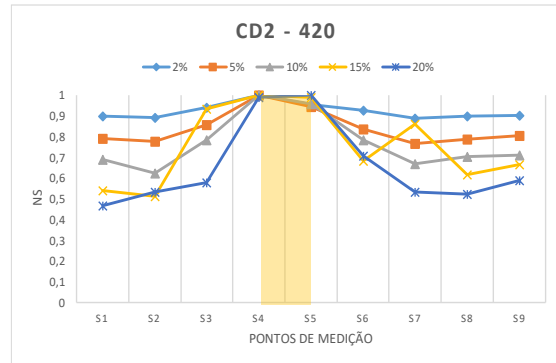
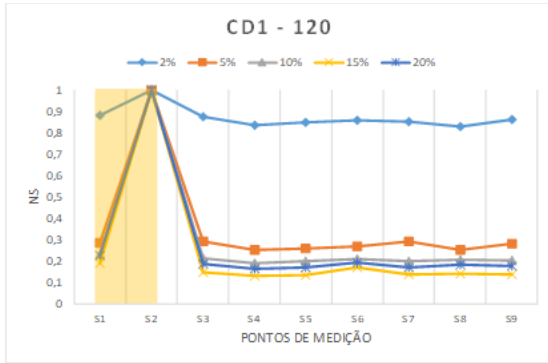
Tabela A1.4- Diferença correspondente à variação do número de elementos para a modelação com elemento finito de casca

Diferença [mm]			
6,67 – 4,00	4,00 – 3,33	3,33 – 2,85	2,85 – 2,50
-1,743	0,002	-0,169	-0,106
-4,486	0,019	-0,424	-0,260
-7,882	0,072	-0,714	-0,419
-11,101	0,193	-0,937	-0,502
-13,207	0,417	-0,982	-0,426
-13,220	0,784	-0,742	-0,107
-2,772	0,013	0,052	0
-10,170	1,328	-0,119	0,524

Como mencionado anteriormente, em 3.2.1. Elemento finito de viga (BEAM188) e elemento finito de casca (SHELL181), a simulação utilizando o elemento de casca requer um maior custo computacional que é agravado com a utilização de uma malha mais refinada. Deste modo, escolheu-se um tamanho de elemento de 4mm de comprimento. Apesar do valor das frequências naturais não estabilizar completamente a partir deste tamanho pode considerar-se que as diferenças não são significativas em comparação com o acréscimo do custo computacional.

## ANEXO A2

Influência do fator de severidade nos resultados do indicador Razão para os 9 casos de dano e para os 5 níveis de severidade estudado, para a simulação utilizando o elemento finito de viga.



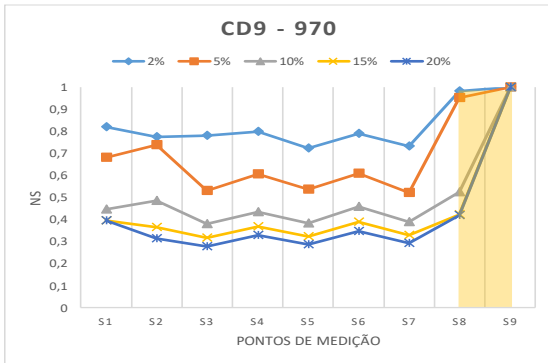
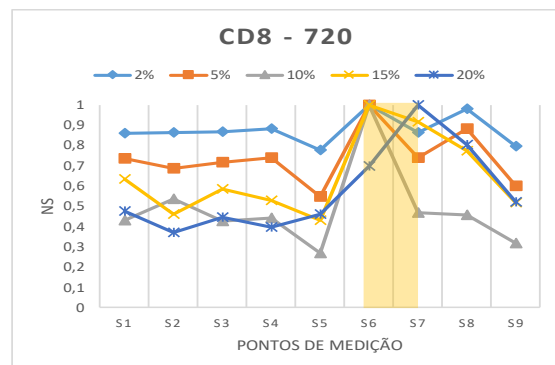
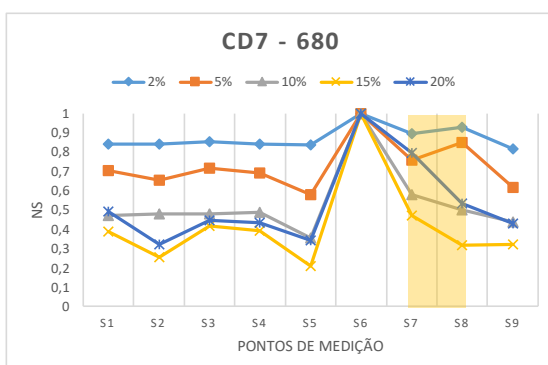
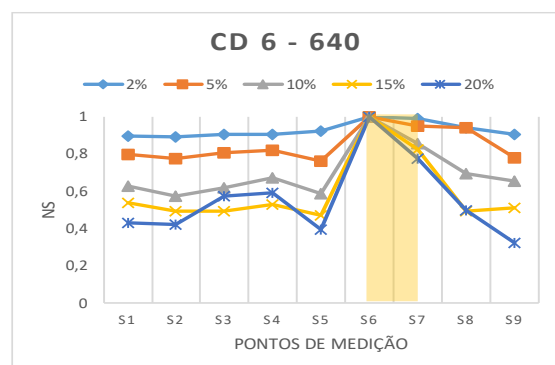
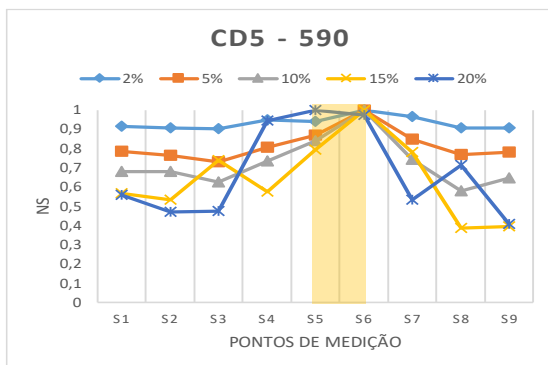
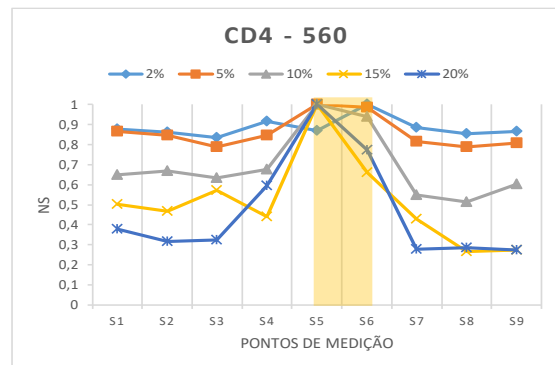
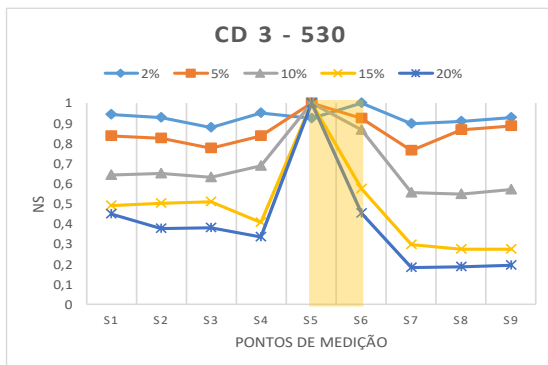
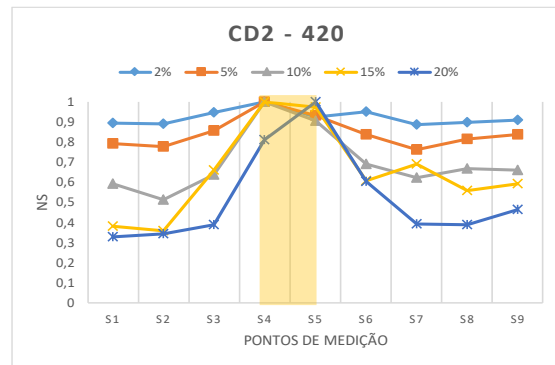
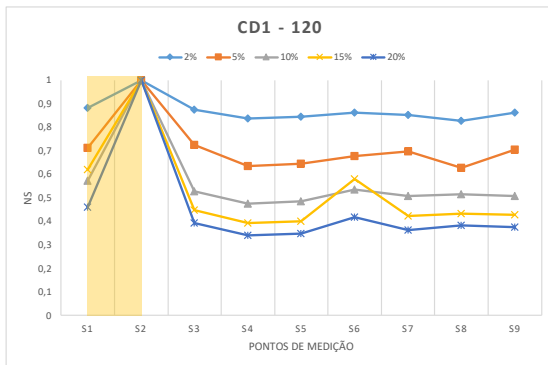


