



João Miguel Correia Palma

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Concessão e Caracterização Dinâmica de Sensores T para a Medição de Rotações

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Doutora Raquel Albuquerque Soares Brás
de Almeida, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Coorientador: Doutor Tiago Alexandre Narciso de
Silva, Professor Auxiliar Convidado,
FCT-UNL

Júri:

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

Arguente: Doutor Bruno Soares, Professor Auxiliar,
FCT-UNL

Vogal: Doutora Raquel Albuquerque Soares Brás
de Almeida, Prof. Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2021

João Miguel Correia Palma
Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Concessão e Caracterização Dinâmica de Sensores T para a Medição de Rotações

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Doutora Raquel Albuquerque Soares Brás
de Almeida, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Coorientador: Doutor Tiago Alexandre Narciso de
Silva, Professor Auxiliar Convidado,
FCT-UNL

Júri:
Presidente: Doutor António Paulo Vale Urgueira,
Professor Associado, FCT-UNL
Arguente: Doutor Bruno Soares, Professor Auxiliar,
FCT-UNL
Vogal: Doutora Raquel Albuquerque Soares Brás
de Almeida, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Março de 2021

Conceção e Caracterização Dinâmica de Sensores T para a Medição de Rotações

Copyright© 2020 João Miguel Correia Palma, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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

Este trabalho foi redigido segundo o novo acordo ortográfico.

À minha família.

Agradecimentos

À Professora Raquel Almeida e ao Professor Tiago Silva pelo tema de dissertação proposto. Pela orientação, ajuda e motivação que me deram ao longo deste percurso e ainda por todo o conhecimento que me passaram e conselhos. Queria ainda agradecer pela confiança depositada em mim para a realização desta dissertação.

Ao Professor Bruno Soares por ter disponibilizado o laboratório de impressão 3D e pela partilha do seu conhecimento na matéria.

Ao Professor António Urgueira pela sua disponibilidade para esclarecer dúvidas perante a rara indisponibilidade dos Professores orientadores.

Ao FabLab da Câmara Municipal de Lisboa que permitiu a impressão dos Sensores T utilizados na dissertação aquando do encerramento dos laboratórios da FCT devido à pandemia.

À minha família, pelo apoio e paciência durante todo o meu percurso académico.

Gostava de por último agradecer a todos os meus amigos que me apoiaram e me ajudaram quando tudo parecia tão difícil.

O meu sincero obrigado.

Resumo

O conhecimento do comportamento dinâmico de uma estrutura desempenha um papel importante em várias áreas de engenharia como: aerodinâmica, resposta sísmica de edifícios, detecção de dano, modificação estrutural, entre outros.

Para conhecer o comportamento dinâmico de uma estrutura é necessário conhecer as relações entre translações/forças, translações/momentos, rotações/forças e rotações/momentos. Teoricamente é fácil obter estas relações, embora, por vezes, o processo seja extremamente complexo. Experimentalmente existem algumas dificuldades, nomeadamente na excitação da estrutura através de um momento puro e na medição de rotações, cuja a falta de conhecimento contribui para a ausência de pelo menos 75% da matriz de resposta de uma estrutura.

O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas permitiu a concessão de um sensor uniaxial que permitem a medição de rotação num eixo, no entanto este apresenta dois inconvenientes, um deles é o seu custo, ainda bastante elevado e o outro é a sua massa. O mesmo desenvolvimento tecnológico ainda não permite a excitação de uma estrutura com um momento puro, por isso existe a necessidade de explorar outras alternativas para poder realizar o estudo do comportamento dinâmico de uma estrutura de forma mais acessível.

Este trabalho explora a possibilidade de imprimir, em 3D Sensores T que permitam a dedução de rotações através de translações medidas, com o auxílio de um par de acelerómetros piezoelétricos uniaxiais.

A tecnologia de Fabricação Aditiva torna-se bastante apelativa pela facilidade de concessão, utilização de materiais leves e sustentáveis, manipulação das características físicas das peças impressas e baixo custo.

Palavras-chave: Comportamento dinâmico, Medição de Rotações, Fabricação Aditiva, Sensores T, Acelerómetros piezoelétricos.

Abstract

The knowledge of the dynamic behavior of a structure has an important role in various fields of engineering such as: aerodynamics, seismic response of buildings, damage detection, structural modification, among others.

It is necessary, for the characterization of the dynamic behavior of a structure, to know the relations between displacement/force, displacement/moment, rotation/force and rotation/moment. Theoretically, it's easy to obtain these relations, although sometimes the process is extremely complex. Experimentally there are some difficulties, namely the excitation of the structure with a pure moment and the measurement of rotations, whose absence contributes for at least 75% of missing data in the response matrix of the structure.

The technological development in the last decades allowed the concession of a uniaxial sensor that is capable of measuring the rotation of a single axis, however, it is expensive and very heavy. The same technological development is still insufficient when it comes to the excitation of the structure with a pure moment, therefore it is required to explore other alternatives for the study of the dynamic behavior of a structure in a more accessible way.

This work explores the possibility of 3D printing T Sensors that allow the deduction of rotational responses from displacements measured, with the help of a pair of uniaxial piezoelectric accelerometers.

The 3D printing technology is very appealing for its facility in manufacturing, the using of light and sustainable materials, manipulation of physical characteristics of printed parts and low production cost.

Keywords: Dynamic behavior, Rotational measurements, 3D printing, T Sensors, Piezoelectric accelerometers

Índice de Conteúdos

Agradecimentos.....	I
Resumo.....	III
Abstract	V
Lista de Figuras	XI
Lista de Tabelas.....	XV
Abreviaturas	XVII
Simbologia e Notação	XIX
Introdução.....	1
1.1 Preâmbulo.....	2
1.2 Considerações sobre Sistemas e Modelos	2
1.2.1 Modelo Espacial	3
1.2.2 Modelo Modal	3
1.2.3 Modelo Resposta	4
1.3 Método dos Elementos Finitos	5
1.4 Análise Modal Experimental	7
1.4.1 Sistema de excitação.....	8
1.4.2 Sistema Sensorial.....	8
1.4.3 Sistema de Aquisição de Informação	8
Medição de Rotações.....	9
2.1 Importância da Medição de Rotações.....	9
2.2 Técnicas de Medição de Rotações.....	10
2.2.1 Técnicas Indiretas	11
2.2.1.1 T-Block.....	11
2.2.1.2 Técnica da Adição de Massa	14
2.2.1.3 Método das Diferenças Finitas	14
2.2.1.4. Vibrómetro Laser por Efeito de Doppler (VLD)	16
2.2.1.5. Sensores Piezoelétricos.....	17
2.2.1.6 Outros Sensores Baseados em Acelerómetros Piezoelétricos	17
2.2.2 Técnicas Diretas	17
2.2.2.1 Transdutores Angulares	17
2.2.2.2 Sensores MEMS	17

Fabricação Aditiva	19
3.1 Fabricação Aditiva.....	19
3.2 Parametrização vs Propriedades Mecânicas	20
3.3 PLA -N	21
3.4 Impressão.....	22
3.5 Parametrização.....	25
Aplicação Experimental	29
4.1 Recursos Utilizados	29
4.1.1 Estrutura.....	29
4.1.2 <i>Hardware e Software</i>	30
4.1.3 Acelerômetros.....	34
4.1.4 Martelo (A)	35
4.1.5 Martelo (B) e Amplificador de Sinal	36
4.2 Tratamento de Dados.....	38
4.3 Ensaio e Objetivos	39
4.3.1 Calibração de Acelerômetros.....	39
4.3.2 Verificação da Análise de Elementos Finitos	40
4.3.3 Ensaio 1	42
4.3.4 Ensaio 2	43
4.3.5 Ensaio 3	44
Resultados Experimentais	49
5.1 Ensaio 1	50
5.2 Ensaio 2	58
5.3 Ensaio 3	60
Conclusões e Trabalhos Futuros.....	65
6.1 Conclusões.....	65
6.2 Trabalhos Futuros	66
Referências Bibliográficas	67
Anexos.....	71
Anexo I	71
Anexo II.....	73
Anexo III	81
Anexo IV	89
Anexo V.....	93

