



Ana Sofia Ferrão Vicente

Licenciada em Ciências da Engenharia Mecânica

**Deteção de dano em juntas soldadas por
análise de vibrações, correntes induzidas e
ultrassons**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador: Doutor António Paulo Vale Urgueira, Professor
Associado, FCT-UNL

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

Deteção de dano em juntas soldadas por análise de vibrações, correntes induzidas e ultrassons.

“Copyright” Ana Sofia Ferrão Vicente FCT/UNL E UNL

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

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu profundo agradecimento a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, estiveram envolvidas no processo de elaboração deste trabalho.

Agradeço aos professores que me orientaram, ao Professor Doutor António Urgueira e á Professora Doutora Raquel Almeida, pela disponibilidade ao longo deste trabalho; pelo empenho nos esclarecimentos de dúvidas; pelo entusiasmo e preocupação demonstrada; pelas críticas, correções e sugestões e pela transmissão de conhecimentos.

Ao Professor Doutor Miguel Machado, e ao engenheiro Patrick Inácio pela ajuda em todos os ensaios realizados no laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI, por toda a paciência e disponibilidade.

Ao Sr. António Campos e ao Sr. Paulo Magalhães pela ajuda prestada durante a realização dos primeiros provetes.

Ao Miguel, uma pessoa muito especial que me acompanhou desde o primeiro dia, que esteve sempre ao meu lado disposto a ajudar, demonstrando compreensão e que muito me ajudou a ultrapassar nos momentos menos bons. Muito obrigada por todo o amor.

Aos meus amigos, Daniel, Diogo, Inês, Débora, Soraia, Daniela, Jandira, Vitinho um profundo obrigado pela amizade, pela compreensão, por todos os momentos de distração e apoio.

Ao, João Paulo, pelo carinho e energia diariamente transmitida.

Aos meus familiares, pela constante amizade e apoio, que à sua maneira também contribuíram decisivamente para a realização deste trabalho. Em especial;

Ao meu pai, João Vicente, um enorme agradecimento pela transmissão de conhecimento, e ajuda.

À minha supermãe, Ana Vicente, pela dedicação, amor e apoio incondicional.

Aos meus avós maternos pela força e companhia.

À minha irmã, Mary, por ter acreditado sempre, pela confiança e admiração.

À minha irmã, Joana, pela ajuda e a minha linda sobrinha pelo apoio e gargalhadas.

Aos meus padrinhos e aos meus primos pelo apoio, em especial ao meu primo Jorge que tanto me aturou, obrigada.

Do fundo do coração, um grande obrigado a todos!!

Resumo

As estruturas ao longo da sua vida útil sofrem desgaste inerente ao seu normal funcionamento, que pode provocar danos que afetem a sua capacidade de carga e desempenho, comprometendo assim a sua segurança e a dos que a rodeiam. Deste modo torna-se cada vez mais importante detetar o dano atempadamente para prevenir o mau funcionamento, avarias e acidentes.

O dano presente numa estrutura, normalmente caracteriza-se pela perda de rigidez localizada, produz alterações nas respostas dinâmicas desta e que podem ser constatadas através da observação das Funções de resposta em frequência.

Neste trabalho serão analisados três casos de defeitos/danos presentes numa junta soldada numa viga de aço a partir de vários ensaios não destrutivos. Apresenta-se um estudo que compara a capacidade de deteção e localização de defeito/dano, utilizando dados obtidos a partir da análise de vibrações e outros obtidos por intermédio de ensaios com ultrassons e correntes induzidas.

Por intermédio da análise da resposta dinâmica das vigas usando indicadores que utilizam FRF como indicadores que utilizam transmissibilidades foi possível detetar e localizar o dano para ambas as vigas.

Os ensaios não destrutivos de correntes induzidas e de ultrassons não nos permitiram detetar o dano presente em nenhuma das vigas a ser estudadas.

Palavras-chave: Ensaios não destrutivos; deteção; localização; análise de vibrações; ultrassons; correntes induzidas

Abstract

During their lifetime and as a result of working conditions, structures can suffer from damage and wear. These can compromise the structure's integrity and performance, and as a result, failure can occur. Thereby, early damage detection is becoming more and more important to prevent malfunction and failure, and consequently, assure that the structure is safe.

Structural damage can be characterized by loss of structural rigidity within the damaged area. This alters the structure's dynamic responses, which can be perceptible through the analysis of the Frequency Response Functions.

In the following work three examples of damage/defect in flat butt-welded joints, corresponding to three steel beams, are studied using non-destructive testing techniques. For each example, a comparison of the damage detection capability is presented when using vibration analysis (FRFs) as opposition to Ultrasound and eddy-current analysis.

This work shows that for each and every one of the beams, the damage/defect was successfully identified and located when applying indicators such as Frequency Response Functions and transmissibility, which derive from the structure's dynamic response. The other non-destructive testing techniques used (ultrasound and eddy-current) didn't make it possible for the damage/defect to be identified, and therefore located, in none of the beams.

Keywords: non-destructive tests, detection; localization; Frequency Response Functions; transmissibility; ultrasound; eddy-current.

Índice

Resumo.....	i
Abstract.....	iii
Índice	v
Lista de Abreviaturas.....	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas.....	x
1 Introdução.....	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da tese.....	3
1.4 Revisão bibliográfica	4
1.4.1 Introdução	4
1.4.2 Uso de FRFs na detecção do dano	5
1.4.3 Uso de transmissibilidades na detecção do dano.....	6
1.4.4 Uso de ultrassons para detecção de dano	8
1.4.5 Uso de correntes induzidas para detecção de dano	11
2 Conceitos teóricos.....	17
<i>Frequências naturais</i>	17
3 Casos de estudo	23
3.1 Características dos modelos experimentais.....	23
3.2 Danos dos modelos experimentais	23
3.3 Sistemas de Medição e Aquisição e Processamentos de Dados.....	25
3.3.1 Sistema de Aquisição e Medição de Dados utilizado na análise de vibrações	25
3.3.2 Dificuldades sentidas nos ensaios experimentais para análise de vibrações	29
3.3.3 Programa numérico utilizados na análise de vibrações	30
3.4 Identificação e localização do dano	30
3.4.1 Análise de Vibrações da Viga 2-B	30
3.4.2 Análise de vibrações da viga 3-B	35
3.4.3 Resumo da análise da resposta dinâmica das estruturas.....	45
3.5 Sistema de Aquisição e Medição de Dados utilizado no estudo de CI	46
3.5.1 Dificuldades sentidas na inspeção por CI.....	48
3.5.2 Programa numérico para CI	49
3.5.3 Estudo das correntes induzidas na viga 2-B	49
3.5.4 Estudo das correntes induzidas na viga 3-B	52
3.6 Sistema de Aquisição e Medição de Dados utilizado no Estudo de Ultrassons Imersos	54
.....	54
4 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	57
5 Referências Bibliográficas.....	59

Lista de Abreviaturas

END- Ensaio não Destrutivo

CI- Correntes Induzidas

US- Ultrassons

APC- Approximate Parameter Change

FRF – Função de Resposta em Frequência

GDL- Graus de Liberdade

FT- Função de Transmissibilidade

RNA- Rede Neuronal Artificial

VBM- Vibration-based method

CT- Coerência da transmissibilidade

CSF- Cross Signature Scale Factor

Índice de Figuras

Figura 1.1- Quadro representativo dos diversos tipos de sondas CI [30].....	8
Figura 1.2- Figura representativa de uma sonda direta [30].....	9
Figura 1.3- Figura representativa de uma sonda angular [30].....	9
Figura 1.4- Figura representativa de uma sonda de cristal múltiplo [30].....	10
Figura 1.5- Técnica de Imersão [31]	10
Figura 1.6- Campos magnéticos e correntes geradas pela sonda de CI [30].....	11
Figura 1.7- Representação do <i>lift-off</i> planar.....	11
Figura 1.8- Efeito de bordo	12
Figura 1.9- Comportamento das CI consoante a posição do defeito.....	12
Figura 1.10- profundidade de penetração [32]	13
Figura 1.11-Representação esquemática do modo de operação de uma sonda absoluta [32]	14
Figura 1.12-Representação esquemática do modo de operação de uma sonda diferencial [32]	14
Figura 1.13-Representação da sequência de uma inspeção com sonda diferencial e sinal curva de Lissajou associada [32]	15
Figura 1.14-Representação esquemática do modo de operação de uma sonda bridge [32]	15
Figura 1.15-Representação esquemática do modo de operação de uma sonda bridge diferencial [32]	15
Figura 3.1- Representação do modelo original em estudo	23
Figura 3.2-Vigas A usadas no caso de estudo.....	24
Figura 3.3- Esquema da Viga 1.....	24
Figura 3.4- Pormenor da soldadura da viga 1-A- Vista lateral.....	24
Figura 3.5- Esquema da Viga 2-A.....	24
Figura 3.6- Pormenor do defeito da viga 2-A- Vista lateral.....	24
Figura 3.7- Esquema da Viga 3-A.....	25
Figura 3.8- Pormenor do defeito da viga 3- Vista lateral.....	25
Figura 3.9- Acelerómetro <i>Bruel&Kiger Type 4507</i>	25
Figura 3.10- Martelo de excitação.....	26
Figura 3.11- Sistema de aquisição e processamento de sinais - OROS	26
Figura 3.12- Pormenor da fixação dos acelerómetros à viga	27
Figura 3.13 - Apresentação da condição dos apoios da estrutura ensaiada.....	27
Figura 3.14- Organização dos danos obtidos	28
Figura 3.15- Primeiras vigas ensaiadas – Vigas A.....	29
Figura 3.16 - Novas vigas, viga 1-B, 2-B e 3-B.....	29
Figura 3.17 - FRF da viga 1-B e da viga 2-B em H 14	31
Figura 3.18- Sensibilidade dos indicadores na deteção do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B usando FRFs.....	32
Figura 3.19- Sensibilidade dos indicadores na localização do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B usando FRFs.....	33
Figura 3.20- Sensibilidade dos indicadores na deteção do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B usando Funções de Transmissibilidade	34
Figura 3.21- Sensibilidade dos indicadores na localização do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B usando Funções de Transmissibilidade	35
Figura 3.22- FRF da viga 1B e da viga 3B em H14.....	36
Figura 3.23- FRF da viga 1-B, viga 2-B e viga 3-B em H14	37
Figura 3.24- Sensibilidade dos indicadores na deteção do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B e 3-B usando FRFs.....	38
Figura 3.25- Sensibilidade do indicador Razão na localização do dano na Viga 2-B e 3-B usando FRFs.....	39

Figura 3.26- Sensibilidade do indicador COH na detecção do dano na Viga 2-B e 3-B usando FRFs	40
Figura 3.27-Sensibilidade do indicador Erro na detecção do dano na Viga 2-B e 3-B usando FRFs	40
Figura 3.28-Sensibilidade do indicador CSF na detecção do dano na Viga 2-B e 3-B usando FRFs	41
Figura 3.29-Sensibilidade dos indicadores na localização do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B e 3-B usando FRFs.....	42
Figura 3.30-Sensibilidade do indicador Razão na localização do dano na Viga 2-B e 3-B usando FTs	43
Figura 3.31-Sensibilidade do indicador COH na localização do dano na Viga 2-B e 3-B usando FTs	43
Figura 3.32-Sensibilidade do indicador Erro na localização do dano na Viga 2-B e 3-B usando FTs	44
Figura 3.33-Sensibilidade do indicador Diferença na localização do dano na Viga 2-B e 3-B usando FTs	44
Figura 3.34 – a) Pormenor da sonda b) Vista geral da sonda utilizada na inspeção de END por CI.....	46
Figura 3.35 - Equipamento Olympus Nortec 500C.....	46
Figura 3.36 – a) Esquema geral de montagem dos ensaios de CI b) pormenor da sonda utiliza	47
Figura 3.37 - Defeitos presentes nas vigas A depois do cordão de soldadura afagado	48
Figura 3.38 – Alguns dos defeitos superficiais presentes na Viga 2A e 3A	48
Figura 3.39-Interface gráfica do utilizador do software LabVIEW.	49
Figura 3.40- Ensaio da viga 1-B e 2-B a 500 KHz.....	50
Figura 3.41- Ensaio da viga 1-B e 2-B a 750 KHz.....	50
Figura 3.42- Pormenor do defeito presente na viga 2-B e da posição das tiras de alumínio.....	50
Figura 3.43- Ensaio da Viga 1-B e 2-B a 2MHz.....	51
Figura 3.44- Ensaio da Viga 1-B e 2-B a 2MHz.....	51
Figura 3.45 - Pormenor do defeito presente na viga 2-B	51
Figura 3.46- Ensaio de CI da viga 1-B e 3-B a 500 KHz.....	52
Figura 3.47- Ensaio de CI da viga 1-B e 3-B a 750 KHz.....	53
Figura 3.48- Ensaio de CI da viga 1-B e 3-B a 1MHz.....	53
Figura 3.49- Pormenor do defeito presente na viga 2-B.....	53
Figura 3.50- Ensaio de CI da viga 1-B e 3-B a 2 MHz.....	54
Figura 3.51- Sonda utilizada nos ensaios de ultrassons.....	54
Figura 3.52- Ensaio de ultrassons submersos.....	55
Figura 3.53- Equipamento Krautkramer USM 36.....	55
Figura 3.54- Interface gráfica do utilizador do <i>software</i> LabVIEW.....	56

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Propriedades do material constituinte	23
Tabela 3.2- Frequências naturais estrutura sem dano (viga 1) e estrutura com dano (viga 2)	31
Tabela 3.3-Frequências naturais estrutura sem dano (viga 1) e estrutura com dano (viga 3)	36
Tabela 3.4-Frequências naturais das três vigas estudadas.....	38

1 Introdução

1.1 Contexto e motivação

Na atualidade torna-se cada vez mais importante detetar o dano atempadamente para prevenir o mau funcionamento, avarias e acidentes.

Durante o seu período de vida útil as estruturas podem estar sujeitas a carregamentos estáticos e/ou dinâmicos em simultâneo com fenómenos de corrosão, reações químicas e desgaste associado ao seu normal funcionamento. Estas solicitações podem originar fenómenos de fadiga e, conseqüentemente, diferentes tipos de danos na estrutura que influenciam a sua resposta dinâmica.

Geralmente os danos na estrutura traduzem-se numa perda de rigidez, associada a uma redução da secção transversal de um elemento estrutural, exemplo disso são as fissuras.

Um dano simples, não visível a olho nu, pode gerar consequenciências irreversíveis na estrutura, como fratura de um elemento constituinte ou até mesmo o colapso desta, podendo resultar em enormes prejuízos humanos e económicos. De modo a eliminar possíveis dúvidas sobre a integridade de uma estrutura, é necessário a utilização de métodos que permitam determinar a sua condição pela globalidade. Para tal são utilizados ensaios não destrutivos, ou seja, ensaios que não alteram as propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais do material a ser ensaiado. Estes contemplam a análise de vibrações mecânicas, radiografia industrial, gamagrafia industrial, ultrassons, correntes induzidas, líquidos penetrantes, inspeção visual e partículas magnéticas.

Embora as indústrias apliquem técnicas de avaliação e deteção de dano não-destrutivas continuam a observar-se acidentes em estruturas devido a existência de dano. Ocorrem devido ao facto da análise efetuada por estas técnicas, ser uma análise local e não uma análise global da estrutura. Não é comum no meio industrial realizarem-se análises completas às estruturas, isto fica a dever-se aos elevados custos associados do equipamento e do pessoal especializado, ao facto de serem processos morosos que por vezes obrigam à interrupção do seu funcionamento, não sendo, pois, esta uma opção muito viável.

Muitos investigadores têm proposto diferentes métodos, todos eles com o objetivo de formular diversos critérios e indicadores por forma a detetar e localizar o dano o mais precocemente possível. Procuram, em geral, resposta a cinco perguntas [1]: O dano existe? (Deteção); Onde está o dano? (Localização); Qual o estado de avanço do dano? (Quantificação); Qual o tipo de dano? (Classificação); Quanto tempo é que a estrutura ainda vai permanecer operacional? (Previsão).

Diversos investigadores têm revelado como objetivo a investigação e desenvolvimento da técnica de monitorização da integridade estrutural. Uma das abordagens recai sobre o estudo da influência do dano ao nível das características dinâmicas da estrutura, especificamente nas suas três principais características mecânicas: a massa, a rigidez e o amortecimento, visto que estas irão influenciar as propriedades dinâmicas: frequências naturais, modos de vibração e constantes de amortecimento.

As vibrações mecânicas estão muitas vezes relacionadas com comportamentos de fadiga que podem levar ao colapso das estruturas a sua análise promove inúmeras vantagens, nomeadamente a capacidade de monitorização contínua que tem como principal objetivo a deteção e localização de possíveis danos não visíveis a olho nu.

Foi no início da década de 70 que foram realizados os primeiros estudos na área da manutenção, que levaram mais tarde ao desenvolvimento da área de análise de dano em estruturas, utilizando vibrações mecânicas.

As Correntes Induzidas (CI) são uma descoberta com quase dois séculos, no entanto, foi só durante a segunda guerra mundial que estas foram postas em prática nos Ensaio Não Destrutivos (END). É um END que se baseia no fenómeno da indução eletromagnética como base do seu princípio de funcionamento. Os danos são detetados a partir da variação da impedância elétrica nos terminais de uma bobina, sujeita a uma corrente elétrica alternada, em interação com um material condutor elétrico. Pode ser aplicado a materiais ferromagnéticos ou não ferromagnéticos desde que estes sejam condutores de eletricidade. As correntes induzidas circulam só à superfície da peça (efeito de pele), sendo possível detetar apenas defeitos subsuperficiais.

O próximo ensaio não destrutivo que se pretende aplicar neste trabalho para detetar defeitos em componentes estruturais são os ultrassons. A primeira aplicação de ultrassons como END ocorreu em meados de 1930. O modo de funcionamento deste ensaio baseia-se na transmissão de ondas sonoras de elevada frequência no material que constitui a peça a inspecionar. Estas ondas refletem-se ao incidir na superfície de separação de dois meios com propriedades acústicas diferentes, de que é exemplo a superfície de um defeito. As reflexões quando recebidas pela sonda permitem detetar e localizar os defeitos se for conhecido o tempo de percurso, a velocidade de propagação do som, e o ângulo de emissão.

Os ensaios não destrutivos acima referidos foram escolhidos pois ambos eram factíveis no laboratório de tecnologia do departamento de engenharia mecânica e gestão industrial.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem com objetivo comparar a capacidade de detecção de dano numa junta soldada, utilizando dados obtidos a partir da análise de vibrações e outros obtidos por intermédio de ensaios com ultrassons e correntes induzidas.

A análise de vibrações consiste na medição e excitação da estrutura para obtenção das Funções de Resposta em Frequência (FRFs) e posteriormente das Transmissibilidades (Funções de Transmissibilidades), para a estrutura sem e com dano e a partir desta informação, estabelecer uma forma de comparação entre ambas que permita detetar e localizar o defeito/dano – métodos que usam o domínio da frequência.

Neste trabalho serão analisados três casos de defeitos/danos presentes na soldadura de uma viga, esta análise será efetuada utilizando os métodos de detecção atrás descritos e comparadas as suas capacidades de detecção, vantagens e limitações.

1.3 Estrutura da tese

O Capítulo 1 apresenta uma introdução geral ao tema em estudo e os objetivos que estiveram na base do trabalho desenvolvido. É neste capítulo que será apresentada a revisão bibliográfica, onde são referidos diversos métodos de detecção de dano tradicionais, que recorrem à utilização das frequências naturais, dos modos de vibração, das FRFs e das transmissibilidades, assim como de outros métodos não destrutivos, nomeadamente ultrassons e correntes induzidas.

No Capítulo 2 serão apresentados os conceitos teóricos relativos aos métodos utilizados nesta dissertação.

No Capítulo 3 são apresentados os diferentes casos de estudo, em que são analisadas várias soldaduras topo a topo, de duas vigas de secção transversal retangular, estas soldaduras apresentam diferentes tipos de defeitos. Serão descritos os ensaios experimentais realizados por forma a tornar possível a obtenção dos dados experimentais necessários para a utilização nos END em análise.

O Capítulo 4 será dedicado às conclusões obtidas no decorrer deste trabalho, assim como sugestões de estudos para trabalhos futuros.

1.4 Revisão bibliográfica

1.4.1 Introdução

Existem vários métodos de avaliação do dano em estruturas, estes podem ser divididos em três categorias [2]: métodos baseados em vibrações (Vibration-based method (VBM) que podem ser subdivididas em métodos que se baseiam em sinais e modelos. Os métodos dos sinais empregaram equipamentos de monitorização de vibrações comumente usados como sondas de proximidade, analisadores de espectro, com ou sem sistemas adicionais, como medição de vibrações torsionais. O método baseado em modelos é baseado em análises ou modelos numéricos para simular o comportamento de eixos fissurados durante a operação e correlacionar as assinaturas de vibração com a presença de uma fissura em locais do eixo. A segunda categoria é o teste modal, este é considerado o método mais popular dos métodos baseados em vibrações disponíveis, onde as alterações nos parâmetros modais, tais como as frequências Naturais, Modos de Vibração e a resposta à excitação (FRF) são usados para a deteção de dano. Estes parâmetros são de fácil obtenção através de análise experimental. e métodos não tradicionais. A terceira e última categoria são os métodos não tradicionais.

Atualmente o estudo de novas técnicas de análise modal tem proporcionado a identificação das características modais de inúmeros tipos de estruturas. Diversos investigadores têm desenvolvido métodos capazes de detetar, quantificar e localizar danos estruturais.

Rytter [3] identifica quatro níveis para a completa caracterização do dano. O nível 1 fornece informação sobre determinação da existência de dano na estrutura. O nível 2 sobre a localização. O nível 3 fornece informação acerca da quantificação do dano e por último o nível 4 estima o tempo de vida da estrutura. O último nível refere-se aos campos de avaliação de projeto estrutural ou análise de fadiga, e os três primeiros níveis dizem respeito mais especificamente ao problema das técnicas de monitorização da “saúde estrutural” e à escolha do método mais apropriado para a deteção e identificação de danos nas estruturas.

Segundo Chesné et al. [4] e Doebling et al [5] existem vários estudos que tinham como objetivo a deteção e localização de dano estrutural, baseados nas características modais das estruturas em estudo. No entanto, a aplicação destes métodos mostrou ter uma eficácia reduzida, tendo sido considerados como problemas o facto dos modos de vibração e as respetivas frequências naturais associadas não serem muito sensíveis à presença de pequenos danos e ainda ao facto das propriedades modais da estrutura poderem ser dependentes de fatores externos, de que exemplo, o vento, que pode provocar alterações nas vibrações mecânicas na mesma ordem de grandeza que a existência de um dano.

De acordo com *Park et al.* [6] as técnicas de detecção de dano podem ser divididas em duas classes principais: métodos onde é necessário um modelo numérico da estrutura e os métodos que utilizam dados obtidos através da experimentação.

Doebbling et al. [5], [7] e *Sohn et al.* [8] propuseram estudos sobre a monitorização estrutural da saúde e técnicas de detecção de danos nas comunidades de engenharia civil e mecânica.

Segundo *Sinou* [9] o primeiro artigo que propôs a detecção de dano usando a medição de vibração foi escrito por *Lifshitz e Rotem* [10].

Messina et al. [11] apresentam também um estudo que propõe a observação das alterações das frequências naturais de uma estrutura, produzidas pela presença de dano.

