



Tales Otávio Almeida da Carvalheira

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Identificação de dano com base na identificação de forças

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Tiago Alexandre Narciso da Silva, Professor Auxiliar
da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Doutora Marta Isabel Pimenta Verdete da Silva Carvalho,
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Doutor Hugo Filipe Diniz Policarpo, Professor Auxiliar Convidado
da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de
Lisboa

Vogal: Doutor Tiago Alexandre Narciso da Silva, Professor Auxiliar da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de
Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019

Identificação de dano com base na identificação de forças

Copyright © Tales Otávio Almeida da Carvalheira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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

Este trabalho foi redigido, respeitando o novo acordo ortográfico em vigor.

*Obrigado a todos e a minha
família por ter dado as
ferramentas para que pudesse
chegar onde cheguei*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer aos meus pais e a minha família, por todos os momentos que dedicaram à minha existência para que pudesse chegar ao momento em que cheguei. Todos os ensinamentos, momentos, experiências e vivências.

Em segundo lugar agradeço com um grande abraço a todos os meus amigos e colegas que suportaram e tornaram-se a minha nova família neste novo mundo repleto de incertezas. Agradeço todos os momentos que partilhamos juntos sejam eles bons ou maus. Não existe uma lista à qual posso basear os meus mais profundos agradecimentos. Foram imensos episódios vividos e algo que nunca esquecerei para toda a minha vida. Novamente um Profundo obrigado família.

Obrigado a todos os estabelecimentos de ensino que me educaram, mais precisamente a Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa. Tenho o meu profundo agradecimento por poderem tornar o meu sonho, em deixar meus pais orgulhosos em ser formado num curso que amo. Obrigado por todas as ajudas focalizadas no aluno, como os desafios lançados.

Um forte agradecimento ao meu orientador Tiago Silva pela orientação e atenção na escolha do meu tema de dissertação, e também por ter motivado a realizar a esta dissertação. São profissionais assim que permitiram-me chegar neste ponto.

RESUMO

Um dos campos de ação da engenharia estrutural é a identificação de dano. Esta vertente tem grande importância na sociedade, uma vez que através da capacidade de identificar e quantificar o dano é possível fazer uma melhor manutenção e controlo da condição das estruturas. A identificação de dano é conseguida com recurso a diversos métodos já desenvolvidos e a novos ainda em investigação.

Neste trabalho, a identificação de dano será abordada utilizando como base o método de identificação de forças. Este método usa o conceito de transmissibilidade de deslocamentos e é capaz de reconstruir cargas desconhecidas e quantificá-la como um dano. Esta área está pouco desenvolvida tanto teoricamente como experencialmente. O contributo deste trabalho nesta área passa essencialmente pela substituição dos convencionais sensores em contato com a estrutura por sensores não contato.

Com esta dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica é pretendido avaliar a metodologia que identifica o dano com base na identificação de forças já desenvolvido utilizando sensores não-contato nas estruturas de forma a permitir uma avaliação mais precisa do dano com o menor erro possível.

Tendo a identificação de forças já estudada, este método visa estudar o comportamento da excitação dinâmica de uma estrutura, com dados computacionais modelados e com a devida aplicação numérica, fazer a identificação da aplicação do dano e quantificá-lo. Serão utilizados sensores de triangulação a laser juntamente com os acelerómetros piezoelétricos, para validação.

Verificou-se que foi feita a localização da força, entretanto não foi possível reconstruir e quantificar o dano. Simultaneamente os sensores laser não foram viáveis para a localização da força sendo necessário utilizar os sensores piezoelétricos e continuando a pesquisa por outros sensores não contato.

PALAVRAS CHAVE

Identificação de dano, Identificação de forças, Sensores não contato, Sensores Laser, Sensores piezoelétricos, Transmissibilidade de deslocamentos, Quantificação de dano

ABSTRACT

One of the main fields in structural engineering is damage identification. Being crucial to the society, damage identification and quantification has a great importance in maintenance and condition monitoring of structures. With the possibility of identifying and quantifying the damage it is possible to make a better control of the condition of the structures and their behavior. Damage identification is achieved using a variety of methods already developed and new ones still under investigation.

In this work, damage identification will be approached using the force identification method. This method uses the concept of displacement transmissibility and is capable of reconstructing unknown loads and quantify it as damage. This area is underdeveloped both theoretically and experientially. The contribution of this work in this area is essentially the replacement of conventional sensors in contact with the structure by non-contact ones.

With this Master thesis in Mechanical Engineering, it is proposed the evaluation of the methodology that identifies the damage based on the force identification already developed using non-contact sensors in the structures to provide a more accurate evaluation of the damage with the smallest possible error.

With the present studies on force identification, this method aims not only to have a deeper understanding on the nature of a dynamic behavior of structures with computational and numerical data but also to identify and quantify damage. It will be used sensors with the laser triangulation method in the support of piezoelectric accelerometers for its validation

The localization of the force was verified. However, it was not possible to reconstruct and quantify the damage. Additionally, the laser sensors were not viable for the localization of the force being necessary to use the piezoelectric sensors and continue the search for another non-contact sensor compatible.

KEYWORDS

Damage identification, Force Identification, Non-contact Sensors, Laser Sensors, piezoelectric sensors, Displacement transmissibility, Damage Quantification

Índice

| | |
|---|-----|
| AGRADECIMENTOS | i |
| RESUMO | iii |
| ABSTRACT | v |
| Índice..... | vii |
| Índice de Figuras | ix |
| NOMENCLATURA | xi |
| Abreviaturas e variáveis | xi |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Abertura | 1 |
| 1.2 Motivação | 2 |
| 1.3 Enquadramento..... | 4 |
| 1.4 Revisão Bibliográfica | 4 |
| 1.5 Estrutura da dissertação e objetivos..... | 5 |
| 2 FUNDAMENTOS | 7 |
| 2.1 Introdução..... | 7 |
| 2.2 Fundamentos das vibrações mecânicas | 7 |
| 2.3.1 Noções Básicas..... | 7 |
| 2.3.2 Grau de Liberdade..... | 8 |
| 2.3.3 Transmissibilidade em 1 Grau de Liberdade..... | 11 |
| 2.3.4 Múltiplos Graus de Liberdade..... | 12 |
| 2.3.5 Modelo contínuo | 15 |
| 2.3.6 Tempo e Frequência..... | 15 |
| 2.4 Identificação de Dano | 17 |
| 2.4.1 Transmissibilidade de deslocamentos para Múltiplos Graus de Liberdade | 17 |
| 2.4.2 Identificação e Quantificação do Carregamento | 19 |
| 2.4.3 Aproximação do Método dos Elementos Finitos..... | 20 |
| 2.4.4 Identificação e quantificação do dano | 20 |
| 2.4.5 Formulação aplicada | 21 |
| 2.5 Sensores | 22 |
| 2.5.1 Piezoelétricos..... | 22 |
| 2.5.2 Indutivos | 23 |
| 2.5.3 Capacitivos | 24 |
| 2.5.4 Laser..... | 24 |
| 2.5.5 Outros..... | 25 |
| 3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 27 |
| 3.3 Introdução..... | 27 |
| 3.4 Metodologia Experimental | 27 |
| 3.5 Martelo Piezoelétrico..... | 28 |
| 3.6 Chassis NI..... | 29 |
| 3.7 Sensores | 29 |
| 3.8 Softwares..... | 29 |
| 3.8.1 Matlab..... | 30 |
| 3.8.2 Labview | 30 |
| 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO | 31 |
| 4.1 Procedimento Experimental | 31 |
| 4.2 Equipamento e esquema | 31 |
| 4.3 Softwares..... | 33 |
| 4.3.1 Matlab..... | 34 |
| 4.3.2 Labview | 35 |
| 4.4 Calibração do Sensor Laser..... | 36 |
| 4.5 Ensaio da aplicação do método e aquisição de dados | 37 |
| 4.5.1 Primeiro ensaio..... | 37 |
| 4.5.2 Segundo ensaio..... | 38 |
| 4.5.3 Terceiro ensaio | 40 |
| 4.6 Discussão de resultados | 40 |
| 5 CONCLUSÃO | 43 |
| 5.1 Conclusões do estudo..... | 43 |
| 5.2 Trabalhos futuros | 43 |

| | |
|-------------------|----|
| BIBLIOGRAFIA..... | 45 |
|-------------------|----|

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Alguns exemplos dos grandes feitos da engenharia mecânica. A esquerda - uma escavadeira de grandes dimensões [2]. À direita - o transporte de turbinas aplicadas na indústria aeronáutica [3]. ...1 | 1 |
| Figura 2 - Queda da Ponte Tacoma Narrows após estar sujeita a vários carregamentos dinâmicos por ação do vento [4] | 1 |
| Figura 3 - Principais aplicações da engenharia mecânica: (a) Mecânica estrutural [8]; (b) Termodinâmica e dinâmica dos fluidos [9]; (c) Produção industrial [10]..... | 2 |
| Figura 4 - Aplicação musical das vibrações mecânicas. Cossante a posição dos dedos na no pescoço da guitarra, irá reproduzir sons diferentes. Retirado de [13] | 3 |
| Figura 5 - Representação esquemática de um sistema com 1 grau de liberdade..... | 7 |
| Figura 6 - Exemplos de sistemas com Múltiplos graus de liberdade | 8 |
| Figura 7 - Representação gráfica dos tipos de amortecimentos adaptado de [7] | 9 |
| Figura 8 - Resposta (a) e fase (b) do sistema em função da frequência de excitação, adaptado de [7], baseado na equação (6)..... | 10 |
| Figura 9 - Representação das forças dinâmicas vectorialmente onde $r = \omega/\omega_n$ | 11 |
| Figura 10 - Esquema de 1 grau de liberdade com parede móvel | 11 |
| Figura 11 - Elemento viga com 6 graus de liberdade | 12 |
| Figura 12 - Representação dos modos naturais de vibração num sistema de 2 graus de liberdade. (a) primeiro modo, (b) segundo modo. Retirado de [18]..... | 14 |
| Figura 13 - Transformação entre o modelo espacial e modelo modal. Adaptado de [20]..... | 14 |
| Figura 14 - Alguns exemplos das expressões deduzidas pelas condições de fronteira de uma viga. Retirado de [12]..... | 15 |
| Figura 15 - Comparação de um sinal temporal com um sinal no domínio de frequências | 15 |
| Figura 16 - Exemplo de uma FRF da Receptância de uma viga em um nó específico reproduzida no Matlab. Conseguimos ver a presença de picos de ressonância (máximos) e anti-ressonância (mínimos) | 17 |
| Figura 17 - Representação dos conjuntos de coordenadas de uma estrutura. Retirado de [14]..... | 18 |
| Figura 18 - Esquema de uma viga dividida em 16 elementos (17 nós). Retirado de [18]..... | 20 |
| Figura 19 - Esquema do circuito interno num sensor piezoelétrico. Retirado de [28]..... | 23 |
| Figura 20 - Representação esquemática dos campos magnéticos criados em contato com as Eddy-currents do material alvo. Retirado de [20]..... | 23 |
| Figura 21 - Representação dos campos elétricos de um sensor capacitivo em contato com o alvo. Retirado de [21]..... | 24 |
| Figura 22 - Representação dos sensores laser pela triangulação. Retirado de [22]..... | 25 |
| Figura 23 - Representação do sensor confocal (esquerda) e esquematização de um sensor por ultrassons (direita). Retirados de [23] e [24]. | 26 |
| Figura 24 - Esquematização dos procedimentos a serem realizados na experiência. Adaptado de [18] .. | 27 |
| Figura 25 - Martelo piezoelétrico utilizado | 28 |
| Figura 26 - Chassis NI cDAQ-9172 com os módulos inseridos e seus respectivos equipamentos. Acelerômetros no módulo da esquerda e sensor laser no da direita | 29 |
| Figura 27 - Esquema de representação dos funcionamento dos inputs/outputs do software Matlab..... | 30 |
| Figura 28 - Representação de um esquema de uma viga dividida em 16 elementos (17 nós) e a aplicação da força de excitação pelo martelo piezoelétrico. Adaptado de [18]..... | 31 |
| Figura 29 - Posicionamento do sensor Laser face a estrutura para ser ensaiada..... | 31 |
| Figura 30 - Configuração do sensor laser no chassis..... | 32 |
| Figura 31 - Representação dos nós e elementos na estrutura e localização do dano..... | 33 |
| Figura 32 - Dimensões em milímetros da viga e representação da direção das forças aplicadas ea direção (laranja) da aplicação das forças | 33 |
| Figura 33 - Exemplo de uma FRF Obtida Pela Receptância computacional da estrutura | 34 |
| Figura 34 - Inputs dos dados experimentais dos acelerômetros obtidos pelo LabView. Magnitude/Frequência..... | 35 |
| Figura 35 - Esquema do Block diagram do LabView utilizado | 35 |
| Figura 36 - Parâmetros utilizados para aquisição dos dados via LabView | 36 |
| Figura 37 - Procedimento para a calibração do Sensor Laser | 36 |
| Figura 38 - Calibração feita por regressão linear. Voltagem/Distância. Teste realizado com vários ensaios do sensor laser com distâncias conhecidas. equação na direita que foi aplicada para fazer a transformação do sinal em volts para centímetros | 37 |
| Figura 39 - Esquema da primeira configuração..... | 37 |
| Figura 40 - Resposta obtida pelo sensor Laser..... | 38 |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 41 - Resposta obtida pelo acelerometro a esquerda na Figura 39</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 42 – Esquema da segunda configuração.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 43 - Grafico dos erros da comparação dos valores experientnais vindos do LabView com os valores modelados computacionalmente no Matlab.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 44 – Esquema da terceira configuração</i> | <i>40</i> |

NOMENCLATURA

Abreviaturas e variáveis

| | |
|--------------------------------------|--|
| GDL | Grau de liberdade |
| A | Área de secção de uma viga |
| α | Acelerância |
| β | Constante de proporcionalidade associada à matriz de massas. |
| c | Constante de amortecimento |
| c_c | Valor do amortecimento crítico de um sistema |
| C | Matriz de amortecimento |
| δ | Constante de proporcionalidade associada à matriz de rigidez |
| Δ | Matriz das alterações dinâmicas devido ao dano no sistema |
| $DEMI$ | Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial |
| ξ | Fator de amortecimento |
| E | Modulo de Young do material |
| f | Carga dinâmica aplicada no sistema |
| F | Amplitude da carga dinâmica aplicada no sistema |
| f_D | Carga dinâmica resultante do efeito do dano no sistema |
| F_D | Amplitude da carga dinâmica resultante do efeito do dano no sistema |
| ϕ | Angulo de fase |
| FRF | Função de Resposta em Frequência |
| γ | Mobilidade |
| H | Receptancia |
| i | Número imaginário |
| k | Rigidez mecânica |
| k_{eq} | Rigidez equivalente de um sistema mecânico |
| K | Matriz de rigidez |
| K_{BEAM} | Matriz de rigidez de um elemento pelo método dos elementos finitos |
| K^{global} | Matriz de rigidez global de um sistema pelo método dos elementos finitos |
| L | Comprimento de uma viga |
| m | Massa de um sistema |
| m_{eq} | Massa equivalente de um sistema |
| M | Matriz das massas de um sistema |
| M_{BEAM} | Matriz das massas de um elemento pelo método dos elementos finitos |
| M^{global} | Matriz das massas global de um sistema pelo método dos elementos finitos |
| MEF | Método dos elementos finitos |
| $MGDL$ | Múltiplos graus de liberdade |
| $m_{\Delta}, c_{\Delta}, k_{\Delta}$ | Propriedades dinâmicas associadas ao dano |
| N | Número de elementos de um sistema pelo método dos elementos finitos |

| | |
|----------------------|---|
| NI | National Instruments |
| ψ | Modo de vibração |
| Q | Matriz das propriedades dinâmicas dos deslocamentos para determinação do dano |
| r | Razão da frequência de excitação com a frequência natural do sistema |
| ρ | Densidade do material utilizado |
| t | Instante temporal |
| TR | Transmissibilidade em IGDL |
| $T_{UK}^{(d)A}$ | Matriz de transmissibilidade associada aos deslocamentos U para K pelo carregamento A |
| T_{LG} | Matriz mudança de coordenadas |
| θ | Grandeza angular |
| θ_i, θ_j | Componentes angular nos nós no MEF |
| $u_i, u_j; v_i, v_j$ | Componentes de deslocamento nos nós no MEF |
| VI | Virtual Instrument |
| ω_a | Frequência amortecida de um sistema |
| ω_n | Frequência natural de um sistema |
| ω_n | Frequência natural de um sistema |
| ω_f | Frequência de excitação de um sistema |
| x, y | Função deslocamento |
| x_h, x_p | Funções soluções homogénea e particular |
| \dot{x}, \ddot{x} | Velocidade e aceleração |
| X, Y | Amplitude da função deslocamento |
| X_h, Y_p | Amplitudes das funções soluções homogénea e particular |
| Y, \tilde{Y} | Deslocamentos referentes a componente teórica e experimental |
| y_Δ, Y_Δ | Deslocamentos resultantes do efeito do dano |
| Z | Matriz da rigidez dinâmica do sistema |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Abertura

Na sociedade atual, a civilização fez grandiosos avanços tecnológicos desde os tempos primitivos. Uma importante área de desenvolvimento científico presente desde as primeiras invenções é a engenharia, mais precisamente a engenharia mecânica. É o ramo da engenharia que lida com o projeto, construção e uso de máquinas. Atualmente é possível ver a sua aplicação em diversas áreas com diferentes formas, como na Figura 1.