Anexo VI	97
----------------	----

Lista de Figuras

FIGURA 1 - ILUSTRAÇÃO DOS 6 GRAUS DE LIBERDADE	2
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DE UMA MALHA Ω_e DE UM DOMÍNIO Ω , LIMITADO PELA FRONTEIRA Γ , SUJEITO A FORÇAS DE TRAÇÃO T E TENDO COMO RESPOSTA O DESLOCAMENTO U. [3]	6
FIGURA 3 - EXEMPLO DO ELEMENTO DE VIGA UTILIZADO	6
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DO BLOCO EM T ENCASTRADO NA ESTRUTURA DE TESTE [2].	11
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DOS 2 ENSAIOS NECESSÁRIOS [2]	12
FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ADIÇÃO DE MASSA [4]	14
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DA TÉCNICA DAS DIFERENÇAS FINITAS [8]	15
FIGURA 8 - ESQUEMA DE UM VIBRÔMETRO DE LASER POR EFEITO DE DOPPLER [25].....	16
FIGURA 9 - DESENHO 2D DO BLOCO EM T COM AS RESPECTIVAS COTAS	22
FIGURA 10 - SOFTWARE 'ULTIMAKERCURA v5.0.1'	22
FIGURA 11 - 'PRINTING DETAILS'	23
FIGURA 12 - 'PRINTING INFORMATION'.....	25
FIGURA 13- REPRESENTAÇÃO DO PADRÃO 'GRID'	26
FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO DAS ORIENTAÇÕES DE IMPRESSÃO.....	26
FIGURA 15 – SENSORES T.....	27
FIGURA 16 – VIGA.....	30
FIGURA 17 - SISTEMA P8012.....	31
FIGURA 18 - FRF (MAGNITUDE DO SINAL E FASE)	31
FIGURA 19 – PARÂMETROS DE CAPTAÇÃO DE SINAL	31
FIGURA 20 - JANELA DE PRÉ TESTES PARA DEFINIÇÃO DE JANELAS DE RESPOSTA E EXCITAÇÃO	32
FIGURA 21 - AMBIENTE DE TRABALHO DO MÓDULO MODAL ANALYSIS	33
FIGURA 22 - ACELERÔMETRO THETA SHEAR TYPE 4507	34
FIGURA 23 - VISTA EXPLODIDA DO ACELERÔMETRO.	35
FIGURA 24 - MARTELO (A)	36
FIGURA 25 - PONTEIRA DE PLÁSTICO DE DUREZA MÉDIA.....	36
FIGURA 26 - MARTELO (B).....	37
FIGURA 27 - AMPLIFICADOR DE SINAL	37
FIGURA 28 - TÉCNICA DE CALIBRAÇÃO	39
FIGURA 29 – PRIMEIRO GRÁFICO DA MASSA APARENTE OBTIDA PELO PAR MARTELO (A)/ACELERÔMETROS	40
FIGURA 30 - MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA A VERIFICAÇÃO DO MEF	41
FIGURA 31 - REPRESENTAÇÃO DA FRF EXPERIMENTAL (AZUL) E DOS ELEMENTOS FINITOS (VERMELHO). 42	
FIGURA 32 - MONTAGEM EXPERIMENTAL DO ENSAIO 1	43
FIGURA 33 - MONTAGEM EXPERIMENTAL DO ENSAIO 2	44
FIGURA 34 - MONTAGEM EXPERIMENTAL DO ENSAIO 3	44
FIGURA 35 - MONTAGEM DO SENSOR T NA VIGA	46
FIGURA 36 - ESQUEMATIZAÇÃO DA DIVISÃO DO BLOCO	46
FIGURA 37 - ACELERÔMETROS E CENTRO DE MASSA.....	47
FIGURA 38 – ESQUEMATIZAÇÃO DA DIVISÃO DO PARAFUSO	47
FIGURA 39 - VISUALIZAÇÃO DA DISTÂNCIA DO CENTRO DE MASSA DA PORCA AO EIXO NEUTRO DA VIGA . 48	
FIGURA 40 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - I	50
FIGURA 41 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - I	50
FIGURA 42 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - I	51
FIGURA 43 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - I	51
FIGURA 44 - GRÁFICO RELATIVO AO EFEITO DA VARIAÇÃO DE % DE INFILL NA 1ª FREQ. NATURAL DE CADA SENSOR T DO GRUPO G1 [ESP. PAREDE EXT. 1,5MM; UPRIGHT]	52
FIGURA 45 - GRÁFICO RELATIVO AO EFEITO DA VARIAÇÃO DE % DE INFILL NA 1ª FREQ. NATURAL DE CADA SENSOR T DO GRUPO G2 [ESP. PAREDE EXT. 1,5MM; FLAT]	53

FIGURA 46 - GRÁFICO RELATIVO AO EFEITO DA VARIAÇÃO DE % DE INFILL NA 1ª FREQ. NATURAL DE CADA SENSOR T DO GRUPO G3 [ESP. PAREDE EXT. 3,0MM; UPRIGHT]	53
FIGURA 47 - GRÁFICO RELATIVO AO EFEITO DA VARIAÇÃO DE % DE INFILL NA 1ª FREQ. NATURAL DE CADA SENSOR T DO GRUPO G3 [ESP. PAREDE EXT. 3,0MM; FLAT]	53
FIGURA 48 - GRÁFICO RELATIVO AO EFEITO DA VARIAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO NAS 1ª FREQUÊNCIAS NATURAIS DOS SENSORES T DOS GRUPOS G1 [ESP. PAREDE EXT. 1,5MM; UPRIGHT] E G2 [ESP. PAREDE EXT. 1,5MM; FLAT]	55
FIGURA 49 - GRÁFICO RELATIVO AO EFEITO DA VARIAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO NAS 1ª FREQUÊNCIAS NATURAIS DOS SENSORES T DOS GRUPOS G3 [ESP. PAREDE EXT. 3,0MM; UPRIGHT] E G4 [ESP. PAREDE EXT. 3,0MM; FLAT]	55
FIGURA 50 - GRÁFICO RELATIVO AO EFEITO DA VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA EXTERIOR NAS 1ª FREQUÊNCIAS NATURAIS DOS SENSORES T DOS GRUPOS G1 [ESP. PAREDE EXT. 1,5MM; UPRIGHT] E G3 [ESP. PAREDE EXT. 3,0MM; UPRIGHT]	56
FIGURA 51 - GRÁFICO RELATIVO AO EFEITO DA VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA EXTERIOR NAS 1ª FREQUÊNCIAS NATURAIS DOS SENSORES T DOS GRUPOS G2 [ESP. PAREDE EXT. 1,5MM; FLAT] E G4 [ESP. PAREDE EXT. 3.0 mm; FLAT]	56
FIGURA 52 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - I E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	58
FIGURA 53 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SI E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T - I	61
FIGURA 54 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SI E FRF-R DO FEM CONSIDERANDO A MASSA DO SENSOR T - I	61
FIGURA 55 - SEGUNDO GRÁFICO DA MASSA APARENTE OBTIDA PELO PAR MARTELO (A)/ACELERÓMETROS	71
FIGURA 56 - PRIMEIRO GRÁFICO DA MASSA APARENTE OBTIDA PELO PAR MARTELO (B)/ACELERÓMETROS	71
FIGURA 57 - SEGUNDO GRÁFICO DA MASSA APARENTE OBTIDA PELO PAR MARTELO (B)/ACELERÓMETROS	71
FIGURA 58 - TERCEIRO GRÁFICO DA MASSA APARENTE OBTIDA PELO PAR MARTELO (B)/ACELERÓMETROS	72
FIGURA 59 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - II	73
FIGURA 60 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - II	73
FIGURA 61 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - III	73
FIGURA 62 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - III	74
FIGURA 63 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - IV	74
FIGURA 64 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - IV	74
FIGURA 65 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - V	75
FIGURA 66 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - V	75
FIGURA 67 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - VI	75
FIGURA 68 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - VI	76
FIGURA 69 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - VII	76
FIGURA 70 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - VII	76
FIGURA 71 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - VIII	77
FIGURA 72 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - VIII	77
FIGURA 73 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - IX	77
FIGURA 74 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - IX	78
FIGURA 75 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - X	78
FIGURA 76 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - X	78
FIGURA 77 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - XI	79
FIGURA 78 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - XI	79
FIGURA 79 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY1 DO SENSOR T - XII	79
FIGURA 80 - GRÁFICO DE FRF-T CAPTADAS PARA A FORÇA FY2 DO SENSOR T - XII	80
FIGURA 81 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - II	81
FIGURA 82 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - II	81
FIGURA 83 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - III	81
FIGURA 84 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - III	82