De acordo com *Salawu* [12] e *Lam et al.*[13], a informação cedida pelas frequências naturais é insuficiente para localizar corretamente o dano.

Os modos de vibração são característicos de uma estrutura quando esta vibra a uma das suas frequências naturais. Desta forma, a presença de dano pode ser visível na alteração destes modos.

1.4.2 Uso de FRFs na detecção do dano

Investigadores na área do dano propõem o estudo das FRFs em detrimento dos dados obtidos através da identificação modal. *Wang et al* [14] referem as vantagens da utilização das FRFs, uma vez que estas oferecem mais informação numa certa gama de frequências do que os dados obtidos pela análise dos modos de vibração, onde a informação é limitada as frequências naturais.

Lin e Ewins [15] desenvolveram um método de ajustamento de modelos estruturais que recorre a FRFs e que origina um conjunto de equações lineares. O método consiste na substituição dos GDL desconhecidos (não medidos) das FRFs experimentais pelos GDL analíticos homólogos, usando um processo iterativo para resolver o sistema de equações. *Wang et al.*[14] utilizaram este método para detetar dano numa estrutura treliçada.

De acordo com *Lee e Shin* [16] o dano é equivalente à alteração do módulo de elasticidade do material constituinte da estrutura. Estes autores formularam um método de detecção de dano, baseado em FRFs medidas, onde excluem as zonas intactas da estrutura da análise restando somente as zonas suspeitas de dano. Este método tem como vantagem, o facto de utilizar modos de vibração da estrutura intacta e as FRFs da estrutura danificada. No entanto, após teste efetuados com modelos numéricos, conclui-se que este método permite a detecção de dano, desde que o ruído presente nas FRFs não ultrapasse um limite máximo de 9%.

Park et al [6] sugerem um método de detecção de dano, por forma a reduzirem o volume de experimentação, que consiste na análise de dano ser realizada em várias subestruturas em substituição de uma única estrutura.

Araújo dos Santos et al [17] apresentam uma técnica de identificação de dano baseada nas sensibilidades das FRF, com a sua aplicação a uma estrutura laminada. Os autores constataram que a gama de frequências a estudar e o ponto de aplicação da excitação são fatores determinantes para o seu sucesso.

Diversas investigações experimentais mostraram que os parâmetros estruturais são afetados pelas condições ambientais. Limogelli [18] ao tentar verificar a influência do ruído e da temperatura na ponte I-40 no Novo México desenvolveu o método Interpolation Damage Detection Method (IDDM). Este método baseia-se na identificação do dano existente a partir da diferença entre o deslocamento medido num ponto e o deslocamento calculado por meio de uma função de interpolação para a mesma localização. Esta função é gerada através da leitura dos deslocamentos medidos nos diversos locais equipados com um sensor.

1.4.3 Uso de transmissibilidades na detecção do dano

Desde que Chen et al.[19] propuseram a utilização das Funções de Transmissibilidade (FTs) como ferramenta para detecção de dano, que as FTs têm sido alvo de estudo por parte de diversos investigadores em todo o mundo na área da detecção e localização de dano.

Worden [20] desenvolveu uma Rede Neuronal Artificial (RNA) que utiliza FTs para calcular um novo indicador para detecção de dano.

Além do facto das FTs demonstrarem ter uma alta sensibilidade no que diz respeito à detecção e localização de danos, o facto de não ser necessário medir a excitação imposta na estrutura é a principal motivação para o uso das mesmas neste género de estudo.

Uma alteração na localização(coordenadas) da excitação pode causar diferenças significativas nas FTs, quer na estrutura intacta, quer na estrutura danificada, causando assim falsos alarmes. Este ponto foi discutido por *Devriendt et al.*[21] onde foi apresentado que a amplitude da transmissibilidade registada nas frequências naturais da estrutura depende da localização da excitação. *Devriendt e Guillaume* [22] aplicaram esta propriedade para desenvolver técnicas de recolha de dados através de análise modal. Por forma a evitar a variação das FTs devido à mudança de localização da excitação da estrutura, foi proposto que se restringisse o estudo das FTs numa gama de frequências próxima das frequências naturais da estrutura.

Embora existam variados estudos que mostram, com exemplos específicos, a possibilidade de usar FTs na detecção de danos, estas não apresentam nenhum resultado analítico que valide os mesmos. Ainda que seja relativamente simples demonstrar a sensibilidade das FTs

à presença de dano, (em consequência de serem obtidas através de um rácio entre as FRFs que são, geralmente, muito sensíveis à presença de dano), é difícil localizá-lo através da utilização das FTs.

Analogamente aos estudos anteriores, têm sido publicado desenvolvimentos semelhantes usando FTs [23]–[27] de modo a realizar uma monitorização contínua das condições de funcionamento de estruturas. Foi utilizado, para detetar e localizar o dano, um indicador baseado na integração entre as FTs obtidas com uma estrutura sã e uma estrutura danificada, ao longo de uma gama de frequência. O dano localizado entre dois pontos i e j vai provocar alterações na função de transmissibilidade entre esses dois pontos e não vai causar nas FTs entre outros pontos. A aplicabilidade desta técnica foi avaliada com dados experimentais adquiridos em vigas, placas e pás de turbinas eólicas. Embora este método ter ficado provado com os exemplos estudados, não existe desenvolvimentos analíticos para avaliar o limite da sua aplicabilidade. Em particular, a questão da gama de frequências específica para obter uma boa localização de dano não foi questionada.

Maia et al.[28] sugeriam um indicador de dano que se baseia na correlação entre as FTs correspondentes à estrutura sã e danificada, semelhante ao Modal Assurance Criterion (MAC). Este indicador foi proposto para responder ao problema da deteção de dano. Os resultados apresentam uma maior sensibilidade na utilização de FTs em comparação com as FRFs. No entanto, é difícil avaliar a sua generalização nas inúmeras abordagens que possam ser estudadas.

Uma nova abordagem de deteção e quantificação de dano baseada na transmissibilidade foi proposta em [29]. Este estudo ilustrou a coerência entre duas saídas e a recentemente definida coerência da transmissibilidade (CT); construiu uma relação entre a CT e a tradicional coerência FRF em análise modal, seguindo a construção de um indicador sensível a danos, usando o critério de garantia modal para detetar e quantificar relativamente danos estruturais. Para testar a viabilidade da abordagem proposta, é posta em prática uma simulação numérica da estrutura de um laboratório e, adicionalmente, medidas experimentais de uma estrutura de alumínio de três andares são usadas para verificar a aplicabilidade do indicador proposto.

A CT tem uma importante vantagem sobre a coerência de FRF, uma vez que o antigo não precisa de conhecer a excitação de entrada no sistema, o que poderia ser uma importante característica para aplicações no mundo real. A CT pode ser usada para verificar se a experiência é bem conduzida, uma vez que a mesma dá indicações sobre a presença de ruído no sistema. Também pode ser usada para detetar danos usando a mudança de frequência como indicador de danos. Adicionalmente, a análise CT proposta pode ser usada para detetar danos, especialmente em análise não linear; foi demonstrado que funciona bem na quantificação de danos não lineares. Além disso, a CT e os indicadores relacionados são sensíveis às variações ambientais como o ruído, o que poderá ser usado para monitorizar as condições operacionais.

1.4.4 Uso de ultrassons para detecção de dano

Quanto aos métodos de ensaio não destrutivo de materiais, pelo emprego de ultrassons, aplicam-se, especialmente, na verificação de peças de aço ou em produtos ferrosos.

Essencialmente, os aparelhos construídos para esse género de ensaio, baseiam-se na aplicação de energia sonora entre 1 e 15 MHz (em aplicações especiais até 150 MHz).

A face externa da peça ou qualquer defeito existente no seu interior, provoca um eco, cuja grandeza ou amplitude, além da sua localização, são registados por determinados aparelhos acessórios.

Para se conseguir detetar o dano com este método, é necessário que o comprimento de onda do ultrassom seja inferior à dimensão do defeito ($l_{defeito}$). Esta condição é necessária para que ocorra a reflexão do som no defeito. Se o defeito for menor que o comprimento de onda não haverá reflexão, mas sim difração, não sendo possível identificar o defeito através do eco refletido. Assim, para se detetar defeitos mais pequenos é necessário baixar o comprimento de onda, ou seja, aumentar a frequência.

Sondas

As sondas são o elemento principal dos ensaios não destrutivos por US. Existe uma enorme variedade de sondas as quais se ajustam a diferentes objetivos. Podem ser classificadas segundo diferentes critérios como apresentados na Figura 1.1:

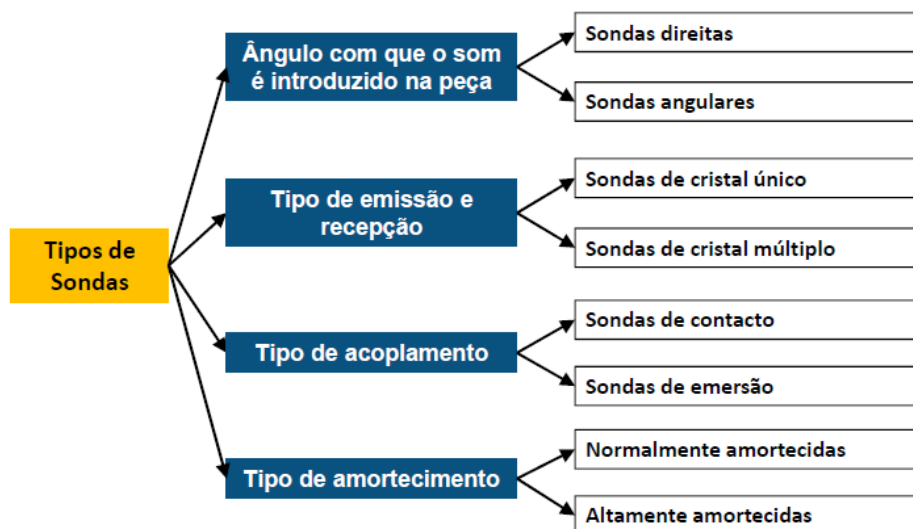


Figura 1.1- Quadro representativo dos diversos tipos de sondas CI [30]

As sondas diretas, Figura 1.2, são sondas que introduzem o som numa direção perpendicular à superfície.

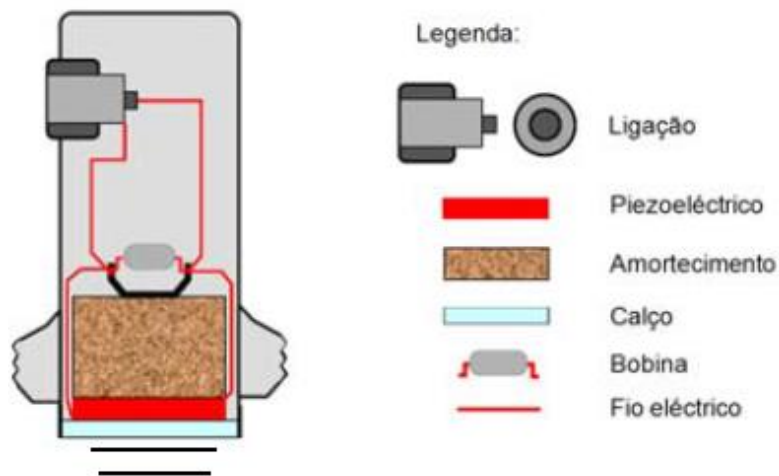


Figura 1.2- Figura representativa de uma sonda direta [30]

As sondas angulares são sondas em que o piezoelétrico forma um ângulo com a normal à superfície maior que 0° como representado na Figura 1.3.

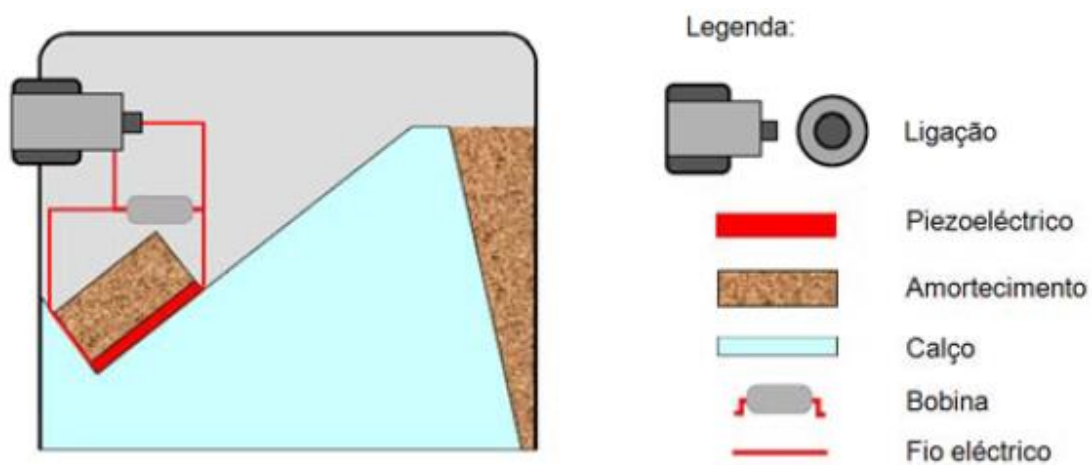


Figura 1.3- Figura representativa de uma sonda angular [30]

Normalmente estas sondas são usadas para defeitos com orientação oblíqua relativamente à superfície. Ângulos inferiores a 35° levam ao aparecimento de uma onda longitudinal, que é normalmente indesejável, pois a existência de duas ondas complica o sinal recebido. Ângulos maiores que 80° provocam o aparecimento de ondas rasantes.

As ondas de cristal múltiplo são constituídas por apenas 2 piezoelétricos, um com a função de emissão e outro de receção como se pode observar na Figura 1.4.

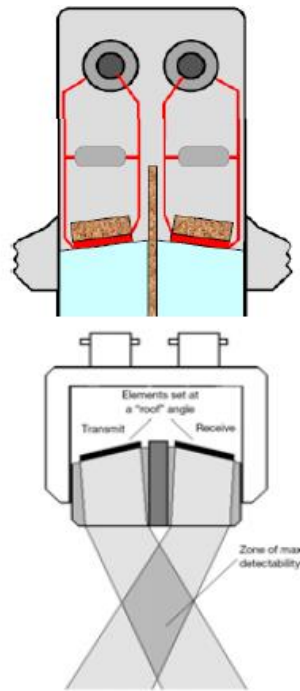


Figura 1.4- Figura representativa de uma sonda de cristal múltiplo [30]

As sondas de imersão são idênticas as sondas direitas na sua construção [30]. Estas sondas podem ser focalizadas de forma a aumentar a sensibilidade para detetar pequenos defeitos numa determinada gama de profundidades. A focalização pode ser esférica ou cilíndrica, onde o primeiro tipo focaliza o som para um ponto, enquanto o segundo o faz para uma linha.

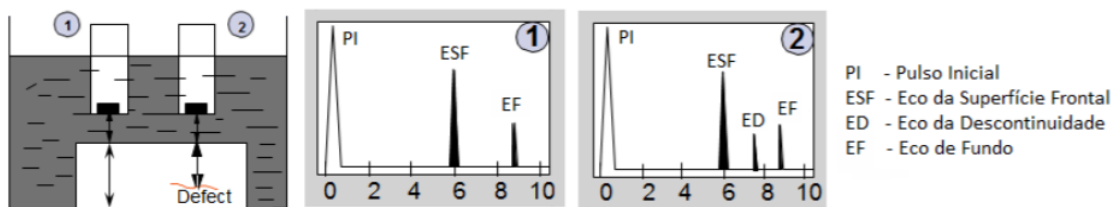
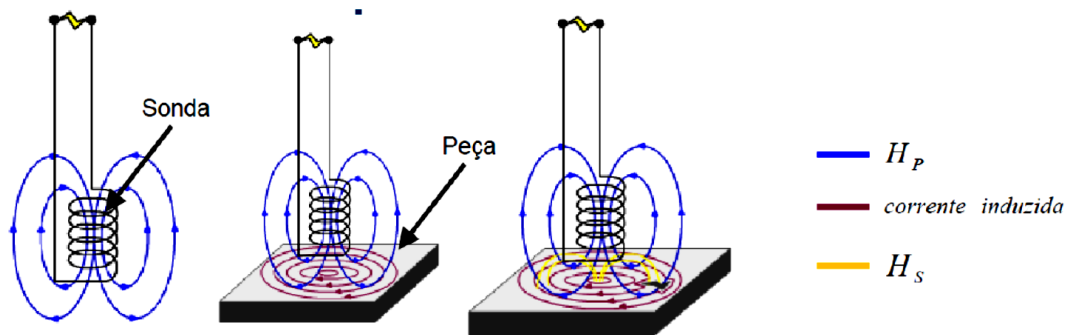


Figura 1.5- Técnica de Imersão [31]

A Figura 1.5 representa a técnica que usa este tipo de sonda. A peça a analisar e a sonda são colocadas num banho de água. Neste método é exibido um sinal que representa o eco da superfície frontal da peça e outro que representa o eco de fundo. Se existir algum defeito, o sinal será exibido entre os dois sinais referidos anteriormente.

1.4.5 Uso de correntes induzidas para deteção de dano

O princípio de funcionamento do método de correntes induzidas baseia-se no fenómeno da indução eletromagnética. A corrente eléctrica alternada ao percorrer a bobina de que é composta a sonda, cria um campo magnético primário H_p , que induz uma corrente eléctrica (induzida) num material condutor que seja colocado na sua vizinhança, como ilustrada na figura 1.6.

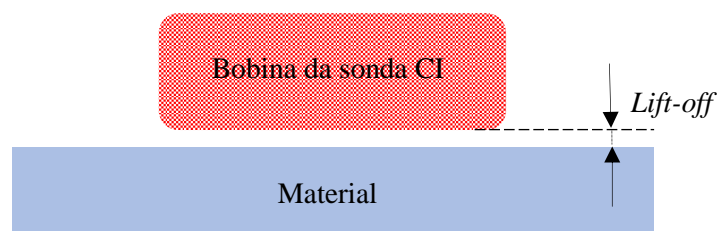


A corrente induzida na peça, cria um campo magnético secundário, H_s , que contraria o campo primário H_p e que é sensível aos defeitos superficiais e subsuperficiais do material.

Se existir defeito na peça a corrente induzida terá mais dificuldade em circular e o campo magnético H_s será menos intenso, consequentemente o valor da impedância eléctrica medida aos terminais da sonda aumenta, permitindo assim a deteção destes.

A medição da variação do valor da impedância permite também medir a condutividade eléctrica, a permeabilidade magnética, geometria e identificação do material [31].

Neste END é necessário garantir a perpendicularidade da sonda e o seu contacto com o material para evitar a ocorrência de *lift off* - representado na Figura 1.7- planar e angular. Quando um destes fenómenos não é garantido, o valor obtido no plano de impedâncias é distorcido e adquire um nível de ruído que impede a identificação dos defeitos.



O efeito de bordo é um fenómeno que ocorre quando a sonda se aproxima da extremidade da estrutura a analisar, provocando distorções nas correntes idênticas às provocadas pela existência de defeito. As correntes induzidas comportam-se como um “fluido compressível” quando se aproximam dos bordos da estrutura. Este fenómeno tem de ser tido em conta na análise da estrutura, uma vez que os defeitos presentes nas proximidades dos bordos podem ser dissimulados, Figura 1.8.

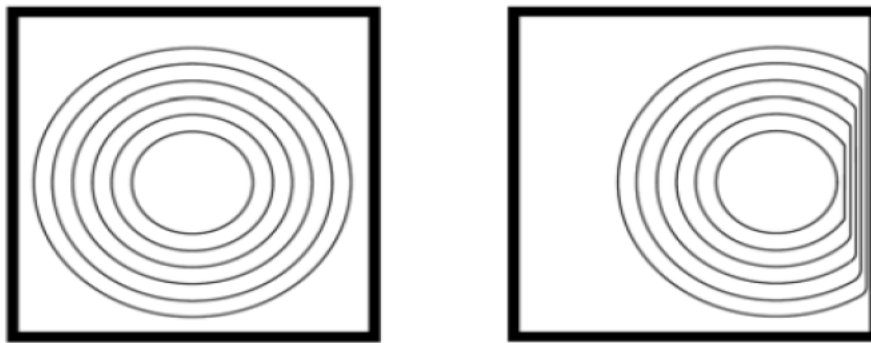


Figura 1.8- Efeito de bordo

Como referido anteriormente, as correntes induzidas têm um efeito pele quando circulam no material e apenas conseguem detetar defeitos superficiais e subsuperficiais. No entanto os defeitos posicionados perpendicularmente a estas permitem ser detetados mais facilmente do que os defeitos posicionados paralelamente, devido ao efeito de perturbação que provocam como representado na Figura 1.9.

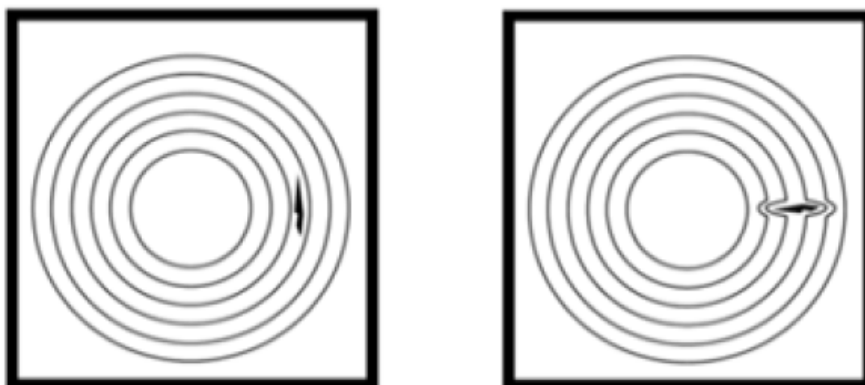


Figura 1.9- Comportamento das CI consoante a posição do defeito

Estas correntes tornam-se progressivamente menos intensas até se anularem a uma certa profundidade. A equação 1.1 traduz a densidade de corrente I em função da profundidade x :

$$I_x = I_0 \cdot e^{-x(\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma)^{\frac{1}{2}}} \quad (1.1)$$

Onde I_0 representa a densidade da corrente à superfície [$A \cdot m^{-2}$], x representa a profundidade [m], f representa a frequência de excitação [s^{-1}], μ a permeabilidade magnética [$H \cdot m^{-1}$] e σ é a condutividade elétrica [%IACS].

A profundidade máxima de penetração δ [m] convencionou-se como sendo a profundidade para qual o valor da densidade de corrente (I_x) corresponde a e^{-1} ($\approx 37\%$) da densidade de corrente à superfície do material (I_0). Deste modo:

$$\frac{I_x}{I_0} = e^{-1} \approx 37\% \leftrightarrow x(\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma)^{\frac{1}{2}} = 1 \quad (1.2)$$

Donde resulta:

$$\delta_{(f,\mu,\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.3)$$

Para um dado material com os valores de μ e σ conhecidos já é possível, a partir da equação (1.3), calcular a frequência de funcionamento da sonda para a profundidade de penetração desejada.