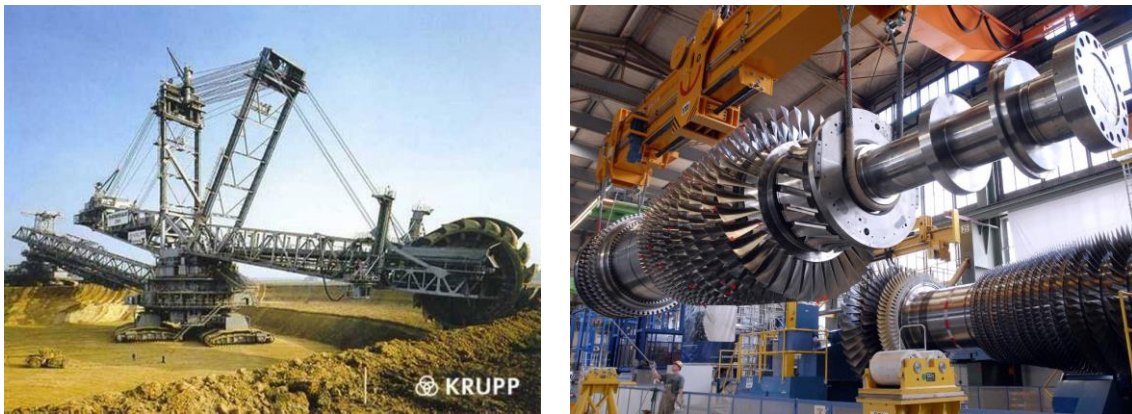


Figura 1 - Alguns exemplos dos grandes feitos da engenharia mecânica. A esquerda - uma escavadeira de grandes dimensões [2]. À direita - o transporte de turbinas aplicadas na indústria aeronáutica [3].

Contudo, diante de vários avanços científicos é comum existir diversas falhas e erros, pois a natureza não é perfeitamente previsível, causando assim o aparecimento de defeitos no projeto ou falhas provenientes de fatores exteriores desconhecidos. Estes fenômenos podem causar consequências catastróficas quando se trata de grandes obras e construções que garantem a segurança de várias pessoas. Um exemplo notável seria a queda da ponte Tacoma Narrows em 1940 em Washington na Figura 2. É de prioridade máxima evitar que catástrofes dessas ocorram e com isso deve-se assegurar da melhor qualidade possível de todos os projetos realizados e anular o maior número de falhas [1].



Figura 2 - Queda da Ponte Tacoma Narrows após estar sujeita a vários carregamentos dinâmicos por ação do vento [4]

De forma a solucionar estes problemas, é necessário um grande investimento e esforço para reduzir estas consequências catastróficas. De forma eficiente e metódica, é possível resolver esse problema. Foi adaptada uma área do controlo de condição e monitoramento de equipamentos e saúde das estruturas [1]. Esta área foca-se na aplicação de metodologias e boas praticas que podem não só expor a localização dos erros como também repará-los, tudo isto de uma forma eficaz e de custo reduzido. Tendo em conta as diferentes aplicações que a engenharia tem, foram desenvolvidos vários métodos focalizados a cada aplicação. Mesmo sendo diferentes uns dos outros, a sua teoria base é sempre a mesma (Controlo de condição de sistemas mecânicos), a deteção dos defeitos e possível reparo. [5], [6].

1.2 Motivação

A engenharia Mecânica desenvolveu-se juntamente com as primeiras evoluções tecnológicas da história da humanidade. Os primeiros trabalhos criados de construção e realização de tarefas como a agricultura, arquitetura e projetos militares foram desenvolvidos juntamente com a engenharia. Povos que deram o início aos grandes estudos desta temática localizavam-se na Babilonia, Assíria, Egito e a Grécia. - Todos estes desenvolvimentos ocorreram cerca de mil anos antes de cristo. [7].

Foi graças a este desenvolvimento inicial que a engenharia evoluiu juntamente com a capacidade mental dos humanos e suas necessidades. Atualmente a influência da engenharia está presente em todas as invenções humanas. Na engenharia mecânica esta aplicação varia desde estudos estruturais, como transformações energéticas e comportamento mecânico dos materiais (Figura 3).



(a)



(b)



(c)

Figura 3 - Principais aplicações da engenharia mecânica: (a) Mecânica estrutural [8]; (b) Termodinâmica e dinâmica dos fluidos [9]; (c) Produção industrial [10]

É de importância desde documento focar no comportamento estrutural das construções, comportamento estático e dinâmico. Este ramo trata-se da Mecânica Estrutural.

A Mecânica Estrutural é uma área especializada em estudar o comportamento físico de estruturas mecânicas. Foram desenvolvidos temas de estudos como o comportamento dinâmico de estruturas, funcionamento de sistemas mecânicos, otimização estrutural e análise modal [11].

Focando-se mais nas áreas de análise modal e controlo de sistemas mecânicos é possível atingir estudos focados nas metodologias de deteção e identificação de danos nas estruturas, que é do interesse do estudo deste documento. O principal ingrediente para todos estes estudos são as vibrações.

A primeira utilização das vibrações registada pelo ser humano provem desde os anos 4000 A.C., referentes aos primeiros instrumentos musicais. Desde então foram feitos estudos referente apenas ao ramo musical. Os primeiros estudos foram realizados apenas na área musical, sendo estudado por filósofos gregos, entre eles, Pitágoras. Só no século XVI, Galileu Galilei estudou com finalidade científica os movimentos harmónicos e vibratório dos objetos (Figura 4), desbloqueando novas possibilidades para a engenharia mecânica [12]. Desde então diversos estudos foram realizados por outras importantes figuras até a atualidade. Em muitas análises estruturais, as metodologias base utilizada são provenientes dos conceitos de vibrações mecânicas [7].

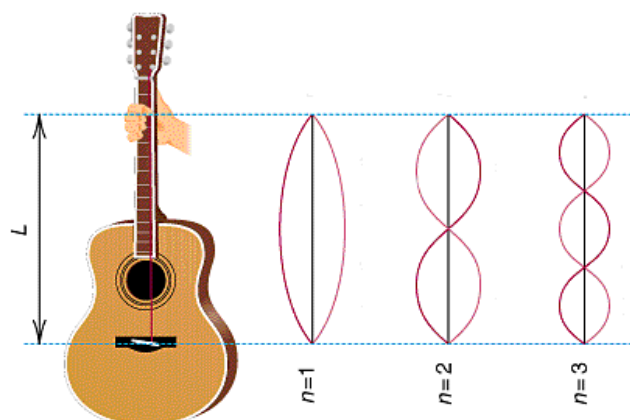


Figura 4 - Aplicação musical das vibrações mecânicas. Coadjuvando a posição dos dedos no pescoço da guitarra, irá reproduzir sons diferentes. Retirado de [13]

Nos dias de hoje as vibrações estão num nível de estudo que são utilizadas como ferramentas diárias como também importantes ferramentas em grandes indústrias. As vibrações podem ser utilizadas como um ensaio não destrutivo para a análise de defeitos ou falhas em produtos ou estruturas [1]. Um bom exemplo desta utilização seria a deteção de defeitos por ultrassons, onde procura-se identificar alguma anomalia pela forma como é propagado os ultrassons no material em análise. As ecografias em gravidas baseia-se no mesmo princípio das vibrações [14], onde é possível visualizar o interior da barriga por meio de ultrassons para reproduzir uma imagem do interior, sendo um processo que não é químico nem prejudicial ao feto.

Com o domínio desta área conseguimos prever diversos comportamentos físicos de estruturas apenas pelo seu estudo mecânico, podendo fazer comparações com modelos teóricos e experimentais para retirar conclusões sobre o comportamento de uma estrutura. Ainda assim é uma área de constante desenvolvimento e com a evolução tecnológica, é possível a aplicação de novos métodos que não eram

possíveis. Esta dissertação estuda a identificação e quantificação de dano em estruturas pela comparação do método computacional e experimental.

1.3 Enquadramento

A aplicabilidade da mecânica estrutural nos dias de hoje e na indústria é baseada em vários objetivos:

1. Dimensionamento de uma estrutura, tendo em conta diversos carregamentos e comportamentos admissíveis;
2. Otimização de uma estrutura de forma a que, com menos recursos possíveis, atinja o comportamento desejado;
3. Previsão de determinados comportamentos estáticos e dinâmicos de forma a adaptação e evitar diversas falhas;

Tendo em conta o ponto 3, é possível aprofundar a investigação dando encontro à análise e condição de sistemas mecânicos [1] Estudando os comportamentos das estruturas e aplicando as diversas metodologias desenvolvidas, é possível obter resultados interessantes relativamente às suas propriedades. A principal utilização desta metodologia nas indústrias é pelas vibrações, ou seja, na aplicação de vibrações em equipamentos industriais para fazer o devido acompanhamento, no conhecimento de falhas ou funcionamento não previsto.

A área das vibrações mecânicas contém uma vertente muito focada nas análises de sinais e funções de resposta em frequências para diversas identificações e previsões de uma estrutura. Acontece que nem sempre existe esta facilidade dessa identificação e representação das anomalias ou do interior. Nem todas as estruturas permitem com exatidão as propagações dos ultrassons ou podem estar instalados de tais formas que não é possível a sua desmontagem num equipamento que não pode parar seu funcionamento. Diante de muitas técnicas desenvolvidas é curioso e de interesse poder identificar estes problemas de uma forma simples, eficaz e rápida e sem a necessidade de haver contato com a estrutura. Esta dissertação irá avaliar o procedimento de identificação de dano pela identificação de forças e aprimorá-lo para no futuro poder ser utilizado.

1.4 Revisão Bibliográfica

Analisando com mais detalhe a área das vibrações, é possível estudar o comportamento dinâmico de uma estrutura e sua resposta, assim possibilitando novos estudos. Por exemplo em [15], [16] e [17] já foi possível a identificação de forças desconhecidas atuadas numa estrutura, sendo importante compreender a existência de uma carga desconhecida, podendo destabilizar e impedir o correto funcionamento do equipamento. Em [18], sendo um próximo passo face as referências anteriores, é possível poder identificar um dano numa estrutura assumindo que este seja manifestado por uma força fictícia com a tentativa de não usar sensores de contato com a estrutura. Todos estes estudos baseiam-se nas vibrações mecânicas, na aplicação experimental de vibrações em estruturas com dano, na extração dos seus modos de vibração, na modelação computacional e comparação dos valores obtidos pelas aplicações de metodologias identificadoras de forças e danos.

Diante estes desafios métodos foram desenvolvidas novas abordagens que pudessem superar a falta de investigação da área. Foi estudado na dissertação [19] ao pormenor o método de identificação de forças e a tentativa da implementação de um sensor não contato, por efeito de hall, onde não teve sucesso e como alternativa serão utilizados sensores piezoelétricos onde necessita o contato com a estrutura. Pretende-se utilizar as recomendações deste e de outros trabalhos futuros na seleção de outros sensores (Capítulo 2.5).

1.5 Estrutura da dissertação e objetivos

Esta dissertação aponta verificare otimizar o método da identificação de dano de forma mais eficaz e pratico face às metodologias já desenvolvidas. Irá ser estudado e implementado no estudo desta dissertação as base no controlo de condição, as bases dos fundamentos de vibrações (Capítulo 2), as metodologias de identificação de forças já estudadas em [15], [16] e [17], os fundamentos estudados em [18] para quantificação de dano pelas forças identificadas e, por fim, a aplicação de sensores não contato segundo [19].

Tendo em conta todos as bases recolhidas, é possível assinalar problemas existentes e definir métodos e objetivos a atingir de forma a realizar um método ainda mais eficaz e direto:

Verificar a metodologia da identificação e quantificação de dano, se possível, otimizando o seu processo: Ira ser utilizado o método da identificação de dano tendo em base a identificação de forças. Segundo [18] notou-se que para níveis de ruído superiores a 1%, o método tinha chances de falhar. Irá ser informado e tratado possíveis métodos para evitar este erro. Acredita-se que uma modificação e filtração de sinais ou um devido procedimento experimental possa neutralizar esse inconveniente.

Substituição de sensores piezoelétricos (acelerómetros) por sensores Laser: A procura de sensores que possam fazer a medição do deslocamento não necessitando o contato direto com a estrutura. Numa pesquisa na internet ([20]-[24]) a procura de sensores onde foram identificados possíveis tipos que poderão ser aplicados ao método. Eles serão explicados com mais detalhe no capítulo 2.5. Esta troca trará vantagens significativas nos métodos experimentais futuros nas áreas das vibrações, pois os sensores piezoelétricos necessitando do contato direto condiciona a massa da estrutura, podendo resultar em cálculos mais complexos ou até impossíveis de realizar (no caso de estruturas laminares ou leves). Com a utilização de sensores não contato este não será mais um problema, abrindo uma nova margem na investigação experimental.

Tendo os objetivos organizados, esta dissertação procura desenvolver um procedimento, aplicável por qualquer técnico com finalidades industriais ou até por outra pessoa. Acredita-se que com uma devida revisão dos passos de aplicação do método, uma tarefa de grande complexidade matemática/física/computacional pode ser simplificada numa “caixa negra” de pequenas dimensões e com instruções simples e praticas, identificar os danos e alterações estruturais, ou sua amplitude.

2 FUNDAMENTOS

2.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado os fundamentos das vibrações mecânicas, as metodologias estudadas para identificação do dano e funcionamento dos sensores candidatos para aplicação no estudo.

2.2 Fundamentos das vibrações mecânicas

Para o entendimento completo dos métodos a utilizar nesta dissertação, serão apresentados os conceitos bases de vibrações em que irão se basear. Neste capítulo irá ser revisto o comportamento de uma estrutura com um movimento vibratório harmônico, em 1 grau de liberdade (GDL) e em múltiplos GDL. Todos os conceitos neste capítulo são baseados em [12] e [19].

Uma vibração mecânica é o fenômeno onde um ponto oscila em torno de um ponto de equilíbrio, realizando esta oscilação de forma periódica ou não. No caso de estudo, serão analisadas as vibrações com períodos harmônicos, ou seja, com trajetórias temporais harmônicas. Este movimento só é possível com restituidores como uma mola e com inércia. Uma vibração mecânica harmônica pode ser descrita por uma função que contenha uma amplitude, uma frequência e um ângulo de fase. Estas são os temas base para a análise de modelação de sinais.

2.3.1 Noções Básicas

Qualquer sistema pode ser simplificado num esquema em 1GDL. Qualquer sistema possui uma massa, um amortecimento e uma rigidez associada ao movimento descrito. A massa atua no sistema em forma de forças de inercia. Também é responsável por armazenamento de energia do sistema. O amortecedor é um elemento dissipativo de energia, atuando em função da velocidade. As molas resultam da rigidez do sistema, sendo um elemento que fornece forças de restituição, acumulando energia potencial. Para poder deduzir os valores dos elementos de rigidez para um sistema onde não é direta a sua determinação recorre-se a uma derivação a energia interna em ordem ao tempo (energia cinética relacionada com a massa, energia dissipada relacionada com o amortecimento, energia potencial relacionada com as molas).

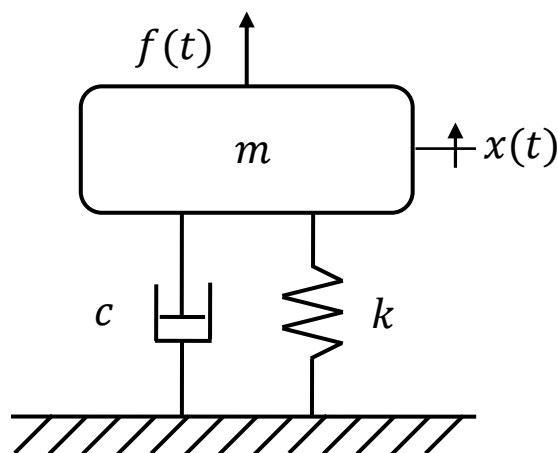


Figura 5 - Representação esquemática de um sistema com 1 grau de liberdade

A Figura 5 representa um sistema em 1GDL. O grau de liberdade representa o número de posições independentes que o sistema pode tomar. Por vezes existe a necessidade de simplificar um sistema complexo para um de 1GDL para ser feita uma análise mais simples. Numa dimensão mais detalhada, os sistemas podem apresentar comportamentos muito mais complexos sendo necessário o auxílio de MGDL (como apresentado na Figura 6) ou até o modelo contínuo (Capítulo 2.3.4 e 2.3.5).

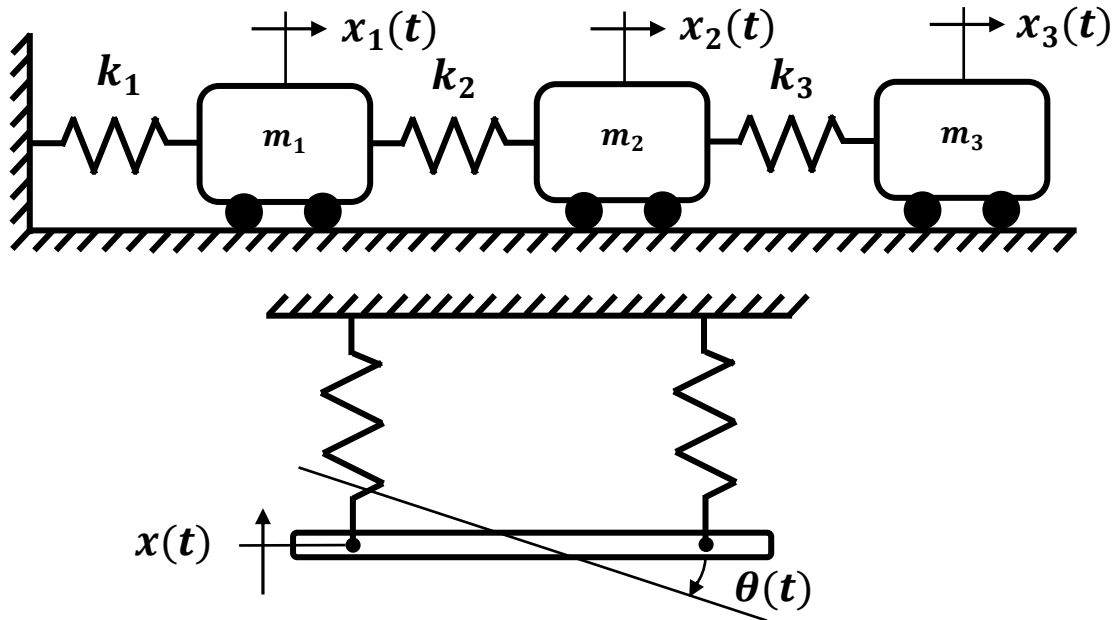


Figura 6 - Exemplos de sistemas com Múltiplos graus de liberdade

Na trajetória harmónica existem 2 tipos regimes de vibração: livre e forçado. No regime livre temos o sistema que foi destabilizado por um carregamento onde depois de um tempo o sistema encontra-se em repouso. No regime forçado o sistema está constantemente a realizar a mesma trajetória por um carregamento. Estas respostas tanto podem ser representadas num domínio temporal ou num domínio de frequências.

2.3.2 Grau de Liberdade

A noção de Grau de liberdade é o número de coordenadas em que o sistema pode variar sua posição de forma independente. Irá ser explicado em primeira instância o sistema de 1GDL.