FIGURA 85 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - IV	82
FIGURA 86 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - IV	82
FIGURA 87 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - V	83
FIGURA 88 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - V	83
FIGURA 89 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - VI	83
FIGURA 90 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - VI	84
FIGURA 91 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - VII	84
FIGURA 92 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - VII	84
FIGURA 93 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - VIII	85
FIGURA 94 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - VIII	85
FIGURA 95 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - IX	85
FIGURA 96 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - IX	86
FIGURA 97 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - X	86
FIGURA 98 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - X	86
FIGURA 99 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - XI	87
FIGURA 100 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - XI	87
FIGURA 101 - GRÁFICO DE FRF-T DIRETAS – SENSOR T - XII	87
FIGURA 102 - GRÁFICO DE FRF-T INDIRETAS – SENSOR T - XII	88
FIGURA 103 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - II E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	89
FIGURA 104 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - III E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	89
FIGURA 105 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - IV E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	89
FIGURA 106 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - V E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	90
FIGURA 107 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - VI E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	90
FIGURA 108 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - VII E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	90
FIGURA 109 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - VIII E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	91
FIGURA 110 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - IX E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	91
FIGURA 111 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - X E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	91
FIGURA 112 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - XI E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	92
FIGURA 113 - GRÁFICO DA FRF-T DO SENSOR T - XII E DA FRF-T DE REFERÊNCIA	92
FIGURA 114 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-II E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T	93
FIGURA 115 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-III E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T	93
FIGURA 116 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-IV E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T	93
FIGURA 117 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-V E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T	94
FIGURA 118 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-VI E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T	94
FIGURA 119 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-VII E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T	94
FIGURA 120 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-VIII E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T	95
FIGURA 121 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-IX E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T	95
FIGURA 122 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-X E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T	95
FIGURA 123 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-XI E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T	96
FIGURA 124 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-XII E FRF-R DO FEM SEM CONSIDERAR A MASSA DO SENSOR T	96
FIGURA 125 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-II E FRF-R DO FEM QUE CONSIDERA A MASSA DO SENSOR T	97

FIGURA 126 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-III E FRF-R DO FEM QUE CONSIDERA A MASSA DO SENSOR T	97
FIGURA 127 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-IV E FRF-R DO FEM QUE CONSIDERA A MASSA DO SENSOR T	97
FIGURA 128 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-V E FRF-R DO FEM QUE CONSIDERA A MASSA DO SENSOR T	98
FIGURA 129 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-VI E FRF-R DO FEM QUE CONSIDERA A MASSA DO SENSOR T	98
FIGURA 130 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-VII E FRF-R DO FEM QUE CONSIDERA A MASSA DO SENSOR T	98
FIGURA 131 - - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-VIII E FRF-R DO FEM QUE CONSIDERA A MASSA DO SENSOR T	99
FIGURA 132 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-IX E FRF-R DO FEM QUE CONSIDERA A MASSA DO SENSOR T	99
FIGURA 133 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T-X E FRF-R DO FEM QUE CONSIDERA A MASSA DO SENSOR T	99
FIGURA 134 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T - XI E FRF-R DO FEM QUE CONSIDERA A MASSA DO SENSOR T	100
FIGURA 135 - GRÁFICO DA FRF-R DEDUZIDA DE SENSOR T - XII E FRF-R DO FEM QUE CONSIDERA A MASSA DO SENSOR T	100

Lista de Tabelas

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DE FRF SEGUNDO SKINGLE [9].....	5
TABELA 2 - DESCRIÇÃO DE FUNÇÕES REPRESENTADAS NA IMAGEM 9	23
TABELA 3 - DESCRIÇÃO DAS FUNÇÕES ILUSTRADAS NA FIGURA 10	24
TABELA 4 - PARÂMETROS FIXOS DE IMPRESSÃO.....	25
TABELA 5 - PARÂMETROS VARIÁVEIS DE IMPRESSÃO.....	26
TABELA 6 – ESPÉCIMENS	27
TABELA 7 - NÓS DOS FUROS PASSANTES E CORRESPONDENTES LOCALIZAÇÕES	30
TABELA 8 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA VIGA	30
TABELA 9 – DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS APRESENTADOS NA FIGURA 15.....	32
TABELA 10 - DESCRIÇÃO DOS PRÉ TESTES.....	33
TABELA 11 – DESCRIÇÃO DAS FUNÇÕES APRESENTADAS NA FIGURA 16.	34
TABELA 12 - ESPECIFICAÇÕES DO ACELERÓMETRO.....	34
TABELA 13 - LEGENDA DA FIGURA 21	35
TABELA 14 - ESPECIFICAÇÕES DO MARTELO (A).....	36
TABELA 15- ESPECIFICAÇÕES DO MARTELO (B).....	37
TABELA 16 - DESCRIÇÃO DAS FUNÇÕES DO AMPLIFICADOR DE SINAL	38
TABELA 17 - SENSIBILIDADE DOS ACELERÓMETROS APÓS CALIBRAÇÃO	40
TABELA 18 - FREQUÊNCIAS NATURAIS EXPERIMENTAIS E PROVENIENTES DO MODELO DE EF	42
TABELA 19 - ESQUEMATIZAÇÃO DA ANÁLISE DOS SINAIS DOS DIFERENTES ACELERÓMETROS	43
TABELA 20 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO ENSAIO 1.....	51
TABELA 21 – COMPARAÇÃO DE GRUPOS PARA ANÁLISE DE PARÂMETROS	52
TABELA 22 - CSF PARA MEDIÇÕES DIRETAS E INDIRETAS PARA CADA UM DOS SENSORES T.....	57
TABELA 23 - FREQUÊNCIAS NATURAIS OBTIDAS DE CADA SENSOR T PARA O ENSAIO 1 E 2.....	59
TABELA 24 – VALOR DO FATOR DE CORRELAÇÃO CSF PARA CADA UM DOS SENSORES T PARA AMBAS AS GAMAS DE FREQUÊNCIA.....	60
TABELA 25 - FREQUÊNCIAS NATURAIS DOS SENSORES T PARA CADA ENSAIO.	62
TABELA 26 - CSF PARA O ENSAIO 3	63