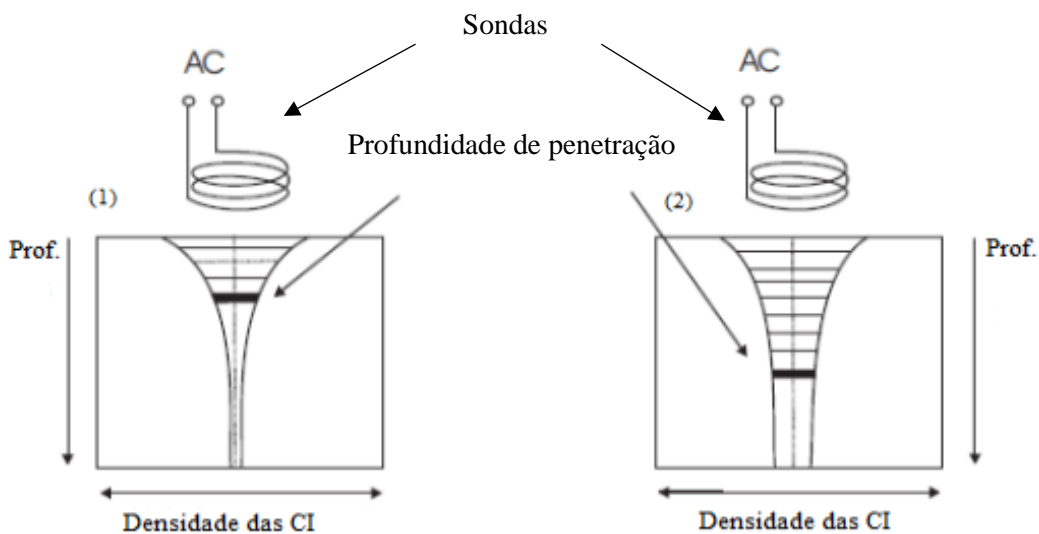


Figura 1.10- profundidade de penetração [32]

A profundidade de penetração representada na Figura 1.10 (1) requer frequência, condutividade e permeabilidade altas e a profundidade de penetração representada na figura 1.10 (2) requer frequências, condutividade e permeabilidade baixas.

Sondas CI

Atualmente, existem diversos protótipos de sondas, consoante a inspeção que se pretende realizar. Existem diversos tipos de sondas CI que são classificadas de acordo a configuração da bobina e o modo de funcionamento. De seguida, referem-se alguns tipos:

- Sondas absolutas, como representadas : são constituídas por uma bobina que faz simultaneamente de sonda de excitação e de receção conforme esquema da Figura 1.11. O valor analisado no plano de impedâncias é a impedância total da bobina.

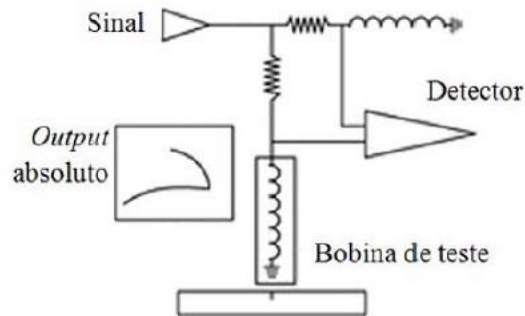


Figura 1.11-Representação esquemática do modo de operação de uma sonda absoluta [32]

-Sondas diferenciais: são sondas compostas por duas bobinas, e o valor analisado no plano de impedâncias é a diferença de impedância entre as duas bobinas, estando uma delas com polaridade invertida em relação à outra. Apesar de terem sentidos contrários os campos gerados por estas bobinas possuem o mesmo valor em módulo. As bobinas são posicionadas lado a lado e quanto mais próximas estiverem, maior a sensibilidade da sonda. Quando a sonda analisa uma região homogénea a sua resposta é zero, pois as duas bobinas anulam-se uma à outra, mas ao se aproximarem de um defeito, a primeira bobina em contacto com a descontinuidade de material, vai apresentar valor de impedância diferentes em relação à outra que ainda se encontra na região homogénea, então o sinal da sonda vai ser diferente de zero. Se o defeito for maior que o espaço entre as bobinas, estas num certo momento da análise à estrutura vão estar as duas “dentro” do defeito, ou seja, as duas vão dar o mesmo valor da impedância, então a resposta no interior do defeito vai ser zero.

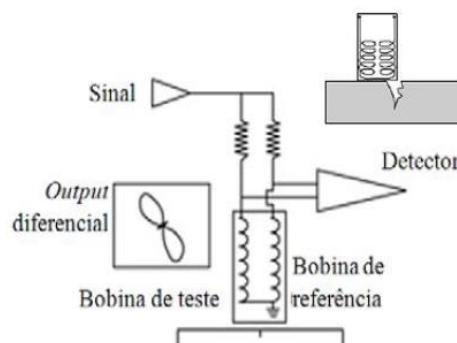


Figura 1.12-Representação esquemática do modo de operação de uma sonda diferencial [32]

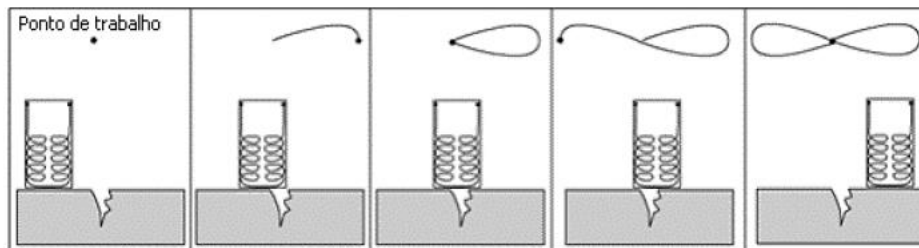


Figura 1.13-Representação da sequência de uma inspeção com sonda diferencial e sinal curva de Lissajou associada [32]

Como se pode observar na Figura 1.13, o sinal obtido na sequência total possui a forma de um “laço”, é conhecido como “*Lissajou*” e é característico das sondas diferenciais.

-Sondas bridge: estas sondas são compostas por bobinas que formam uma ponte elétrica e a mesma bobina que gera as correntes CI, deteta as alterações de impedância causadas pela existência de descontinuidades.

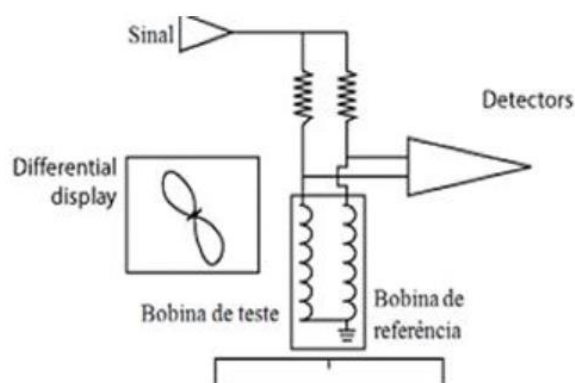


Figura 1.14-Representação esquemática do modo de operação de uma sonda bridge [32]

Estas sondas são muitas vezes confundidas com as sondas diferenciais, e esta confusão surge quando as bobinas estão ligadas diferencialmente.

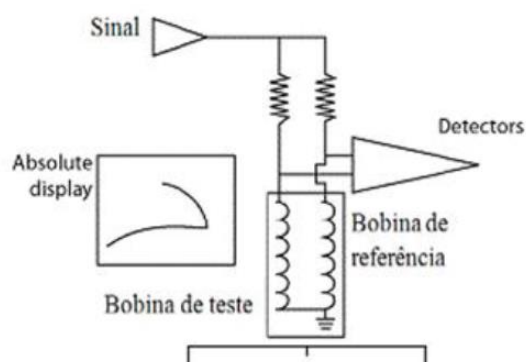


Figura 1.15-Representação esquemática do modo de operação de uma sonda bridge diferencial [32]

A excitação é imposta a ambas as bobinas e ambas funcionam como recepção e o output é a diferença de impedâncias entre as duas.

Em relação ao modo de recepção das sondas, estas podem ser de dupla função ou de emissão-recepção. As sondas de dupla função são constituídas uma única bobina responsável por introduz as CI no material e detetar o defeito simultaneamente. As sondas de emissão-recepção têm duas bobinas, uma para induzir e outra para detetar.

Existem dois tipos de formas sondas, estas podem ser helicoidais cilíndricas, que são utilizadas geralmente na inspeção de pequenas regiões do material e a espirais planas, que permitem inspecionar maiores áreas.

As sondas internas permitem inspecionar interiores de tubos ou furos e as sondas externas permitem inspecionar o exterior de veios ou tubos.

2 Conceitos teóricos

Frequências naturais

O dano numa estrutura pode ser detetado pela variação das frequências naturais, que este pode produzir, quer na rigidez, quer na massa da mesma. Esta afirmação pode ser comprovada a partir da equação 2.1:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2.1)$$

Sinou [9] menciona o critério de Normalização de Frequências Naturais (NFN) para a deteção de dano, que tem como base o quociente entre a i -ésima frequência natural danificada (ω_i^d) e não danificada (ω_i).

$$NFN_i = \frac{\omega_i^d}{\omega_i} \quad (2.2)$$

Onde d diz respeito a estrutura danificada.

Outros autores [32]–[35] propuseram alterações percentuais nas frequências naturais:

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

Em ambos os casos, para se conseguir detetar a presença de dano, as frequências naturais da estrutura não danificada precisam ser cuidadosamente estimadas para que se consiga mostrar as alterações nas frequências medidas.

Função resposta frequência

A equação (2.4) descreve o equilíbrio dinâmico de um sistema com múltiplos graus de liberdade (GDL), com amortecimento viscoso, em regime forçado:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (2.4)$$

Onde M , C e K representam as matrizes de massa, amortecimento e rigidez respetivamente.

$\{x''(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$ e $\{x(t)\}$ representam vetores de aceleração, velocidade e deslocamento respetivamente, em função do tempo t . E $\{f(t)\}$ representa o vetor da força exterior aplicada.

A equação (2.5) descreve a força para o caso de situação harmónica:

$$\{f(t)\} = Fe^{i\omega t} \quad (2.5)$$

E a resposta do sistema a cada frequência, ω , é dada pela equação (2.6):

$$\{x(t)\} = Xe^{i\omega t} \quad (2.6)$$

Deste modo, substituindo-se a equação (2.5) e (2.6) na equação (2.4), a relação entre a resposta e a excitação, para cada frequência é dada pela equação (2.7).

$$[-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K]].\{X\} = \{F\} \quad (2.7)$$

Assim, a relação entre a resposta X e a excitação F no domínio da frequência é exposta na equação (2.8).

$$\{X\} = [[K] - \omega^2[M] + i\omega[C]]^{-1}.\{F\} = [H(\omega)].\{F\} \quad (2.8)$$

Em que:

$$[H(\omega)] = ([K] - \omega^2[M] + i\omega[C])^{-1} \quad (2.9)$$

$[H(\omega)]$ é designada por matriz de receptância, e contém toda a informação sobre as características dinâmicas do sistema. Cada elemento da matriz $[H(\omega)]$ corresponde a uma FRF individual que descreve a resposta de uma coordenada i a uma força aplicada na coordenada j , para uma dada frequência ω , como é definido pela equação seguinte:

$$H_{i,j}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{F_j(\omega)} \quad (2.10)$$

Transmissibilidades

A definição do conceito de transmissibilidade pode ser encontrada em diversa literatura, nomeadamente [26]-[28] contudo seguidamente é apresentado uma introdução ao tema, como é publicado em [28], para um dado vetor de forças harmónicas $\{F_A\}$ que podem ser aplicadas a uma

estrutura nas coordenadas A, as amplitudes nas coordenadas U (desconhecidas), $\{X_U\}$ e nas coordenadas K (conhecidas), $\{X_K\}$, relacionam-se para essas forças através de $[H_{UA}]$ e $[H_{KA}]$.

$$\{X_U\} = [H_{UA}] \{F_A\} \quad (2.11)$$

$$\{X_K\} = [H_{KA}] \{F_A\} \quad (2.12)$$

Eliminando $\{F_A\}$ das equações 2.11 e 2.12 obtemos a seguinte equação

$$\{X_U\} = [H_{UA}][H_{KA}]^{-1} \{X_K\} \Rightarrow \{X_U\} = [T_{UK}]\{X_K\} \quad (2.13)$$

Onde

$$[T_{UK}] = [H_{UA}][H_{KA}]^{-1} \quad (2.14)$$

$[T_{UK}]$ Corresponde à Matriz de Transmissibilidades entre as coordenadas U e K.

A inversão na equação (2.13) implica que o número de coordenadas K seja igual ao número de coordenadas A ($\#K = \#A$). Se tal não acontecer ($\#K > \#A$), terá que ser utilizada a pseudo-inversa da matriz $[H_{KA}]$.

Se as coordenadas $\{X_K\}$ forem medidas, podem ser calculadas as coordenadas $\{X_U\}$ desde que a matriz de transmissibilidades $[T_{UK}]$ já seja conhecida; Como o vetor $\{F_A\}$ foi eliminado entre as equações (2.11 e 2.12) a matriz de transmissibilidades $[T_{UK}]$ não depende da magnitude das forças e, portanto, os elementos de $[T_{UK}]$ são denominados por transmissibilidades multivariável.

Por outro lado, pode-se dividir diretamente duas respostas e chamá-las de transmissibilidades “diretas”. Estas transmissibilidades obtidas dependem da magnitude das forças assim como da sua localização.

Por exemplo, se a equação (2.13), for dividida por uma amplitude de resposta conhecida $\{X_S\}$, então:

$$\frac{X_U}{X_S} = \frac{T_{UK}X_K}{X_S} \Rightarrow \tau_{Us} = T_{UK}\tau_{Ks} \quad (2.15)$$

Se apenas uma força for aplicada na coordenada j e apenas duas coordenadas foram relacionadas, r e s , os dois tipos de transmissibilidade coincidem.

$$\tau_{rs} \equiv T_{rs} = \frac{X_r}{X_s} = \frac{H_{rj}}{H_{sj}} \quad (2.16)$$

As forças aplicadas não precisam de ter obrigatoriamente harmônicas. Embora as expressões para a transmissibilidade tenham sido deduzidas assumindo tais forças, ainda assim as

expressões acabam por ser válidas para outro tipo de excitação, incluindo aquelas de natureza impulsiva ou aleatória.

Indicadores - Função Resposta Frequência

Drozg et al [36] utilizam um indicador proposto por Van der Seijs et al [37], representado pela equação 2.17, que compara duas FRFs obtidas numérica e experimentalmente, para o mesmo ponto de medição(i) e de aplicação da força (j). Valores mais próximos de um representam correlação perfeita por outro lado, valores próximos de zero não apresentam correlação alguma.

$$COH_{ij} = \frac{(H_{ij}^{num} + H_{ij}^{exp}) \times (H_{ij}^{num*} + H_{ij}^{exp*})}{2[(H_{ij}^{num*} \times H_{ij}^{num}) + (H_{ij}^{exp*} \times H_{ij}^{exp})]} \quad (2.17)$$

Onde H_{ij}^{num} e H_{ij}^{exp} representam o valor numérico e o valor experimental da FRF, respetivamente para um determinado i,j e H_{ij}^{num*} como H_{ij}^{exp*} representam os complexos conjugados.

De acordo com *Silva* [38] um dos dois critérios do Cross Signature Correlation (CSC) é o Cross Signature Scale Factor (CSF), equação (2.18) que avalia as diferenças de amplitude, sendo sensível a mudanças de amortecimento.

$$CSF(w_i)_j = \frac{2(H_{ij}^{num} + H_{ij}^{exp})}{[(H_{ij}^{num*} \times H_{ij}^{num}) + (H_{ij}^{exp*} \times H_{ij}^{exp})]} \quad (2.18)$$

Onde H_{ij}^{num} e H_{ij}^{exp} representam o valor numérico e o valor experimental da FRF, respetivamente para um determinado i,j e H_{ij}^{num*} como H_{ij}^{exp*} representam os complexos conjugados. Os valores dos critérios do CSC variam entre 0 e 1 para cada linha de frequência w_i , por isso é proveitoso para traçar esses critérios com um par FRF.

A Razão, equação 2.19, foi um indicador desenvolvido pela Professora Raquel Almeida no decorrer deste trabalho. Este indicador como o nome indica é a relação entre dois valores de FRF.

$$Razão = \left| \frac{H_{CD}}{H_{SD}} \right| \quad (2.19)$$

Onde H_{CD} representa o valor com dano e H_{SD} o valor sem dano. Valores próximos de 1 indicam que não existe dano.

O Erro, equação 2.20, à semelhança da Razão, também foi desenvolvido pela Professora Raquel Almeida. Este indicador consiste na razão, do produto de recetância com e sem dano pela recetância sem dano.

$$Erro = \left| \frac{H_{CD} \times H_{SD}}{H_{SD}} \right| \quad (2.20)$$

O erro toma o valor de 1 quando indica máximo dano e 0 quando não há dano.

Indicadores - Transmissibilidade

A diferença de transmissibilidades, equação 2.21, é um indicador que conforme o nome indica, é a diferença entre dois valores de transmissibilidade para a viga com e sem dano.

$$Diferença = |\tau^{CD} - \tau^{SD}| \quad (2.21)$$

3 Casos de estudo

3.1 Características dos modelos experimentais

No primeiro caso experimental foram utilizados três modelos de vigas metálicas de comprimento, L , de 503 mm com secção transversal retangular de 25×4 mm² e massa de aproximadamente 0,423 Kg (não incluindo os acelerómetros da *Bruel & Kjaer Type 4507* de 4,8g) e foram marcados cinco pontos, como indica a Figura 3.1. As propriedades do material constituinte das vigas são apresentadas na tabela 3.1.

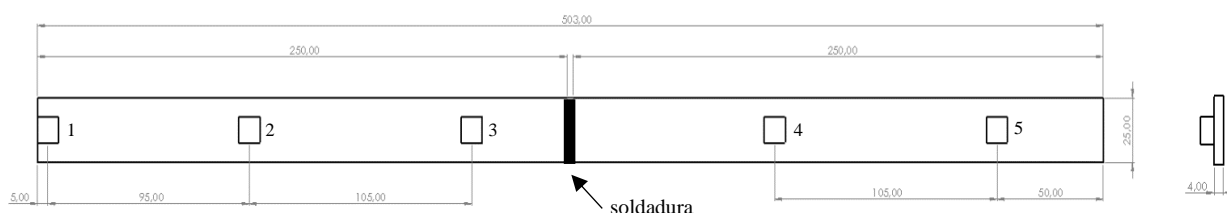


Figura 3.1- Representação do modelo original em estudo

Cada viga de 503 mm é composta por 2 vigas de 250 mm soldadas topo a topo por MIG/MAG. A soldadura situa-se exatamente no mesmo sítio em todas as vigas, entre o ponto 3 e 4 como representado na Figura 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades do material constituinte

Módulo de Young (E)	210 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidade volúmica (ρ)	7850 Kg / m ³
Módulo de elasticidade transversal (G)	80.0 GPa

3.2 Danos dos modelos experimentais

Com o intuito de determinar e localizar o dano, foram estudadas três situações em vigas distinta, Figura 3.2. A soldadura da primeira viga (1-A) é executada de maneira a ficar sem defeito, para termos como comparar com as restantes vigas com defeito, Figura 3.4.



Figura 3.2-Vigas A usadas no caso de estudo

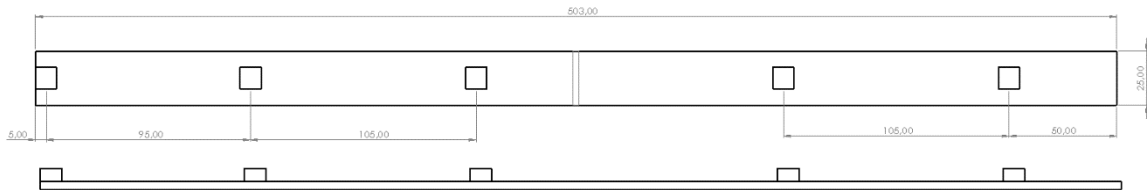


Figura 3.3- Esquema da Viga 1



Figura 3.4- Pormenor da soldadura da viga 1-A- Vista lateral

A soldadura da segunda viga (2-A) foi realizada de ambos os lados da viga, com certos parâmetros de soldadura de maneira a existir falta de penetração no interior, Figura 3.5 e 3.6. O dano provocado nesta viga tem aproximadamente 2 mm de diâmetro.

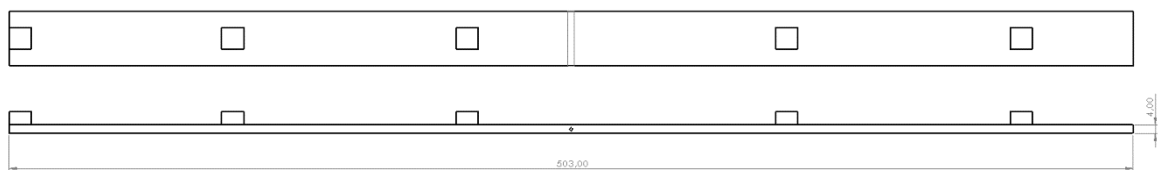


Figura 3.5- Esquema da Viga 2-A



Figura 3.6- Pormenor do defeito da viga 2-A- Vista lateral

A soldadura da viga 3-A foi executada apenas de um lado, como é demonstrado na Figura 3.7. O dano tem uma secção transversal de aproximadamente $3 \times 3 \text{ mm}^2$ e encontra-se a 1mm da superfície.

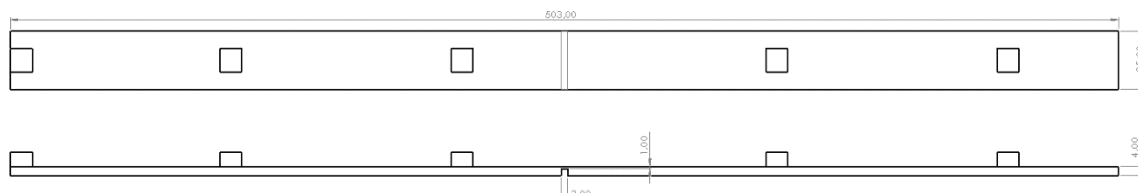


Figura 3.7- Esquema da Viga 3-A



Figura 3.8- Pormenor do defeito da viga 3- Vista lateral

3.3 Sistemas de Medição e Aquisição e Processamentos de Dados

3.3.1 Sistema de Aquisição e Medição de Dados utilizado na análise de vibrações

Durante a execução dos ensaios experimentais foram utilizados diversos equipamentos cujas características são a seguir descritas.

Para medição da resposta dinâmica das vigas, foi utilizado um acelerómetro piezoelétrico uniaxial (*Bruel&Kjaer Type 4507*), cuja massa é aproximadamente 4.8g, Figura 3.9.

Para a realização dos ensaios, foi utilizado um martelo de excitação que permitiu aplicar as forças excitadoras nas coordenadas pretendidas. Figura 3.10.



Figura 3.9- Acelerómetro *Bruel&Kiger Type 4507*



Figura 3.10- Martelo de excitação

Os sinais foram recolhidos e processados pelo equipamento OROS, sistema de aquisição e processamento de sinais como representado na Figura 3.11.