Figura A2.1- Gráficos correspondentes ao estudo do fator severidade para o elemento finito de viga

Influência do fator de severidade nos resultados do indicador Razão para os 9 casos de dano e para os 5 níveis de severidade estudados, para a simulação utilizando o elemento finito de casca.



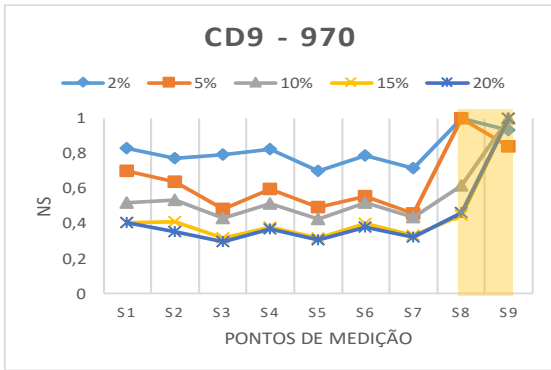
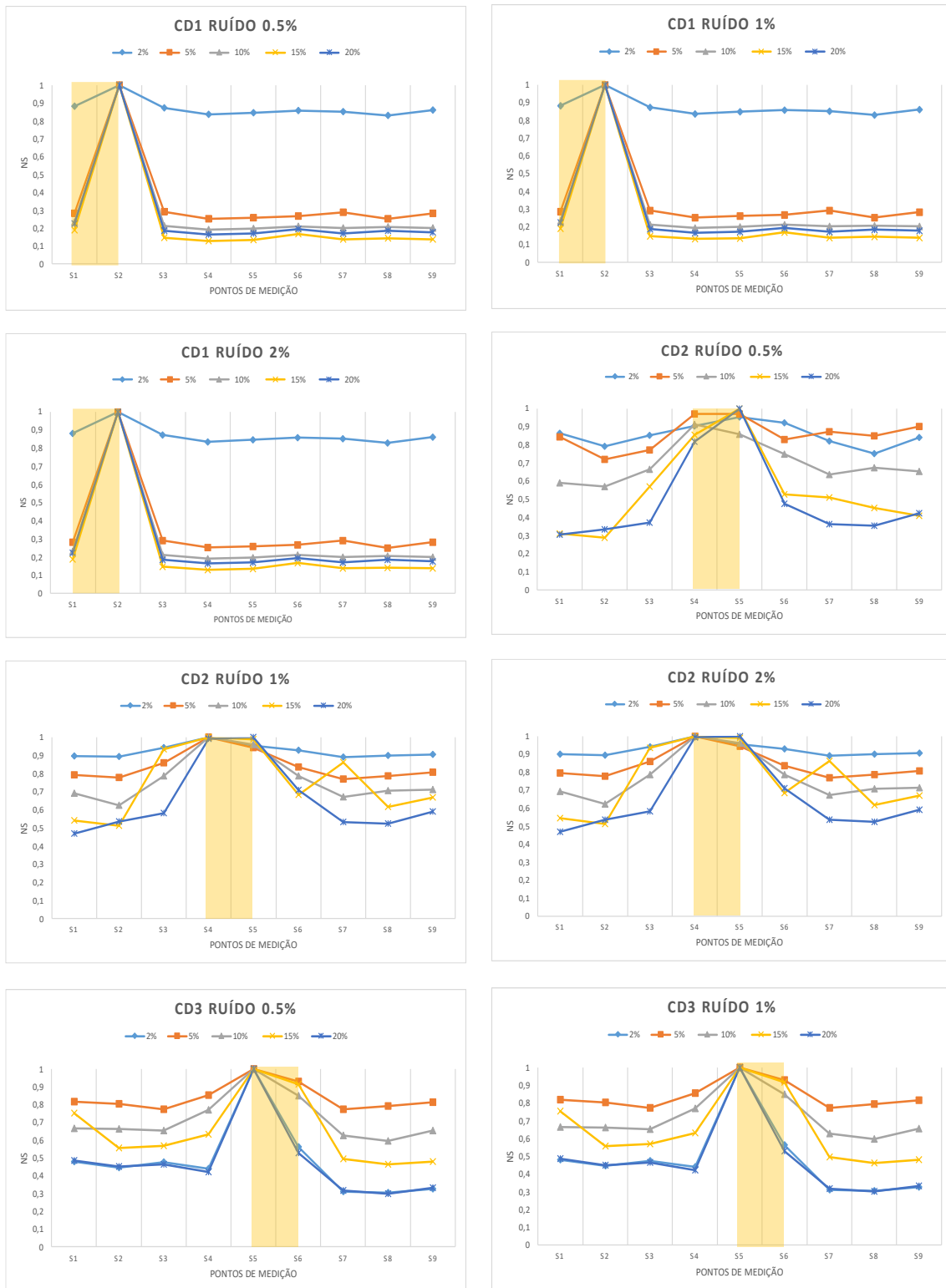
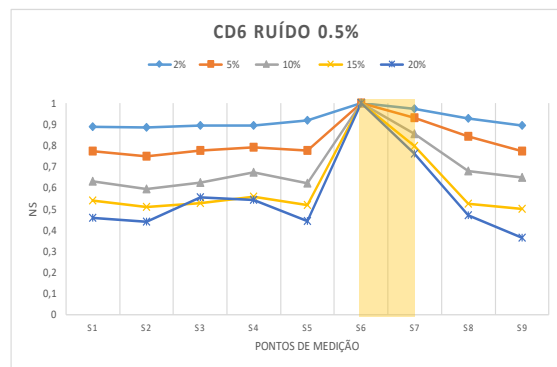
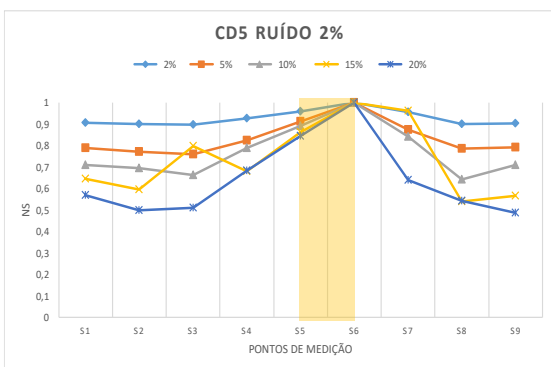
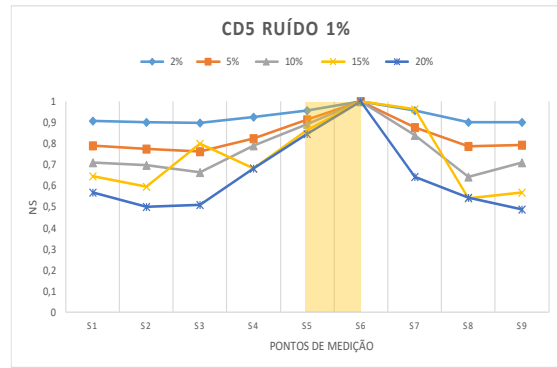
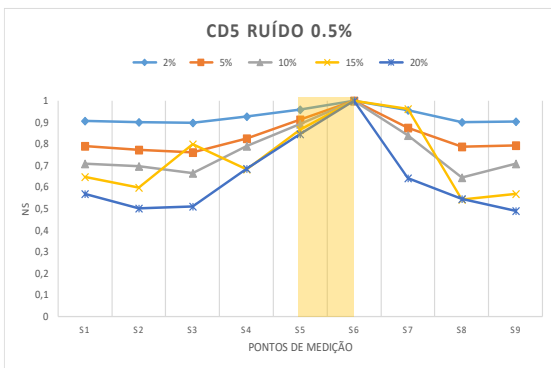
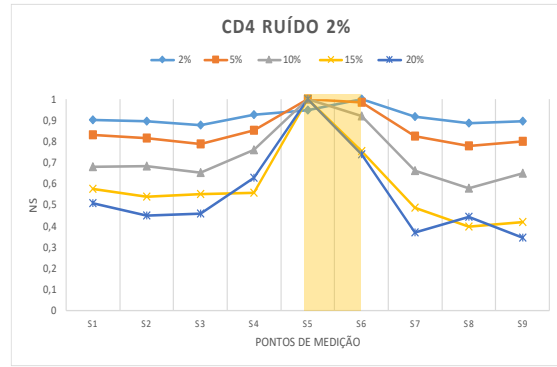
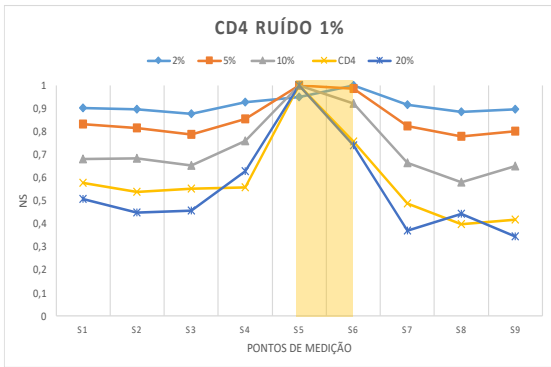
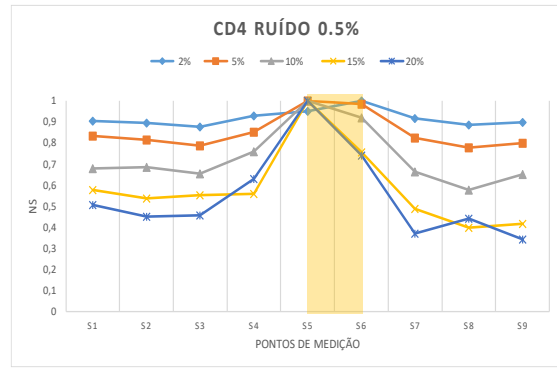
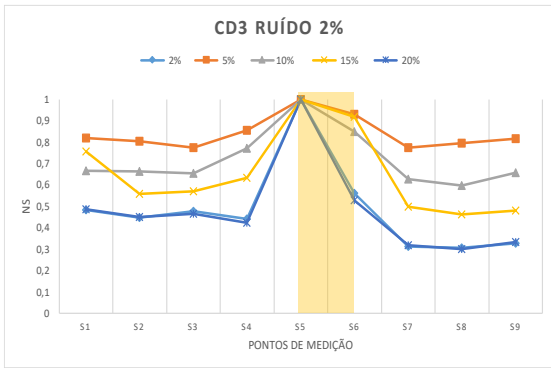