Abreviaturas

3D	→	Tridimensional
ABS	→	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ADC	→	Analog Digital Converter
EMA	→	Análise Modal Experimental
CAD	→	Computer Aided Design
CSF	→	Cross Signature Scale Factor
EF	→	Elementos Finitos
FA	→	Fabricação Aditiva
FDM	→	Fused Deposition Modeling
FRF	→	Função de Resposta em Frequência
FRF-T	→	Função de Resposta em Frequência de Translação
FRF-R	→	Função de Resposta em Frequência de Rotação
GDL	→	Grau de Liberdade
IEPE	→	Integrated Electronic Piezo-Electric
FEM	→	Método dos Elementos Finitos
PLA,PLAN	→	Polyactic Acid
VLD	→	Vibrômetro Laser Doppler

Simbologia e Notação

x, y, z	→	Graus de Liberdade translacionais
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	→	Graus de Liberdade rotacionais
$[M]$	→	Matriz de massa
$[K]$	→	Matriz de rigidez
$[C]$	→	Matriz de amortecimento
$\{x\}$	→	Vetor deslocamento no domínio do tempo
$\{\dot{x}\}$	→	Vetor velocidade no domínio do tempo
$\{\ddot{x}\}$	→	Vetor aceleração no domínio do tempo
$\{f\}$	→	Vetor força no domínio do tempo
ω	→	Frequência
ω_n	→	Frequência natural
$[\Psi]$	→	Matriz modal
$\{\Psi\}_n$	→	Vetor modal de índice n
$[\alpha]$	→	Matriz de aceleração
$[H]$	→	Matriz de receptância
E	→	Módulo de <i>Young</i>
I	→	2º Momento de área ou Momento de Inércia
L	→	Comprimento
ρ	→	Massa volúmica
X	→	Deslocamento no domínio da frequência
$\ddot{X}$	→	Aceleração linear no domínio da frequência
$\ddot{X}_i$	→	Aceleração linear no domínio da frequência do ponto i
Θ	→	Rotação no domínio da frequência
$\ddot{\Theta}$	→	Aceleração angular no domínio da frequência
F	→	Força no domínio da frequência
F_j	→	Força no domínio da Frequência aplicada no ponto j
M	→	Momento no domínio da frequência
UP	→	Orientação de impressão <i>Upright</i>
F	→	Orientação de impressão <i>Flat</i>
a	→	Componente real do sinal
b	→	Componente imaginária do sinal
CSF	→	Critério de correlação Cross Signature Scale Factor
$\{ \ }^H$	→	Complexo conjugado transposto
q	→	Localização da resposta
γ, β	→	Constantes de amortecimento de Rayleigh
$a1$	→	Acelerómetro na posição 1
$a2$	→	Acelerómetro na posição 2
$G1$	→	Grupo de Sensores T nº 1
$G2$	→	Grupo de Sensores T nº 2
$G3$	→	Grupo de Sensores T nº3
$G4$	→	Grupo de Sensores T nº4

1

Introdução

Neste capítulo será feita uma breve introdução ao tema desta dissertação, fazendo um enquadramento teórico sobre algumas noções básicas para a sua compreensão. Serão também apresentados os métodos a utilizar para a sua realização, o Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite Element Method*) e a Análise Modal Experimental (EMA).

1.1 Preâmbulo

O estudo dinâmico de estruturas tem grande importância para a engenharia em áreas bastante diversas como: aerodinâmica, deteção de dano, segurança, estudo de tempo de vida à fadiga, resposta sísmica de edifícios, modificação estrutural, acoplamento, entre outros. Este estudo visa primariamente a previsão da resposta dinâmica de uma estrutura face a determinados esforços, evitando expor a mesma a situações que a levem ao fenómeno de ressonância. Isto é a absorção de energia pela estrutura criando amplitudes de deslocamento e de ângulos de rotação crescentes que eventualmente poderão levar a estrutura ao colapso. Desta forma podemos prever o comportamento da estrutura, evitando falhas catastróficas e reduzindo custos de manutenção. Do ponto de vista do utilizador, o controlo da vibração permite uma utilização mais cómoda da estrutura em questão, reduzindo por exemplo trepidações e ruído.

Ao longo dos anos desenvolveram-se métodos teóricos e experimentais para a análise dinâmica de estruturas. O método teórico utilizado é o FEM e o experimental é a EMA. O FEM permite através do conhecimento das propriedades mássicas, de rigidez e de amortecimento de uma estrutura obter a sua resposta

dinâmica. O seu aparecimento levou a um grande desenvolvimento na área de mecânica estrutural pela possibilidade de estudar estruturas complexas. Porém, com os avanços na engenharia têm surgido estruturas cada vez mais complexas que necessitam da utilização conjunta de FEM e outros métodos experimentais que comprovem os resultados dos primeiros. A EMA, como o próprio nome indica, constitui-se como uma via experimental de obtenção de um modelo resposta dinâmica de uma estrutura, conseguindo-o através da relação entre a excitação e resposta num ou vários pontos da estrutura. Este método surgiu com a necessidade de comprovar com resultados experimentais os resultados obtidos pela via teórica.

1.2 Considerações sobre Sistemas e Modelos

Num sistema, ou modelo, mecânico podem ser tidos em cada ponto até 6 Graus de Liberdade (GDL). Isto é, segundo Cook *et al* 2002 [1] considera-se que um dado ponto num sistema mecânico poderá ter 6 respostas independentes que traduzem a variação espacial de um determinado campo associadas a 3 direções diferentes. Estas respostas são de translação e de rotação em cada direção como se pode observar na Figura 1. É possível também excitar um dado ponto da estrutura através da aplicação de uma força ou de um momento em qualquer uma das 3 direções sempre que acessibilidade ao ponto o permita.

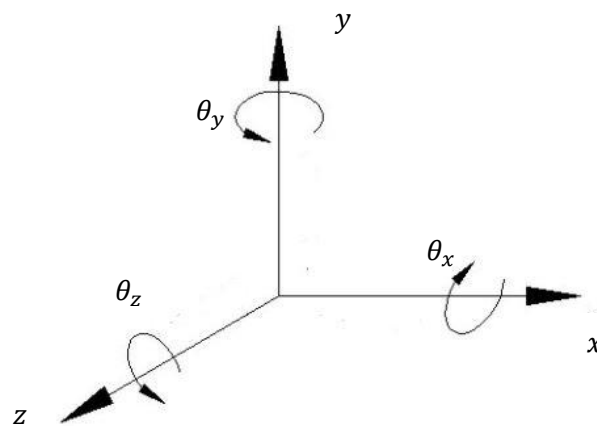


Figura 1 - Ilustração dos 6 Graus de Liberdade

Segundo Maia *et al* 1997 [2], pode se estudar e analisar o comportamento dinâmico de uma estrutura através dos seguintes modelos:

- Modelo Espacial
- Modelo Modal

- Modelo de Resposta

Modelos estes que são explicitados em seguida.

1.2.1 Modelo Espacial

O modelo espacial, segundo Maia *et al* [2], caracteriza um sistema atribuindo a cada uma das ‘N’ coordenadas, valores de propriedades espacialmente distribuídas de massa ([M]), rigidez ([K]) e amortecimento ([C]), sendo cada coordenada um GDL de um nó. Estas propriedades espaciais são definidas como:

[M] – Matriz de massa (N×N) que permite a obtenção das forças de inércia associadas a cada coordenada ‘N’ quando estas experienciam aceleração.