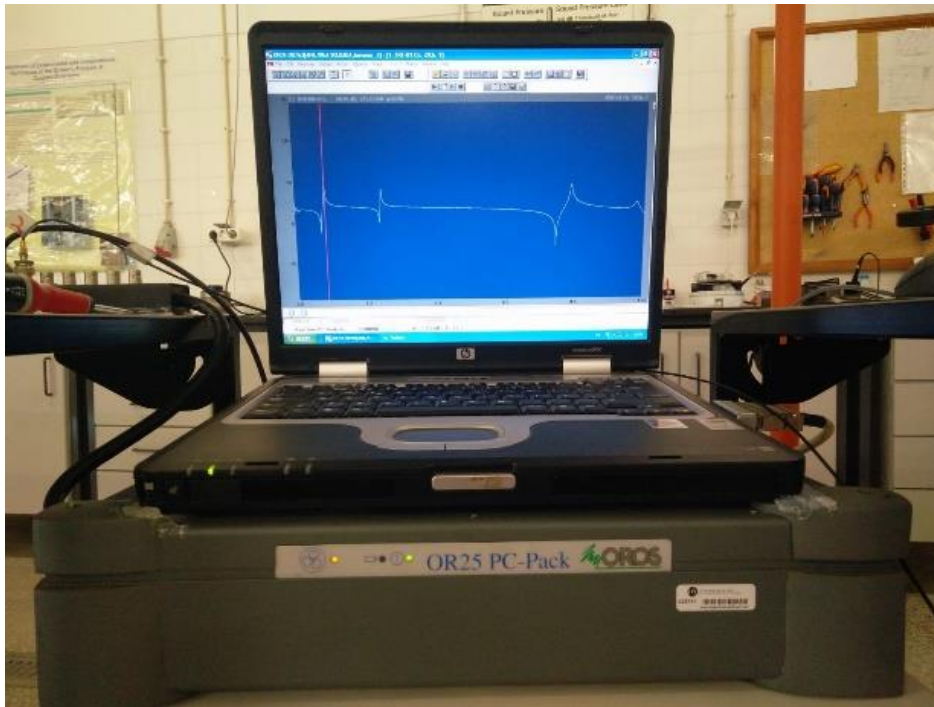


Figura 3.11- Sistema de aquisição e processamento de sinais - OROS

O acelerómetro que media a resposta dinâmica da estrutura era fixo a esta através dum suporte colado em cada um dos cinco pontos anteriormente mencionados, por forma a garantir que os valores medidos correspondiam exatamente ao movimento da estrutura e não a movimentos relativos entre a estrutura e o acelerómetro.

Uma vez que apenas um acelerómetro estava ativo para este estudo, foi necessário mover o acelerómetro ao longo da estrutura (cinco pontos), trocando-o com os acelerómetros “fantasma” usados apenas para uniformizar a massa total desta.

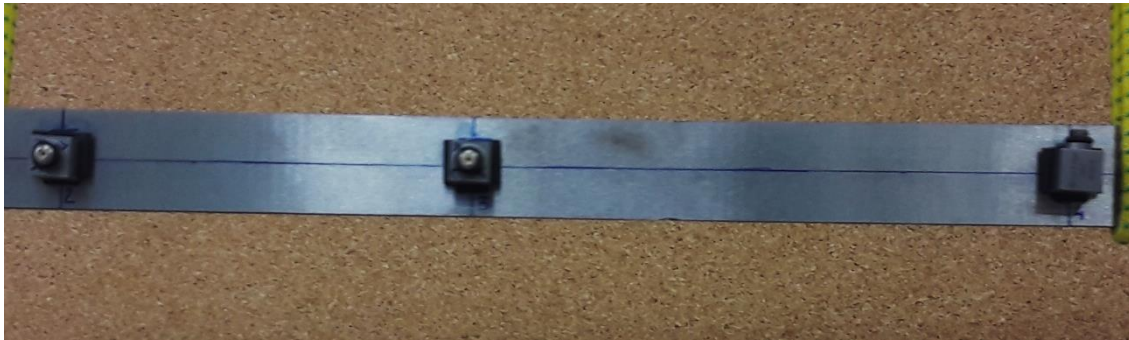


Figura 3.12- Pormenor da fixação dos acelerómetros à viga

Os ensaios foram realizados com a estrutura em suspensão, como apresentada na Figura 3.13, com o objetivo de não restringir o movimento da estrutura, quer em translação quer em rotação, simulando desta forma o apoio de uma viga livre-livre. Para isso foi usada uma corda fixa a uma armação metálica, garantindo assim que o efeito provocado na estrutura de suporte não afete as curvas medidas.



Figura 3.13 - Apresentação da condição dos apoios da estrutura ensaiada

A obtenção das cinco FRFs de receptâncias, na gama de frequências 0-1000Hz, para cada uma das 5 coordenadas de excitação da estrutura foi feita da seguinte maneira: primeiramente foi fixado o acelerómetro ativo na coordenada 1 e os restantes distribuídos pelas outras coordenadas (2,3,4,5). De seguida, a viga foi colocada em suspensão e na face oposta à colocação dos acelerómetros foi aplicada uma excitação na coordenada 1 e guardada a FRF medida, depois na coordenada 2 e guardada a FRF medida e assim sucessivamente até à coordenada 5 inclusive. Após este processo, o acelerómetro calibrado era trocado com o acelerómetro da coordenada 2 e repetia-se todo o processo anterior, depois trocado pelo acelerómetro da coordenada 3 e assim sucessivamente até à coordenada 5. Nos ensaios foram efetuados três medições para cada força

de excitação e calculada, pelo analisador, a média correspondente a cada uma das FRFs em questão.

O intervalo analisado neste estudo foi [0 Hz ;1000 Hz], com uma resolução de 0,125Hz, ou seja, 3200 pontos de frequência. A cada frequência esta associada uma matriz acelerância 5x5, como tal recorreu-se a um método de organização para se conseguir analisar todos os dados e aplicar os indicadores acima referidos.

Os dados foram organizados em folhas Excel de maneira a que cada linha correspondesse a uma frequência e a sua respetiva matriz associada como apresentado na Figura 3.14.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1																			
2	frequência	VIGA 1-	H11	H12	H13	H14	H15		H21	H22	H23	H24	H25		H31	H32	H33	H34	H35
3	0,00		23,6533	23,6533	23,6533	23,6533	23,6533	#NÚM!	23,6533	23,6533	23,6533	23,6533	23,6533	#NÚM!	23,6533	23,6533	23,6533	23,6533	23,6533
4	0,31		17,8067	19,2214	9,89811	11,0261	14,6547	#NÚM!	5,53692	18,5966	7,72625	8,65041	5,83887	#NÚM!	8,23245	4,97054	8,78367	11,9906	9,39757
5	0,63		24,2871	21,5124	14,801	9,48337	17,1873	#NÚM!	16,9835	20,6883	13,6819	4,29387	9,09741	#NÚM!	13,3381	12,1437	11,6645	8,18194	4,24875
6	0,94		24,6841	19,6388	13,5827	3,70655	13,7116	#NÚM!	17,2859	18,5012	12,267	-1,569	5,43738	#NÚM!	13,0432	12,2328	10,1998	5,9061	2,30561
7	1,25		23,3813	17,5874	11,8365	-0,617	11,6241	#NÚM!	16,1483	16,9659	10,4325	-6,0896	2,3112	#NÚM!	11,1049	10,9908	8,93051	5,32279	0,5024
8	1,56		22,7257	16,7155	10,7763	-1,5616	9,90345	#NÚM!	15,593	15,9643	9,26376	-5,9172	0,80401	#NÚM!	11,3172	10,3231	8,31054	4,93679	1,84014
9	1,88		22,1471	16,4215	10,5964	-4,7493	9,78097	#NÚM!	15,6038	15,7759	9,05491	-8,0133	-0,3811	#NÚM!	11,3715	10,2513	8,583	4,72996	1,40991
10	2,19		22,1337	17,0215	10,756	-3,6364	9,49845	#NÚM!	15,9118	15,9044	9,29458	-5,1005	0,06663	#NÚM!	11,6319	9,77346	8,15488	4,25323	2,43415
11	2,50		21,7345	17,6508	11,0062	-6,8782	10,4647	#NÚM!	16,3469	16,1752	9,49536	-5,1343	0,27627	#NÚM!	11,7483	9,53501	8,46345	4,53468	2,16458
12	2,81		21,8992	18,866	11,4491	-5,0855	10,7745	#NÚM!	17,1652	16,6411	9,86066	-3,2304	1,27917	#NÚM!	12,5256	9,41985	8,6108	4,72393	3,97633
13	3,13		21,9997	20,1489	12,2747	-8,3542	12,4243	#NÚM!	18,0243	17,3119	10,5382	-3,7879	0,94509	#NÚM!	13,0594	9,49691	9,38157	5,5536	4,15357
14	3,44		22,2516	21,3496	12,7124	-3,8327	12,6964	#NÚM!	18,4569	17,5934	10,744	-1,5074	1,42569	#NÚM!	14,1033	9,51089	9,53327	6,14849	6,03788
15	3,75		22,1106	21,0226	12,8256	-7,1566	12,8291	#NÚM!	18,1815	17,4567	10,7568	-2,731	1,1248	#NÚM!	14,2539	9,50276	9,91721	6,63243	5,34298
16	4,06		22,2292	19,8547	12,4805	-4,679	11,1788	#NÚM!	17,3801	16,8089	10,1881	-1,7751	1,5633	#NÚM!	14,3079	9,32095	9,65724	6,53607	6,02147
17	4,38		22,2086	18,2309	12,0953	-9,8581	10,4085	#NÚM!	16,5174	16,094	9,65343	-3,9743	0,31979	#NÚM!	13,1787	9,09184	9,36093	6,1863	4,45132
18	4,69		22,3571	17,0385	11,4387	-6,8701	8,95358	#NÚM!	15,6922	15,4169	9,13622	-3,9072	-0,0463	#NÚM!	12,6574	8,58451	8,30663	5,28285	4,64596
19	5,00		22,1239	16,0068	11,0569	-9,8595	8,86709	#NÚM!	15,0345	14,798	8,82714	-6,1494	-0,7987	#NÚM!	11,5487	8,1535	7,95093	4,74996	2,91407
20	5,31		22,1154	15,5088	10,5643	-7,9646	7,94733	#NÚM!	14,6374	14,2571	8,2837	-5,2419	-0,609	#NÚM!	11,234	7,75529	7,21535	4,08396	3,55924
21	5,63		21,8356	15,1272	10,4364	-11,772	8,26354	#NÚM!	14,4814	14,0758	8,27655	-6,8139	-1,439	#NÚM!	10,4565	7,59309	7,32564	4,06065	2,48649
22	5,94		21,8231	15,2201	10,3773	-9,4101	7,70264	#NÚM!	14,4851	14,0444	8,32572	-5,8677	-1,4155	#NÚM!	10,608	7,41904	7,04988	3,81714	3,41735
23	6,25		21,4999	15,3342	10,6536	-13,107	8,27233	#NÚM!	14,619	14,2736	8,7387	-6,9446	-2,2857	#NÚM!	10,0995	7,47386	7,46336	4,09852	2,70629
24	6,56		21,3437	15,7116	10,8647	-10,507	7,79423	#NÚM!	14,8534	14,4833	8,97072	-4,7244	-1,4649	#NÚM!	10,2887	7,55819	7,44522	4,14416	3,85166
25	6,88		20,8449	15,8473	11,2037	-15,708	8,26684	#NÚM!	15,1333	14,7433	9,32197	-5,2791	-2,1751	#NÚM!	9,80046	7,89548	7,8742	4,45493	2,55956
26	7,19		20,5868	15,9743	11,1961	-11,082	7,43682	#NÚM!	15,1946	14,6866	9,19377	-3,5988	-2,0031	#NÚM!	9,9318	7,95585	7,58338	4,24691	2,8046

Figura 3.14- Organização dos danos obtidos

Após se aplicar os indicadores entre as FRF obtidas experimentalmente da estrutura sem dano (viga 1) e da estrutura com dano (viga 2) e da viga 1 e da outra estrutura com dano (viga 3), aplicou-se as equações 3.1 e 3.2 que permitem detetar e localizar o dano respetivamente.

Para cada i (varia de 1 até 25):

$$Det_i = \sum_i^{N \text{ pontos}} \left(\sum_{j=1}^{n \text{ forças}} \left(\frac{1}{f} \sum_{w_i}^{wf} \text{indicador}(w) \right) \right) \quad (3.1)$$

$$Loc_i = \sum_{j=1}^{n \text{ forças}} \left(\frac{1}{f} \sum_{w_i}^{wf} \text{indicador}(w) \right) \quad (3.2)$$

Onde i corresponde a coluna.

Este processo de medição foi repetido para cada viga.

3.3.2 Dificuldades sentidas nos ensaios experimentais para análise de vibrações

Os primeiros ensaios experimentais foram realizados em vigas com o cordão de soldadura sem qualquer acabamento superficial, Figura 3.15, produzindo uma superfície não plana o que poderá acarretar dificuldades na realização dos ensaios de ultrassons e correntes induzidas. Este assunto merecerá uma discussão mais pormenorizada na secção 3.5.1.

Posto isto foram fabricas novas vigas, Figura 3.16, com as mesmas características das anteriores, tanto a nível de propriedades do material como a nível de características geométricas, soldadas com TIG e depois retificadas. A viga 1-B tem de massa 366g, a viga 2-B tem 367g e a viga 3-B tem 387g.

Estas vigas (1-B, 2-B e 3-B) foram sujeitas aos ensaios experimentais e processos descritos anteriormente.



Figura 3.15- Primeiras vigas ensaiadas – Vigas A

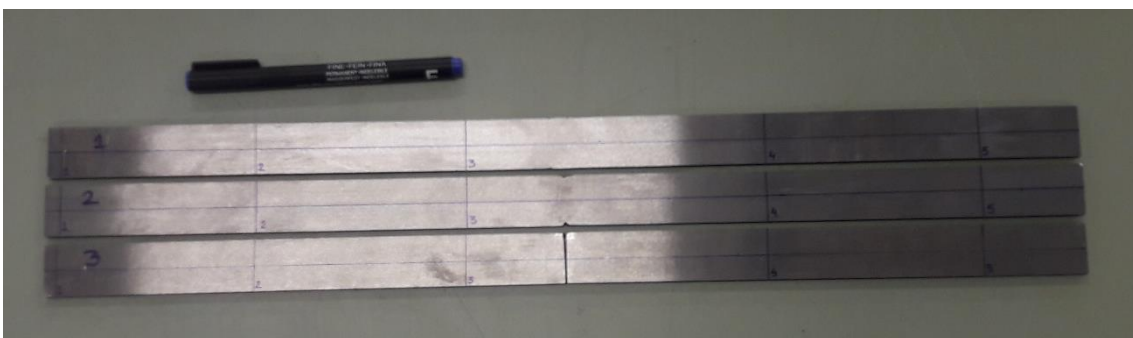


Figura 3.16 - Novas vigas, viga 1-B, 2-B e 3-B

3.3.3 Programa numérico utilizados na análise de vibrações

Posteriormente às medições das FRFs das vigas estudadas, todos os dados foram tratados em *Excel* permitindo assim a identificação da existência de dano.

Tanto para a detecção como para a localização do dano, utilizando as informações as FRFs medidas, foram usados todos os indicadores descritos no capítulo 2.

Usando as transmissibilidades foi usado o indicador descrito no capítulo 2 assim como a Razão, a COH e o Erro.

3.4 Identificação e localização do dano

Os danos estudados neste trabalho foram criados com o objetivo de se aproximarem ao máximo com uma soldadura feita no meio industrial.

Em ambos os danos, como descrito na secção 3.2 e indicados na Figura 3.5- 3.8 existe uma ausência de material ao longo de toda a secção transversal. Esse vazio, vai modificar a rigidez da estrutura que por sua vez vai afetar a sua resposta dinâmica e comparando com a resposta dinâmica da viga 1B- sem dano, pretende-se verificar se é possível detetar e localizar o dano.

Posto isto é feito a inspeção END por CI a todas as vigas. Este ensaio é comparado com a análise de vibrações a fim de se descobrir qual o melhor estudo realizado para este tipo de caso.

3.4.1 Análise de Vibrações da Viga 2-B

Para se confirmar a existência de dano na viga 2-B, foram utilizadas as funções de resposta em frequência (receptâncias) obtidas experimentalmente e depois comparadas com as funções de resposta em frequência obtidas também experimentalmente da viga 1-B, viga sem dano.

Com as FRFs obtidas experimentalmente, para o caso com e sem dano, conseguiu-se obter uma curva para cada situação referida. Os máximos dessas curvas correspondem às frequências naturais do sistema em estudo, e sobrepondo-as consegue-se identificar alterações que podem traduzir na existência de dano, como se pode contactar na figura 3.17.

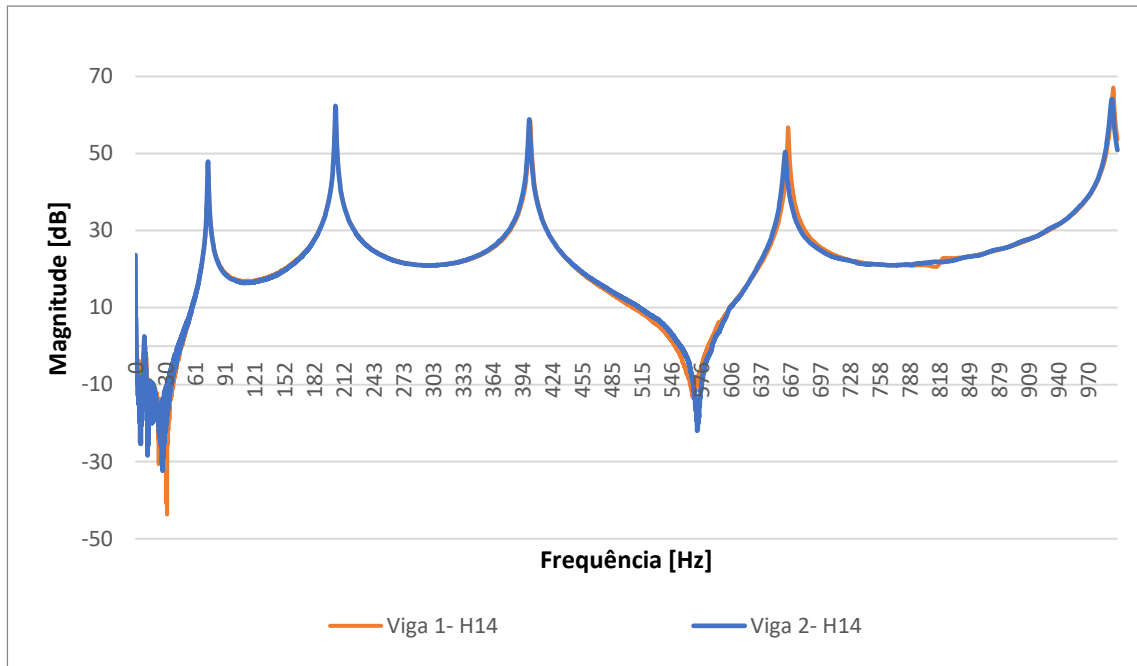


Figura 3.17 - FRF da viga 1-B e da viga 2-B em H 14

Na tabela 3.2 estão apresentados os valores das frequências naturais para a estrutura sem dano -Viga 1B e para a estrutura com dano – Viga 2B.

Tabela 3.2- Frequências naturais estrutura sem dano (viga 1) e estrutura com dano (viga 2)

	Viga 1B	Viga 2B
	Frequência [Hz]	
1	74,06	74,06
2	203,75	203,75
3	401,88	401,25
4	664,69	661,56

A análise destas frequências naturais permite constatar que os valores obtidos da estrutura com dano – Viga 2B, são muito próximo aos valores obtidos da estrutura sem dano- Viga 1B, observando-se que o dano na viga 2B somente provocou alteração na terceira e na quarta frequências naturais. No entanto como era de esperar, as frequências naturais da viga com dano sofrem uma ligeira variação relativamente às frequências naturais da viga sem dano.

Indicadores que usam FRFs para análise da resposta dinâmica da viga

A sensibilidade dos indicadores, em relação à deteção do tipo de dano presente na viga 2-B, foi calculada a partir da equação 3.2 explicada na secção 3.1.1. Para cada indicador é feito uma comparação entre a viga com e sem dano como apresentado na figura 3.18.

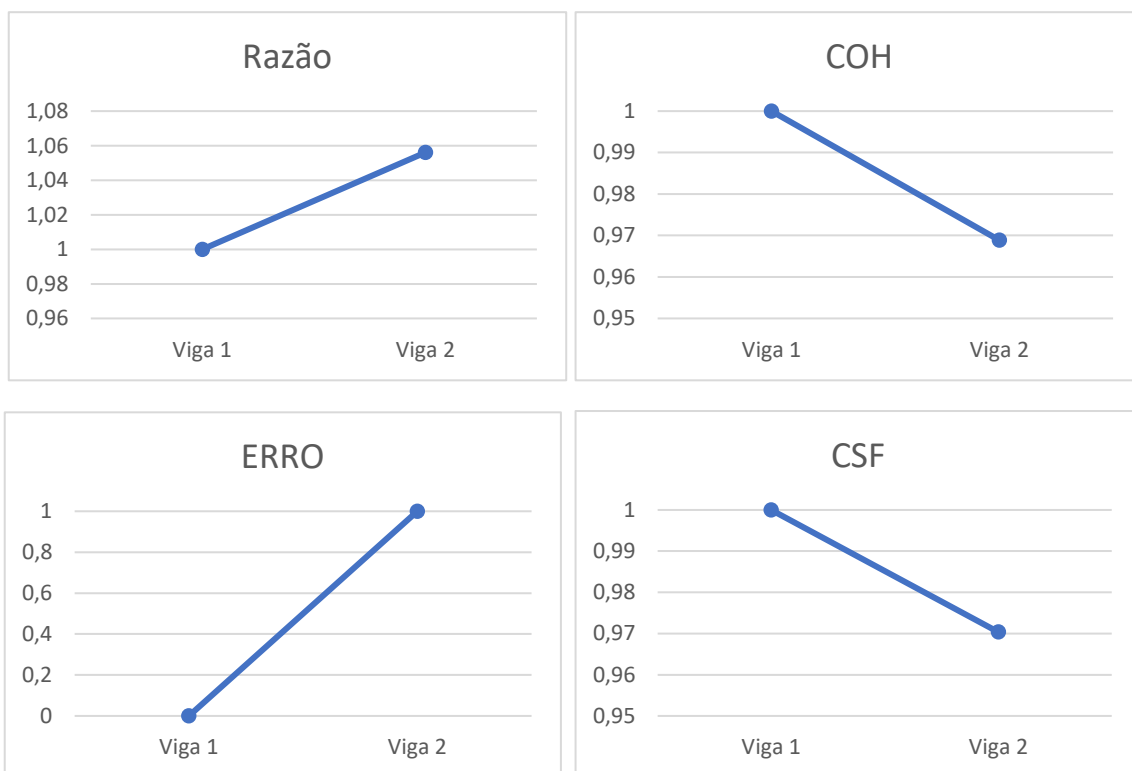


Figura 3.18- Sensibilidade dos indicadores na deteção do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B usando FRFs

Como explicado no capítulo 2 a razão toma valores iguais a 1 quando não existe dano e o erro toma valores muito próximos de zero. No indicadores COH e CSF valores iguais a 1 significam que não existe dano e valores perto de zero que existe.

Observando a Figura 3.18 conclui-se que todos os indicadores permitem detetar este tipo de dano.

A linha que une os dois pontos sugere o comportamento da sensibilidade dos indicadores para danos localizados no mesmo sítio na viga, mas com dimensões entre o dano estudado neste caso e sem dano.

A sensibilidade dos indicadores no que toca a localização do dano presente na viga 2-B esta apresentada na Figura 3.19.