Representado na Figura 5 temos uma massa (m) apoiada por uma mola (k) e um amortecedor (c) fixos, sendo sujeitada por uma força (f) onde é analisada a sua trajetória na coordenada (x). Qualquer corpo contém características internas relacionadas com a sua massa, amortecimento e rigidez, sendo possível simplificar o seu comportamento dinâmico para 1GDL.

Nesta situação é possível representar uma equação do equilíbrio dinâmico. Será feita a análise no regime forçado pois esta dissertação estuda o comportamento apenas neste regime:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \quad (1)$$

onde m , c e k representam a massa, o amortecimento e a rigidez equivalente da estrutura associada ao deslocamento x . f representa valor da força que varia com o tempo de forma harmónica. \dot{x} e \ddot{x} representam

a velocidade e a aceleração representadas como a primeira e segunda derivadas. Neste caso o valor de f representará um carregamento harmónico dada pela seguinte expressão:

$$f(t) = F \cos(\omega_f t) \quad (2)$$

onde $f(t)$ representa a variação da força em função do tempo, t o instante temporal, F representa a amplitude do movimento harmónico e ω_f representa a frequência harmónica.

Diante a equação diferenciável (1) é possível descobrir a solução de x tendo uma solução homogénea e uma solução particular. A solução homogénea representa a vibração livre do sistema quando não existe uma força harmónica aplicada enquanto a particular representa a vibração forçada quando a força atua no sistema. As suas soluções são dadas por:

$$x = x_h + x_p \quad (3)$$

$$x = X_h e^{-\xi \omega_n t} \cos(\omega_a - \phi_1) + X_p \cos(\omega_f - \phi_2) \quad (4)$$

onde x_h e x_p representam as soluções homogenia e particular respetivamente, ξ é o fator de amortecimento, ω_n é a frequência natural do sistema, ω_a é a frequência amortecida do sistema, ω_f é a frequência de excitação, ϕ_1 e ϕ_2 são os ângulos de fase de cada uma das soluções.

Cada um destes valores está associado a uma característica do sistema harmónico. Neste caso onde temos a existência de um amortecedor, uma vibração livre tem tendência a estabilizar em repouso, pois o amortecimento tem função de dissipar energia do sistema. Desta forma existe um fator de amortecimento:

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (5)$$

O fator de amortecimento é dado pela razão entre o valor do coeficiente de amortecimento presente no sistema e o coeficiente de amortecimento crítico calculado pelo sistema. Quando o valor de ξ é superior a 1, o sistema é sobre amortecido, menor que 1 é sub-amortecido, igual a 1 é criticamente amortecido. A Figura 7 representa melhor o efeito dos diferentes tipos de amortecimento:

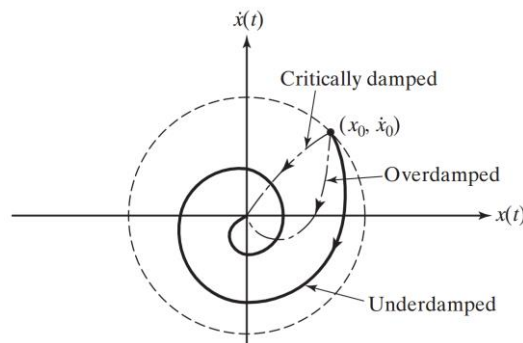


Figura 7 - Representação gráfica dos tipos de amortecimentos adaptado de [7]

Num sistema não amortecido com 1GDL, ele terá uma frequência natural ω_n associada à sua vibração livre. Ao ser imposta uma força harmônica com frequência de excitação igual a natural, o sistema entrará em ressonância, resultando em valores de respostas elevados.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \quad (6)$$

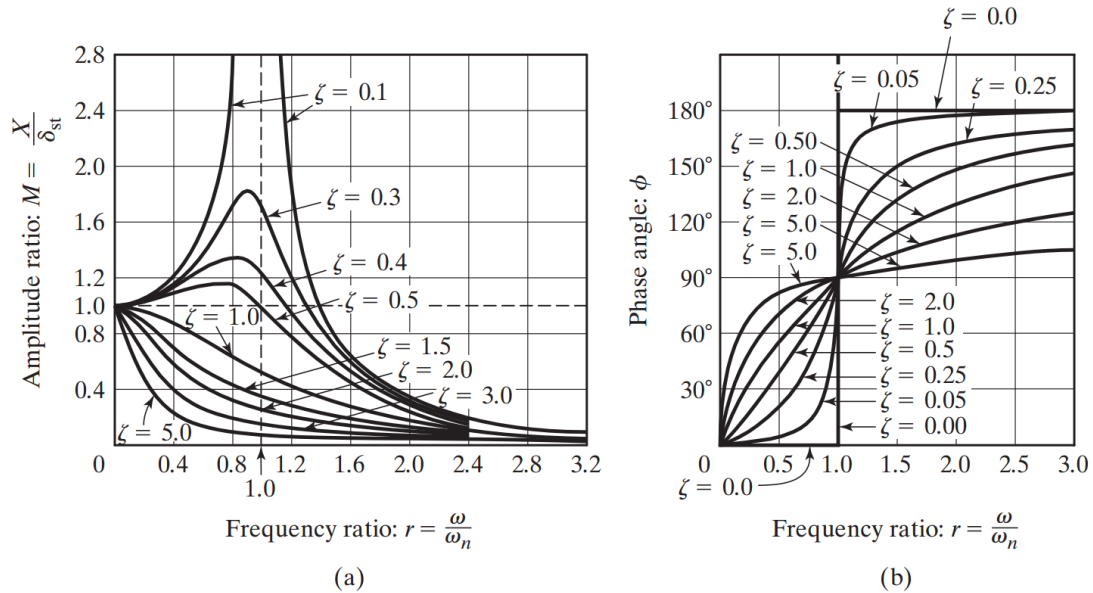


Figura 8 - Resposta (a) e fase (b) do sistema em função da frequência de excitação, adaptado de [7], baseado na equação (6)

Quando é aplicada uma carga harmônica ao sistema com a frequência do mesmo valor da frequência natural, este entrará em ressonância, aumentando significativamente a sua amplitude de resposta. Pode ser feita esta comparação com auxílio da Figura 8.

Num sistema amortecido, sendo imposta uma vibração livre, este irá oscilar a uma frequência amortecida ω_a relacionada com a solução homogênea de quando a força de excitação é nula:

$$\omega_a = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (7)$$

Tendo a expressão da resposta do sistema $x(t)$, é do interesse desta dissertação analisar a componente das vibrações forçadas, ou seja, irá ser considerada apenas a solução particular x_p

$$x(t) = x_p(t) = X \cos(\omega_f t + \phi_2) \quad (8)$$

Realizando as derivadas para a velocidade e aceleração obtém-se:

$$\dot{x}(t) = -\omega_f X \sin(\omega_f t + \phi) \quad (9)$$

$$\ddot{x}(t) = -\omega_f^2 X \cos(\omega_f t + \phi) \quad (10)$$

Substituindo na equação (1) obtemos:

$$m[-\omega_f^2 X \cos(\omega_f t + \phi_2)] + c[-\omega_f X \sin(\omega_f t + \phi)] + k[X \cos(\omega_f t + \phi_2)] = F \cos(\omega_f t) \quad (11)$$

Para obter uma expressão simplificada no cálculo da resposta x necessita-se de considerar a representação vetorial de cada componente do carregamento no equilíbrio dinâmico.

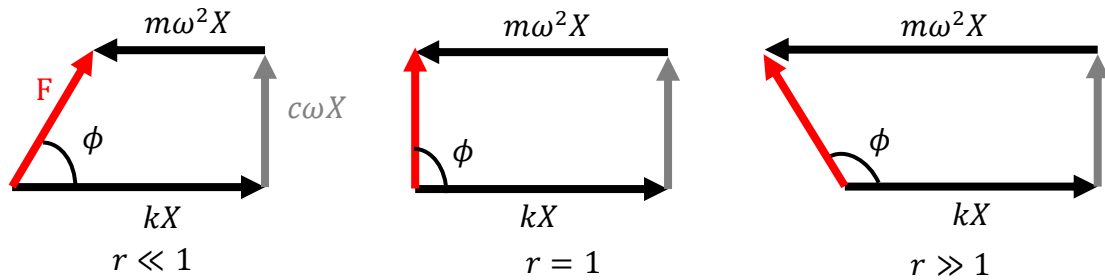


Figura 9 - Representação das forças dinâmicas vectorialmente onde $r = \omega/\omega_n$

Como observa-se na Figura 9, é possível ter uma melhor interpretação do ângulo de fase, representando o desfasamento da força e a resposta do sistema. De seguida é possível relacionar as 3 componentes do carregamento dos elementos massa, amortecimento e mola, numa soma vetorial (note que o amortecimento tem um desfasamento de 90° relativamente à massa e a força). Retirando a componente trigonométrica baseada da figura obtém-se a seguinte fórmula:

$$X \sqrt{(k - m\omega_f^2)^2 + (c\omega_f)^2} = F \Leftrightarrow X = \frac{F}{\sqrt{(k - m\omega_f^2)^2 + (c\omega_f)^2}} \quad (12)$$

Com o ângulo de fase:

$$\phi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{c\omega_f}{k - m\omega_f^2} \right) \quad (13)$$

2.3.3 Transmissibilidade em 1 Grau de Liberdade

O conceito de transmissibilidade é dado quando se relaciona a resposta em um ponto sendo transmitida para outro onde esta resposta é alterada devido os elementos rígidos do sistema, um exemplo seria tirar proveito do esquema simples de 1GDL, mas desta vez substituir a “parede” onde eram fixados os elementos de rigidez por um ponto que responde a um deslocamento definido $y(t)$.

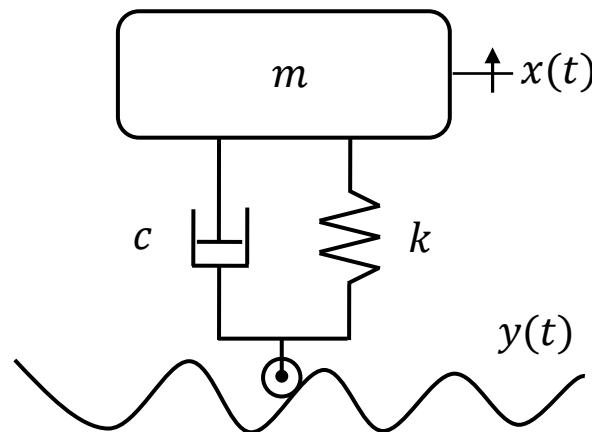


Figura 10 - Esquema de 1 grau de liberdade com parede movel

Pela Figura 10, nota-se que contrário à existência de uma força excitadora, temos um deslocamento harmónico imposto na base $y(t)$. Na presença de 2 referenciais para descrever a resposta há que relacioná-los utilizando a equação do equilíbrio dinâmico:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \Leftrightarrow m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{y} + ky \quad (14)$$

Utilizando as mesmas simplificações utilizadas em (12) obtém-se:

$$X \sqrt{(k - m\omega_f^2)^2 + (c\omega_f)^2} = Y \sqrt{k^2 + (c\omega_f)^2} \quad (15)$$

$$\frac{X}{Y} = \frac{\sqrt{k^2 + (c\omega_f)^2}}{\sqrt{(k - m\omega_f^2)^2 + (c\omega_f)^2}} = TR \quad (16)$$

Esta fórmula representa a transmissibilidade que relaciona os deslocamentos X e Y, como também a relação das forças atuadas em cada coordenada em qualquer instante temporal.

2.3.4 Múltiplos Graus de Liberdade

No caso das estruturas a serem estudadas, a representação em 1 GDL não é suficiente para o estudo desta dissertação, é necessário tratar o problema com MGD. Agora uma estrutura pode ter mais do que 1 GDL, originando outras equações de equilíbrio, na qual todas as equações dos outros referenciais irão relacionar-se em um sistema de equações. Para ser mais pratico o manuseio destes sistemas é vantajoso utilizar a forma matricial:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (17)$$

Nesta fórmula existem os vetores das coordenadas dos GDL $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$ e $\{x\}$ e o vetor dos carregamentos $\{f\}$. Para cada grau de liberdade, está associado uma expressão, na qual foi simplificada numa forma matricial. [M] representa a matriz de massas do sistema, [C] e [K] as matrizes de amortecimento e da rigidez respetivamente. As modelações dessas matrizes podem ser feitas utilizando a derivação das energias de um sistema, esta derivação pode ser realizada com o auxílio da segunda lei de Newton com o apoio de um esquema. Em alternativa pode-se utilizar as equações de Lagrange de uma forma mais analítica e geral. Nesta dissertação irá ser utilizado os conceitos do método dos elementos finitos por existirem definidos na literatura as matrizes apenas necessitando das propriedades da geometria e do material do sistema.

Num melhor entendimento dos conceitos do MEF, irá ser exemplificado um elemento viga com 6 graus de liberdade como apresentado na Figura 11.

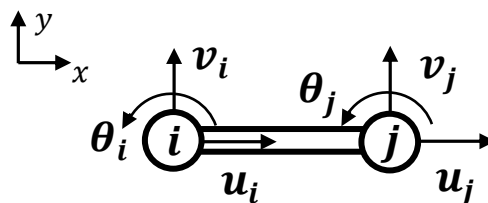


Figura 11 - Elemento viga com 6 graus de liberdade

É representado a localização dos graus de liberdade e seus nós. Pela literatura do MEF, segundo as deduções das energias potenciais mínimas, as fórmulas base da rigidez de um elemento e das funções de forma [25] é possível obter as matrizes de Rigidez e das Massas relacionada com os graus de liberdade apresentadas na figura:

$$K_{BEAM6}^{EI} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$M_{BEAM}^{EI} = \rho AL \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} & \frac{11L}{210} & 0 & \frac{9}{70} & -\frac{13L}{420} \\ 0 & \frac{11L}{210} & \frac{L^2}{105} & 0 & \frac{13L}{420} & -\frac{L^2}{140} \\ \frac{1}{6} & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} & \frac{13L}{420} & 0 & \frac{13}{35} & -\frac{11L}{210} \\ 0 & -\frac{13L}{420} & -\frac{L^2}{140} & 0 & -\frac{11L}{210} & \frac{L^2}{105} \end{bmatrix} \quad (19)$$

onde E é o módulo de Young do material, A é a área da secção do elemento viga, I é o segundo momento de área, L é o comprimento do elemento e ρ a densidade do material. Estas matrizes definem as propriedades de rigidez da viga em suas coordenadas locais representadas na Figura 11. Por vezes a estrutura apresenta elementos em outras orientações ligados, desta forma deve-se fazer a devida transformação de coordenadas do sistema local para o sistema global. Utiliza-se a seguinte formula:

$$K^{global} = [T_{LG}]^T [K_{BEAM6}^{EI}] [T_{LG}]; M^{global} = [T_{LG}]^T [M_{BEAM6}^{EI}] [T_{LG}] \quad (20)$$

onde,

$$T_{LG} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Restando a matriz do amortecimento, esta pode ser determinada utilizando do amortecimento proporcional, utilizando 2 constantes de proporcionalidade δ e β :

$$C = \delta K^{global} + \beta M^{global} \quad (22)$$

Tendo a equação (17) definida, basta fazer a sua resolução. Para pode explicar de uma forma clara, irá ser utilizado um exemplo onde estamos diante do regime livre e o amortecimento é desprezável:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (23)$$

Tendo em conta as aproximações em (11) pode-se simplificar para:

$$[[K] - \omega^2[M]]\{X\} = 0 \quad (24)$$

Com a expressão neste formado estamos diante do problema dos valores próprios, onde é necessário resolver a seguinte equação constituída pelo determinante:

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (25)$$

As “n” soluções ω^2 a serem obtidos será igual ao de grau de liberdades. Os valores obtidos representam o quadrado das frequências naturais do sistema. Substituindo estes valores na equação (24) podemos obter os modos de vibração $\{\psi\}_n$, o que representa a configuração de cada grau de liberdade em cada modo. Para melhor poder visualizar modos de vibração tem-se o auxílio da Figura 12.

Tendo obtido a matriz dos modos de vibração $[\psi]_n = [\{\psi\}_1 \{\psi\}_2 \dots \{\psi\}_n]$ estamos diante do modelo

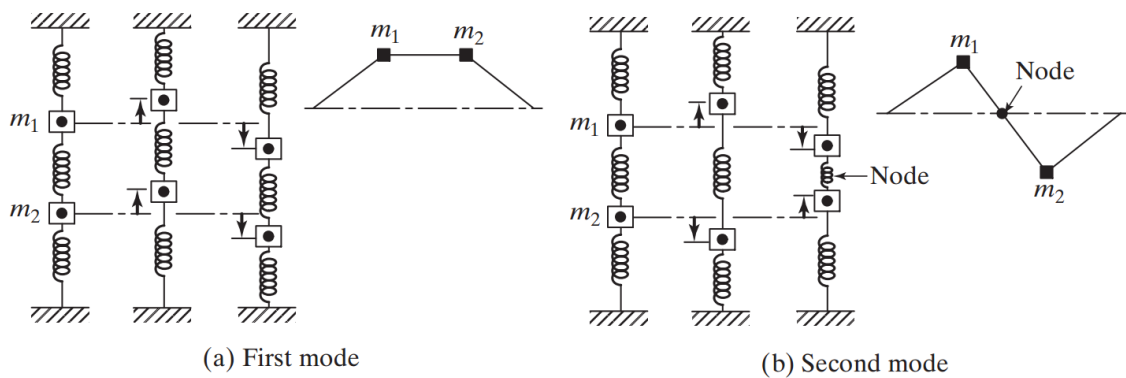


Figura 12 - Representação dos modos naturais de vibração num sistema de 2 graus de liberdade. (a) primeiro modo, (b) segundo modo. Retirado de [12]

modal. O modelo modal é outro modelo dinâmico para a representação da solução e do comportamento do sistema de MGD. Tendo a matriz $[\psi]_n$, e uma matriz das diagonais das soluções ω_n temos o modelo modal completo. Normalmente é utilizado este modelo por ter um preço computacional melhor na resolução dos sistemas pois na necessidade de inverter matrizes, é mais rápido e eficaz inverter a matriz diagonal constituída pelas frequências naturais. Na Figura 13 verifica-se as transformações de cada modelo.