[K] – Matriz de rigidez (N×N) que permite a obtenção das forças de restituição inerentes a cada deslocamento relativo em cada coordenada ‘N’.

[C] – Matriz de amortecimento (N×N) que permite a obtenção de forças dissipativas em cada coordenada ‘N’. Esta matriz só é levada em consideração se o efeito das forças dissipativas não for desprezável.

Estas propriedades permitem escrever a equação de equilíbrio dinâmico da estrutura:

$$[M]_{n \times n} \cdot \{\ddot{x}(t)\}_{n \times 1} + [C]_{n \times n} \cdot \{\dot{x}(t)\}_{n \times 1} + [K]_{n \times n} \cdot \{x(t)\}_{n \times 1} = \{f(t)\}_{n \times 1} \quad (1.1)$$

Sendo $[M]_{n \times n}$, $[C]_{n \times n}$ e $[K]_{n \times n}$ as matrizes de massa, amortecimento e rigidez respetivamente. $\{\ddot{x}\}_{n \times 1}$, $\{\dot{x}\}_{n \times 1}$, $\{x\}_{n \times 1}$ e $\{f\}_{n \times 1}$ são vetores de aceleração, velocidade, deslocamento e das forças externas, respetivamente.

1.2.2 Modelo Modal

O modelo modal, segundo Maia *et al* [2], permite a definição das propriedades dinâmicas de uma estrutura em termos de frequências naturais e modos de vibração.

As frequências naturais (ω_n) resultam da equação (desprezando o amortecimento):

$$[K]_{n \times n} - \omega_n^2 \cdot [M]_{n \times n} = 0 \quad (1.2)$$

Podendo ser representadas da seguinte forma:

$$\omega_{n \times n}^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Os modos de vibração são representados através de vetores $\{\Psi_k\}$ em que cada elemento representa um deslocamento relativo de um dado grau de liberdade n com outro utilizado como referência. Os vetores são utilizados para formar uma matriz $[\Psi_{n \times n}]$ quadrada de n coordenadas por n modos da seguinte forma:

$$[\Psi]_{n \times n} = [\{\Psi_1\}_n \{\Psi_2\}_n \dots \{\Psi_n\}_n] \quad (1.4)$$

Os resultados obtidos por este modelo podem ser utilizados de forma a representar, animadamente ou não, a deformação da estrutura a uma dada frequência natural.

1.2.3 Modelo Resposta

O Modelo de Resposta é descrito por uma matriz de Funções de Resposta em Frequência (FRF), cujos elementos podem ser obtidos através de medições experimentais, cálculo ou ambos. Segundo Skingle [9], a FRF é uma função no domínio da frequência que relaciona ambas as magnitudes e fases de uma resposta harmónica e a excitação que a causa. As diferentes FRF podem ser agrupadas em dois grupos, que se distinguem pela relação que representam:

- (a) resposta/excitação
- (b) excitação/resposta

Estes dois grupos podem ainda ser divididos em função do parâmetro medido, sendo este deslocamento, velocidade ou aceleração, estes grupos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de FRF segundo Skingle [9]

Tipo de Resposta	(a) Resposta/Força	(b) Força/Resposta
Deslocamento	$\frac{x}{f}$	$\frac{f}{x}$
Velocidade	$\frac{\dot{x}}{f}$	$\frac{f}{\dot{x}}$
Aceleração	$\frac{\ddot{x}}{f}$	$\frac{f}{\ddot{x}}$

Para efeitos desta dissertação, será considerada a FRF de aceleração do grupo (a), a acelerância, $[\alpha(\omega)]$, uma vez que a recolha da informação das respostas da estrutura foi feita recorrendo à utilização de acelerómetros, e a FRF de deslocamento do grupo (a), a receptância, $[H(\omega)]$, uma vez que a acelerância é posteriormente traduzida em termos de receptância.

É possível ainda fazer a correlação deste modelo com o Modelo Espacial e Modal, relacionando a receptância da seguinte maneira (considerando um sistema com amortecimento desprezável):

$$\text{Para o Modelo Espacial, } [H(\omega)]_{n \times n} = [[K] - \omega^2[M]]_{n \times n}^{-1} \quad (1.5)$$

$$\text{Para o Modelo Modal, } [H(\omega)]_{n \times n} = [\varphi]_{n \times m}[(\omega_r^2 - \omega^2)]_{m \times m}^{-1}[\varphi]_{m \times n}^T \quad (1.6)$$

1.3 Método dos Elementos Finitos

Segundo Coelho *et al* [3] os modelos matemáticos são descrições teóricas de fenómenos e processos físicos baseados em princípios fundamentais da física como o princípio da conservação de massa, conservação de momento linear e de conservação de energia. Estes modelos muitas vezes são caracterizados através de equações integrais e/ou diferenciais, cuja resolução pode ser bastante complexa. Face à complexidade destas equações existiu a necessidade de desenvolver novos métodos analíticos de forma a simplificá-las e tornar as suas resoluções possíveis, desta forma surge o FEM.

O FEM constitui-se como um método numérico capaz de resolver problemas cujo domínio envolve processos físicos, geometria e/ou condições de fronteira complexos através da discretização de um domínio em vários subdomínios, tal deve-se à facilidade em resolver uma função complicada como um conjunto de equações mais simples. Assim o FEM discretiza uma

estrutura num número finito de elementos ligados através de nós onde se consideram os GDL, a este conjunto de subdomínios chama-se malha, como podemos observar na Figura 2.

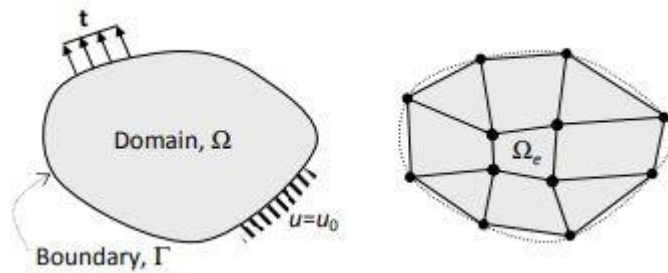


Figura 2 - Representação de uma malha Ω_e e de um domínio Ω , limitado pela fronteira Γ , sujeito a forças de tração t e tendo como resposta o deslocamento u . [3]

Para efeitos desta dissertação aplicaremos o FEM para realizar uma análise dinâmica da estrutura a estudar. No entanto, esta é apenas uma das aplicações deste método, pois este permite também estudar fenómenos como a transferência de calor, distribuição de tensões, deslocamentos e/ou rotações.

A análise dinâmica da estrutura a estudar será feita através do elemento de viga de Euler-Bernoulli, com 2GDL por nó, translação em 'y' e rotação em torno de 'z', cuja representação é feita na Figura 3. A utilização deste elemento pressupõe a conservação da perpendicularidade entre a secção transversal da viga e a sua linha neutra durante a sua deformação.

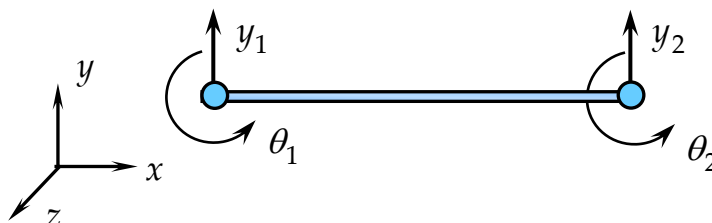


Figura 3 - Exemplo do elemento de viga utilizado

As matrizes elementares de rigidez e massa para elemento de viga considerados segundo Coelho *et al* [3] são dadas respetivamente por:

$$K = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 4 & -\frac{6}{L} & 2 \\ -\frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} & \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 2 & -\frac{6}{L} & 4 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

e,

$$M = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

onde,

$E \rightarrow$ Módulo de *Young*,

$I \rightarrow$ 2º Momento de área da secção transversal do elemento no plano yz,

$L \rightarrow$ Comprimento do elemento,

$\rho \rightarrow$ Massa volúmica,

$A \rightarrow$ Área da secção transversal do elemento no plano yz.