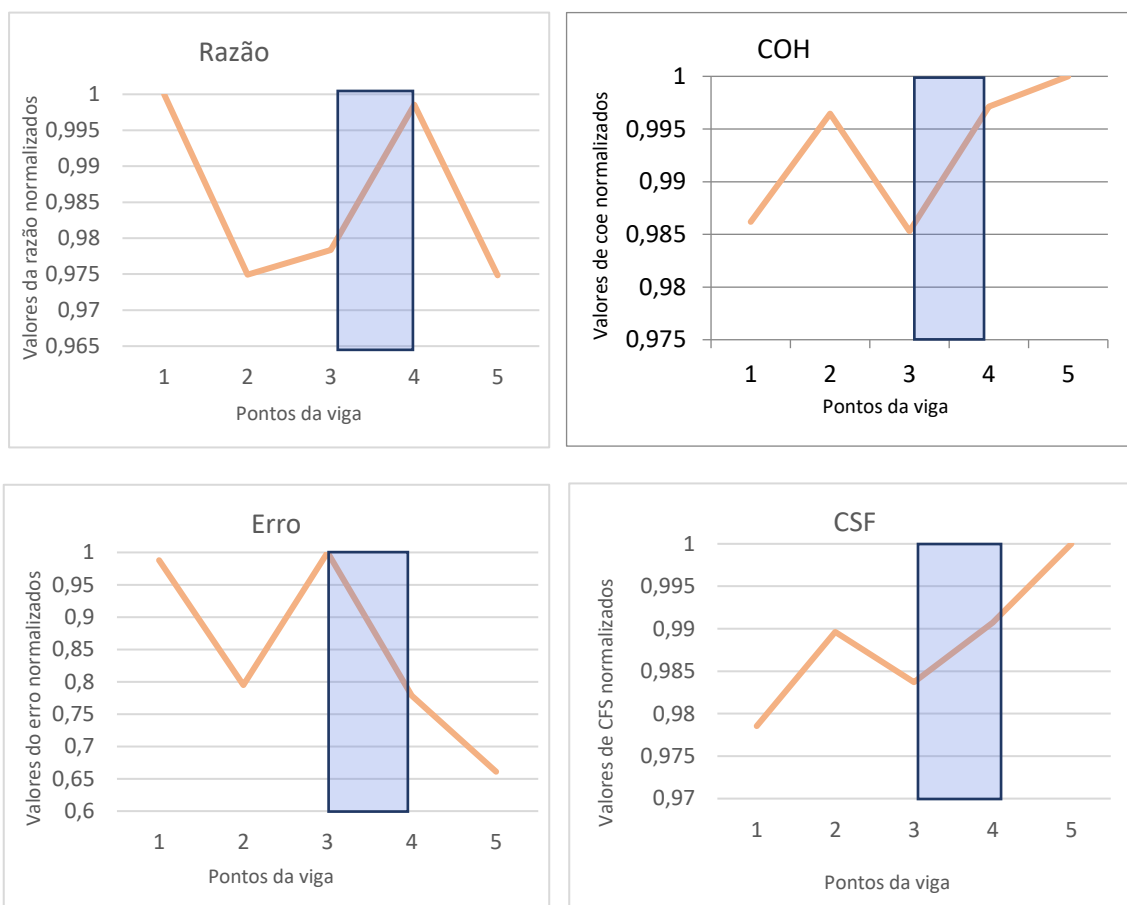


Figura 3.19- Sensibilidade dos indicadores na localização do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B usando FRFs

Como se observa na Figura 3.19 o indicador razão não permite localizar o dano presente na estrutura em estudo, para este indicador o ponto 1, ou seja, no início da viga seria o local onde se encontrava o dano. Para o indicador CSF o dano estaria localizado também no início da viga.

Por outro lado, o indicador erro apesar de mostrar ser pouco sensível na localização do tipo de dano presente na viga 2-B aponta que o ponto 3 é o ponto com mais dano (ponto que está mais próximo de 1), e que o dano pode estar localizado à esquerda ou a direita deste ponto.

O indicador COH, à semelhança do erro, diz-nos que o ponto com mais dano é o ponto 3 (por estar mais próximo de zero) e que o dano pode estar localizado à direita ou a esquerda desse ponto.

Apenas dois dos quatro indicadores utilizados permitem localizar o dano, mas verifica-se que são pouco sensíveis no estudo deste tipo de dano presente nesta estrutura.

Indicadores que usam transmissibilidade para análise de vibrações

Após calcular as transmissibilidades entre os pontos aplicaram-se os indicadores descritos no capítulo 2.

A figura seguinte traduz a sensibilidade dos indicadores no que toca a deteção do dano existente na viga 2-B por meio das transmissibilidades.

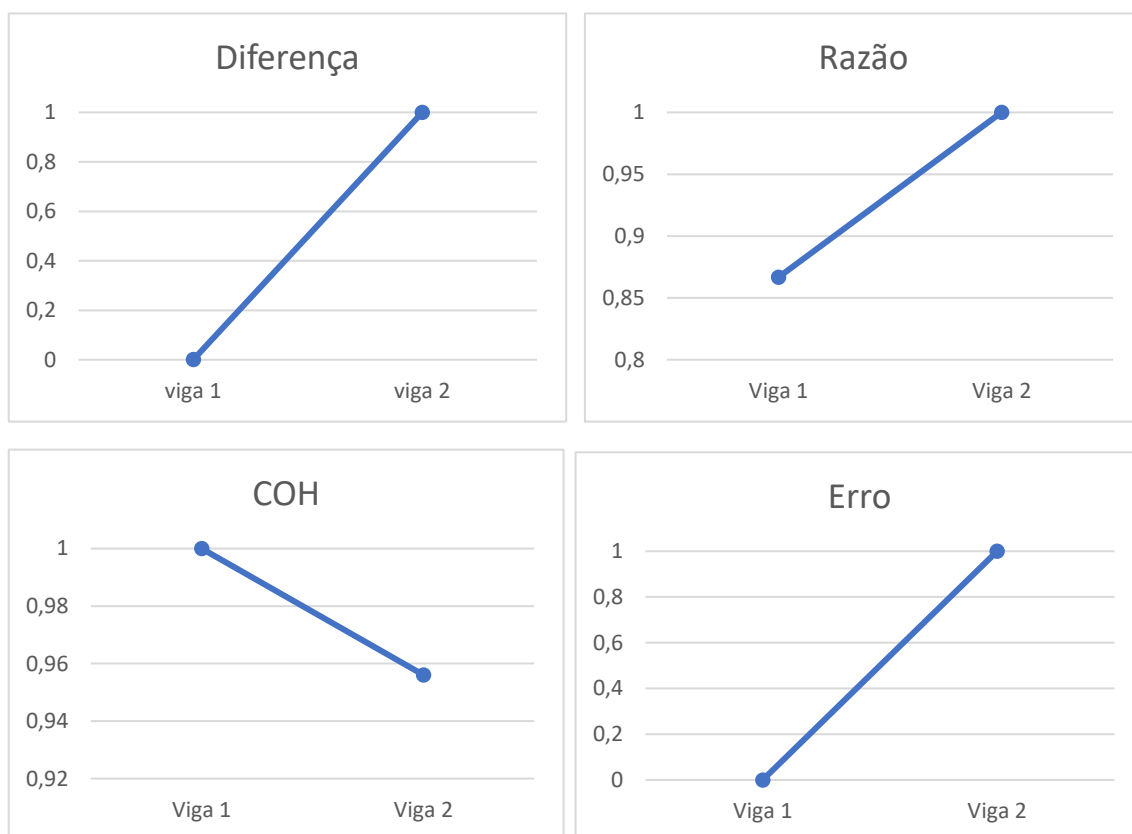


Figura 3.20- Sensibilidade dos indicadores na deteção do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B usando Funções de Transmissibilidade

Como se verifica pelos resultados obtidos presentes na Figura 3.20 todos os indicadores permitem detetar o tipo de dano em análise.

Os valores estão todos normalizados, daí o gráfico da diferença e do erro estarem iguais. Ambos os indicadores, como explicado anteriormente, tomam o valor 0 para quando não há dano e 1 quando existe dano.

Na figura 3.21 esta representada a sensibilidade dos indicadores descritos no capítulo 2, no que toca à localização do existente na viga 2-B.

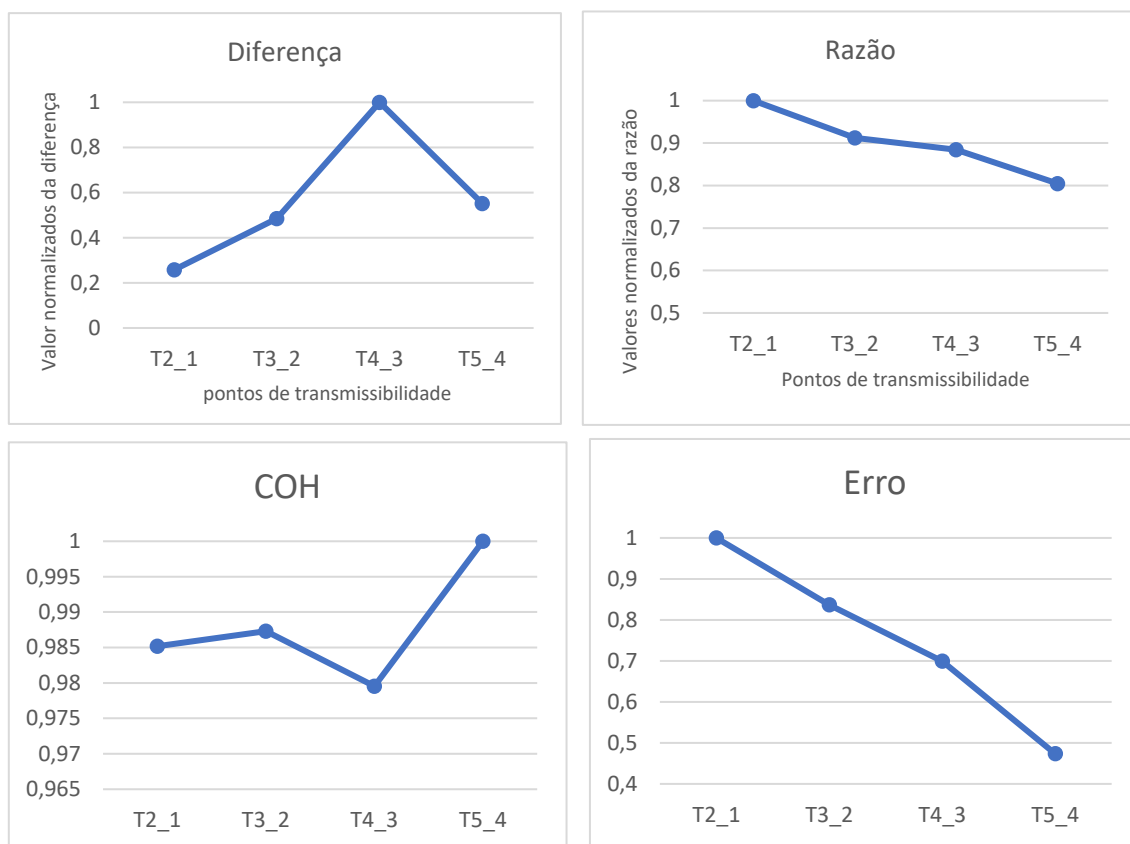


Figura 3.21- Sensibilidade dos indicadores na localização do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B usando Funções de Transmissibilidade

Como se observa na Figura 3.21 o indicador Diferença mostra-nos que a transmissibilidade entre os pontos 4-3 é a mais afetada pela existência de dano, o que facilmente é explicado pois o dano se localiza entre o ponto 3 e 4.

Tanto o indicador razão como o erro, não são suficientemente sensíveis a este tipo de dano analisado e por isso não conseguem localizá-lo.

A COH, à semelhança da diferença, indica-nos que os pontos mais afetados pelo dano são o 3 e o 4, permitindo assim dar uma ideia duma possível localização do dano.

3.4.2 Análise de vibrações da viga 3-B

O estudo feito na Viga 3-B foi igual ao estudo feito para a viga anterior. As FRF obtidas experimentalmente da viga 3-B foram comparadas com as FRF obtidas experimentalmente da viga 1-B e também com as da viga 2-B, para tentar perceber o comportamento das FRF à medida que o dano aumenta.

A sensibilidade dos indicadores para este tipo de dano também foi comparada com a sensibilidade dos indicadores para o dano anterior estudado.

Na figura 3.22 identifica-se as alterações nas frequências naturais provocadas pelo tipo de dano da viga 3-B.

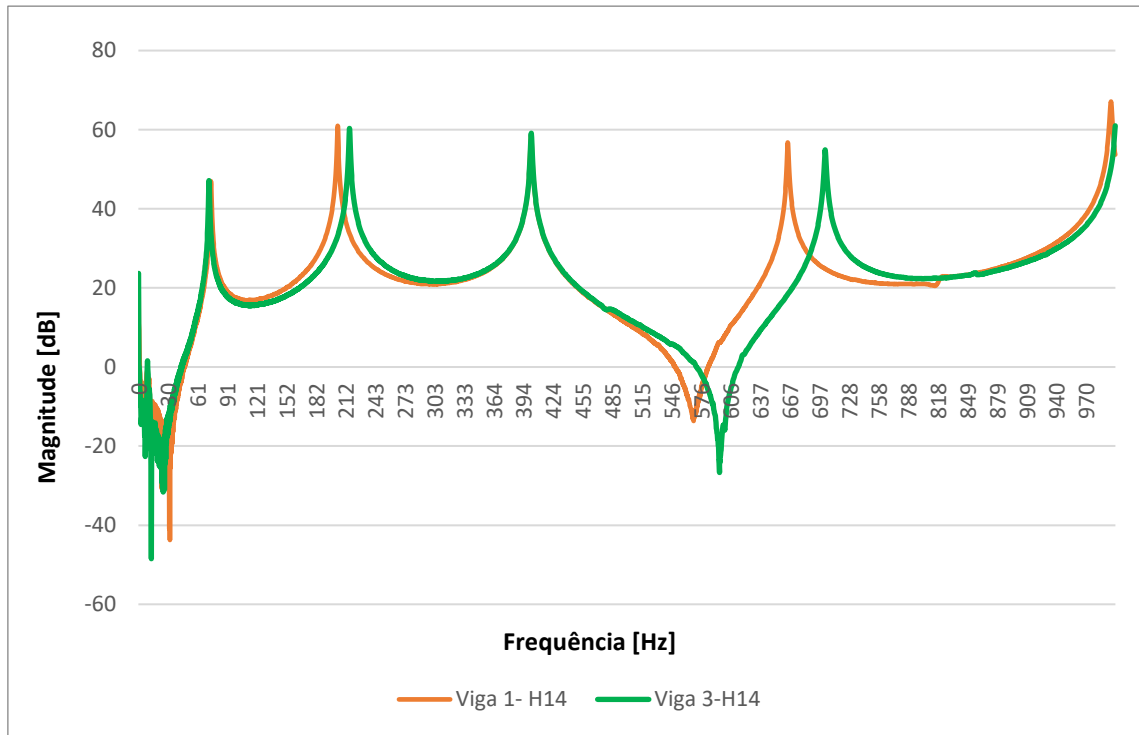


Figura 3.22- FRF da viga 1B e da viga 3B em H14

Na tabela estão apresentados os valores das frequências naturais das vigas 1B e da viga 3B.

Tabela 3.3-Frequências naturais estrutura sem dano (viga 1) e estrutura com dano (viga 3)

	Viga 1B	Viga 3B
	Frequência [Hz]	
1	74,06	72,19
2	203,75	215,94
3	401,88	402,19
4	664,69	703,13

Como se pode observar pela Figura 3.22 e refutar com os valores que estão apresentados na tabela 3.3, é na segunda e na quarta frequência natural a maior diferença registada.

Esta alteração é justificada pela equação 2.1, referida no capítulo 2. O dano apresentado na viga 3-B altera o valor das frequências naturais, como se observa na Figura 3.22 os valores destas frequências são efetivamente mais elevados que a viga 1-B, este resultado pode ser justificado pela diferença de massas entre estas.

Uma vez que a viga 3-B tem dois danos: o dano relacionado com a diminuição de rigidez e o aumento da massa, não foi possível estudar a relação entre o comportamento da sensibilidade dos indicadores com o aumento deste tipo de dano que apenas diminuem a rigidez.

A Figura 3.23 apresenta as FRFs medidas para cada viga permitindo assim perceber como os tipos de dano presentes em cada viga, influenciam as suas frequências naturais.

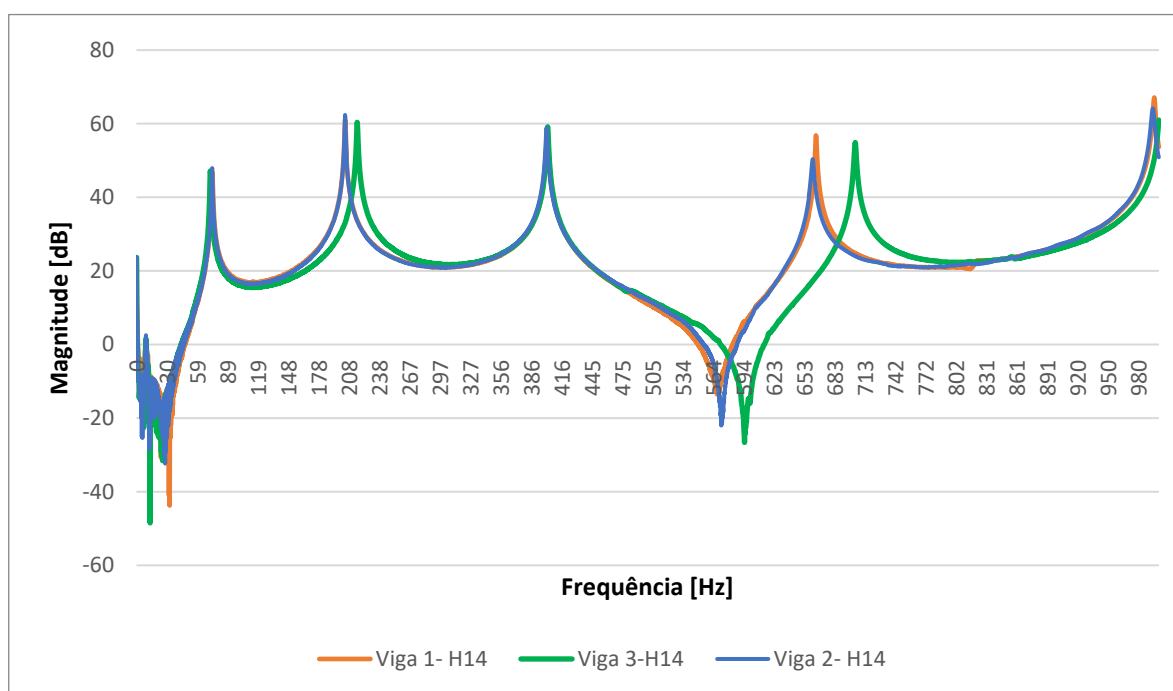


Figura 3.23- FRF da viga 1-B, viga 2-B e viga 3-B em H14

Tabela 3.4-Freqüências naturais das três vigas B estudadas

	Viga 1B	Viga 2B	Viga 3B
	Frequência [Hz]		
1	74,06	74,06	72,19
2	203,75	203,75	215,94
3	401,88	401,25	402,19
4	664,69	661,56	703,13

Indicadores que utilizam FRF para análise a resposta dinâmica

Na figura 3.24 são apresentados o comportamento dos indicadores no que toca a sua sensibilidade para a deteção de dano presentes nas vigas.

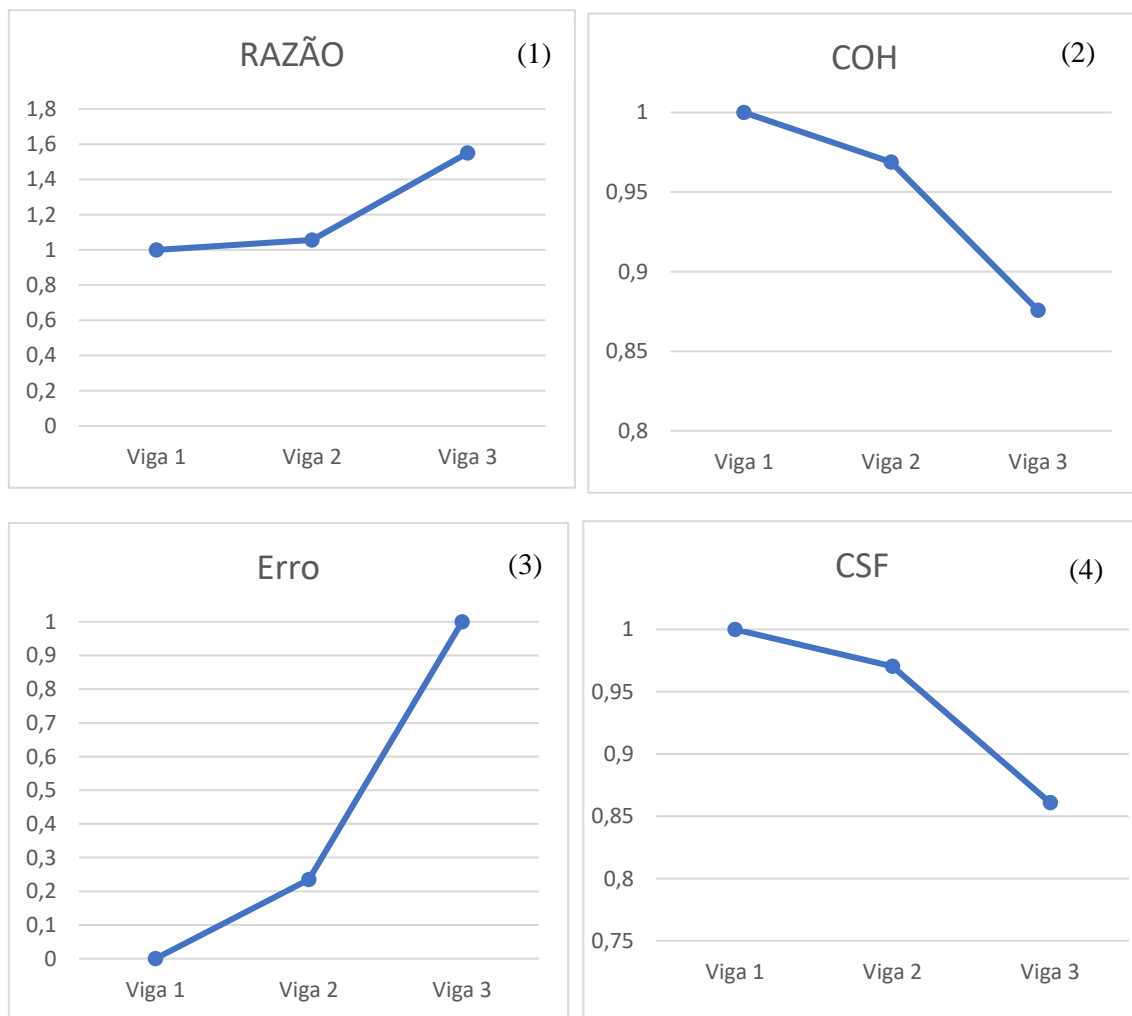


Figura 3.24- Sensibilidade dos indicadores na deteção do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B e 3-B usando FRFs

Como se pode observar na Figura 3.24 (1) a reta que traduz a deteção do dano entre a viga 2B e a viga 3B tem um declive bastante acentuado aquando comparada com a reta entre a viga 1B e a viga 2B, isto pode ser explicado pelo facto da viga 3 estar mais danificada do que a viga 2B. Do mesmo modo se conclui para o indicador apresentado na Figura 3.24(3).