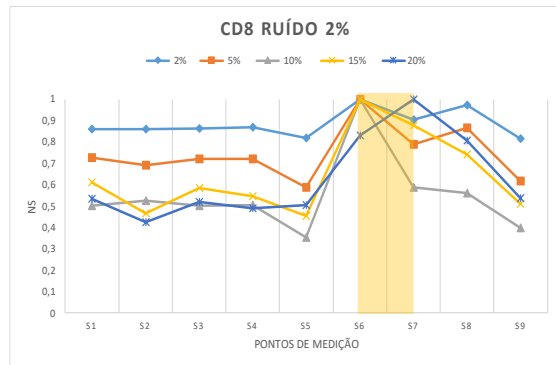
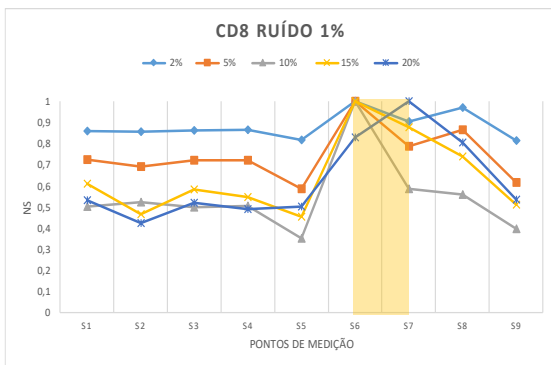
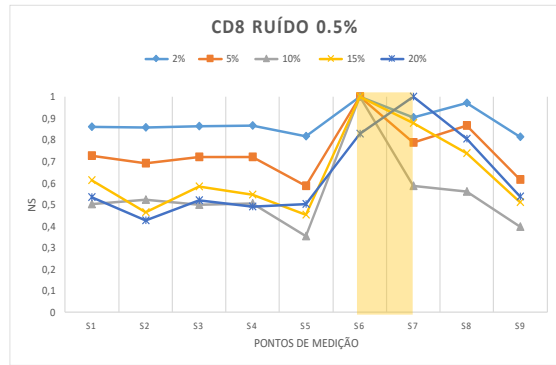
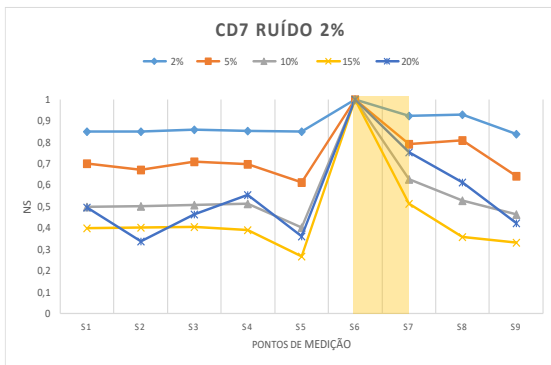
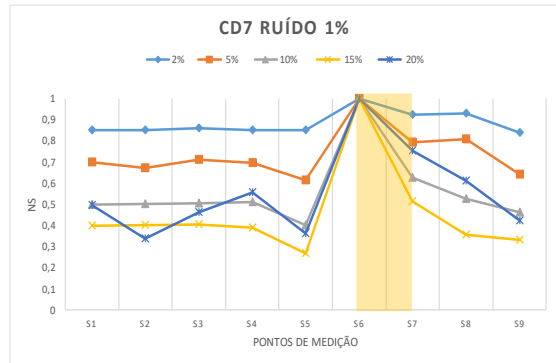
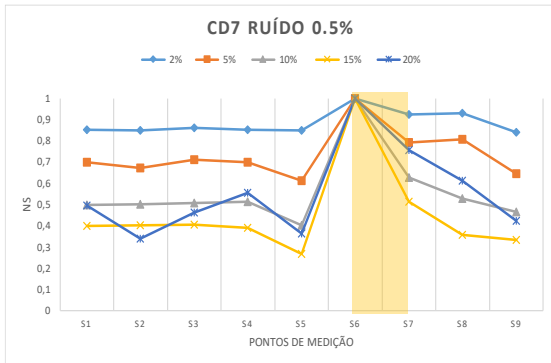
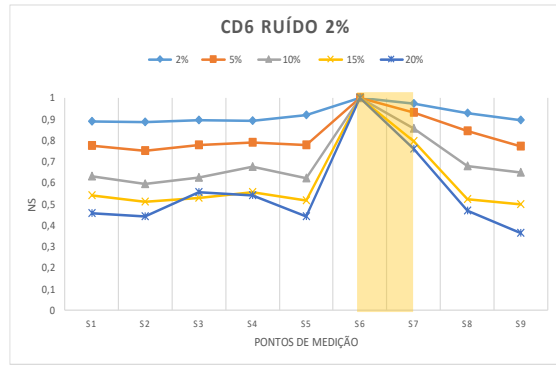
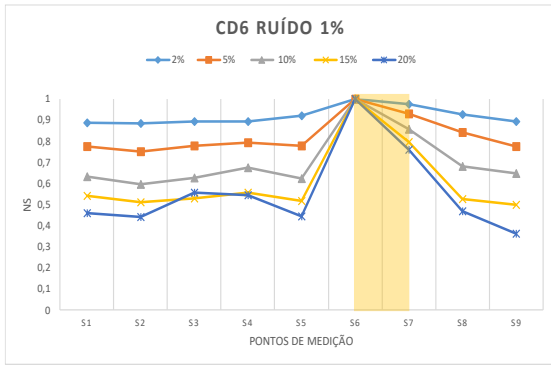
Figura A2.2 - Gráficos correspondentes ao estudo do fator severidade para o elemento finito de casca