1.4 Análise Modal Experimental

A prática da EMA, segundo Maia *et al* 1997 [2] é complexa e não existe uma forma ótima para a realizar. O suporte, equipamento de excitação e transdutores irão influenciar o comportamento dinâmico da estrutura de teste. O sucesso desta análise reside no conhecimento desta influência, percebendo-a e realizando-a de forma a minimizar os seus efeitos na resposta dinâmica da estrutura. Cada estrutura possui os seus próprios problemas quanto à sua análise modal e existem várias formas de abordar estes problemas. Todas as análises modais envolvem um certo grau de compromisso e o engenheiro de teste é encorajado a considerar todos os aspetos do planeamento do teste, equipamento de teste, recolha de informação e tratamento de dados antes do teste. O trabalho de preparação minucioso é um pré-requisito essencial para uma análise modal bem-sucedida.

O intervalo de frequência do modelo obtido através da via experimental vai ser ditado pelas capacidades dos transdutores e equipamento de processamento para recolha de informação. A precisão e validade do modelo podem ser influenciados pela montagem experimental. A excitação

da estrutura tem de ser feita de forma a poder gerar a resposta desejada, pois quase todos os métodos de aplicação de forças envolvem alguns efeitos indesejados na estrutura.

Frequentemente não é possível prever tais problemas por não existir nenhum modelo analítico para a estrutura, ou pela mesma não ser possível de representar. Desta forma é aconselhado um estudo antecessor à EMA para conhecer o intervalo de frequência a estudar, resolução de frequência necessária e coordenadas onde se pode proceder à modificação estrutural.

Para realizar a análise modal existem três sistemas principais de medição:

- Sistema de Excitação
- Sistema Sensorial
- Sistema de Aquisição de Informação.

Estes sistemas são descritos em seguida.

1.4.1 Sistema de excitação

O sistema de excitação confere um *input* de movimento na estrutura, geralmente sobre a forma de uma força motriz $f(t)$ numa determinada coordenada. Existem algumas variantes para este sistema que dependem do *input* desejado, acessibilidade e propriedades físicas da estrutura de teste. Normalmente é usado um dispositivo de excitação (exemplo: “*Shaker*”), mas este pode ser substituído por um martelo com um transdutor de força na sua cabeça. Este permite excitar a estrutura sem adicionar massa e modificar localmente a rigidez da estrutura no ponto de excitação.

1.4.2 Sistema Sensorial

O sistema é constituído por sensores que são conhecidos como transdutores. Estes geram sinais elétricos que são proporcionais ao parâmetro físico que o mesmo quer medir.

1.4.3 Sistema de Aquisição de Informação

O objetivo do sistema de aquisição de informação é medir os sinais desenvolvidos pelos sensores e determinar a magnitude e a fase das forças excitadoras e de resposta da estrutura. Basicamente este sistema transforma o domínio analógico do sinal obtido pelos transdutores em informação digital sobre o domínio da frequência da estrutura.

2

Medição de Rotações

Neste capítulo será apresentada a importância da medição de rotações na prática da EMA e também as técnicas que permitem a medição das mesmas [4].

2.1 Importância da Medição de Rotações

Para realizar o estudo sobre o comportamento dinâmico de uma estrutura é geralmente usado o Modelo de Resposta. Este modelo relaciona a excitação e a resposta da estrutura, podendo assim obter uma matriz de receptância completa, representada em seguida.

$$[H] = \begin{bmatrix} \frac{X}{F} & \frac{X}{M} \\ \frac{\Theta}{F} & \frac{\Theta}{M} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Onde,

$X \rightarrow$ Resposta em Translação $\{x, y, z\}$

$\Theta \rightarrow$ Resposta em Aceleração Angular $\{\theta_x, \theta_y, \theta_z\}$

$F \rightarrow$ Excitação em Força $\{F_x, F_y, F_z\}$

$M \rightarrow$ Excitação em Momento $\{M_x, M_y, M_z\}$

Observando a matriz podemos facilmente concluir que a ausência da medição de rotações conduz à falta de pelo menos 50% da informação necessária para completar a matriz. Da mesma forma podemos concluir que a ausência conjunta da excitação em momento e da medição de rotações leva à falta de pelo menos 75% da informação da matriz. O efeito desta ausência é um caso de estudo desde os anos 60, tendo sido estudada por Smith 1969 [5] e anos mais tarde por Ewins e Sainsbury 1972 [6]. A importância da inclusão de G.D.L. de Rotação na temática do Acoplamento estrutural foi estudada por vários investigadores [7]-[12], que concluíram unanimemente que a ausência da medição dos GDL associados à rotação leva a erros na previsão do comportamento dinâmico de uma estrutura. Sendo que Urgueira [8] e Ewins e Duarte [10] afirmam que uma má previsão dos termos residuais envolvidos no processo de acoplamento, à semelhança da ausência de GDL de rotação, é uma fonte de erro. Também no campo da modificação estrutural vários investigadores explicam a importância da inclusão de GDL de rotação para a obtenção de modelos de resposta é o caso de Mottershead *et al* [13], O'Callahan *et al* [14], Cafeo *et al* [15] e Skingle [9].

Alguns investigadores, como Cafeo *et al* [16], chegaram também à conclusão que o uso conjunto de respostas medidas em translação e rotação reduz o número de medições necessárias para representar os modos de vibração com uma precisão similar à obtida através de apenas respostas translacionais medidas.

2.2 Técnicas de Medição de Rotações

A medição de rotações pode ser realizada através de técnicas que se podem agrupar em:

- (a) Técnicas Indiretas
- (b) Técnicas Diretas

As técnicas do grupo (a) são técnicas que através de relações aritméticas transformam respostas em translação em respostas de rotação, contrariamente às técnicas do grupo (b) que medem diretamente rotações.

Nas seguintes secções será feita uma breve descrição de algumas destas técnicas, aprofundando apenas a técnica a utilizar nesta dissertação.

2.2.1 Técnicas Indiretas

2.2.1.1 T-Block

Esta técnica de medição, apresentada por Ewins e Sainsbury [6], utiliza dois transdutores colocados a curta distância num bloco T ou corpo auxiliar agarrado á estrutura, como se pode ver na Figura 4. Ela permite a medição indireta de rotações assim como pode permitir a excitação da estrutura em teste com um momento, puro ou associado a uma força. Deve ser notado que nesta técnica o bloco em T tem de se comportar como um corpo rígido para a gama de frequência do Ensaio.

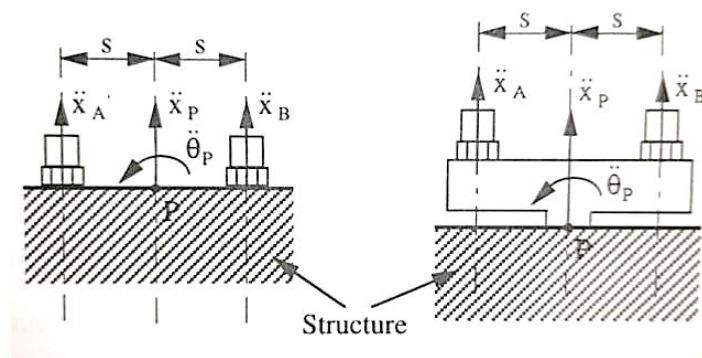


Figura 4 - Representação do Bloco em T encastrado na estrutura de teste [2].