É possível constatar, tanto na Figura 3.24 (2) como na Figura 3.24 (4), que os valores da deteção correspondente a viga 3 são menores quando comparados com os valores da viga 2 e da viga 1B, então à semelhança dos indicadores apresentados na figura (1) e (3) estes indicadores também indicam que a viga 3 tem maior dano aquando comparada com a viga 2 ou 1.

A Figura 3.24 traduz a sensibilidade do indicador razão na localização do dano presente na viga 2 e na viga 3.

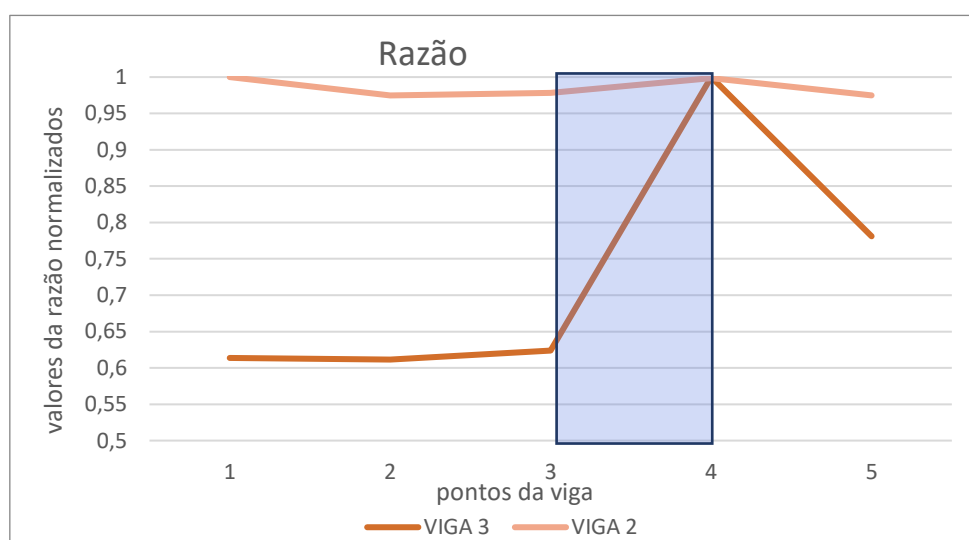


Figura 3.25- Sensibilidade do indicador Razão na localização do dano na Viga 2-B e 3-B usando FRFs

De acordo com os resultados apresentados na Figura 3.25, e como referido anteriormente, este indicador toma valores iguais a 1 na existência de dano, assim verifica-se que este indicador é muito pouco sensível a este tipo de dano, não permitindo assim localizá-lo.

O dano na viga 3B pode estar localizado tanto à esquerda como à direita do ponto 4, visto que este ponto é o que toma o maior valor.

A Figura 3.26 traduz a sensibilidade do indicador COH na localização do dano tanto para a viga 2B como para a viga 3B.

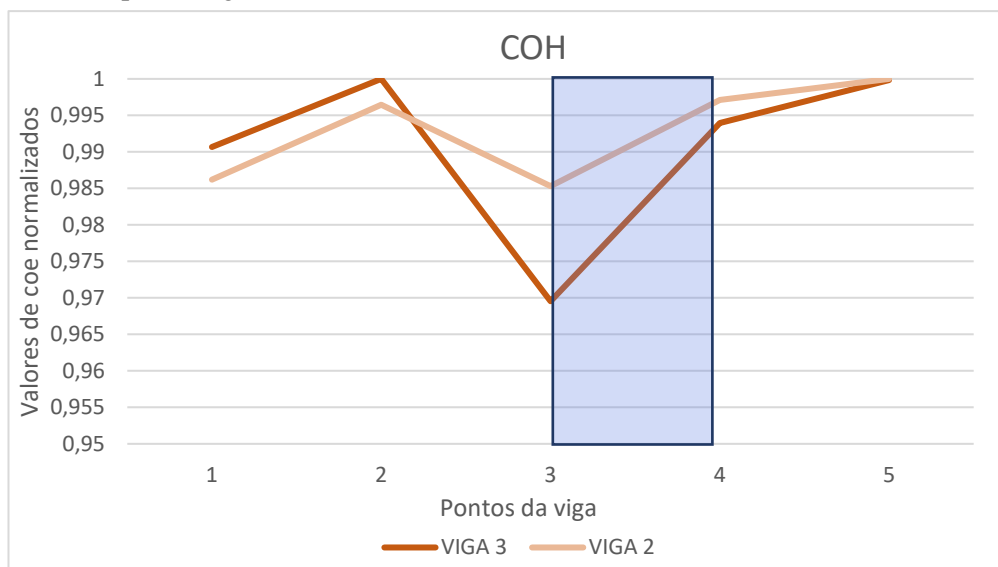


Figura 3.26- Sensibilidade do indicador COH na detecção do dano na Viga 2-B e 3-B usando FRFs

Este indicador indica dano quando toma valores próximos de zero, deste modo constata-se que o dano pode estar localizado próximo do ponto 3, tanto para a viga com mais dano como para a viga com menos dano.

Respetivamente a Figura 3.26 observa-se que para ambas as vigas, é possível localizar o dano, contudo verifica-se que o indicador é mais sensível para o tipo de dano presente na viga 3 B pois a COH toma valores mais baixos para esta viga.

A Figura 3.27 traduz a sensibilidade do indicador Erro na localização do dano tanto para a viga 2B como para a viga 3B.

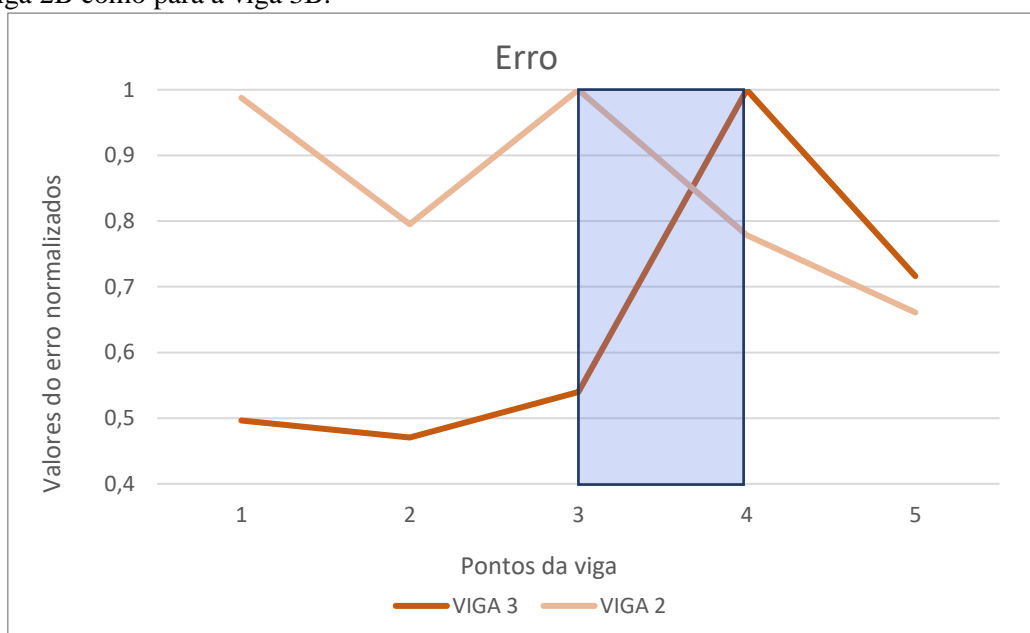


Figura 3.27-Sensibilidade do indicador Erro na detecção do dano na Viga 2-B e 3-B usando FRFs

À semelhança do indicador razão, este indicador apresentado na Figura 3.27 indica o dano quando toma valores perto de 1. Na viga 2B, o indicador mostra-se pouco sensível, pois, o ponto 1 e o ponto 3 tomam valores muito próximos de 1, então torna-se pouco assertivo concluir que o dano se localiza nas proximidades do ponto 3, todavia este indicador, permite de forma clara concluir que o dano está localizado nas proximidades do ponto 4 na viga 3B.

A Figura 3.28 traduz a sensibilidade do indicador CSF na localização do dano tanto para a viga 2B como para a viga 3B.

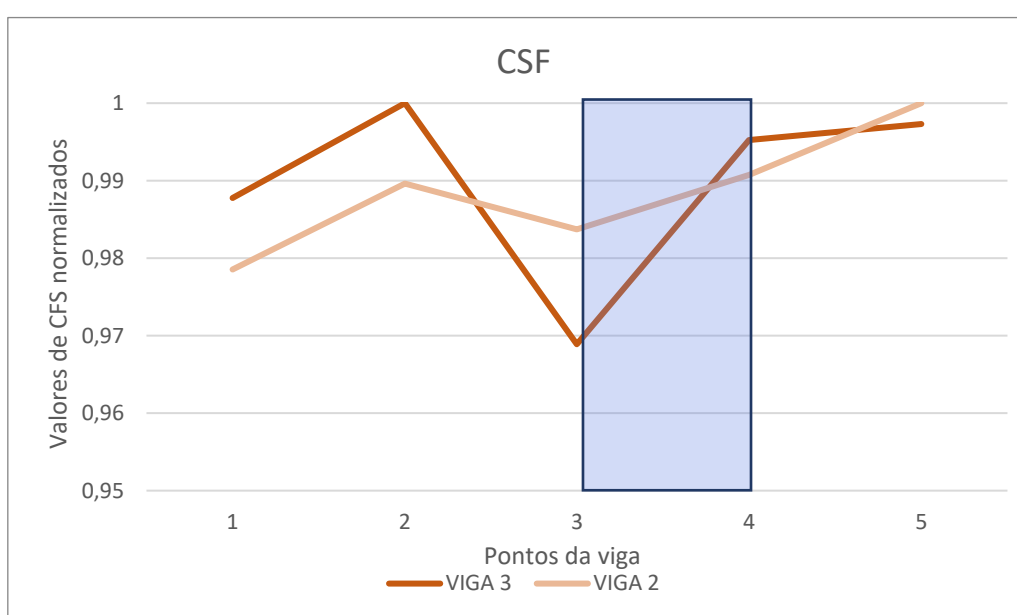


Figura 3.28-Sensibilidade do indicador CSF na deteção do dano na Viga 2-B e 3-B usando FRFs

Como explicado no capítulo 2 este indicador na presença de dano toma valores próximos de zero.

Respetivamente à Figura 3.28 pode-se concluir que o indicador CSF não permite localizar o tipo de dano da viga 2B, pois a localização do dano está representada pelo quadrado azul e o ponto que toma menor valor é o ponto 1.

Este indicador é bastante sensível no tipo de dano da viga 3B, pois com clareza verifica-se que o dano se localiza próximo do ponto 3.

Indicadores que usam transmissibilidade para análise de vibrações

A Figura 3.29 traduz a sensibilidade dos indicadores no que toca a deteção do dano por meio das transmissibilidades.

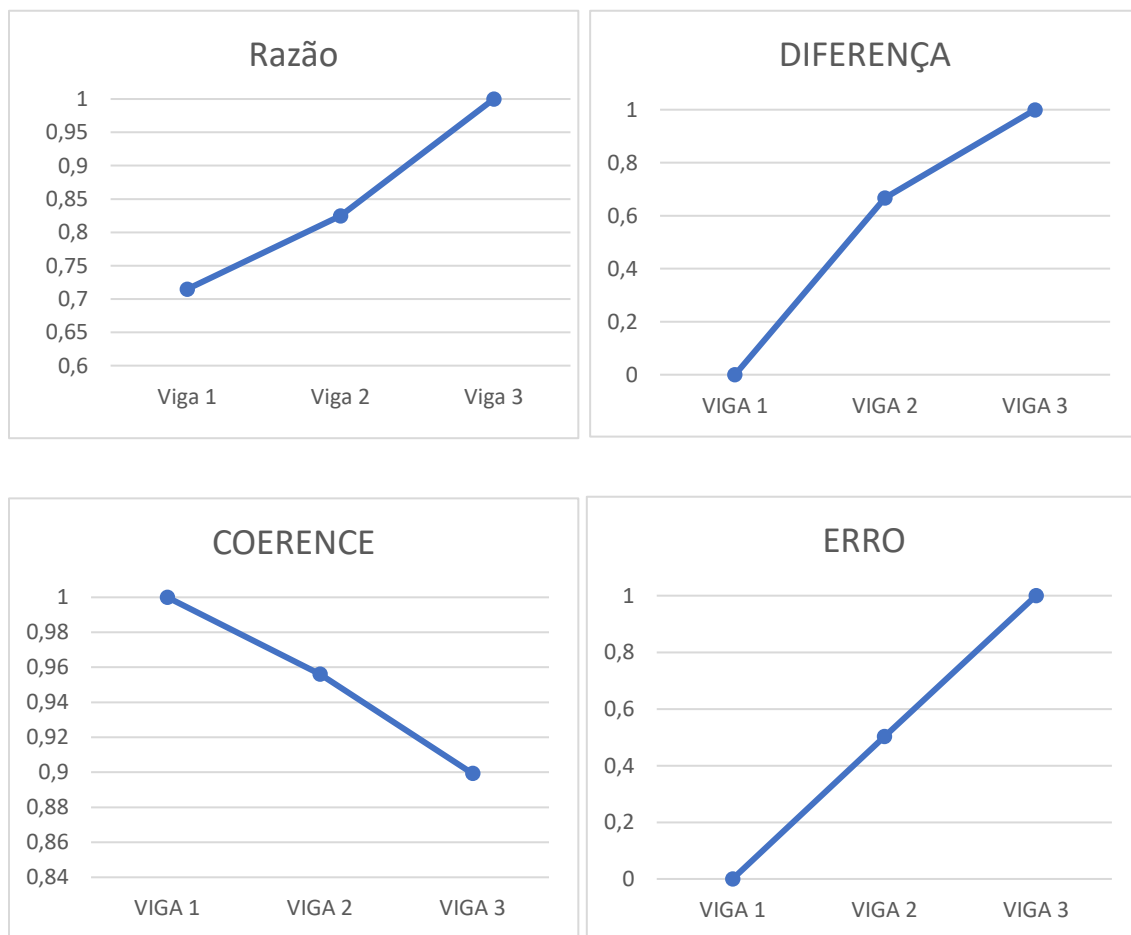


Figura 3.29-Sensibilidade dos indicadores na localização do dano na Viga 1-B e na Viga 2-B e 3-B usando FRFs

Verificando os resultados apresentados na Figura 3.29, constata-se que todos os indicadores permitem detetar o dano presente em ambas as vigas. Também se consegue constatar que os indicadores são mais sensíveis ao dano presente na viga 3-B.

A Figura 3.30 traduz a sensibilidade do indicador razão na localização do dano tanto para a viga 2 como para a viga 3.

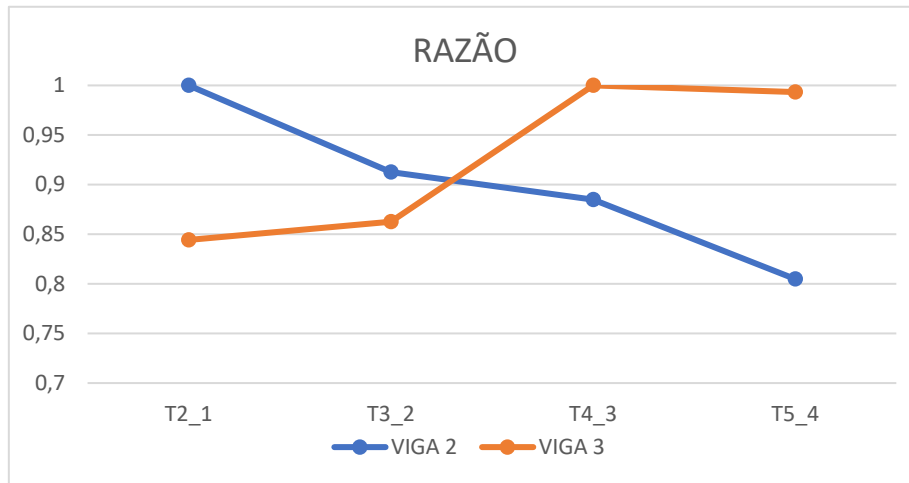


Figura 3.30-Sensibilidade do indicador Razão na localização do dano na Viga 2-B e 3-B usando FTs

Como observado, a razão quando utiliza as transmissibilidades, é um indicador pouco sensível para estes tipos de danos presentes em ambas as vigas. Apesar de na viga 3, o indicador permite verificar que a transmissibilidade do ponto 4-3 é a mais afetada, mas se demonstra muito sensível.

A Figura 3.31 traduz a sensibilidade do indicador COH na localização do dano tanto para a viga 2 B como para a viga 3B.

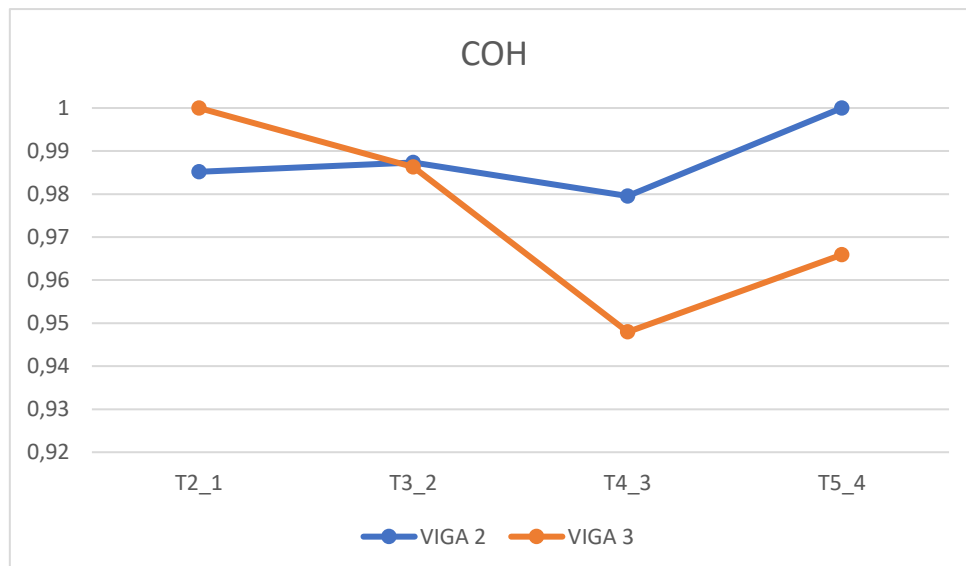


Figura 3.31-Sensibilidade do indicador COH na localização do dano na Viga 2-B e 3-B usando FTs

Como podemos observar, o indicador COH é menos sensível para o dano da viga 2 comparando as curvas representadas na figura anterior. Para ambas as vigas, este indicador indica que a transmissibilidade do ponto 4 para o ponto 3 é a mais afetada pela presença dos danos. Este resultado é espetável, pois o dano efetivamente está localizado entre o ponto 3 e o ponto 4.

A Figura 3.32 traduz a sensibilidade do indicador erro na localização do dano tanto para a viga 2 como para a viga 3.

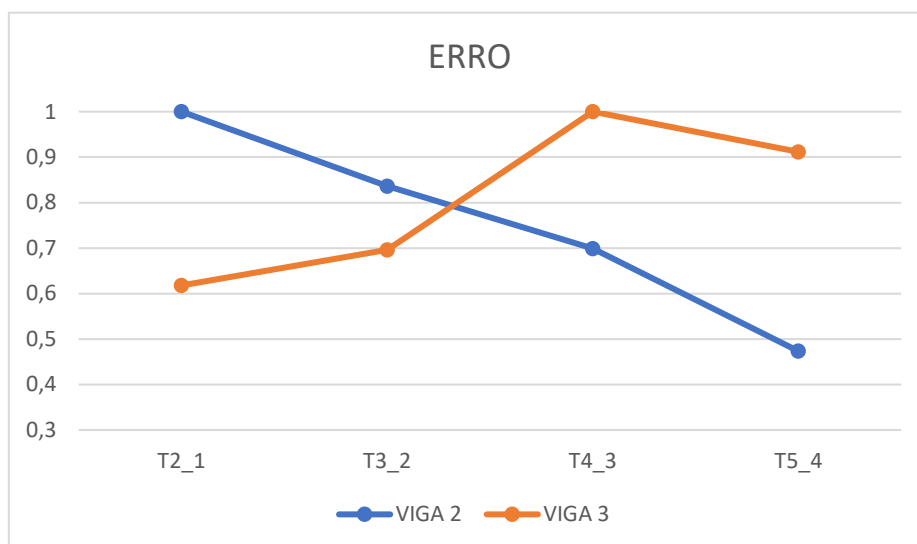


Figura 3.32-Sensibilidade do indicador Erro na localização do dano na Viga 2-B e 3-B usando FTs

Verifica-se que este indicador não é de todo sensível ao tipo de dano presente na viga 2-B, ou seja, é incapaz de localizar o dano, contudo para a viga 3, o erro indica que a transmissibilidade do ponto 4 para o ponto 3 é a mais afetada pelo dano.

A Figura 3.33 traduz a sensibilidade do indicador diferença na localização do dano tanto para a viga 2 como para a viga 3.

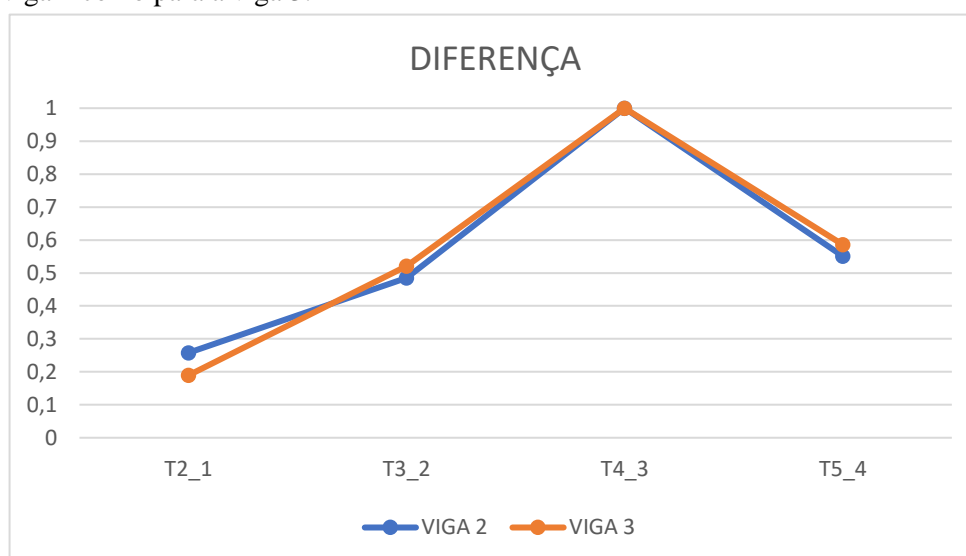


Figura 3.33-Sensibilidade do indicador Diferença na localização do dano na Viga 2-B e 3-B usando FTs

Este indicador permitiu localizar o dano tanto para o tipo de dano presente na viga 2-B como para o presente na viga 3-B. Como se verifica para ambas as vigas, o indicador sinaliza que a transmissibilidade do ponto 4 para o ponto 3 é a mais afetada.