## ANEXO A3

Influência da presença de ruído nos resultados do indicador Razão para os 9 casos de dano e para os 5 níveis de severidade estudados, para a simulação utilizando o elemento finito de viga.







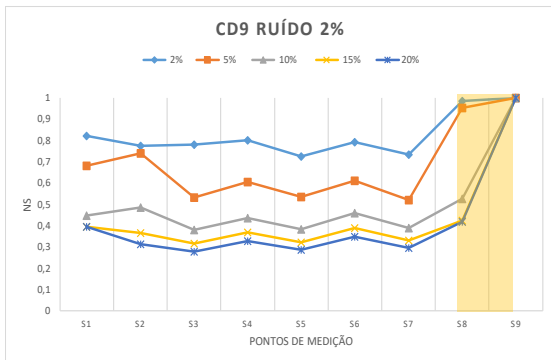
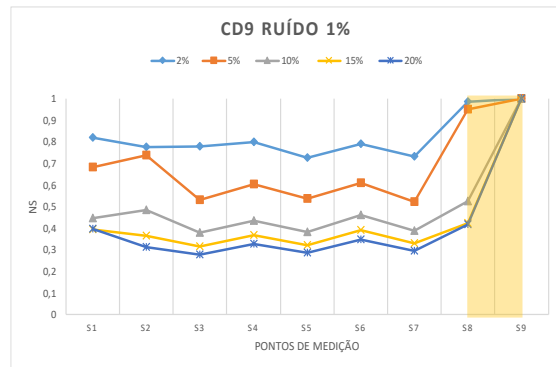
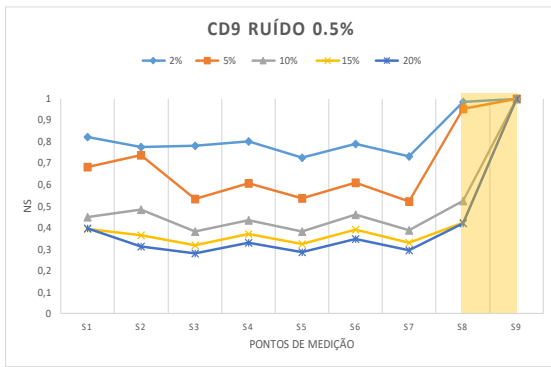
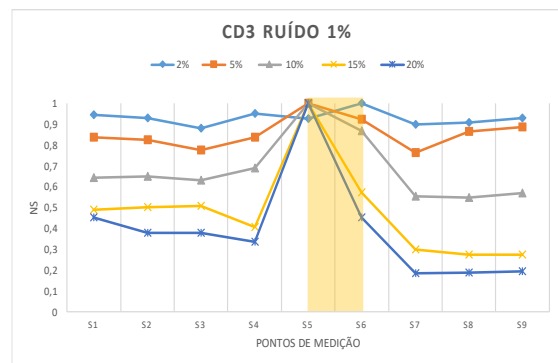
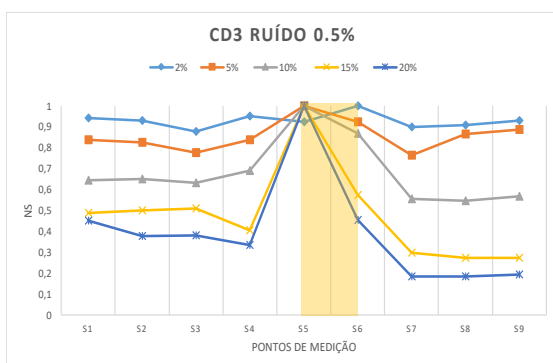
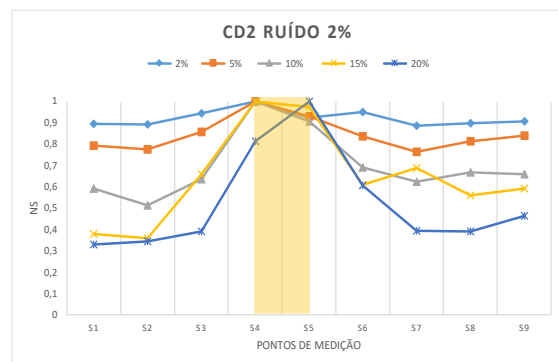