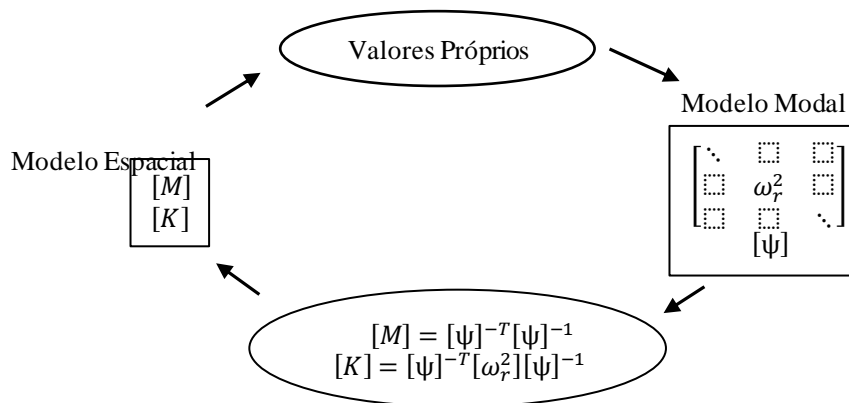


Figura 13 - Transformação entre o modelo espacial e modelo modal. Adaptado de [26]

2.3.5 Modelo contínuo

Neste modelo, os sistemas serão representados, não com múltiplos graus de liberdade (modelo discreto), mas sim com “infinitos” graus de liberdade (modelo contínuo). Esta aproximação é feita tendo em conta a melhor aproximação do modelo real dos materiais. De forma a estudar este modelo a abordagem será diferente. Os comportamentos das estruturas sujeitas a cargas dinâmicas no modelo contínuo são deduzidos a partir de equações do movimento no domínio contínuo. Como estamos a tratar de propriedades num modelo contínuo, face ao modelo discreto, será tratada de equações diferenciais obtendo formulas mais complexas. A Figura 14 apresenta diversos comportamentos que uma viga pode ter dependendo das suas condições fronteira.

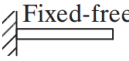
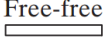
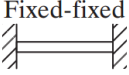
| End Conditions of Bar | Boundary Conditions | Frequency Equation | Mode Shape (Normal Function) | Natural Frequencies |
|--|--|-------------------------------|--|--|
|  Fixed-free | $u(0, t) = 0$ $\frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = 0$ | $\cos \frac{\omega l}{c} = 0$ | $U_n(x) = C_n \sin \frac{(2n+1)\pi x}{2l}$ | $\omega_n = \frac{(2n+1)\pi c}{2l};$ $n = 0, 1, 2, \dots$ |
|  Free-free | $\frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = 0$ $\frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = 0$ | $\sin \frac{\omega l}{c} = 0$ | $U_n(x) = C_n \cos \frac{n\pi x}{l}$ | $\omega_n = \frac{n\pi c}{l};$ $n = 0, 1, 2, \dots$ |
|  Fixed-fixed | $u(0, t) = 0$ $u(l, t) = 0$ | $\sin \frac{\omega l}{c} = 0$ | $U_n(x) = C_n \cos \frac{n\pi x}{l}$ | $\omega_n = \frac{n\pi c}{l};$ $n = 1, 2, 3, \dots$ |

Figura 14 - Alguns exemplos das expressões deduzidas pelas condições de fronteiras de uma viga.
Retirado de [12]

Apesar das vantagens que o modelo apresenta em valores mais próximos da realidade, tem a dificuldade no poder computacional necessário para modelar estruturas complexas, recorrendo ao método dos elementos finitos como melhor alternativa.

2.3.6 Tempo e Frequência

Existem dois métodos para representar e analisar a resposta de um sistema num ponto, no domínio temporal ou no domínio das frequências. No domínio temporal, normalmente, são analisados sinais harmónicos compostos. Esta representação permite ter uma boa noção do comportamento do sistema em tempo real. No caso que seja necessário detetar outros fenómenos dependentes da frequência utiliza-se o

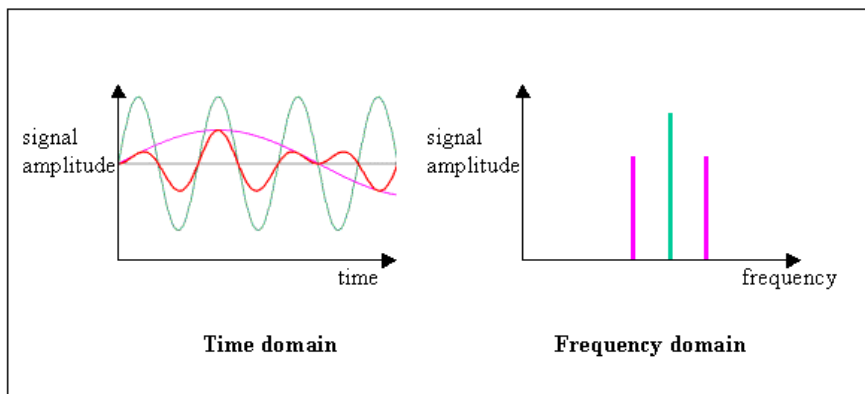


Figura 15 - Comparação de um sinal temporal com um sinal no domínio de frequências

outro método. Comparativamente ao método temporal, o método das frequências permite visualizar o espectro das respostas em função da frequência, como pode-se ver na Figura 15, sendo mais vantajoso na identificação de fenômenos que são manifestados em certos picos de frequência.

De forma a obter o espectro da frequência aplica-se a transformada de Fourier no domínio tempo. Isto é apenas um método para esta transformação. Prevê-se que sendo aplicada esta transformação irá ser transportado ruído. O ruído pode ter diversas formas, mecânica ou elétrica. De forma a obter uma transformação com o mínimo de ruído possível, aplica-se metodologias para a redução de ruído, como por exemplo a aplicação de filtros de passa alto/baixo na análise de sinais.

Tendo um espectro de frequências resultante de um carregamento, dá-se o nome de Função de Resposta em Frequência. As FRFs costumam representar respostas em função de uma força unitária (X/F), tendo o nome de Receptância. Esta matriz é obtida a partir da equação dinâmica em MGDL:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (26)$$

Tendo a equação x escrita na sua solução particular $x(t) = X e^{i\omega t}$ a expressão é simplificada para:

$$[[M] - \omega^2[K] + i\omega[C]]\{X\} = \{F\} \Leftrightarrow \frac{\{X\}}{\{F\}} = [Z]^{-1} = [H] \quad (27)$$

A Receptância é uma matriz que relaciona os deslocamentos em um ponto com tendo em conta a aplicação de uma, ou conjunto de forças atuadas em outros pontos. é possível obter um gráfico para cada entrada da matriz, em função das frequências.

$$H_{ij}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{F_j(\omega)} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1j} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{i1} & H_{i2} & \cdots & H_{ij} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Com a equação (27), a matriz Receptância pode ser obtida por ensaios experimentais da estrutura, normalmente pela aplicação de uma força conhecida e fazendo a medição do deslocamento obtido no nó desejado. Além do deslocamento podem ser utilizadas velocidades ou acelerações, dando assim a obtenção das matrizes Mobilidade e Acelerância [27]:

$$H(\omega) = \frac{\text{deslocamento}}{\text{força}} = \text{Receptância} \quad (29)$$

$$\gamma(\omega) = \frac{\text{velocidade}}{\text{força}} = \text{Mobilidade} \quad (30)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\text{aceleração}}{\text{força}} = \text{Acelerância} \quad (31)$$

Onde todas estas expressões respeitam as seguintes igualdades:

$$\alpha(\omega) = i\omega \gamma(\omega) = -\omega^2 H(\omega) \quad (32)$$

A sua representação gráfica pode ser apresentada pela Figura 16.

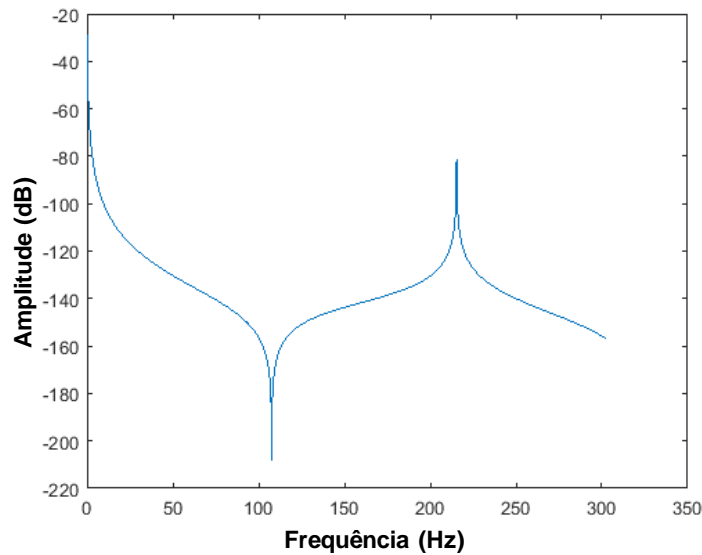


Figura 16 - Exemplo de uma FRF da Receptância de uma viga em um nó específico reproduzida no Matlab. Conseguimos ver a presença de picos de ressonância (máximos) e anti-ressonância (mínimos)

2.4 Identificação de Dano

Para poder fazer a devida identificação do dano é necessário entender os conceitos da identificação de forças, pois será esse o método utilizado tal como [15], [16] e [17]. Foi relatado que este método é preciso em sua aplicação sendo uma das mais viáveis na identificação do dano. Sendo um método que não acumula vários erros experimentais e computacionais, é importante a ausência desses erros, porque na identificação de dano apresenta alguma sensibilidade face esses erros. Neste capítulo irá ser explicado os fundamentos utilizados na identificação de forças e de seguida a quantificação do dano.

2.4.1 Transmissibilidade de deslocamentos para Múltiplos Graus de Liberdade

No capítulo 2.3.2 foi detalhado a noção de GDL tal como a transmissibilidade em 1 GDL, para a identificação é necessário aprofundar o conceito para Múltiplos graus de liberdade, não sendo uma aplicação tão direta como anterior. Neste subcapítulo será explicado como obter a expressão que permite calcular a transmissibilidade de deslocamentos em MGDG.

É de notar que também existe a transmissibilidade de forças, não sendo do interesse desta dissertação. A transmissibilidade não é um valor escalar como na situação de 1GDL, e passa a tomar a forma matricial para satisfazer as equivalências matemáticas.

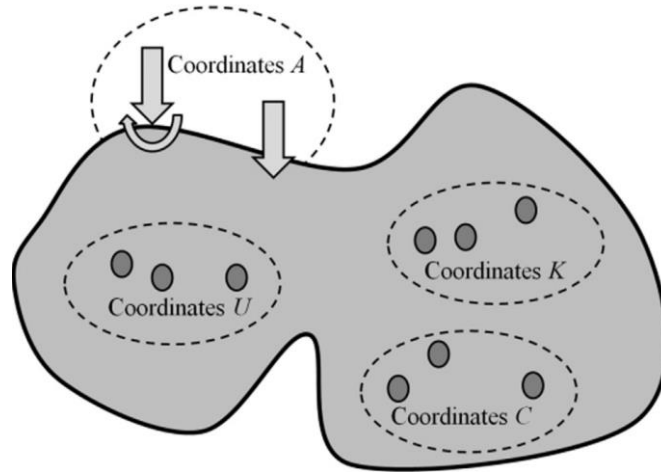


Figura 17 - Representação dos conjuntos de coordenadas de uma estrutura. Retirado de [15]

Seja discretizado qualquer elemento, com N nós, com a condição livre-livre, representado na Figura 17, é definido 4 grupos de coordenadas. As coordenadas “K” (Known) que representam os nós onde as respostas do sistema são conhecidas no algoritmo. As coordenadas “U” (Unknown) que são as coordenadas “desconhecidas” do sistema, que serão calculadas a posteriori depois de ter sido determinado uma forma da transmissibilidade de forças. As coordenadas “A” são os nós onde serão aplicados os carregamentos (forças) e finalmente o conjunto C que representa as outras coordenadas restantes.

Pode-se representar com melhor detalhe os conjuntos na fórmula:

$$\begin{Bmatrix} Y_K \\ Y_U \\ Y_A \\ Y_C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{KA} \\ H_{UA} \\ H_{AA} \\ H_{CA} \end{bmatrix} \{F_A\} \quad (33)$$

Nesta expressão temos as sub-matrizes das receptâncias construindo uma nova matriz. Cada uma dela representa a resposta das coordenadas K, U, A e C respectivamente face a(s) força(s) de excitação das coordenadas A. Apenas foi considerado o deslocamento no eixo Y para reduzir a complexidade dos valores obtidos, daí reduzindo as matrizes de Receptância. Da expressão (33) podemos concluir que:

$$Y_K = H_{KA} F_A \wedge Y_U = H_{UA} F_A \quad (34)$$

Igualando as duas expressões obtém-se:

$$Y_U = (H_{UA} H_{KA}^+) Y_K \quad (35)$$

Onde o expoente “+” representa a pseudo-inversa de uma matriz, operação algébrica que consiste em calcular a inversa de uma matriz não quadrada ($H_{KA}^+ = (H_{KA}^T H_{KA})^{-1} H_{KA}^T$), esta operação foi realizada pela matriz não ser quadrada, devido apenas por ser uma sub-matriz. Analisando a expressão (35) pode-se confirmar uma expressão da transmissibilidade de deslocamentos que calcula Y_U sabendo a matriz de Receptância e Y_K .

$$T_{UK}^{(d)A} = H_{UA} H_{KA}^+ \quad (36)$$

Para poder realizar este cálculo é necessário determinar a matriz de Receptância H completa, este cálculo pode ser efetuado invertendo a matriz de rigidez total do elemento (Z) que é constituída pelas matrizes K, C e M pela eq. (27).

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = Z(\omega)^{-1} = (K - \omega^2 M + i\omega C)^{-1} \quad (37)$$

É de notar que foi utilizada a notação complexa multiplicando pela parcela do amortecimento, explicado na Figura 9 a força resultante deste elemento está desfasada 90° da rigidez e da massa. É mais conveniente fazer esta representação de calculo a inserir apenas o número imaginário “i”.

Um estudo curioso seria a implementação desta mesma metodologia aplicada, também, à mobilidade e acelêrancia referenciadas nas equações (30) e (31) podem ser uteis para calcular transmissibilidades de velocidades ou até de acelerómetros caso não seja possível a medição de outras grandezas devido a limitação do equipamento.

2.4.2 Identificação e Quantificação do Carregamento

Para a identificação das forças será apresentado o procedimento a ser utilizado. Na teoria, se uma estrutura tiver sensores em todos os seus nós discretizados seria possível, de forma mais eficiente, fazer a identificação de forças pela simples formula (38) em todos os GDL. Entretanto numa situação real, nem sempre será possível analisar a estrutura em todos os seus nós. Tanto pela inexistência de sensores suficientes (estruturas complexas podem ter milhares de nós), como também estas estruturas conter geometrias inalcançáveis ou muito complexas.

Grande parte da metodologia da identificação de forças será baseada em [18] e [19] Quando o método é realizado e é descoberto o(s) ponto(s) de aplicação da(s) força(s), este carregamento pode ser quantificado pela seguinte expressão:

$$F = H^{-1}Y \quad (38)$$

A solução proposta em [18] para fazer a identificação nodal do carregamento foi pela comparação do valor verdadeiro experimental com um calculado numericamente e identificar qual combinação de forças fornecer a menor diferença entre experimental e numérico. Sabendo o valor verdadeiro (experimental) é imposto condições no modelo numérico, variando o carregamento em diferentes combinações de forças e verificar a combinação que tem o valor do deslocamento dos nós “desconhecidos” que foi calculado usando a expressão (34) e (35), mais próximo que o valor verdadeiro.

Para utilizar este procedimento, em fase experimental será utilizado em média 3 ou mais sensores para medir os deslocamentos, isto para criar o conjunto K e o conjunto U cada um com pelo menos 2 nós. Tendo estes dois conjuntos definidos, o número de forças aplicadas não pode ser superior ao número de nós com deslocamentos “conhecidos” ($\#A \leq \#K$), por outras palavras, o número máximo de forças a poder identificar será igual ou menor que o número de deslocamentos “conhecidos”.

Para cada combinação de forças, é modelada uma matriz de transmissibilidade (36) e é aplicada a fórmula (35) para conhecer o deslocamento “desconhecido” (irá ser mencionada o deslocamento experimental como \tilde{Y}_U e os deslocamentos calculados pela transmissibilidade como Y_U)

Relativamente à combinação de forças será acompanhada por esta ordem, lendo linha a linha. Suponhamos que a estrutura tenha N nós:

$$\text{Nós em aplicação} \begin{cases} 1 \text{ Força: } (1), (2), \dots, (N-1), (N); \\ 2 \text{ Forças: } (1,2), (1,3), \dots, (N-2), (N-1), (N); \\ 3 \text{ Forças: } (1,2,3), (1,2,4), \dots, (N-2), (N-1), (N) \end{cases}$$

Em cada combinação é efetuado o cálculo do valor de Y_U . Para comparar este valor com o valor de \tilde{Y}_U utiliza-se a seguinte expressão onde obtêm-se um desvio associado entre os valores:

$$\varepsilon = \sum_{\omega} \left(\log(\text{abs}(\tilde{Y}(\omega))) - \log(\text{abs}(Y(\omega))) \right)^2 \quad (39)$$

Nota-se que é feito o somatório para toda a gama das frequências adquiridas na FRF. Tendo calculado todos os erros, a(s) localização(ões) da(s) força(s) será a combinação que apresentar o erro mínimo. Tendo a localização correta das forças, resta aplicar a fórmula em (38) associada aos nós do conjunto A identificado e reconstruir uma FRF das forças que a estrutura suporta.

2.4.3 Aproximação do Método dos Elementos Finitos

Sendo este um problema que consta de MGD, é útil criar o relacionamento com o MEF. Neste capítulo irá ser explicada a metodologia para obter a componente computacional dos deslocamentos. Este procedimento terá o auxílio do software Matlab para a modelação da estrutura utilizando o MEF. Dependendo da estrutura a ser modelada, serão utilizadas as matrizes K, C e M deduzidas em (18) e (19) tendo como exemplo uma viga. Neste mesmo exemplo representado na Figura 18, para a obtenção de valores mais próximos da realidade há necessidade de utilizar mais que um elemento devido ao comportamento não linear da deformação da viga (rigidez não linear devido à Histerese).