Segundo Maia *et al* [2], os sinais de aceleração captados pelos transdutores podem ser convertidos num sinal de aceleração linear (translação) e outro em aceleração angular (rotação) no ponto ‘P’ situado entre eles. Esta conversão é feita através das seguintes relações cinemáticas.

$$\ddot{x}_P = \frac{\ddot{x}_A + \ddot{x}_B}{2} \quad (2.2)$$

$$\ddot{\theta}_P = \frac{\ddot{x}_B - \ddot{x}_A}{2S} \quad (2.3)$$

Para obter a relação pretendida entre a força f_x e momento m_θ com a resposta translacional $\ddot{x}_P$ e a rotação $\ddot{\theta}_P$ é necessário realizar dois pares de excitação-medição. Para um primeiro Ensaio excita-se o conjunto bloco-estrutura no braço direito do bloco em T com uma força f_1 e num segundo Ensaio com uma força f_2 no braço contrário, como ilustrado na Figura 5.

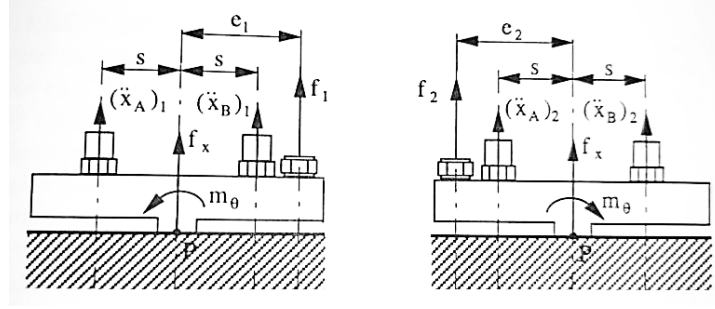


Figura 5 - Representação dos 2 Ensaio necessários [2]

Desta forma obtêm-se as seguintes relações para o primeiro Ensaio:

$$f_x = f_1 - m(\ddot{x}_p)_1 \quad (2.4)$$

$$m_\theta = e_1 f_1 - I_P(\ddot{\theta}_p)_1 \quad (2.5)$$

Onde m é a massa do bloco T e I_P é o momento de inércia relativo ao ponto P do bloco em T. Os valores da aceleração $(\ddot{x}_p)_1$ e $(\ddot{\theta}_p)_1$ são obtidos através da equação 2.2 e 2.3. Assim a equação da receptância relacionada com estes valores é:

$$\begin{Bmatrix} (x_p)_1 \\ (\theta_p)_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{x\theta} \\ \alpha_{\theta x} & \alpha_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_x \\ m_\theta \end{Bmatrix} = [\alpha(\omega)] \begin{Bmatrix} f_1 + \omega^2 m(x_p)_1 \\ e_1 f_1 + \omega^2 I_P(\theta_p)_1 \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

E assim dividindo por f_1 , e por semelhança, dividindo por f_2 para o segundo Ensaio, obtêm-se respetivamente:

$$\begin{Bmatrix} \frac{(x_p)_1}{f_1} \\ \frac{(\theta_p)_1}{f_1} \end{Bmatrix} = [\alpha(\omega)] \begin{Bmatrix} 1 + \omega^2 m \frac{(x_p)_1}{f_1} \\ e_1 + \omega^2 I_P \frac{(\theta_p)_1}{f_1} \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{(x_p)_2}{f_2} \\ \frac{(\theta_p)_2}{f_2} \end{Bmatrix} = [\alpha(\omega)] \begin{Bmatrix} 1 + \omega^2 m \frac{(x_p)_2}{f_2} \\ -e_2 + \omega^2 I_P \frac{(\theta_p)_2}{f_2} \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

Combinando as duas últimas equações 2.7 e 2.8, e tendo em conta as relações 2.2 e 2.3 tanto para $(x_p)_1$ e $(\theta_p)_1$ e as equivalentes para $(x_p)_2$ e $(\theta_p)_2$, a matriz receptância pode ser escrita da seguinte forma:

$$[\alpha(\omega)] = -\frac{1}{\omega^2} [T][G][[\Pi] - [M][T][G]]^{-1} \quad (2.9)$$

Onde:

$$[T] = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ (2s)^{-1} & -(2s)^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$[\Pi] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ e_1 & -e_2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} \left(\frac{\ddot{x}_A}{f}\right)_1 & \left(\frac{\ddot{x}_A}{f}\right)_2 \\ \left(\frac{\ddot{x}_B}{f}\right)_1 & \left(\frac{\ddot{x}_B}{f}\right)_2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

e

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_P \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Sendo assim possível calcular os elementos relevantes da matriz $[\alpha(\omega)]$ através do conhecimento das propriedades mássicas e da geometria do bloco T, conjuntamente com elementos da matriz $[G]$ determinados através do equipamento de medição.

Quando a massa do bloco é desprezável em relação à massa da estrutura em teste, a sua massa e inércia associada podem ser negligenciadas e a equação 2.9 escrita da seguinte forma:

$$[\alpha(\omega)] = -\frac{1}{\omega^2} [T][G][\Pi]^{-1} \quad (2.14)$$

Sendo,

$$[\Pi]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{e_2}{e_1 + e_2} & \frac{1}{e_1 + e_2} \\ \frac{e_1}{e_1 + e_2} & \frac{-1}{e_1 + e_2} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2.2.1.2 Técnica da Adição de Massa

A técnica da adição de massa foi desenvolvida em 1984 por Yasuda *et al* [17]. Esta técnica consiste na ligação de um bloco a uma estrutura, num determinado ponto, para medir, através de 6 ou mais sensores translacionais, a resposta em translação e rotação no ponto de ligação. A excitação da estrutura realiza-se noutra coordenada aplicando uma força de modo a criar um momento. Esta técnica é ilustrada na Figura 6.

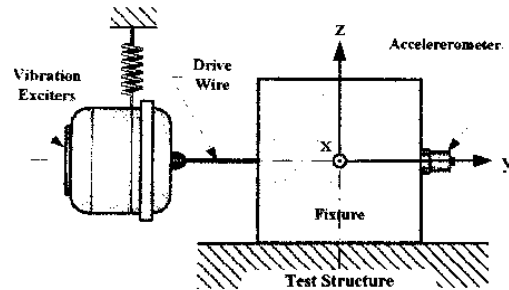


Figura 6 - Representação da Técnica da Adição de Massa [4]

À semelhança da técnica anteriormente descrita, esta adiciona massa e é necessário subtraí-la analiticamente, no entanto diferencia-se da anterior por medir a resposta e excitar a estrutura em coordenadas diferentes.

Este método foi posteriormente aplicado por Yasuda *et al* [17] numa estrutura simples e outra complexa, uma viga e um chassis de automóvel respetivamente, e verificou que o processo é menos preciso quando se pretende estudar uma estrutura mais complexa.

Esta técnica tem sido aplicada em outras áreas como: a modificação estrutural [18], correção de fatores de escala modais e para determinar momentos e rotações numa estrutura devido a forças de impacto.