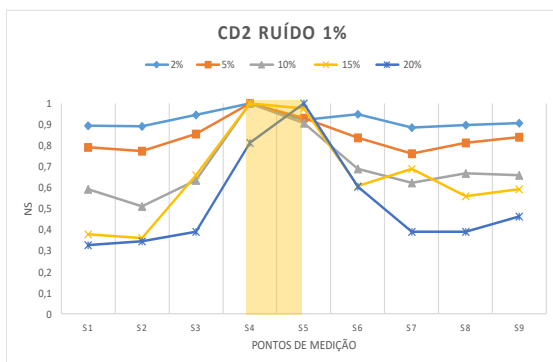
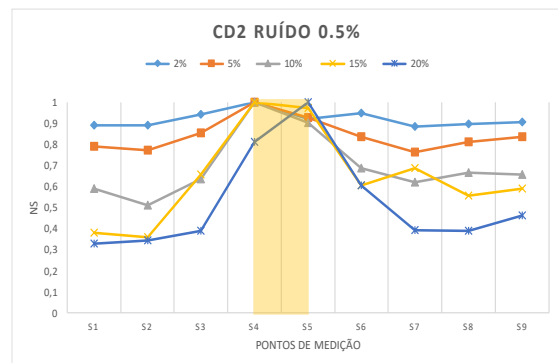
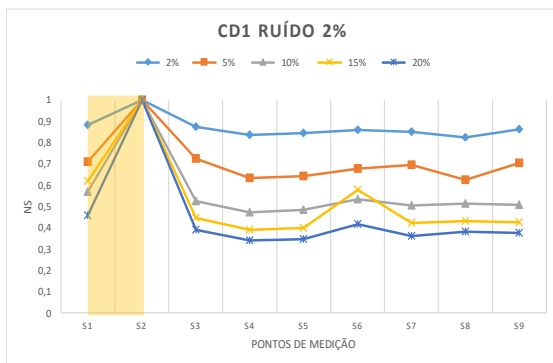
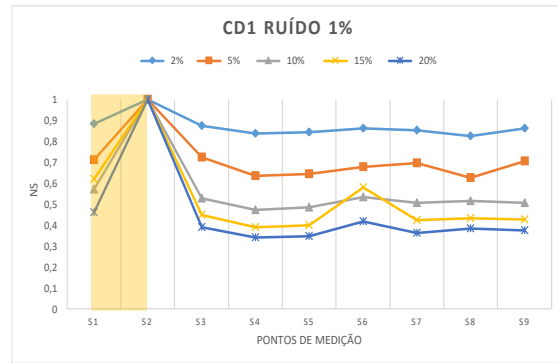
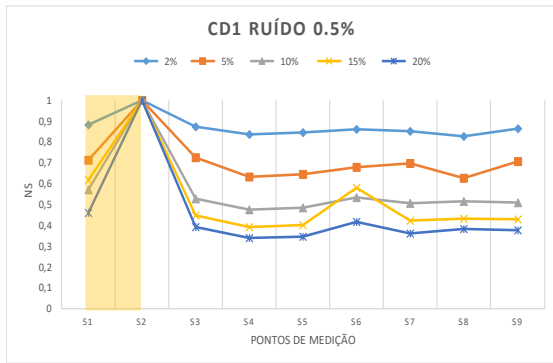
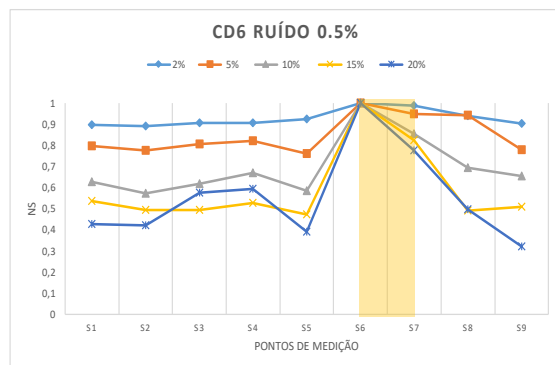
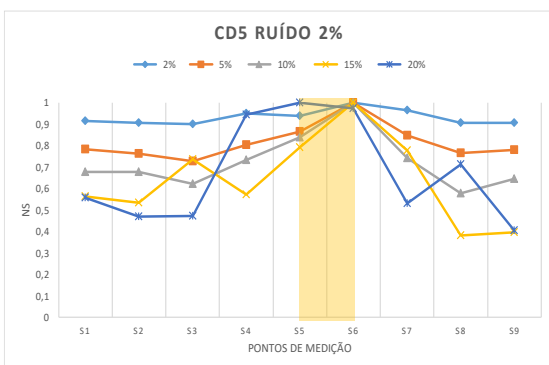
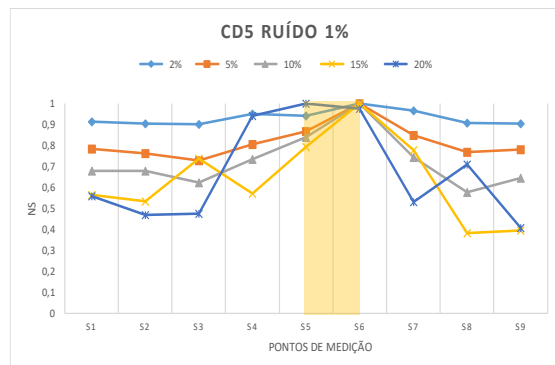
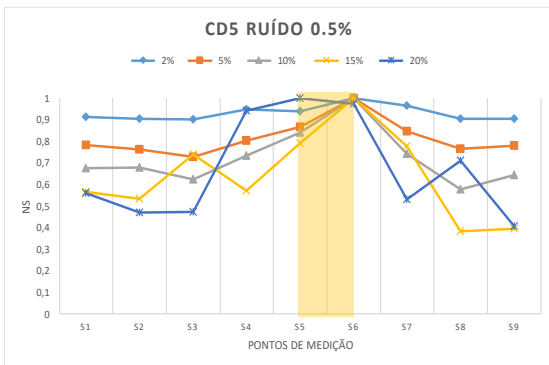
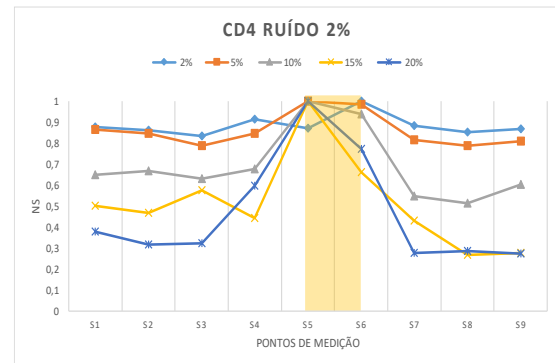