Figura 18 - Esquema de uma viga dividida em 16 elementos (17 nós). Retirado de [19]

O Matlab será o software principal a modelar os elementos viga de forma computacional. Não só irá modelar a estrutura como também realizar cálculos necessários, armazenando as matrizes de rigidez, receptâncias e transmissibilidades. Também será avaliado todos os erros relativos a comparação experimental e computacional e no fim ainda será reconstruída as forças como também o dano.

2.4.4 Identificação e quantificação do dano

O dano ser manifestado de variadas formas, esta dissertação almeja poder fazer a identificação do dano com base na identificação de forças. Tal como estudado em [18] serão utilizadas estas metodologias e possíveis alterações para melhor precisão dos resultados (problemas de ruído).

O maior foco desta dissertação está direcionado na devida seleção de um novo sensor substituto não contato aos convencionais piezoelétricos. Neste capítulo será explicada as metodologias para a identificação do dano.

2.4.5 Formulação aplicada

O raciocínio utilizado neste subcapítulo é que o dano é uma força fictícia a ser aplicada na estrutura durante a aplicação de outra força, resultando de uma força aplicada. Ao analisar o dano, pode-se assumir que este poder causa uma variação da rigidez, amortecimento e/ou massa do sistema. Pode-se apresentar esta afirmação pela seguinte expressão:

$$(M + \Delta M)\ddot{y}_\Delta + (C + \Delta C)\dot{y}_\Delta + (K + \Delta K)y_\Delta = f \Leftrightarrow M\ddot{y}_\Delta + C\dot{y}_\Delta + Ky_\Delta = f - (\Delta M\ddot{y}_\Delta + \Delta C\dot{y}_\Delta + \Delta Ky_\Delta) \quad (40)$$

Onde

$$f_D = -(\Delta M\ddot{y}_\Delta + \Delta C\dot{y}_\Delta + \Delta Ky_\Delta) \quad (41)$$

Verifica-se que o dano pode ser tratado como outra força aplicada no sistema. Para poder saber a relação direta que a força tem com a variação dos elementos de rigidez do sistema foi realizada as seguintes alterações, tendo em conta (24):

$$F_D = -(\Delta K - \omega^2 \Delta M + i\omega \Delta C)Y_D \quad (42)$$

Fazendo a separação das componentes reais e imaginárias:

$$ReF_D + iImF_D = -(\Delta K - \omega^2 \Delta M + i\omega \Delta C)(ReY_D + iImY_D) \quad (43)$$

$$ReF_D = -(\Delta K - \omega^2 \Delta M)ReY_D + \omega \Delta C ImY_D \quad (44)$$

$$ImF_D = -(\Delta K - \omega^2 \Delta M)ImY_D + \omega \Delta C ReY_D \quad (45)$$

Organizando em forma matricial:

$$\begin{Bmatrix} ReF_D \\ ImF_D \end{Bmatrix}_j = \begin{bmatrix} -ReY_D & \omega^2 ReY_D & \omega ImY_D \\ -ImY_D & \omega^2 ImY_D & -\omega ReY_D \end{bmatrix}_j \begin{Bmatrix} \Delta K \\ \Delta M \\ \Delta C \end{Bmatrix}_j \Leftrightarrow \{F_D(\omega)\}_{j(2 \times 1)} = [Q(\omega)]_{j(2 \times 3)} \begin{Bmatrix} \Delta K \\ \Delta M \\ \Delta C \end{Bmatrix}_{j(3 \times 1)} \quad (46)$$

Onde $j = 1, \dots, p$, representa cada alteração nodal do sistema. Como pode-se observar pela dimensão das matrizes está-se diante um sistema indeterminado. Para resolver este problema, é adicionado mais linhas de equações relativa ao comportamento dinâmico em outras frequências, tomando o seguinte formado sobre definido:

$$\begin{Bmatrix} \{F_D(\omega_1)\} \\ \vdots \\ \{F_D(\omega_L)\} \end{Bmatrix}_{j(2L \times 1)} = \begin{bmatrix} [Q(\omega_1)] \\ \vdots \\ [Q(\omega_L)] \end{bmatrix}_{j(2L \times 3)} \begin{Bmatrix} \Delta K \\ \Delta M \\ \Delta C \end{Bmatrix}_{j(3 \times 1)} \quad (47)$$

Simplificando as expressões:

$$F_{DTj} = Q_{Tj} \Delta_j \Leftrightarrow \Delta_j = Q_{Tj}^+ F_{DTj} \quad (48)$$

Com isto, utilizando a identificação de forças, é descoberto a localização do dano e sua força resultante. Inserindo o valor da força na expressão (48) e determinando Δ_j será possível saber as

características do dano, como alterações das propriedades dinâmicas do sistema (variação de massa, fator de amortecimento e/ou variação de rigidez).

As novas possibilidades que este poderá avaliar no futuro pode ser não só a quantificação de dano como também a identificação do tipo de falha presente (fissuras, deformações plásticas ou até adição de material na estrutura, fatores que alteram as propriedades dinâmicas da estrutura).

2.5 Sensores

Alem da Revisão bibliográfica, foi realizada uma pesquisa por sensores não contato na internet, [20] - [24] e [28]. Planeia-se adquirir um ou mais tipos de sensores para serem realizados testes. Foi realizada uma busca de alternativas aos sensores piezoelétricos convencionais na utilização como sensores de ensaios de vibrações. Isto é devido a sua grande precisão no que toca a aquisição de valores e uma grande resolução temporal e reduzido tamanho e massa. O sensor permite leituras até 20kHz. Do interesse da estrutura a ser analisada, basta haver uma resolução $\leq 1,5$ kHz sendo o intervalo onde a estrutura apresenta respostas significativas para serem analisadas sem erro.

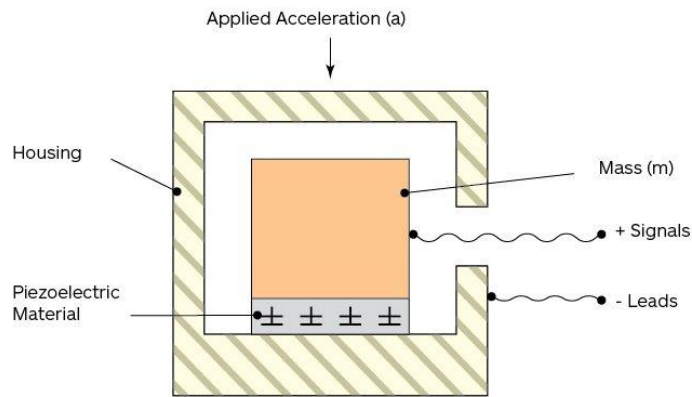
Irá ser explicado sucintamente o funcionamento de cada um dos tipos de sensores encontrados na internet. Será listada as vantagens e desvantagens de cada tipo de sensor de forma a justificar a melhor seleção. Como objetivo, pretende-se adquirir um sensor de cada tipo, de forma a avaliar numa serie de testes se os sensores podem ser aplicados aos testes desejados e servir como substituto dos sensores piezoelétricos.

2.5.1 Piezoelétricos

Os sensores piezoelétricos são os sensores de contato mais utilizados na medição de ensaios de vibrações de altas frequências como também ondas sonoras. Também conhecido como acelerómetros, tal como o nome sugere, faz medições de acelerações. Anteriormente foi mencionado que todos os sensores a serem apresentados fazem a medição dos deslocamentos sem contato com a estrutura, expeto os acelerómetros. Contudo, tendo as suas respostas e valores armazenados da aceleração, é possível transformá-los em deslocamentos pela integração dos valores em ordem ao tempo.

É de notar a ausência da constante de integração na fórmula, isto pode ser justificado como uma obtenção de um deslocamento “relativo”, quando a constante de integração é desprezada, facilitando assim a aquisição dos deslocamentos desejados. Nos acelerómetros normalmente são adquiridos os resultados sob forma de acelerâncias (Capítulo 2.3.6). Analogamente, a acelerância representa a aceleração obtida por unidade de tempo, tendo propriedades muito semelhantes à receptância.

A engenharia que permite a medição direta da aceleração está relacionada com a medição de uma massa piezoelétrica, ligado a uma corrente, que, quando exercido um movimento, sendo um material sensível este deforma-se. A sua deformação causa uma diferença da resistência no circuito elétrico da Figura 19 obtendo uma diferencia de potencial diferente. Utilizando a lei de Hooke e segunda lei de Newton é possível relacionar a deformação do material com sua aceleração.



A basic diagram of a piezoelectric accelerometer.
Image credit: PCB Piezotronics

Figura 19 - Esquema do circuito interno num sensor piezoelétrico. Retirado de [28]

Vantagens: É o sensor mais comum e próprio para análises de altas vibrações para determinação de FRFs; contem pouco ruído; ótima precisão.

Desvantagens: Necessita de contato direto com o material; pelo contato, irá condicionar a massa da estrutura; preço elevado.

2.5.2 Indutivos

Sensores indutivos, tal como o nome indica, é um tipo de sensor que se baseia na criação de campos magnéticos para a medição do deslocamento. Este possui no seu interior uma bobina, no qual é induzida uma corrente alternada, de forma a criar um campo magnético. Tendo este campo em contato com o material condutivo, este irá criar outro campo em sentido contrário, onde é dado o nome de Eddy-currents. Pela interação desses 2 campos magnéticos representados na Figura 20 é possível fazer a alteração da indutância do circuito elétrico, resultando numa variação da impedância e sucessivamente a diferença de potencial. Regulando as distâncias com as voltagens obtidas, é possível calibrar o sensor de forma ter um

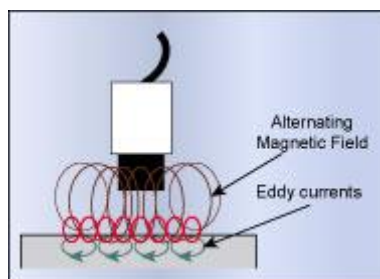


Figura 20 - Representação esquemática dos campos magnéticos criados em contato com as Eddy-currents do material alvo. Retirado de [20].

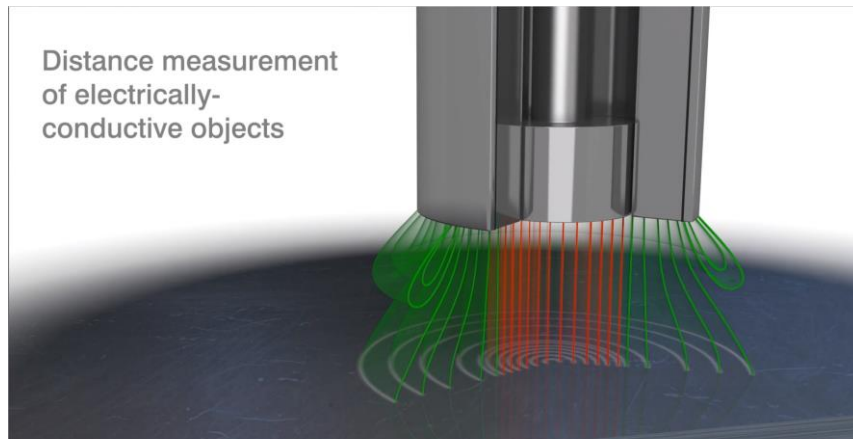
funcionamento correto

Vantagens: Sensor de não contato com um preço acessível; ótima performance em ambientes sujos; uma zona de deteção elevada

Desvantagens: Não apresenta a melhor resolução; apenas funciona com materiais condutores; pode não captar deslocamentos em materiais finos.

Neste estudo não foram adquiridos sensores indutivos, mas foram os que apresentaram mais vantagens excluindo o sensor laser.

2.5.3 Capacitivos



*Figura 21 - Representação dos campos elétricos de um sensor capacitivo em contato com o alvo.
Retirado de [21]*

Os sensores capacitivos têm um funcionamento semelhante aos sensores indutivos, enquanto um relaciona a corrente indutiva, este sensor utiliza a corrente capacitiva. Este aplica uma corrente alternada a um eletrodo posicionado na extremidade e criando um campo elétrico. Esta corrente retorna ao sensor pelos eletrodos de guarda localizados na sua periferia. Em contato com um material condutor, pelo exemplo da Figura 21 este irá destabilizar o campo elétrico, resultando em valores diferentes da capacitância dependendo da sua distância ao sensor, podendo assim relacionar-se com a diferença de potencial e com o deslocamento.

Vantagens: Sensor de não contato com ótima precisão; bom funcionamento em alvos de reduzida geometria (dimensões e/ou espessuras).

Desvantagens: Elevado custo; não funciona em ambientes com impurezas; dependência do material condutor.

Este sensor não foi adquirido para este estudo.

2.5.4 Laser

Os sensores laser tem uma vertente diferente dos outros sensores mencionados. Estes sensores têm uma referência puramente geométrica para a medição dos deslocamentos, mais conhecida como a triangulação de lasers. Como apresentado na Figura 22 é incidido um feixe de luz diretamente contra o material com um certo ângulo, assumindo que o material está perfeitamente ortogonal ao sensor, sua radiação irá ser refletida de volta ao sensor, mas noutro compartimento, este compartimento tem um receptor que dependendo do ângulo da radiação refletida que retorna. Será proporcional a um deslocamento.

Vantagens: Sensor não contato de alta precisão; cálculo do deslocamento puramente geométrico, não dependendo de sistemas eletrônicos; sem necessidade de material condutor.

Desvantagens: Preço de aquisição elevado; grandes transportes dos erros de medição devido à montagem experimental incorreta. Dificuldade em obter valores semelhantes num ensaio de uma estrutura suspensa por 2 cordas, pois o próprio baloiço poderá comprometer o resultado desejado das análises.

O sensor laser foi escolhido como o melhor concorrente sensor não contato para substituir os piezoelétricos. Mais informação pode ser consultada no capítulo 3.7.

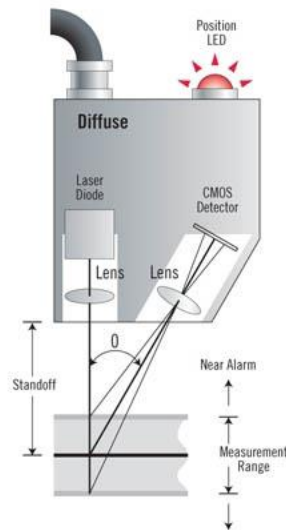


Figura 22 - Representação dos sensores laser pela triangulação. Retirado de [22]

No capítulo 3.7 é indicado qual o sensor utilizado nos ensaios experimentais.

2.5.5 Outros

É importante mencionar outros sensores não contato que foram candidatas a substitutos aos piezoelétricos. Estes sensores serão mencionados neste subcapítulo devido a não trazem grandes vantagens, mas ainda assim apresenta qualidades desejáveis para um sensor deste tipo

Existem os sensores confocais. Estes sensores funcionam pela reflexão de radiações de luz visível contra o material, trazendo vantagens em materiais não condutores e/ou transparentes. Contudo estes sensores são mais especializados na escala nanométrica e não são otimizados para ensaios dinâmicos macromecânicos.

Também existem os sensores de ultrassons. O seu funcionamento vem da aplicação de sucessivos pulsos de ultrassons onde, após refletidos, é armazenado o seu tempo de retorno, e calculado a distância do objeto em estudo. Contudo, estes sensores não são ótimos para altas frequências (>100~200Hz) de vibração, nem para pequenas distâncias. É importante mencionar que estar-se-ia a utilizar sensores que utilizam vibrações para calcular deslocamentos num movimento vibratório de altas frequências, não sendo eficaz.

Um pequeno esquema de ambos sensores pode ser apresentado na Figura 23.

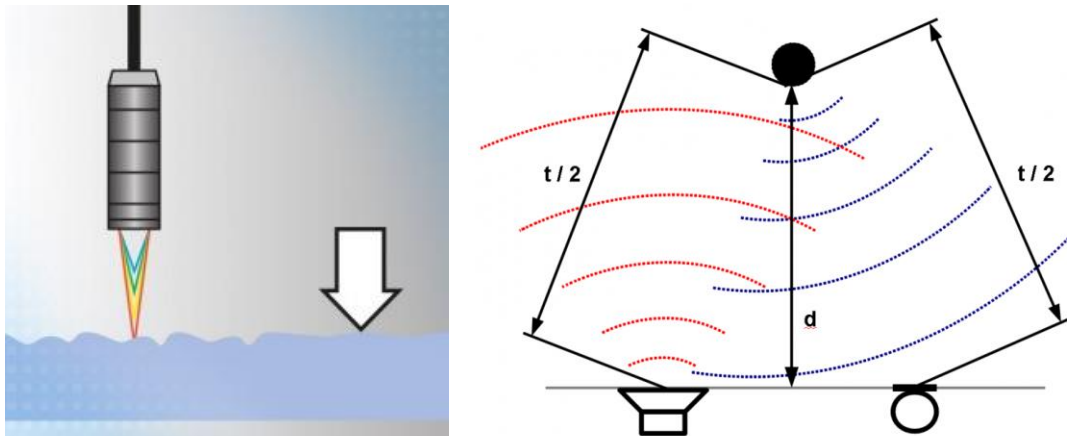


Figura 23 - Representação do sensor confocal(esquerda) e esquematização de um sensor por ultrassons (direita). Retirados de [23] e [24].

3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.3 Introdução

Na metodologia experimental de aquisição de dados utiliza-se várias ferramentas. No caso dos ensaios de vibração é de grande importância fazer a medição das suas respostas e forças impostas para poder fazer a modelação das FRFs. Simultaneamente, será necessário fazer a montagem da estrutura desejada. Em primeira instância nesta dissertação, é pretendido termos um modelo sem apoios, ou seja, modelo livre-livre. Para obtermos este modelo a estrutura a ser estudada será suspensa por fios.

Neste capítulo será introduzido o esquema e métodos experimentais utilizados e descrito a área de trabalho e os procedimentos. Relativamente ao equipamento será dada maior importância nos tipos de sensores a serem selecionados. Os sensores piezoelétricos são os sensores mais comuns para medições de vibrações e na modelação de FRFs sendo necessário o contato direto com a estrutura. Esta dissertação procura um substituto destes sensores, por outros que não necessitam o contato. Os sensores piezoelétricos ao estarem em contato com a estrutura adicionam massa que altera as propriedades do sistema, é de interesse desta dissertação procurar esta alternativa de forma a que seja utilizado em estruturas muito sensíveis a adição de massa, como chapas finas.