3.4.3 Resumo da análise da resposta dinâmica das estruturas

Os danos introduzidos nas vigas 2B e 3B produziram alterações nas suas características dinâmicas a saber: Frequências naturais e modos naturais de vibração e consequentemente alterações nas funções de resposta em frequência.

Verificou-se que todos os indicadores baseados na utilização de FRFs permitiram detetar o dano.

Para o tipo de dano presente na viga 2B, a COH e o erro foram os únicos indicadores que permitem ter uma ideia de onde se localiza o dano, contudo mostraram ter pouca sensibilidade. Para o tipo de dano presente na viga 3 todos os indicadores proporcionaram uma ideia sua localização e indicaram mais sensibilidade em comparação com o estudo feito para a viga 2-B.

Quanto à sensibilidade dos indicadores que usam as transmissibilidades, esta é maior na deteção do dano da viga 3-B em comparação com a deteção do dano da viga 2-B, mas em ambas as vigas foram detetadas.

Para o tipo de dano da viga 2B a razão e o erro foram os indicadores que não permitem localizar o dano. Para o dano presente na viga 3B a razão mostrou-se ser pouco sensível no que toca à localização deste, todavia todos os outros indicadores (a diferença, a COH e o erro) localizaram-no facilmente.

Com o decorrer deste estudo concluímos que o processo de identificação do dano torna-se cada vez mais fácil, com o aumento de pontos em que se analisa o sinal da resposta dinâmica da estrutura.

No processo de deteção o aumento na gama de frequências não traz vantagens se for à custa da perda de resolução no domínio da frequência, ou seja, se usarmos o mesmo número de pontos (3200).

3.5 Sistema de Aquisição e Medição de Dados utilizado no estudo de CI

A sonda utilizada na realização de inspeção END por CI nas vigas descritas no capítulo 3, foi uma sonda composta por duas bobinas quadradas planas feitas com tecnologia PCB (*print circuit board*) e operou em modo *bridge* diferencial.

A sonda está otimizada para altas frequências (2-6 MHz).

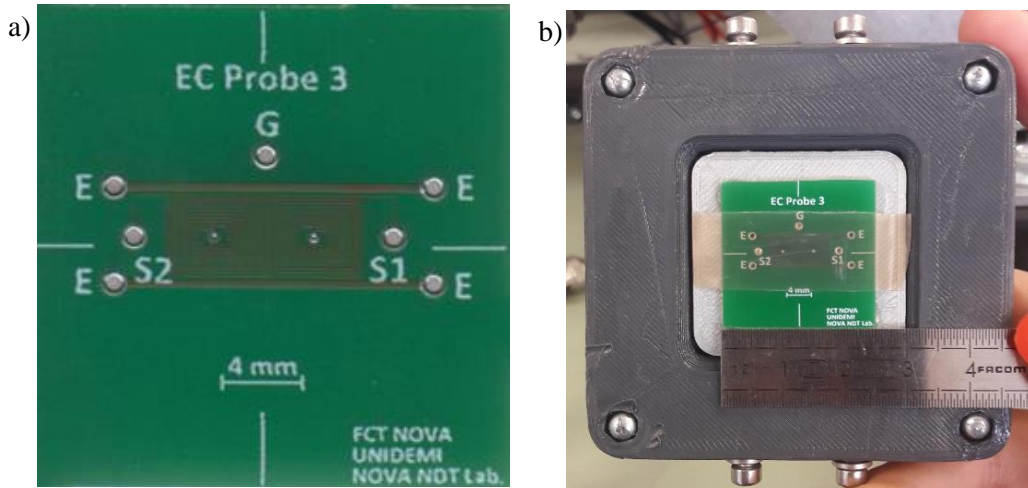


Figura 3.34 – a) Pormenor da sonda b) Vista geral da sonda utilizada na inspeção de END por CI

O equipamento utilizado para transmitir os dados adquiridos para o *software* LabVIEW foi o Olympus Nortec 500C.

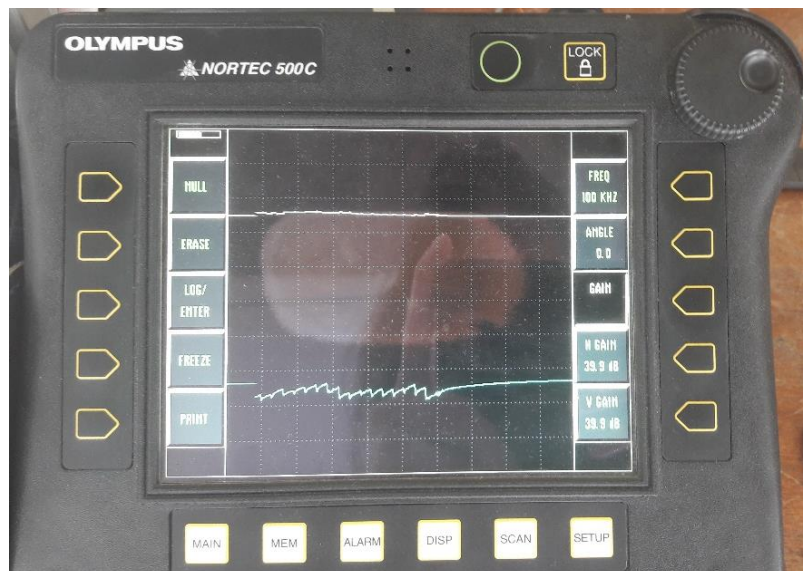


Figura 3.35 - Equipamento Olympus Nortec 500C

Os ensaios foram realizados numa “mesa” que proporcionou um varrimento constante e uniforme da viga. A sonda estava presa num sistema que permitia movimentá-la verticalmente sempre que necessário.

A viga era colocada na mesa e segura nas pontas com auxílio a grampos metálicos, depois posicionava-se a sonda no sítio escolhido (aproximadamente a 60 mm do lado esquerdo do cordão de soldadura) e através de um programa computacional dava-se início à “marcha” da sonda. A sonda percorria 120 mm (60 mm de cada lado do cordão de soldadura) e quando terminava voltava a posição inicial. Foi colado fita-cola tanto na sonda, Figura 3.34, como na viga, para que em todo o percurso da sonda fosse garantido o mesmo valor de *Lift off* e para ajudar na aderência entre a sonda e a viga.



Figura 3.36 – a) Esquema geral de montagem dos ensaios de CI b) pormenor da sonda utilizada

3.5.1 Dificuldades sentidas na inspeção por CI

Para a realização da inspeção END de CI com a sonda escolhida foi necessário afagar o cordão de soldadura das vigas, como esse processo causou muitos defeitos superficiais optou-se por fazer novas vigas, como explicado na secção 3.3.2.



Figura 3.37 - Defeitos presentes nas vigas A depois do cordão de soldadura afagado



Figura 3.38 – Alguns dos defeitos superficiais presentes na Viga 2A e 3A

Como referido no capítulo 1, os ensaios não destrutivos por correntes induzidas têm vários parâmetros sensíveis que influenciam o sinal obtido via experimental. O valor desses parâmetros, como o *Lift off*, a frequência e o tipo de sonda foram escolhidos com o decorrer dos ensaios, com o objetivo de obter o melhor sinal possível.

3.5.2 Programa numérico para CI

Os dados adquiridos pelo equipamento OLYMPUS foram transferidos através de um sistema de aquisição de dados para o software LabVIEW que analisou, apresentou e permitiu armazená-los. De seguida os dados foram tratados em *Excel*.

Na Figura 3.39 apresenta-se a interface gráfica do software em LabVIEW, onde são controlados os parâmetros de deslocamento da sonda

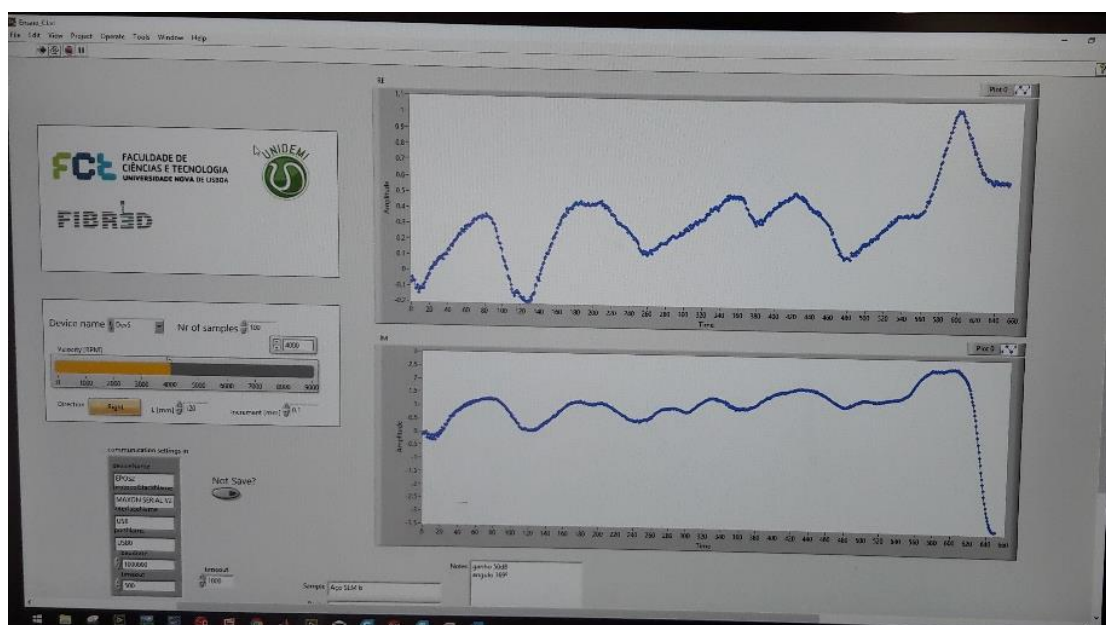


Figura 3.39-Interface gráfica do utilizador do software LabVIEW.

3.5.3 Estudo das correntes induzidas na viga 2-B

Este ensaio foi testado para quatro frequências diferentes, 500KHz, 750 KHz, 1MHz e 2MHz. Após os primeiros ensaios de CI na viga, conclui-se que não havia maneira de comparar as curvas de impedância obtidas da viga 1 B com a viga 2 B, assim colocaram-se 2 tiras de folha de alumínio à esquerda e à direita do dano distanciadas 30mm deste, de maneira que as curvas de impedância destas auxiliassem na comparação das curvas do defeito.

Na Figuras 3.40,3.41, 3.43 e 3.44 Estão representados os resultados obtidos por intermédio dos ensaios de correntes induzidas com 4 gamas de frequência distintas, à viga 1B e a viga 2B.

Estes resultados dizem respeito à variação de impedância, parte (Re) de ambas as bobinas quadrangulares planas ao longo do varrimento linear de 120 mm com o defeito a meio. Quando o defeito se encontra entre ambas as bobinas, a sua resposta será simétrica e de sinal contrário, como se pode confirmar.

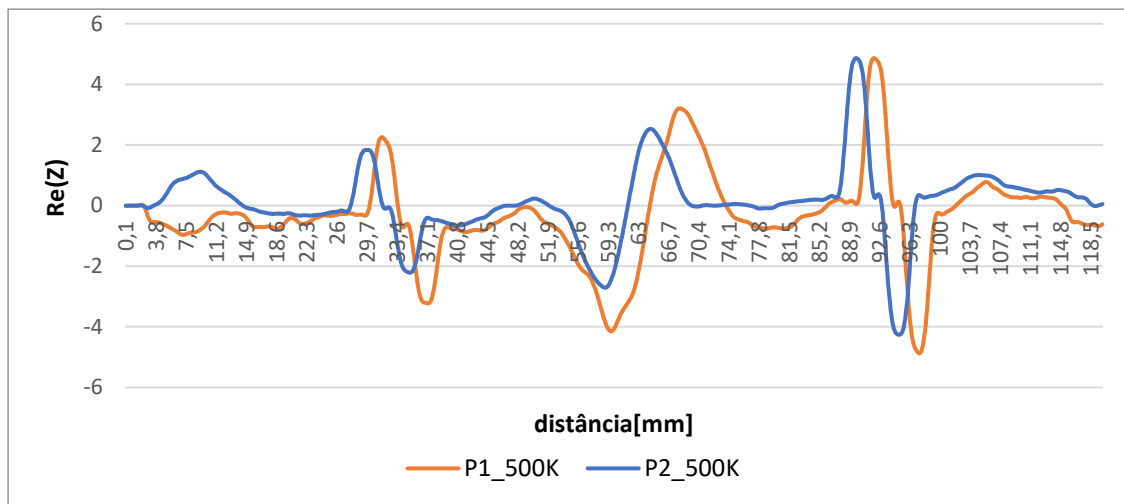


Figura 3.40- Ensaio da viga 1-B e 2-B a 500 KHz

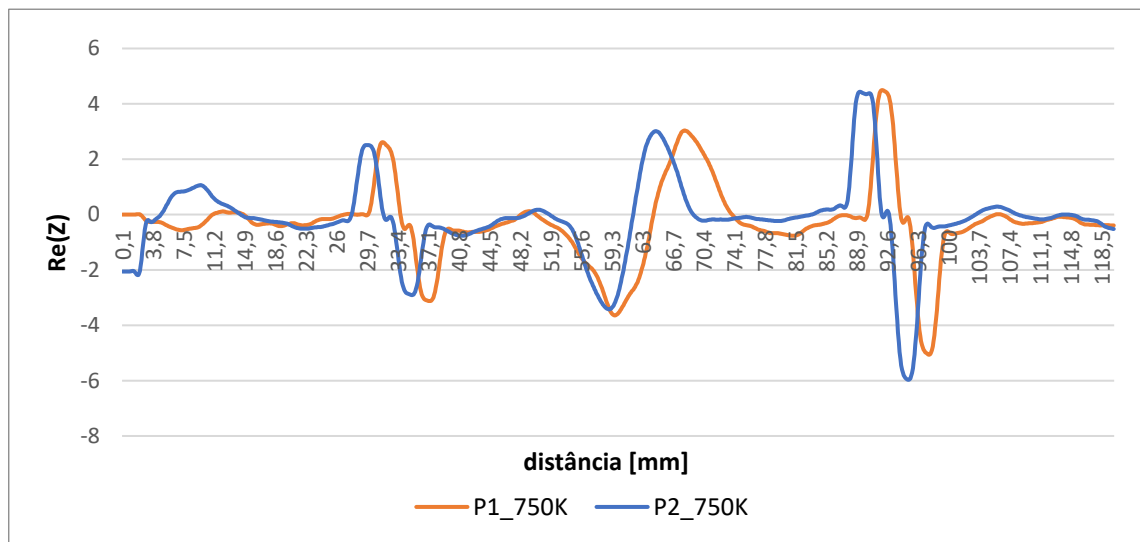


Figura 3.41- Ensaio da viga 1-B e 2-B a 750 KHz

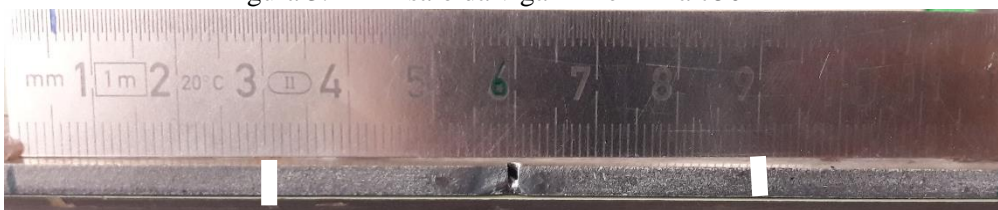


Figura 3.42- Pormenor do defeito presente na viga 2-B e da posição das tiras de alumínio

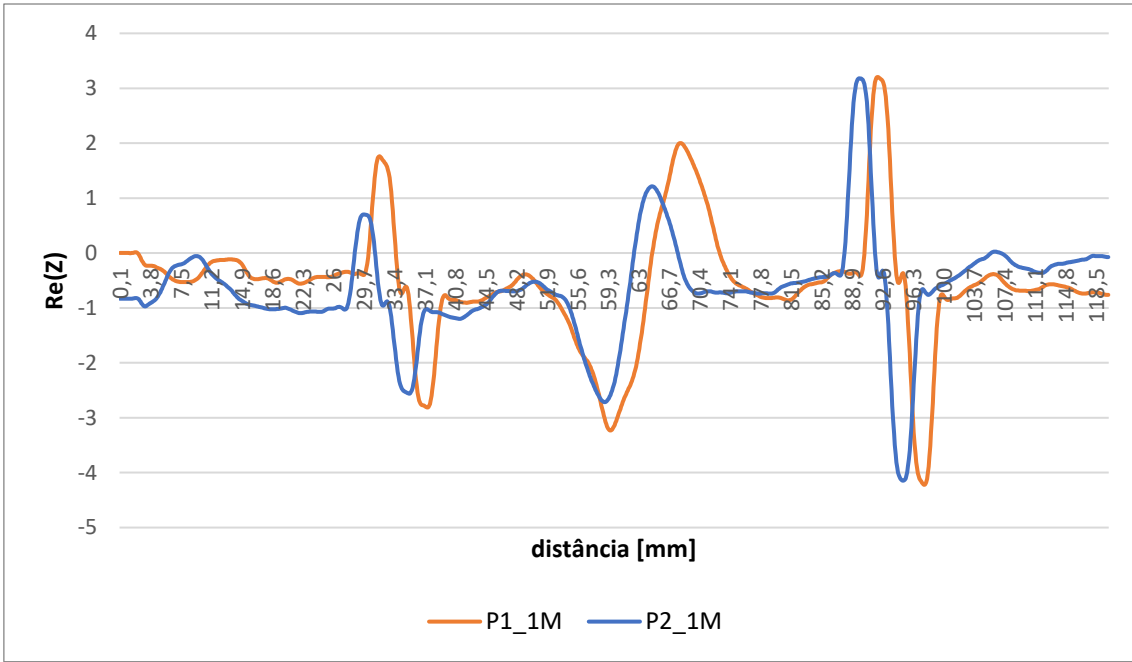


Figura 3.43- Ensaio da Viga 1-B e 2-B a 2MHz

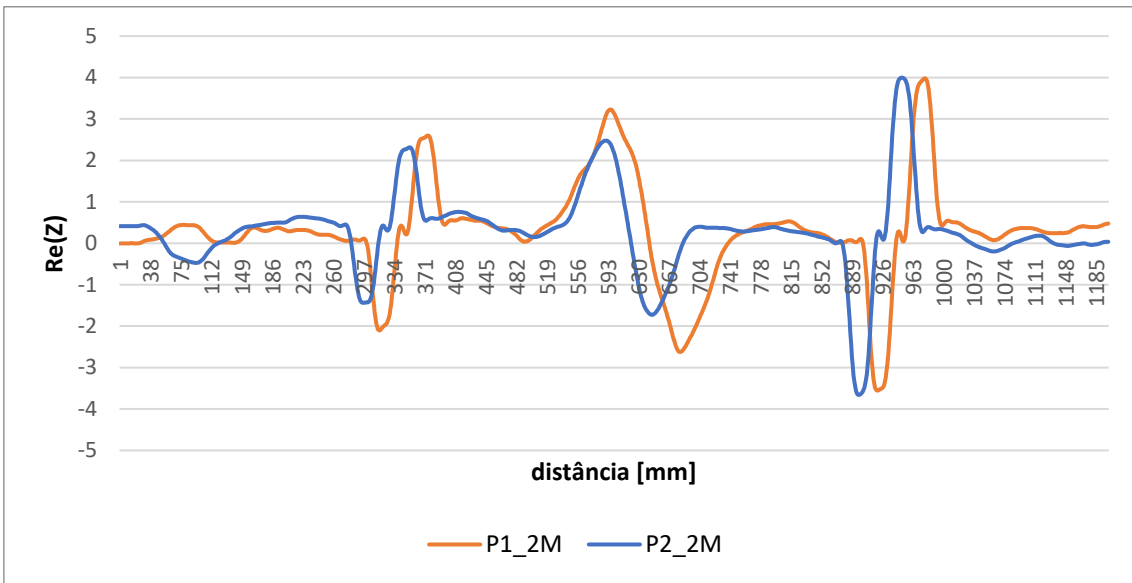


Figura 3.44- Ensaio da Viga 1-B e 2-B a 2MHz

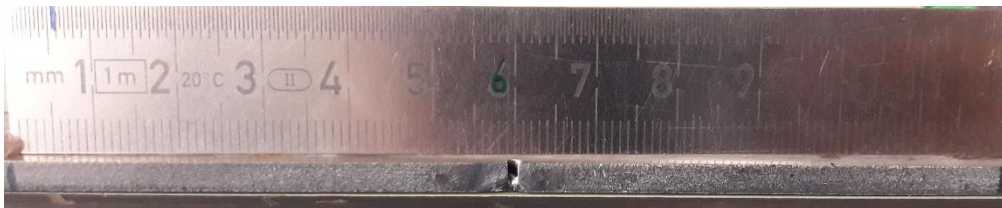


Figura 3.45 - Pormenor do defeito presente na viga 2-B

Verificou-se, para todas as frequências, que a amplitude do sinal na zona do defeito na viga 2B é aproximadamente igual ao da viga 1B, o que pode ser explicado através da equação 1.3, sendo o aço um material com permeabilidade magnética e condutividade elétrica elevada a profundidade máxima a que se consegue detetar defeitos é muito pequena. As correntes induzidas deslocam-se á superfície o que não permitiu a deteção do defeito. A zona de descontinuidade central no sinal diz respeito ao material da soldadura TIG, que em comparação com o material base tem diferente condutividade elétrica. A primeira e a última curva dizem respeito as folhas de alumínio referidas anteriormente.

3.5.4 Estudo das correntes induzidas na viga 3-B

Foi realizado o mesmo procedimento da viga 2B, na viga 3B para o estudo utilizando correntes induzidas.

Nas Figuras 3.46,3.47, 3.48 e Figura 3.50 Estão representados os resultados obtidos por intermédio dos ensaios de correntes induzidas com 4 gamas de frequência distintas, à viga 1B e a viga 3B.

Estes resultados dizem respeito à variação de impedância, parte real do sinal (Re) de ambas as bobinas quadradas planas ao longo do varrimento linear de 120 mm com o defeito a meio. Quando o defeito se encontra entre ambas as bobinas, a sua resposta será simétrica e de sinal contrário, como se pode confirmar.