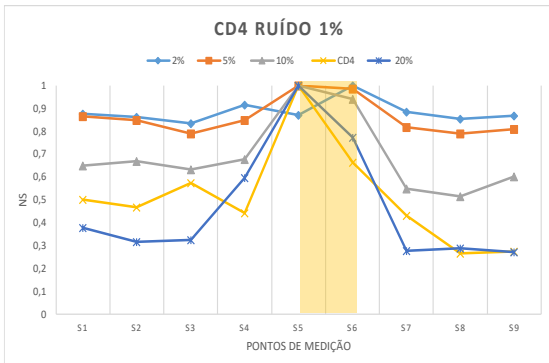
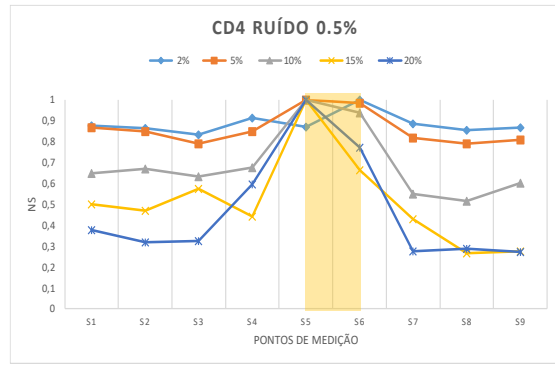
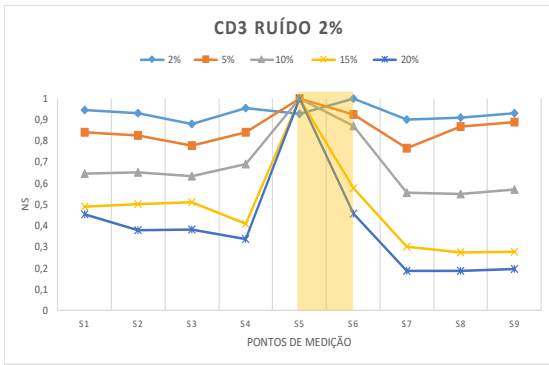
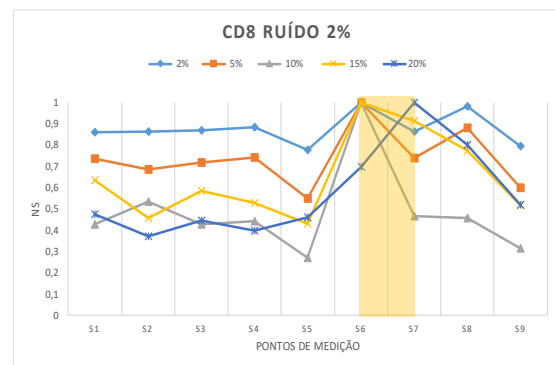
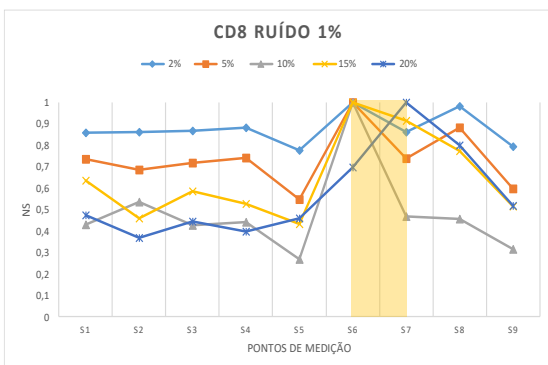
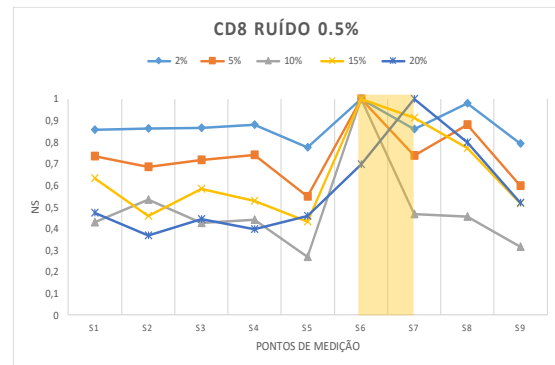
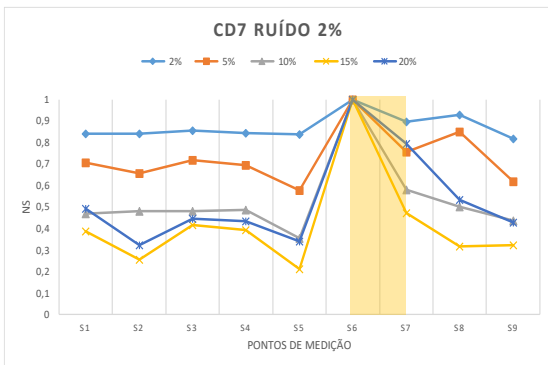
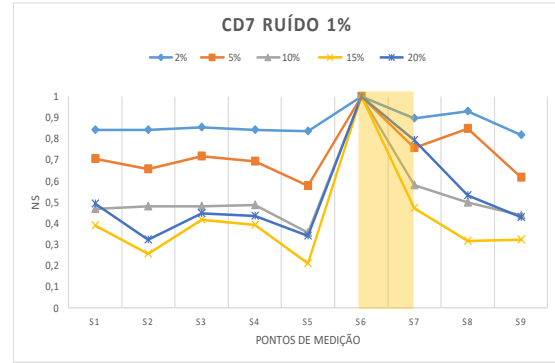
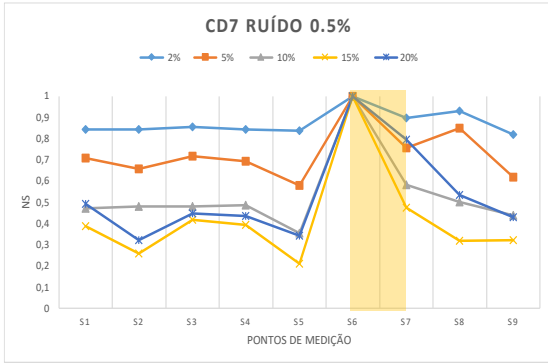
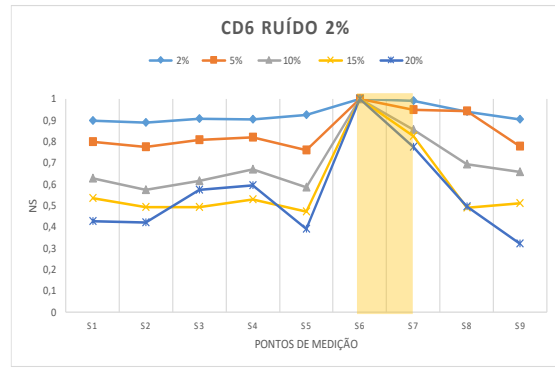
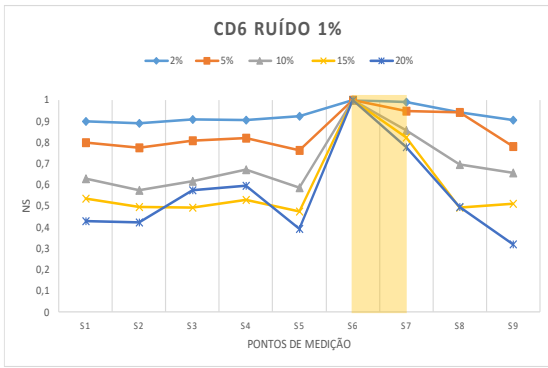