3.4 Metodologia Experimental

Este capítulo irá descrever os conceitos e boas praticas utilizadas para a elaboração e o tratamento dos dados. Tendo em conta que serão adquiridos dados de várias naturezas distintas. Antes de descrever o equipamento e comentar ensaios, apresenta-se um esquema global do que se pretende atingir com a componente experimental. Segundo [19] é possível reaproveitar boas praticas experimentais utilizadas

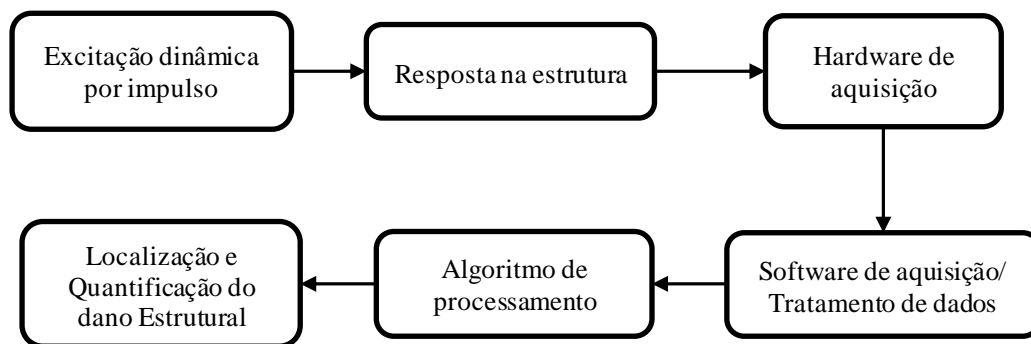


Figura 24 - Esquematização dos procedimentos a serem realizados na experiencia. Adaptado de [19]

devido a semelhança de equipamentos, entre eles foi possível adaptar o seguinte esquema para o interesse desta dissertação:

O esquema da Figura 24 representa o foco principal da componente experimental:

- **Excitação dinâmica por impulso:** Tendo a viga para estudo, sensores montados da forma desejada e softwares programados para tratar os dados, a estrutura será excitada por um martelo

com transdutor de forças piezoelétrico. Pela variação de acelerações o martelo mandará um sinal para os sensores adquirirem dados com ajuda do software LabView (Capítulo 3.8.2);

- **Resposta na estrutura:** Tendo a estrutura excitada pelo martelo, a viga em vibrações transmitirá os deslocamentos locais nos sensores montados estrategicamente;
- **Hardware de aquisição:** Os sensores que irão adquirir serão mencionados mais a frente (Capítulo 3.7). De seguida estes dados passarão por um chassis de aquisição da National Instruments que está programado para funcionar no software LabView.
- **Software de aquisição/ Tratamento de dados:** O LabView irá apenas receber valores de voltagens relacionado com a natureza do sensor. Com um conhecimento técnico do funcionamento do equipamento e a devida modelação e programação no ambiente LabView é possível modelar um instrumento virtual que calcule todos os dados necessários de deslocamentos no domínio temporal, de frequências, componentes imaginárias e reais.
- **Algoritmo de processamento:** Tendo os dados dos deslocamentos obtidos, deve-se fazer a aplicação matemática das expressões discutidas no Capítulo 3.8.2 O algoritmo é utilizado no software Matlab.
- **Localização e Quantificação do dano Estrutural:** Como outputs do algoritmo Matlab irá ser obtido a localização do dano, e que tipo de dano estamos presentes.

Para um melhor entendimento destes processos a ser realizados, os equipamentos estão detalhadamente explicados nos próximos subcapítulos com o seu propósito. Estas descrições irão corresponder ao atual estado deste estudo.

3.5 Martelo Piezoelétrico

O martelo a ser utilizado tem instalado um sensor piezoelétrico instalado em sua cabeça como representado na Figura 25. O equipamento foi inicialmente montado desta forma para que seja necessário fazer medições de forças ao aplicar um impacto contra uma estrutura



Figura 25 - Martelo piezoelétrico utilizado

O fator essencial do martelo será a comunicação com o chassis logo após a leitura de uma variação de aceleração (impacto na estrutura). Isto permite a leitura de dados dos outros sensores do sistema após a aplicação de uma força na estrutura. A sua comunicação com os sensores será feita fisicamente pela conexão ao chassis que tem também ligado os sensores.

3.6 Chassis NI

O Chassis National Instruments representado na Figura 26 é utilizado como interface física que faz a comunicação em todos os dispositivos instalados e o programa LabView que foi modelado para exercer a função designada. Trata-se de um chassis NI cDAQ-9172 com disponibilidade para até 8 slots. Inseridos nos slots temos o NI 9233 para as entradas do acelerómetro, e o NI 9205 com entradas analógicas, onde foi configurado o sensor laser. É possível ver na imagem com detalhe a montagem experimental feita:

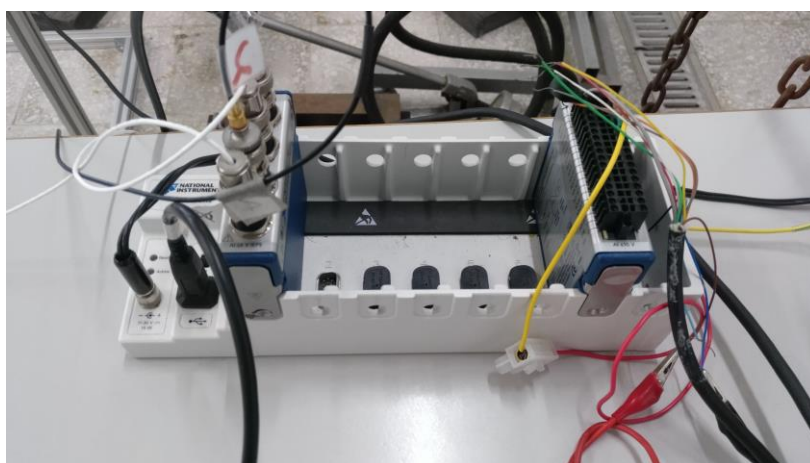


Figura 26 - Chassis NI cDAQ-9172 com os módulos inseridos e seus respectivos equipamentos. Acelerómetros no módulo da esquerda e sensor laser no da direita

3.7 Sensores

Tendo em conta a informação pesquisada sobre os sensores não contato a substituir os piezoelétricos, foram selecionados os sensores laser por terem um funcionamento que aplica-se melhor no caso de estudo. Entretanto apenas foi adquirido 1 unidade devido à falha apresentada no capítulo 4.5.1 no seu funcionamento em outros testes, não sendo apto na aplicação desta metodologia. O sensor utilizado é do modelo Micro Laser Displacement Sensor LM10 [29].

3.8 Softwares

Não se tratando propriamente de equipamentos físicos, estes são os softwares que foram utilizados para realizar o estudo. Foram feitas suas aplicações na fase de tratamento dos dados tanto do martelo piezoelétrico em comunicação com os sensores, a própria aquisição das respostas e por fim, o cálculo computacional da localização e quantificação do dano na estrutura.

3.8.1 Matlab

O Matlab é uma ferramenta computacional de matemática que permite criar algoritmos de forma a poder realizar procedimentos pré-programados, utilidade para diferentes casos e programação geral entre modelação de gráficos e conjuntos de elementos. Neste caso utiliza-se o auxílio do software para realizar o estudo tendo em conta o MEF.

Como síntese, o programa utilizado recebe como inputs os dados da estrutura viga (ou outro tipo), parâmetros de análise de modo a obter valores mais precisos e com isto o programa gere como output vários valores de cálculos intermédios das várias expressões deduzidas nos outros capítulos anteriores. Mais importante, o algoritmo tem capacidade de utilizar os valores obtidos no software LabView provenientes dos sensores e computar a posição onde localiza-se as forças aplicadas, sendo uma delas o impacto do martelo piezoelétrico, e as restantes as posições candidatas para localizações do dano, sendo depois possível quantificar o efeito em “força” desses danos e representá-los em alterações das propriedades dinâmicas.

É possível consultar as linhas do código em nos anexos do documento. A Figura 27 simplifica o seu funcionamento.

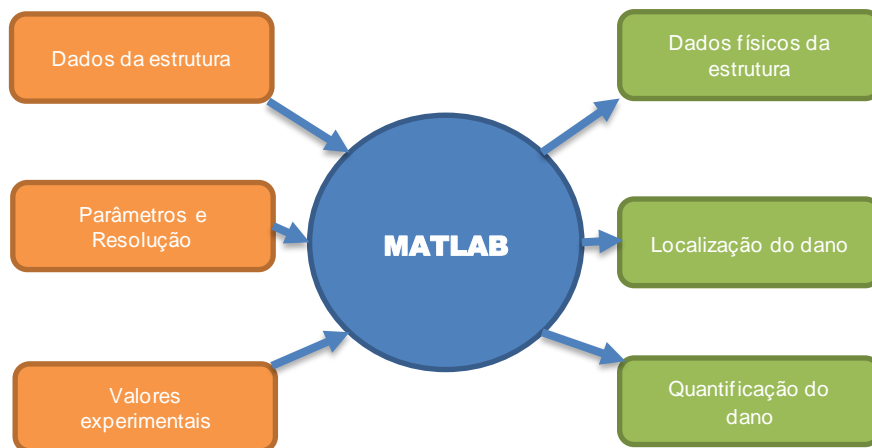


Figura 27 - Esquema de representação dos funcionamento do inputs/outputs do software Matlab

3.8.2 Labview

O LabView trata-se de um software capaz de modelar e criar ferramentas virtuais (virtual instruments, ou VIs). Isto significa a criação de programas concebidos a interagir com vários tipos de hardware, de modo a obter o estudo necessário pelo programador. Para esta dissertação foi aproveitado um VI já existente da dissertação de [27] de forma a possuir um programa capaz de fazer a comunicação entre o sinal do impacto do martelo piezoelétrico, e a devida modelação de sinais necessária para obter as curvas necessárias para servirem como inputs no Matlab.

A utilização do Lab View é indispensável devido a utilização personalizada e simultânea dos acelerómetros, sensor laser e martelo piezoelétrico.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

4.1 Procedimento Experimental

As experiências serão efetuadas no laboratório de vibrações do DEMI. Irá ser planeada uma estrutura base na qual estará suportada por fios o nosso elemento de interesse a ser estudado. Também será projetado a montagem e posicionamento dos sensores selecionados para fazer as medições dos deslocamentos. A Figura 28 indica um esquema geral do procedimento a ser realizado.

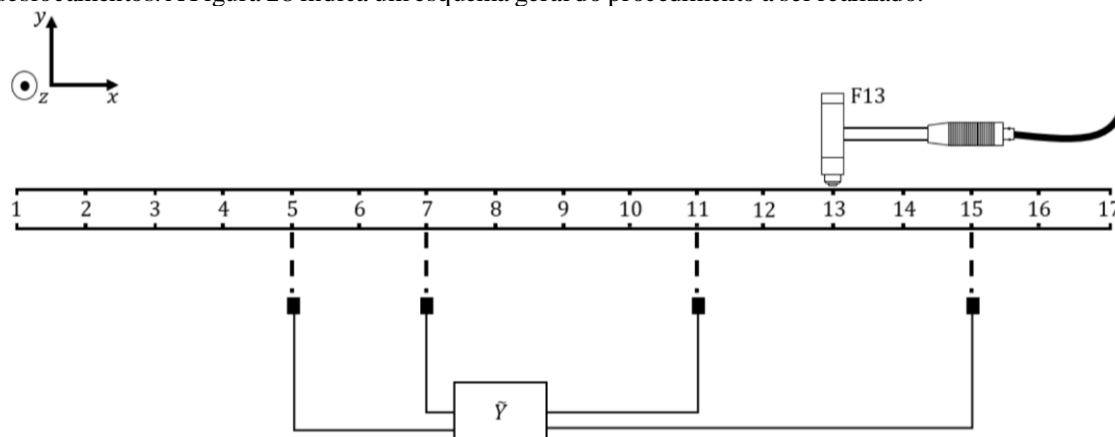


Figura 28 - Representação de um esquema de uma viga dividida em 16 elementos (17 nós) e a aplicação da força de excitação pelo martelo piezoelétrico. Adaptado de [19].

4.2 Equipamento e esquema

Para um bom ensaio experimental, é necessário fazer a devida calibração de todos os instrumentos e devida montagem estrutural.

De seguida, tendo o sensor calibrado é necessário ter em conta o suporte. Pela natureza de ser um sensor laser de não contato (Capítulo 3.7) é necessário um suporte estável e ajustável para posicionar o sensor próxima a estrutura a ser analisada, estrutura esta que possa uma boa rigidez de forma a não causar oscilações não desejadas. Foi aproveitado de [19] a mesma estrutura e posicionado o sensor em seu suporte como apresentado na Figura 29.



Figura 29 - Posicionamento do sensor Laser face a estrutura para ser ensaiada

Apenas foi possível adquirir apenas 1 sensor de laser no laboratório do DEMI. Para contrariar a falta de sensores, será utilizado e tendo em conta o número mínimo de sensores a ser utilizado para verificar o método (≥ 3 sensores) os restantes sensores utilizados foram acelerómetros. De seguida é avaliado o método apenas com os acelerómetros de forma a comparar os valores obtidos do sensor laser.

De forma a configurar o sensor laser para ter compatibilidade com o chassis da NI, foi necessário avaliar a sua ficha técnica e entender quais os fios necessários para alimentar o dispositivo e onde sairia a voltagem (output) e a terra. Desta forma foi feita a configuração apresentada na Figura 30.

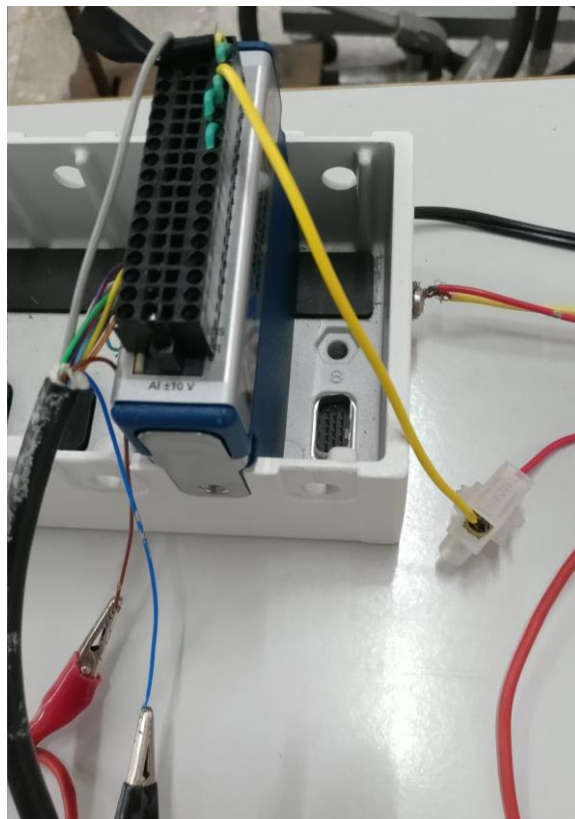


Figura 30 - Configuração do sensor laser no chassis

O sensor obtido já se encontrava guardado por algum tempo devido a grandes níveis de ruído. Contudo o sensor poderia apresentar alguns defeitos ocasionalmente, com um melhor arranjo eletrónico dos fios notava-se um melhor funcionamento do sensor. Preve-se que o sensor cumprirá com o requisito de modo a realizar o procedimento da identificação de dano. Caso não seja um sensor apropriado, será feito o ensaio com acelerómetros.

O Chassis estará ligado ao computador com o software LabView aberto por utilizar.

A estrutura a ser analisada será uma viga de aço, de ensaios experimentais do DEMI, de secção retangular possuindo uma fissura localizado no centro. Será feita a discretização da viga em 9 nós distanciados entre si aproximadamente 62,5 mm, tendo o dano localizado próximo ao nó 6 (na metade da viga), ou seja, em 8 elementos viga interligados para poder ter a melhor aproximação os valores numéricos dos experimentais, como apresentado na Figura 31.

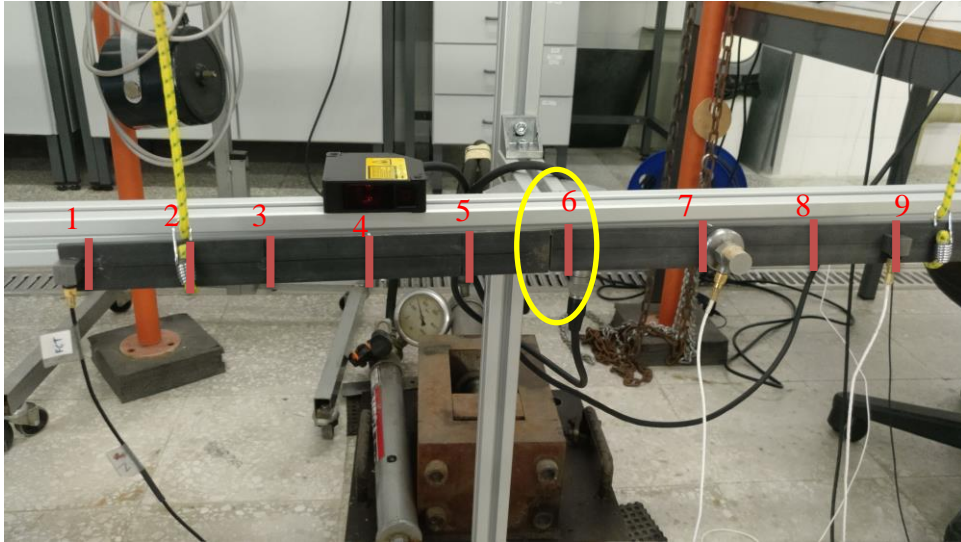


Figura 31 - Representação dos nós e elementos na estrutura e localização do dano

Não sendo um aço especializado foram atribuídos os valores da densidade e do módulo de elasticidade de 7860 kg/m^3 e 200 GPa . Por fim foi atribuído aos fatores de amortecimento da eq. (22), δ e β respectivamente de 1×10^{-5} e 0 . É possível ter uma melhor representação da estrutura na Figura 32 juntamente com a direção onde serão aplicadas as forças de excitação:

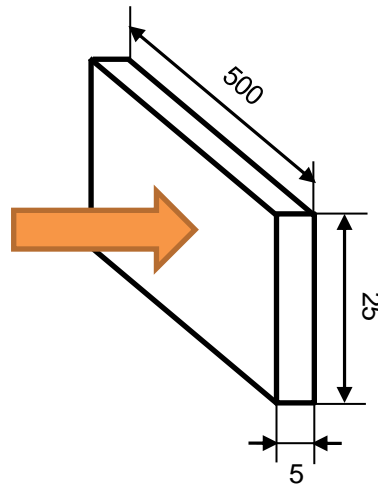


Figura 32 - Dimensões em milímetros da viga e representação da direção das forças aplicadas ea direção (laranja) da aplicação das forças

4.3 Softwares

Tendo em conta os softwares Matlab e LabView, serão avaliados os programas desenvolvidos em cada um e comentar o seu funcionamento.