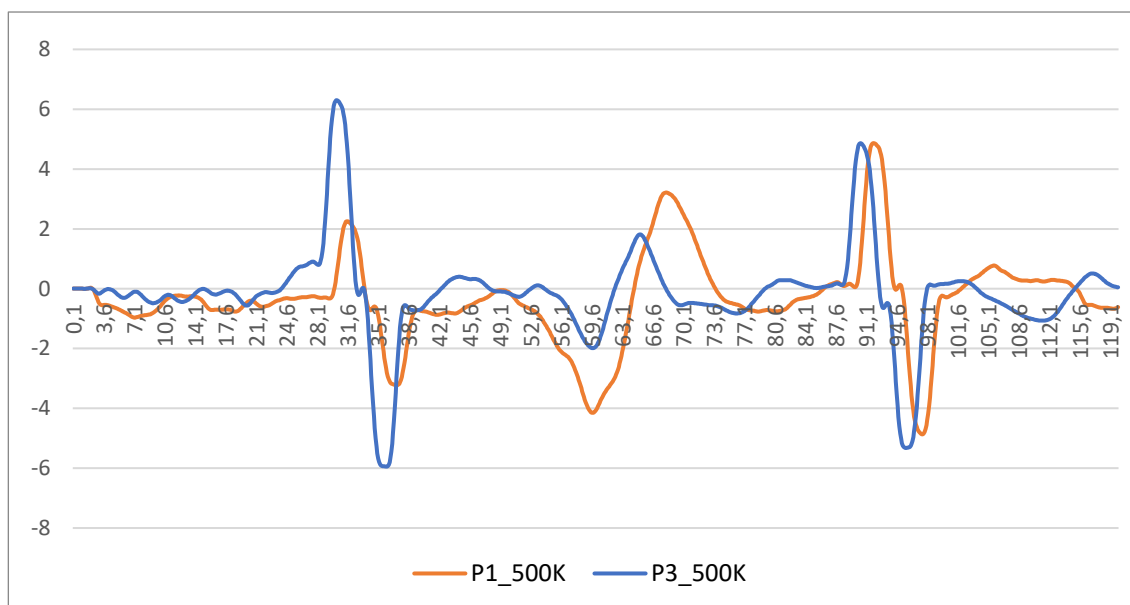


Figura 3.46- Ensaio de CI da viga 1-B e 3-B a 500 KHz

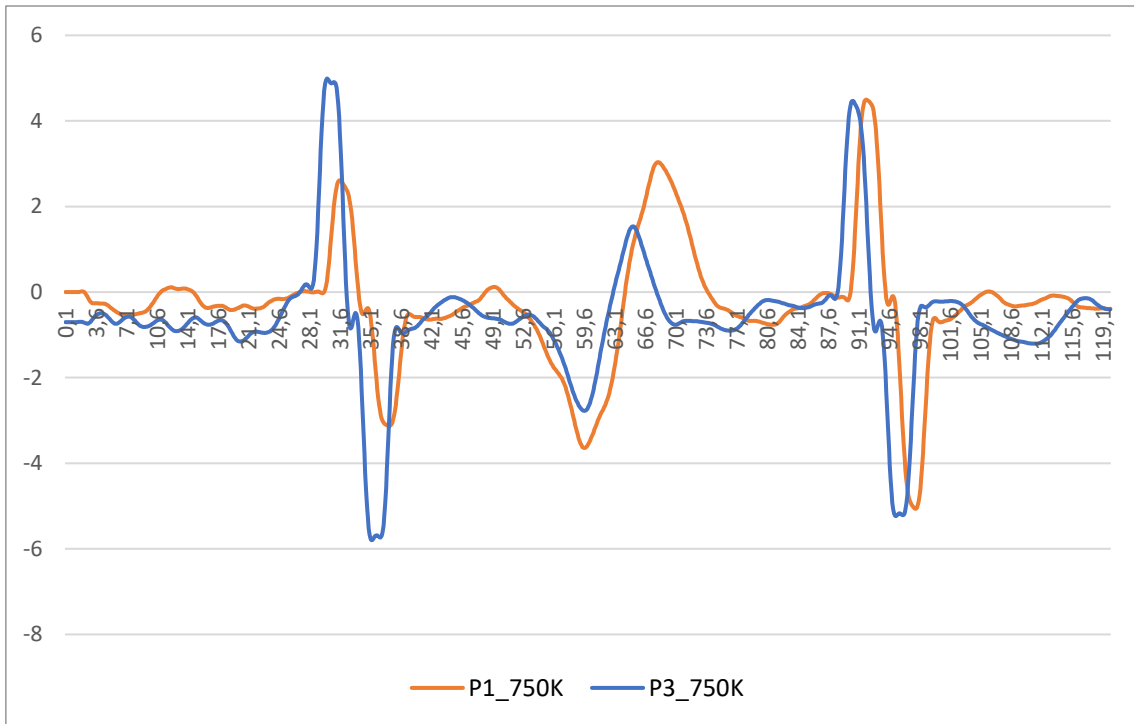


Figura 3.47- Ensaio de CI da viga 1-B e 3-B a 750 KHz

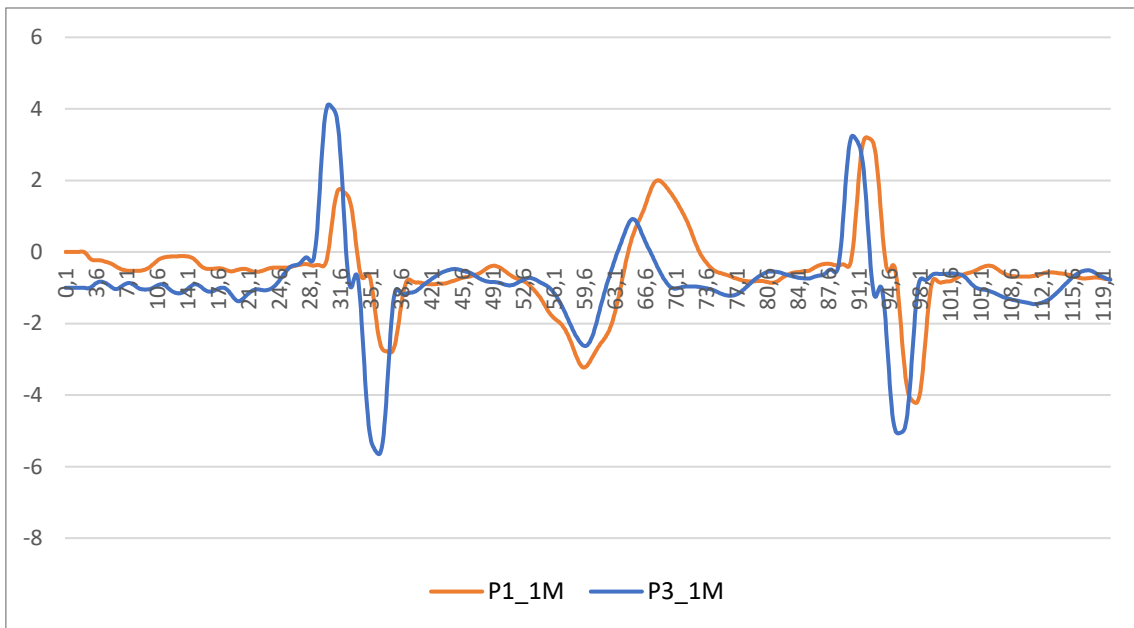


Figura 3.48-Ensaio de CI da viga 1-B e 3-B a 1 MHz



Figura 3.49- Pormenor do defeito presente na viga 2-B

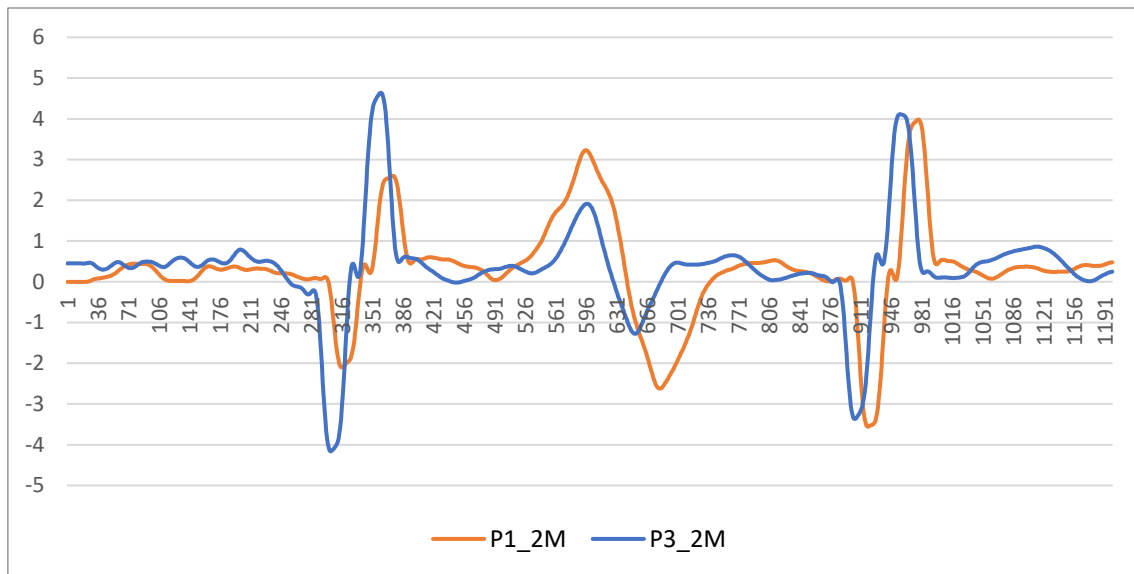


Figura 3.50 -Ensaio de CI da viga 1-B e 3-B a 2 MHz

À semelhança do que se observou nas Figuras 3.40, 3.41, 3.43 e 3.44 que representam o sinal da impedância na viga 2B, verifica-se para todas as frequências ensaiadas que a amplitude do sinal das impedâncias na zona do defeito na viga 3B aproximadamente igual ao sinal da viga 1B. Isso é também explicado através da equação 1.2.

3.6 Sistema de Aquisição e Medição de Dados utilizado no Estudo de Ultrassons Imersos

A sonda utilizada para este tipo de ensaio foi uma sonda de imersão OLYMPUS, de 10 MHz, representada nas Figura 3.51 e 3.52.



Figura 3.51 - Sonda utilizada nos ensaios de ultrassons

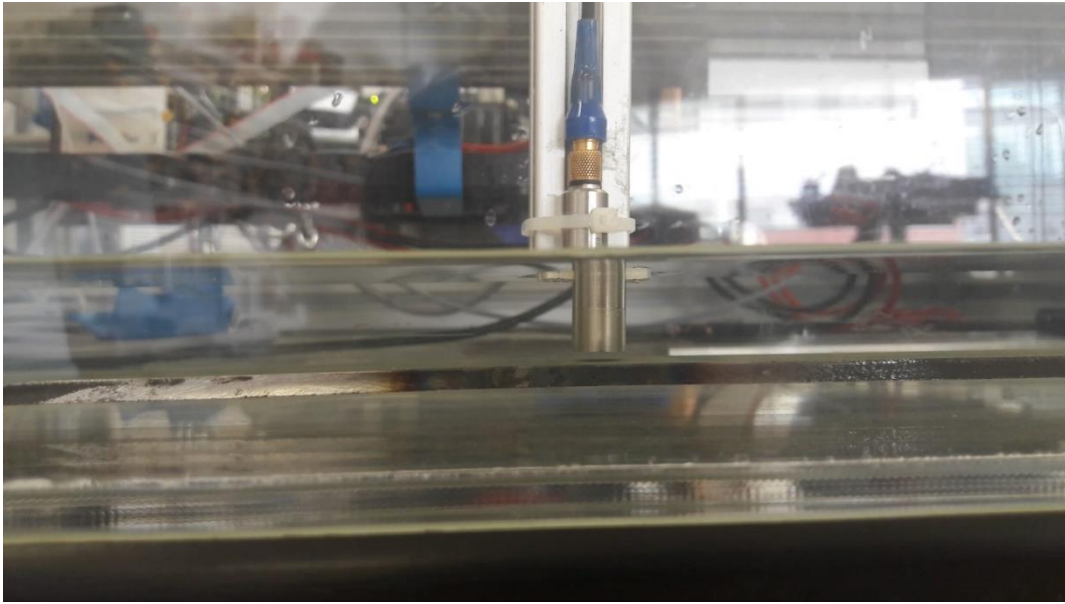


Figura 3.52 - Ensaio de ultrassons submersos

A Figura 3.53 ilustra o equipamento utilizado nestes ensaios para transmitir os dados adquiridos para o *software* LabVIEW, o Krautkramer USM 36.



Figura 3.53 - Equipamento Krautkramer USM 36

A Figura 3.54 representa a interface gráfica utilizada nestes ensaios.

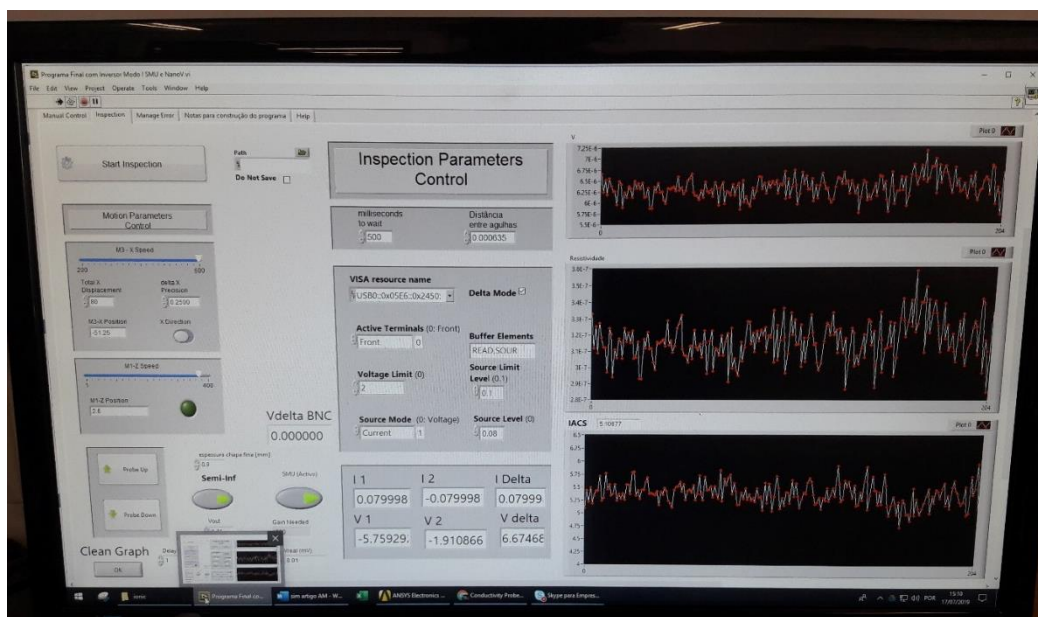


Figura 3.54- Interface gráfica do utilizador do *software* LabVIEW

Na Figura 3.54, observa-se um exemplo de um sinal obtido após o varrimento da viga 3-B, ao analisar percebe-se que o defeito não é detetado. Após vários ensaios a alterar a frequência e o *Lift off* concluiu-se que não era possível detetar os tipos de danos a ser estudadas com o tipo de sonda usado.

4 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

A partir do estudo da deteção do dano, por intermédio da análise da resposta dinâmica das vigas usando indicadores que utilizam FRF, foi possível detetar o dano em ambas as vigas.

Também no estudo da localização do dano, por intermédio da análise da resposta dinâmica das vigas usando indicadores que utilizam FRF, foi possível localizar o dano em ambas as vigas.

O estudo da deteção do dano, através da análise das respostas dinâmicas das vigas usando indicadores que utilizam FT, permitiu detetar o dano em ambas as vigas.

Localizou-se o dano tanto na viga com mais dano como na viga com menos dano no estudo da localização do dano, por meio da análise da resposta dinâmica das vigas usando indicadores que utilizam FT.

Os ensaios não destrutivos de correntes induzidas não permitiram detetar nem localizar o dano, apenas a zona de soldadura.

No END de US também não foi possível a deteção nem a localização do defeito.

Para desenvolvimentos futuros seria interessante fazer a comparação da análise modal com outros tipos de ensaios não destrutivos mais convencionais como o Rx, termografia e partículas magnética.

Também seria interessante investigar outros tipos de defeitos, com dimensões, geometria e/ou orientações diferentes.

5 Referências Bibliográficas

- [1] N. M. M. Maia, R. A. B. Almeida, A. P. V. Urgueira, e R. P. C. Sampaio, «Using transmissibility for damage detection and quantification», apresentado na Proceedings of the 5th European Workshop - Structural Health Monitoring 2010, 2010, pp. 327–335.
- [2] G. Sabnavis, R. G. Kirk, M. Kasarda, e D. Quinn, «Cracked Shaft Detection and Diagnostics: A Literature Review», *Shock Vib. Dig.*, vol. 36, n. 4, pp. 287–296, Jul. 2004, doi: 10.1177/0583102404045439.
- [3] A. Rytter, «Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures», 1993.
- [4] S. Chesné e A. Deraemaeker, «Damage localization using transmissibility functions: A critical review», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 38, n. 2, pp. 569–584, 2013, doi: 10.1016/j.ymssp.2013.01.020.
- [5] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, e D. W. Shevitz, «Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review», Los Alamos National Lab., NM (United States), LA-13070-MS, Mai. 1996.
- [6] N.-G. Park e Y.-S. Park, «Identification of damage on a substructure with measured frequency response functions», *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 19, n. 10, pp. 1891–1901, 2005, doi: 10.1007/BF02984268.
- [7] S. W. Doebling, C. R. Farrar, e M. B. Prime, «A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods», *Shock Vib. Dig.*, vol. 30, n. 2, pp. 91–105, Mar. 1998, doi: 10.1177/058310249803000201.
- [8] H. Sohn, C. R. Farrar, F. Hemez, e J. Czarnecki, «A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996 – 200», p. 7.
- [9] J.-J. Sinou, «A review of damage detection and health monitoring of mechanical systems from changes in the measurement of linear and non-linear vibrations», em *Mechanical Vibrations: Measurement, Effects and Control*, 2009, pp. 643–702.
- [10] J. M. Lifshitz e A. Rotem, «Determination of Reinforcement Unbonding of Composites by a Vibration Technique», *J. Compos. Mater.*, vol. 3, n. 3, pp. 412–423, 1969, doi: 10.1177/002199836900300305.
- [11] A. Messina, E. J. Williams, e T. Contursi, «Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method», *J. Sound Vib.*, vol. 216, n. 5, pp. 791–808, 1998, doi: 10.1006/jsvi.1998.1728.
- [12] O. S. Salawu, «Detection of structural damage through changes in frequency: A review», *Eng. Struct.*, vol. 19, n. 9, pp. 718–723, 1997, doi: 10.1016/S0141-0296(96)00149-6.
- [13] H. F. Lam, J. M. Ko, e C. W. Wong, «LOCALIZATION OF DAMAGED STRUCTURAL CONNECTIONS BASED ON EXPERIMENTAL MODAL AND SENSITIVITY ANALYSIS», *J. Sound Vib.*, vol. 210, n. 1, pp. 91–115, Fev. 1998, doi: 10.1006/jsvi.1997.1302.
- [14] Z. Wang, R. M. Lin, e M. K. Lim, «Structural damage detection using measured FRF data», *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 147, n. 1–2, pp. 187–197, 1997, doi: 10.1016/S0045-7825(97)00013-3.
- [15] R. M. Lin e D. J. Ewins, «Analytical model improvement using frequency response functions», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 8, n. 4, pp. 437–458, Jul. 1994, doi: 10.1006/mssp.1994.1032.
- [16] U. Lee e J. Shin, «A frequency response function-based structural damage identification method», *Comput. Struct.*, vol. 80, n. 2, pp. 117–132, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0045-7949(01)00170-5.
- [17] J. V. Araújo dos Santos, C. M. Mota Soares, C. A. Mota Soares, e N. M. M. Maia, «Structural damage identification in laminated structures using FRF data», *Compos. Struct.*, vol. 67, n. 2, pp. 239–249, Fev. 2005, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.09.011.

- [18] M. P. Limongelli, «Frequency response function interpolation for damage detection under changing environment», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 24, n. 8, pp. 2898–2913, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.ymsp.2010.03.004.
- [19] Q. Chen, Y. W. Chan, e K. Worden, «Structural fault diagnosis and isolation using neural networks based on response-only data», *Comput. Struct.*, vol. 81, n. 22, pp. 2165–2172, Set. 2003, doi: 10.1016/S0045-7949(03)00295-5.
- [20] K. Worden, «STRUCTURAL FAULT DETECTION USING A NOVELTY MEASURE», *J. Sound Vib.*, vol. 201, n. 1, pp. 85–101, Mar. 1997, doi: 10.1006/jsvi.1996.0747.
- [21] C. Devriendt, G. Steenhackers, e P. Guillaume, *On the use of Transmissibility in the field of: operational Modal Analysis and Structural Health Monitoring Proceedings of the 8th National Congress in theoretical and applied Mechanics*. May.
- [22] C. Devriendt e P. Guillaume, «The use of transmissibility measurements in output-only modal analysis», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, n. 7, pp. 2689–2696, Out. 2007, doi: 10.1016/j.ymsp.2007.02.008.
- [23] M. J. Schulz, A. S. Naser, P. F. Pai, M. S. Linville, e J. Chung, «Detecting structural damage using transmittance functions», em *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference*, 1997, vol. 3089, p. 638.
- [24] V. Caccese, R. Mewer, e S. S. Vel, «Detection of bolt load loss in hybrid composite/metal bolted connections», *Eng. Struct.*, vol. 26, n. 7, pp. 895–906, 2004.
- [25] W. Liu e D. J. Ewins, «Transmissibility properties of MDOF systems», em *Proceedings-Spie The International Society For Optical Engineering*, 1998, vol. 2, pp. 847–854.
- [26] N. M. Maia, J. M. Silva, e A. M. Ribeiro, «The transmissibility concept in multi-degree-of-freedom systems», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, n. 1, pp. 129–137, 2001.
- [27] A. M. R. Ribeiro, J. M. M. Silva, e N. M. M. Maia, «On the generalisation of the transmissibility concept», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 14, n. 1, pp. 29–35, 2000.
- [28] N. M. Maia, R. A. Almeida, A. P. Urgueira, e R. P. Sampaio, «Damage detection and quantification using transmissibility», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 25, n. 7, pp. 2475–2483, 2011.
- [29] Y.-L. Zhou, E. Figueiredo, N. Maia, e R. Perera, «Damage detection and quantification using transmissibility coherence analysis», *Shock Vib.*, vol. 2015, 2015.
- [30] T. Santos, «Elementos de estudo da unidade curricular- Processos Avançados de Fabrico e Ensaio não Destrutivos.» .
- [31] «Non-destructive Testing Applications in Commercial Aircraft Maintenance». [Em linha]. Disponível em: <https://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/031/031.htm>. [Acedido: 15-Ago-2019].
- [32] J.-J. Sinou e A. W. Lees, «The influence of cracks in rotating shafts», *J. Sound Vib.*, vol. 285, n. 4–5, pp. 1015–1037, 2005, doi: 10.1016/j.jsv.2004.09.008.
- [33] Y. Narkis e E. Elmalah, «Crack identification in a cantilever beam under uncertain end conditions», *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 38, n. 5, pp. 499–507, Mai. 1996, doi: 10.1016/0020-7403(95)00071-2.
- [34] Y. Narkis, «Identification of Crack Location in Vibrating Simply Supported Beams», *J. Sound Vib.*, vol. 172, n. 4, pp. 549–558, Mai. 1994, doi: 10.1006/jsvi.1994.1195.
- [35] Y.-S. Lee e M.-J. Chung, «A study on crack detection using eigenfrequency test data», *Comput. Struct.*, vol. 77, n. 3, pp. 327–342, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0045-7949(99)00194-7.
- [36] A. Drozg, J. Rogelj, G. Čepon, e M. Boltežar, «On the performance of direct piezoelectric rotational accelerometers in experimental structural dynamics», *Measurement*, vol. 127, pp. 292–298, Out. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.05.081.
- [37] M. Van der Seijs, D. van den Bosch, D. Rixen, e D. Klerk, «An improved methodology for the virtual point transformation of measured frequency response functions in dynamic substructuring», 2013, pp. 4334–4347, doi: 10.7712/120113.4816.C1539.
- [38] T. Silva, «Development and Implementation of Model Updating Techniques in Structural Dynamics».