Figura A3.1 - Gráficos correspondentes ao estudo da presença de ruído para o elemento finito de viga

Influência da presença de ruído nos resultados do indicador Razão para os 9 casos de dano e para os 5 níveis de severidade estudados, para a simulação utilizando o elemento finito de casca.







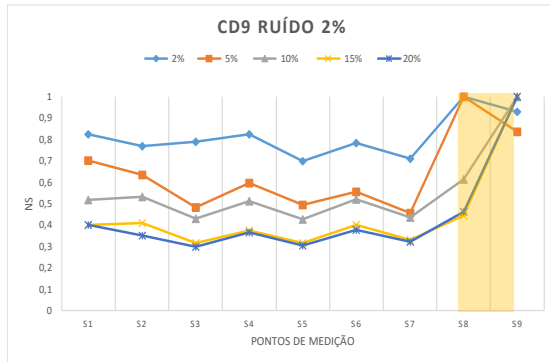
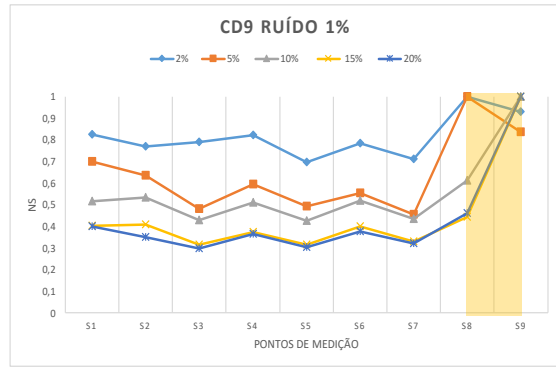
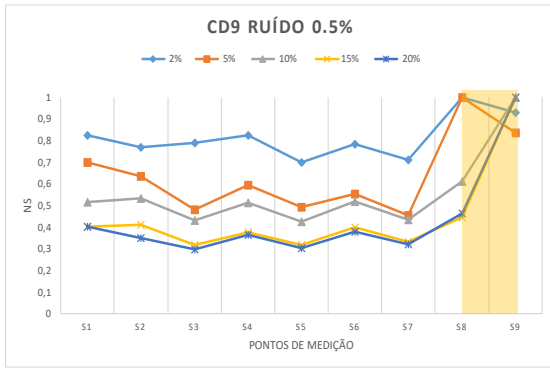


Figura A3.2 - Gráficos correspondentes ao estudo da presença de ruído para o elemento finito de casca



2023

Joana Filipa Cruz Ramos

Deteção de dano em estruturas tubulares utilizando Funções de Resposta em Frequência