4.3.1 Matlab

No Matlab foi criado um programa principal chamado IDdano, nele serão feitas principais considerações e cálculos por uma estrutura já modelada em MEF e sendo aplicado os nós K e U (Capítulo 2.4.3), o programa consegue fazer a comparação com os valores experimentais obtidos dos sensores vindos do software LabView e localizar o ponto de aplicação da força gerada pelo efeito do dano. Adicionalmente, existe outro programa que gera a matriz global de receptancia H. Esta matriz é modelada tendo em conta os MEF e da geometria da estrutura. Neste caso o algoritmo BEAM6_H é utilizado para a modelação da estrutura da viga com as propriedades ditas no capítulo 4.2 composta por 9 elementos. Seria possível a aplicação de outros tipos de estruturas de forma a gerar uma matriz de receptancia com outras propriedades.

Na Figura 33 podemos ver um exemplo da receptancia computacional da viga e na Figura 34 o valor experimental em um teste.

Não foi possível modelar o código Matlab ao ponto de fazer a identificação e quantificação do dano, a ficar apenas pela localização do dano. O procedimento restante pode ser aplicado em trabalhos futuros.

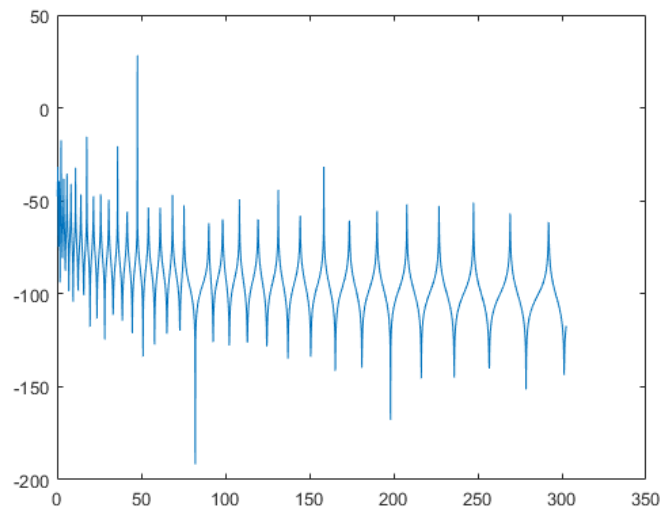


Figura 33 - Exemplo de uma FRF Obtida Pela Receptância computacional da estrutura

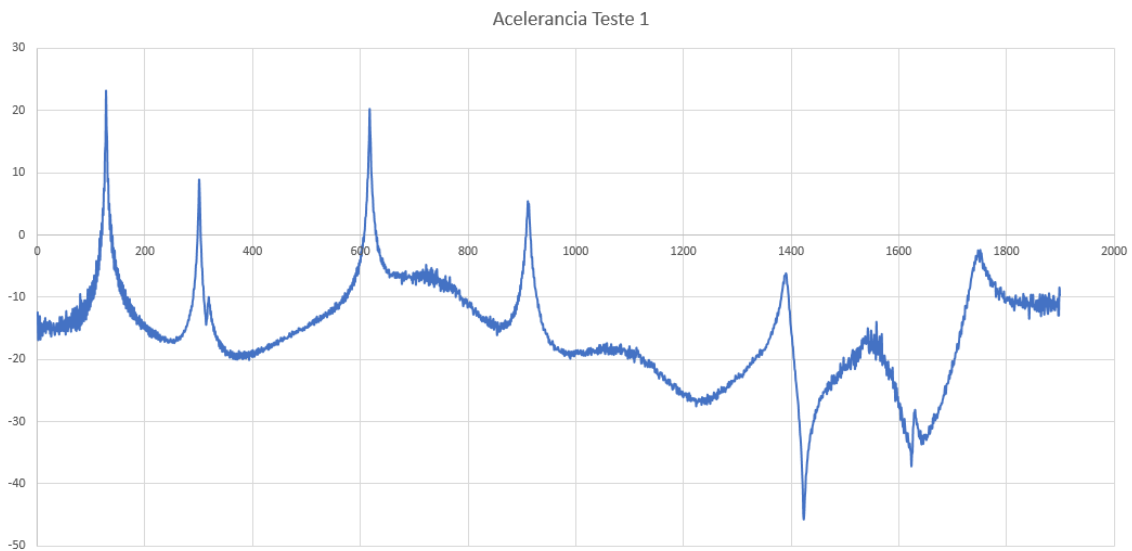


Figura 34 - Inputs dos dados experimentais dos acelerômetros obtidos pelo LabView.
Magnitude/Frequência

4.3.2 Labview

Como próximo objetivo pretende-se fazer a avaliação do sensor laser. Irá ser testado o sensor laser e simultaneamente os sensores convencionais piezoelétricos. Tendo a seleção feita irá ser utilizado o software Labview para a modelação de um instrumento virtual capaz de receber respostas dos sensores e manipular estas respostas por transformação de sinais em deslocamento pela modelação de blocos lógicos (Figura 35) de forma a calcular os valores desejados. De seguida será montado o local da experiência tal como organização dos seus equipamentos. Paralelamente será codificado o programa computacional utilizando o software Matlab para a modelação do MEF onde será efetuado todos os cálculos e a realização da identificação do dano. Tendo todas estas tarefas concluídas, existirá recursos suficientes para redigir a dissertação final, concluindo o estudo.

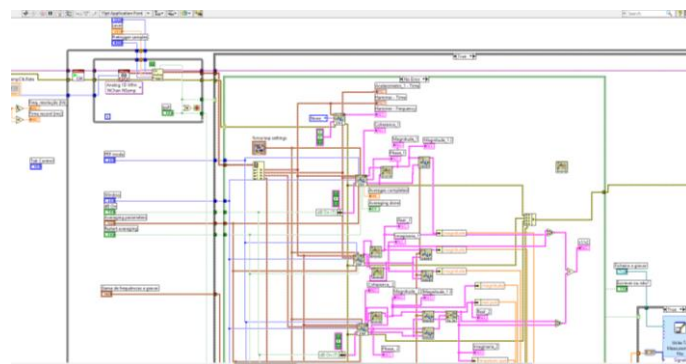


Figura 35 - Esquema do Block diagram do LabView utilizado

Tendo em conta o VI utilizado, foram utilizados os parâmetros apresentados na Figura 36 para fazer a aquisição e tratamento dos dados dos sensores. Como exemplo pode-se obter um gráfico como na Figura 34.

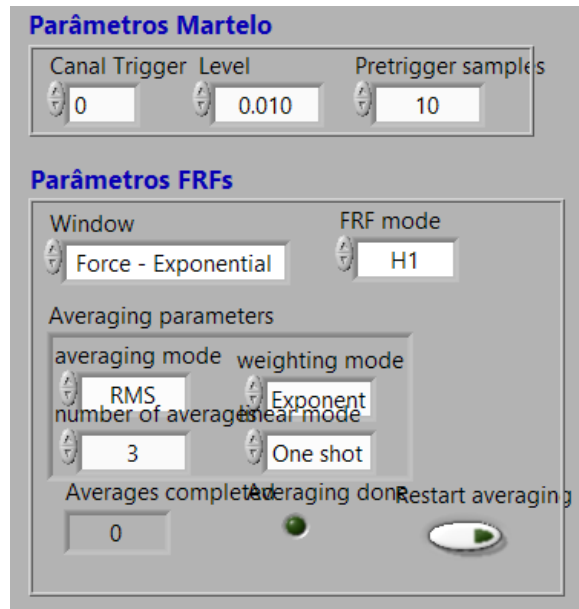


Figura 36 - Parametros utilizados para aquisição dos dados via LabView

4.4 Calibração do Sensor Laser

De modo ao sensor de laser fazer as medições corretas deve-se fazer a tua calibração, tendo em conta que o sensor regista valores em diferença de potencial (Volts) e o desejado é obter deslocamentos (metros) para que os softwares obtenham valores concisos. Para resolver este problema, foi utilizado uma régua onde foi registado diversos valores de diferença de potencial vs. a verdadeira distância. Pode-se visualizar esse procedimento na figura X. Notou-se que tal como na ficha técnica do sensor, este tem um comportamento linear sendo apenas necessário fazer uma transformação polinomial de grau 1, representado na Figura 38. Deste modo conseguiu-se calibrar corretamente o sensor.



Figura 37 - Procedimento para a calibração do Sensor Laser

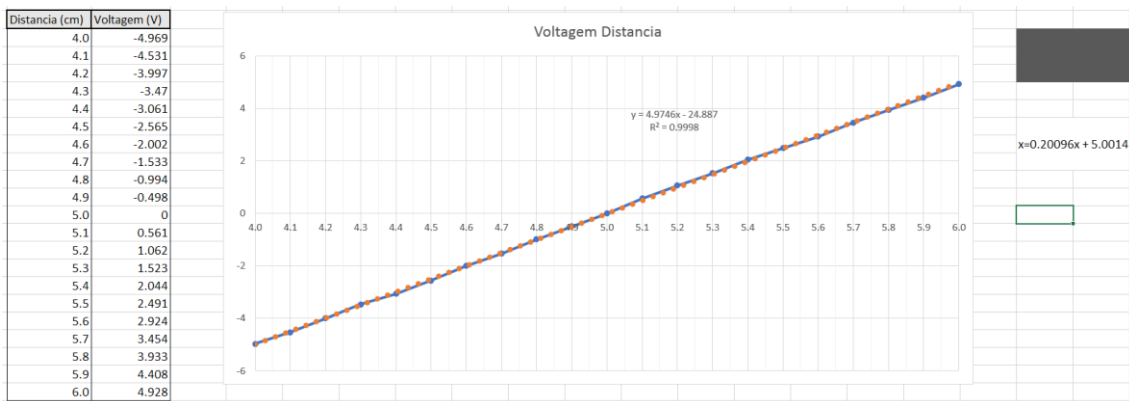


Figura 38 - Calibração feita por regressão linear. Voltagem/Distancia. Teste realizado com vários ensaios do sensor laser com distancias conhecidas. equação na direita que foi aplicada para fazer a transformação do sinal em volts para centímetros

É previsível a conversão de energia para distancia ter um comportamento linear tendo em conta a ficha técnica do sensor laser. Entretanto para obter valores corretos foi feita esta calibração.

4.5 Ensaios da aplicação do método e aquisição de dados

Os ensaios seguirão a metodologia imposta pela Figura 28. Sendo mais específico, em cada análise será colocada um arranjo dos sensores na viga danificada, de modo a verificar a importância ou não da posição dos sensores na identificação de dano.

A estrutura estará apoiada por dois fios, tomando a condição livre-livre, assegurando o seu comportamento livre-livre e será excitada pelo martelo piezoelétrico e iniciar as suas vibrações conforme a Figura 31 e simplificado na Figura 39.

4.5.1 Primeiro ensaio

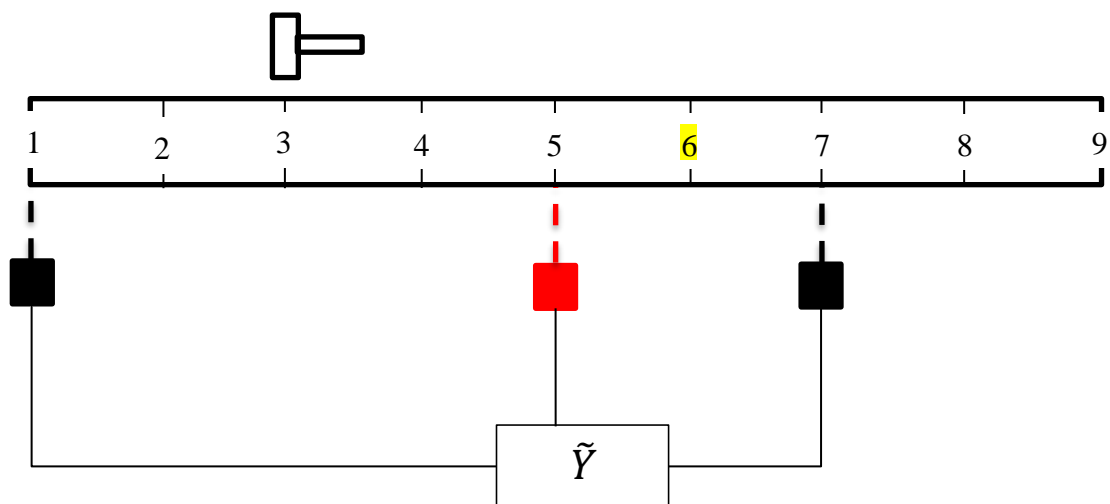


Figura 39 – Esquema da primeira configuração

Nesta primeira análise teremos os seguintes sensores: 2 acelerómetros e o sensor laser a atuar. Ao realizar o ensaio notou-se que os valores obtidos da resposta não são semelhantes a uma FRF, diferente de uma FRF obtida em um acelerómetro. Comparativamente o comportamento dos acelerómetros foi o previsto, tal como apresentado na Figura 40:

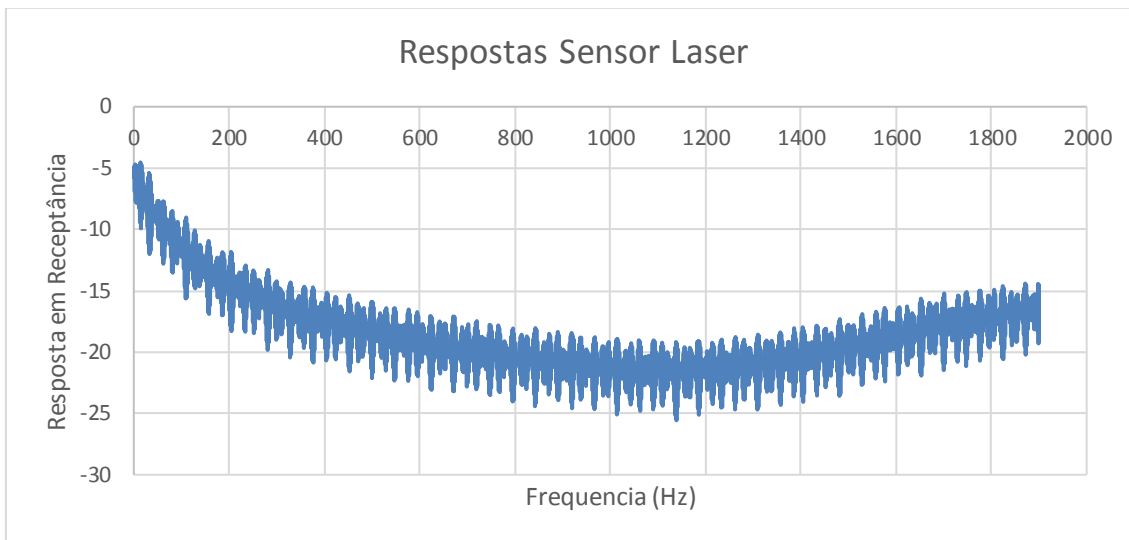


Figura 40 – Resposta obtida pelo sensor Laser

Pode-se verificar quem além da incoerência de curvas, o gráfico do laser não apresenta valores de ressonância nem antirressonância. Este gráfico não representa de forma correta a estrutura e desta forma foi feita a decisão de desconsiderar o sensor laser para as análises devido aos valores da resposta não terem aparência de uma FRF de uma estrutura viga. Pode-se verificar na Figura 41 a representação da resposta dos acelerómetros.

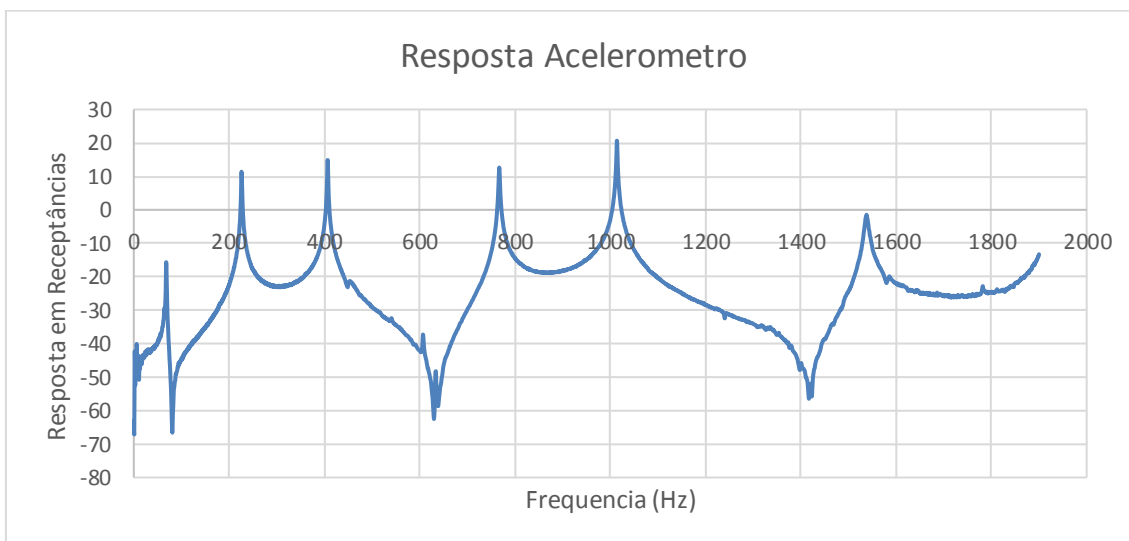


Figura 41 - Resposta obtida pelo acelerometro a esquerda na Figura 39

4.5.2 Segundo ensaio

Neste ensaio apresentado pela Figura 42, com a falha do sensor laser, será apenas utilizado acelerómetros, onde já é previsível um resultado mais coerente. Na aplicação da identificação de dano obteve-se os seguintes resultados:

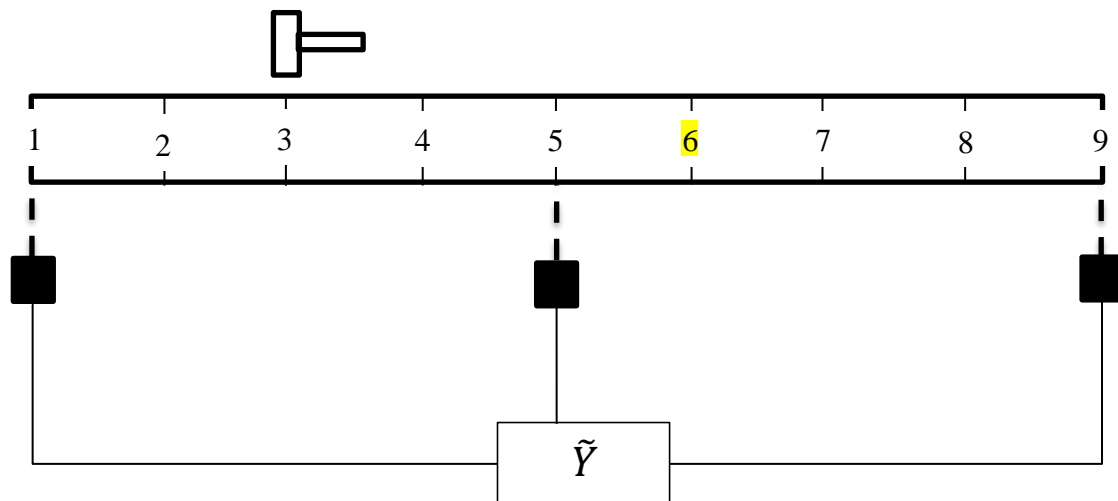


Figura 42 – Esquema da segunda configuração

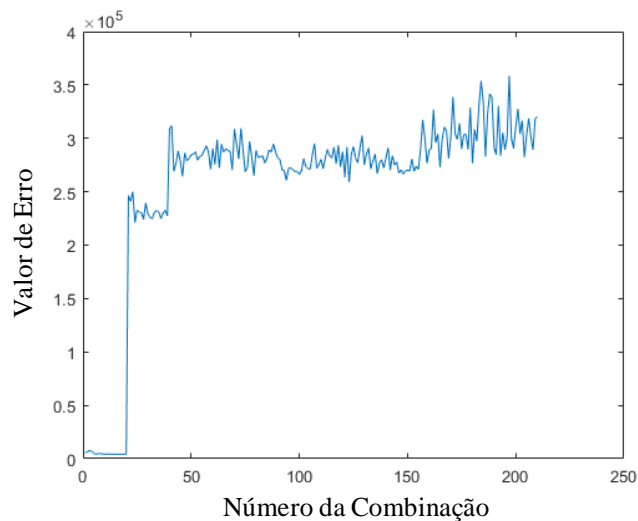


Figura 43 - Gráfico dos erros da comparação dos valores experimentais vindos do LabView com os valores modelados computacionalmente no Matlab.

E verifica-se pela figura que, para o método detetar um dano, foi modelado no algoritmo Matlab para detetar, no máximo, 2 forças aplicadas na estrutura. Uma força seria do martelo piezoelétrico a carga de excitação e outra a força gerada pelo efeito do dano, pretendendo ser feita a sua localização e quantificação. Pelo programa Matlab foi localizado apenas uma força no nó 6 (pela combinação do gráfico apresentado na Figura 43, identificado o nó de atuação da força pela Figura 42) quando devia apresentar o par do nó onde foi aplicada a força e o dano. O método neste ensaio não pode ser aceite na totalidade por não ter identificado um par de forças como desejado. Acredita-se que este erro seja devido a um mal

dimensionamento da estrutura e sua divisão pelo MEF. Outra hipótese podia ser a existência de um dano muito significativo que absorveu o efeito do martelo por completo.

4.5.3 Terceiro ensaio

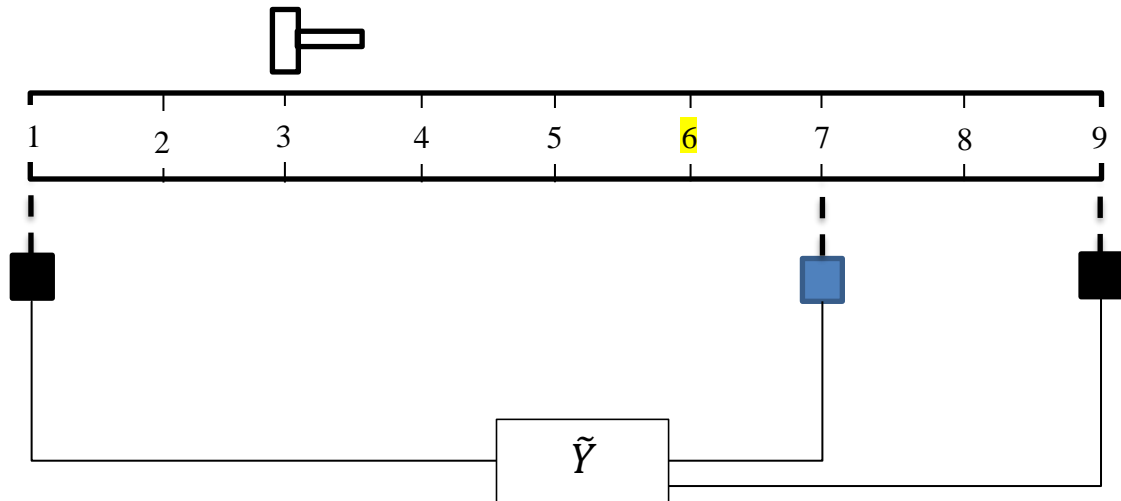


Figura 44 – Esquema da terceira configuração

Neste ensaio alterou-se a posição de um dos sensores como apresentado na figura 40 de forma a verificar que os resultados no ensaio anterior sejam iguais, de modo a aceitar uma verificação do método que para qualquer localização dos sensores na estrutura, o resultado seja sempre o mesmo devido ao Capítulo 2.4.2.

Pela mesma abordagem tomada no capítulo 38 e alteração dos parâmetros de cálculo (Localização dos nós a serem analisados pelo Matlab), novamente, não há a existência da força do martelo piezoelétrico, fortificando ainda mais o argumento de a estrutura não ser muito uniforme e semelhante à sua forma computacional, ou devido ao dano significativo. Contudo foi identificada apenas uma força no nó 7 sendo incoerente com o valor anterior, mas ainda assim, na fronteira com o dano.

4.6 Discussão de resultados

Tendo em conta os valores obtidos podemos enunciar as maiores falhas observadas e não previstas:

A falha dos sensores laser:

Acreditava-se que os sensores laser, dentro dos outros tipos de sensores pesquisados, seria o melhor concorrente podendo substituir os acelerômetros. Contudo notou-se que a precisão e resolução não foi suficiente. Previu-se que a gama de frequências de funcionamento seria suficiente para adquirir as repostas da estrutura. Entretanto notou-se que apenas apresentam um bom rigor nas suas gamas de frequências recomendadas (1kHz). Pensa-se que esse rigor acabe por ser prejudicial principalmente no ensaio de uma estrutura suspensa por fios. Com o acelerômetro a fazer medições das variações “internas”

da estrutura, o sensor laser sente mais dificuldades por não poder acompanhar o movimento relativo e acumulando mais erros de leitura.

Aplicação dos resultados experimentais não identificou claramente o dano no 2º teste:

Houve apenas identificação de uma força no 2º ensaio. O método de identificação de forças procura o comportamento estrutural computacional e teórico que será mais semelhante ao experimental. Podemos entender que o algoritmo não quantificou o efeito da força de excitação. Acredita-se que um fator a ter em conta seja as dimensões da viga (5 metros de comprimento) quando com um maior comprimento adquiriria valores com menos erros tendo em conta a deteção do dano. Pode haver alguma falha na aplicação da força de excitação, neste caso, com pouca força, ao ponto do algoritmo não detetar o dano.

No terceiro teste identificou apenas uma força fronteira ao dano:

Este problema assemelha-se muito ao problema anterior. Devido a interferência existente, a alteração de sensores nesta nova configuração. Pode ter alguma influência a posição do novo sensor que deslocou-se do nó 5 para o nó 7, trazendo consigo mais massa próximo ao nó 7 sendo causadora de um dano proveniente da força fictícia pela adição de massa.

Os valores reais não estiveram próximos ao serem verificados pela tabela dos erros:

Foi verificado o método estudado em [19]. Entretanto, a força identificada não era a desejada, ao verificar o valor do erro da verdadeira combinação de forças e ver se ainda assim passa por um mínimo local na função.

Estes erros não são os únicos a apresentar. A própria estrutura dos fios e da própria montagem pode ter sido responsável com um impacto nos valores. Já mencionado anteriormente a aplicação da força de excitação pode ser outra causa dos erros. Verifica-se que a viga poderia ser de melhor qualidade académica para avaliar o método, tendo em conta o estado em que se encontrava. Possivelmente pode ter a existência de erros de engenharia ou computacionais na implementação de fórmulas ou cálculos complexos. Todos estes erros podem ter intensificado a falha do método visto que este método como visto anteriormente, é muito sensível ao ruído. Os acelerómetros poderiam necessitar de calibrações simples que podem alterar completamente os valores. Ainda assim acredita-se que os valores obtidos nos acelerómetros são fidedignos e que o erro esteja do desenvolvimento das ferramentas do método. O método não foi verificado na totalidade, mas ainda assim obteve-se valores próximos, provando que maior parte dos ensaios foram feitos de forma correta. Por fim, não foi possível otimizar o método nem reduzir os erros experimentais.

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusões do estudo

Com esta dissertação pretendia-se fazer a devida identificação e quantificação do dano em uma estrutura tendo disponível as forças atuantes identificadas na estrutura. Foram definidos no Capítulo 1.5 os objetivos principais a alcançar com esta dissertação. No seguimento do documento é apresentada a seleção e verificação dos sensores laser candidatos como sensores não contato e a verificação do método teórico da identificação do dano (incompleto).

No capítulo 2, além de serem apresentadas as bases teóricas para a compreensão do método, foi feita a demonstração para a identificação do dano e a quantificação do mesmo, sabendo as suas propriedades. Tal como verificado em [18], é possível fazer a identificação e quantificação do dano. Entretanto a metodologia é muito sensível à presença do ruído nos sinais de resposta. Além disso em [19] foi feita a nova abordagem pela utilização dos sensores não contato. Foram utilizados os sensores laser como sendo os melhores substitutos dos acelerómetros, tendo em conta o seu funcionamento teórico ser bastante plausível para a aplicação. Esta explicação é feita no capítulo 3 juntamente com os principais procedimentos experimentais, que são semelhantes aos realizados em [19].

No capítulo 4 é apresentado o equipamento utilizado, os ensaios realizados e os resultados obtidos. Além da descrição do equipamento e do funcionamento dos *softwares* a serem utilizados, é posto em teste o sensor laser. Foram obtidos resultados não desejáveis na representação da sua resposta, sem valores semelhantes ao do acelerómetro e assim concluindo que não é válido para o método. De seguida foram feitos ensaios utilizando apenas acelerómetros apenas realizando a identificação de forças.

Tendo em conta os pontos principais discutidos no capítulo 4.6 conclui-se que o tema abordado e planeado nesta dissertação necessita de mais estudo. Ainda assim avaliou-se a não compatibilidade do sensor laser como um sensor não contato em leituras de vibrações mecânicas.

5.2 Trabalhos futuros

O tema de controlo de condição e manutenção industrial está em constante desenvolvimento devido ao foco em reduzir custos nas produções e em resolver falhas de forma rápida e eficaz. Este estudo e outros mencionados neste documento devem servir como base de conhecimento para que estudos futuros se possam focar em novas metodologias ou diferentes aplicações.

Não tendo feito o estudo completo da identificação, recomenda-se que sejam feitos novos ensaios experimentais e que sejam aplicadas a identificação e quantificação do dano de forma completa segundo [18] e sucessivamente, verificar e adaptar outros métodos para o problema de redução de ruído nos sinais.

Os sensores laser não foram aceites como substitutos dos acelerómetros neste estudo. Contudo os sensores laser são muito rigorosos em ensaios de posicionamento. Tendo em conta os ensaios realizados acredita-se que estes não sejam adequados para oscilações em gamas de frequências acima dos 500Hz.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cawley, P., “Machinery Condition Monitoring and Structural Health Monitoring – Potential for Cross Fertilisation?”, 3rd European Workshop, Structural health monitoring, Granada, Spain, 2006.
- [2] AS MAIORES OBRAS MECÂNICAS. (2012, 18 de dezembro de 2019) Pedro Garcia wordpress: <https://pedrogarcial2av1.wordpress.com/about/as-maiores-obras-mecanicas/>
- [3] PESSOAL DE MANUNTENÇÃO DE AERONAVES (2017, 18 de dezembro de 2019) Mecânicos de Plantão: <http://mecanicosdeplanta.com.br/site/pessoal-de-manutencao-de-aeronaves/>
- [4] ERROS FATAIS! CONHEÇA OS 10 PIORES DESASTRES CAUSADOS POR FALHAS DA ENGENHARIA (2016, 18 de dezembro de 2019) Notícias R7: <https://noticias.r7.com/internacional/fotos/erros-fatais-conheca-os-10-piores-desastres-causados-por-falhas-da-engenharia-11022016#!foto/2>
- [5] Wowk, V., “A Brief Tutorial On Machine Vibration” Machine Dynamics, Inc.
- [6] Roque, A. A., “Equilibrage Dinâmica no Local. Dos Conceitos à Prática”, Departamento de Engenharia Mecânica Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2002
- [7] History of Mechanical Engineering (2019, 20 de dezembro de 2019) Wikipedia (EN): https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_mechanical_engineering
- [8] 4 TIPOS DE ESTRUTURAS DE PONTES QUE TODO ENGENHEIRO PRECISA CONHECER (2016, 20 de dezembro de 2019) AWA Comercial: <http://awacomercial.com.br/blog/tipos-estruturas-de-pontes/>
- [9] VOCÊ SABE PARA QUE SERVE A ESPIRAL NA TURBINA DO AVIÃO? (2017, 20 de dezembro de 2019) Engenharia 360: <https://engenharia360.com/para-que-a-espiral-na-turbina-do-aviao/>
- [10] ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (20 de dezembro de 2019) Minha Pós: <https://www.minhapos.com.br/areas-de-posgraduacao/engenharia-producao.html>
- [11] MECÂNICA ESTRUTURAL (20 de dezembro de 2019) DEMI FCT-UNL: <https://www.demi.fct.unl.pt/departamento/organizacao/mecanica-estrutural>
- [12] Rao, S. S., 2010, Mechanical Vibrations, Prentice Hall.
- [13] A FÍSICA DA MÚSICA (2011, 20 de dezembro de 2019) Música Sacra e Adoração: <https://musicaeadoracao.com.br/25359/a-fisica-da-musica/>
- [14] O QUE É A ECOGRAFIA (20 de dezembro de 2019) Imagens Médicas Integradas: <http://imi.pt/pt/content/17-servios/76-o-que-a-ecografia?main=18¤t=67>
- [15] Lage, Y. E., Maia, N. M. M., Neves, M. M., and Ribeiro, A. M. R., 2013, “Force Identification Using the Concept of Displacement Transmissibility,” J. Sound Vib., 332(7), pp. 1674–1686.
- [16] Lage Y. E., Maia N. M. M., Neves M. M., “Force Magnitude Reconstruction Using the Force Transmissibility Concept”, Shock and Vibration, 2014.
- [17] Lage, Y. E., Neves, M. M., Maia, N. M. M., and Tcherniak, D., 2014, “Force Transmissibility versus Displacement Transmissibility,” J. Sound Vib., 333(22), pp. 5708–5722.
- [18] Maia, N. M. M., Neves M. M., Silva T. A. N., “Transmissibility versus damage detection”, ISMA 2018, K.U. Leuven, Belgium.
- [19] Saraiva, D.D., “Identificação de forças com base no conceito de Transmissibilidade” Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, dezembro, 2017
- [20] EDDY-CURRENT SENSORS (20 de dezembro de 2019) LION Precision: <http://www.lionprecision.com/eddy-current-sensors/>

- [21] CAPACITIVE SENSORS FOR DISPLACEMENT, DISTANCE AND POSITION (20 de dezembro de 2019) Micro-Epsilon: <https://www.micro-epsilon.com/displacement-position-sensors/capacitive-sensor/>
- [22] AN INTRODUCTION TO LASER TRIANGULATION SENSORS (2014, 20 de dezembro de 2019) AZO Sensors: <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=523>
- [23] INSPECTION OF CRACKS AND BREAKAGES (20 de dezembro de 2019) Micro-Epsilon; <https://www.micro-epsilon.com/applications/branch/Halbleiter/Ueberpruefung-Risse-Abbrueche/>
- [24] SENSOR DE DISTÂNCIA POR ULTRA-SONS (2018, 20 de dezembro de 2019) Robotic & Mechatronic HomeLab Kit Community: http://home.roboticlab.eu/pt/examples/sensor/ultrasonic_distance
- [25] Cardoso, J.B., “Métodos Computacionais Em Engenharia Mecânica”, Mestrado Integrado Em Engenharia Mecânica, Departamento de Eng. Mecânica e Industrial, FCT/UNL, 2018/2019
- [26] Maia, N. M. M., Silva, J. M. M., He, J., Lieven, N. A. J., Lin, R. M., Skingle, G. W., To, W., and Urgueira, A. P. V., 1997, Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies Pres Ltd.
- [27] Riscado, P.H.G.,” Determinação Experimental de Rotações em Estruturas através da Utilização de Sensores MEMS” Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, março, 2016
- [28] SPECIFYING AN ACCELEROMETER: FUNCTION AND APPLICATIONS (2015, 20 de dezembro de 2019) Engineering 360: <https://insights.globalspec.com/article/1263/specifying-an-accelerometer-function-and-applications>
- [29] MICRO LASER DISPLACEMENT SENSOR LM10 (DISCONTINUED PRODUCTS), (2013, 14 de janeiro de 2020) Parasonic: <https://www3.panasonic.biz/ac/e/fasys/measurement/measurement/lm10/index.jsp>