2.2.1.3 Método das Diferenças Finitas

Em 1980 Sattinger [19] desenvolveu esta técnica experimental de determinação de respostas em rotação através do uso de acelerómetros convencionais. Esta técnica permite representar a mobilidade rotacional através de derivadas espaciais das suas mobilidades translacionais, estas derivadas por sua vez são aproximadas a somatórios de equações de diferenças finitas. Esta derivação da resposta em rotação pode ser conseguida através de diferenças finitas de primeira e segunda ordem [19]. Uma formulação completa desta técnica pode ser consultada nos trabalhos de Urgueira [8], Duarte [20].

Para ilustrar este método consideraremos a Figura 7, onde três ou dois acelerómetros são colocados a uma distância constante 's', para a aproximação de segunda ordem e de primeira ordem, respetivamente. Um deles é colocado na coordenada onde se pretende deduzir a rotação, representada por 'P', o posicionamento dos restantes acelerómetros é dependente da formulação de diferenças finitas a utilizar e da orientação do eixo global.

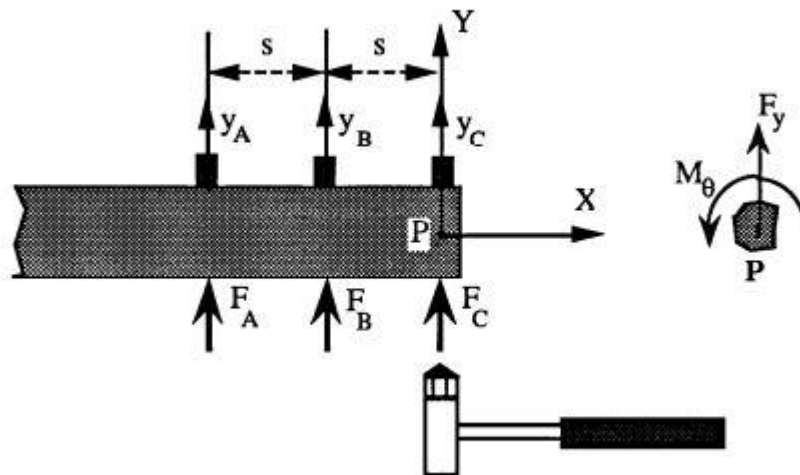


Figura 7 - Representação da Técnica das Diferenças Finitas [8]

A aplicação desta técnica leva a alguns problemas. Segundo Duarte *et al* [11] o espaçamento 's' e a ordem de aproximação utilizada influenciam bastante a qualidade do modelo, pois o aumento da ordem de aproximação para a FRF de rotação/força requer um espaçamento menor enquanto que um espaçamento maior é requerido para um aumento na ordem de aproximação para a FRF de rotação/momento. Desta forma o distanciamento dos sensores tem de ser bem ponderado. Foi ainda constatado um outro problema associado à presença de ruído, visto que pequenos erros nas FRF translacionais medidas levam a erros inaceitáveis nas FRF rotacionais deduzidas. É, pois, recomendada a regeneração das curvas de translação antes de realizar cálculos para obtenção de FRFs de rotação. Outra alternativa é apresentada por Liu *et al* [21] que consiste na compensação residual que permite utilizar várias aproximações obtendo assim melhores resultados. A compensação residual é a inclusão de parâmetros modais fora da gama de frequência. Duarte *et al* [11] conclui ainda que a aproximação de primeira ordem apresenta melhores resultados para FRFs de rotação/força e que a aproximação de segunda ordem apresenta melhores resultados para FRFs de rotação/momento.

2.2.1.4. Vibrômetro Laser por Efeito de Doppler (VLD)

A utilização desta técnica foi desenvolvida por Yeh e Cummins [22]. Esta técnica trouxe novas possibilidades para as medições experimentais, pela capacidade de as realizar sem necessitar de ligar sensores à estrutura. Isto permite não só realizar medições em estruturas leves e frágeis como estudar superfícies a alta temperatura, componentes rotativos e até estruturas em ambientes de radiação elevada. Esta técnica pode ser utilizada ainda para o estudo de escoamentos de fluidos onde os transdutores poderiam provocar alterações no escoamento. A aplicabilidade deste método na medição de vibrações foi desde logo estudada [23], [24].

O VLD é um equipamento ótico de medição de velocidade baseado no efeito de Doppler. O feixe de laser emitido é dividido em dois feixes, sendo que um servirá para medição no ponto de interesse e o outro servirá de referência. O feixe de medição sofrerá uma variação proporcional à velocidade verificada no ponto, este feixe é depois direcionado juntamente com o feixe de referência para um fotorreceptor. A montagem deste método experimental é representada na Figura 8.

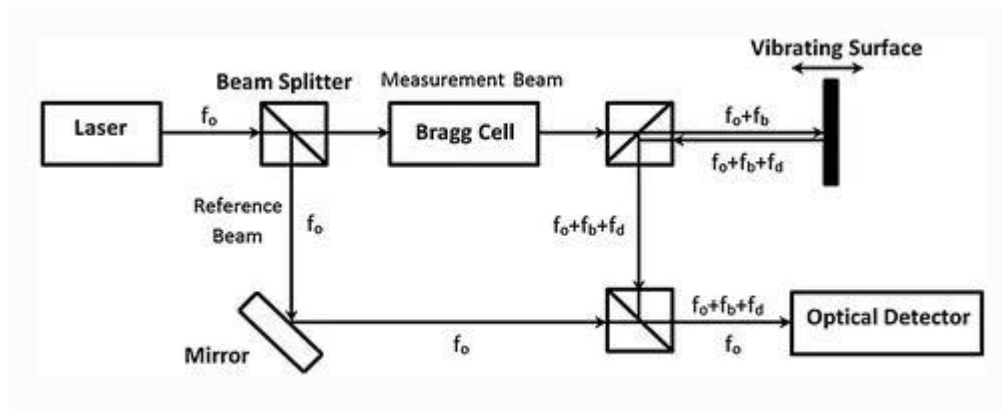


Figura 8 - Esquema de um Vibrômetro de Laser por efeito de Doppler [25]

Uma das desvantagens deste método é a medição de velocidade em vez de aceleração na maior parte dos casos assim como a sensibilidade limitada dos vibrômetros laser. O seu rácio sinal/ruído apenas permite medições em superfícies bastante difusoras ou com a aplicação de fita retro difusora no ponto que se pretende estudar. O custo elevado e tamanho do equipamento são também aspetos menos positivos deste método. Apesar de todas estas desvantagens, Oliver [25] afirma que este é um método promissor para a medição de respostas translacionais e rotacionais.

2.2.1.5. Sensores Piezoelétricos

Bello *et al* [27] desenvolveu esta técnica utilizando sensores Piezoelétricos de baixo custo para estimar respostas em rotação. É importante referir a utilização de pequenos adesivos biomórficos que são capazes de medir a curvatura numa estrutura no ponto onde se encontram. O uso conjunto destes instrumentos permite medições de curvatura, dos quais através de técnicas de interpolação se consegue obter a resposta em rotação. Apesar destes sensores serem bastante simples, baratos e não intrusivos dado o seu peso e tamanho, já foi provado que para a sua utilização neste contexto é necessário ainda resolver problemas relacionados com a amplificação de sinal, junção e ligação à estrutura, calibração e sensibilidade transversal.

Cicogna *et al* [28] também estudou o uso destes adesivos piezoelétricos biomórficos para medir a curvatura numa viga e numa placa e através de técnicas de interpolação obter a resposta em rotação. A metodologia foi baseada em algoritmos genéticos para estudar a possibilidade de usar mais do que um adesivo biomórfico para perceber o tamanho ótimo e posição em estruturas do tipo viga.

2.2.2 Técnicas Diretas

2.2.2.1 Transdutores Angulares

Alguns investigadores desenvolveram sistemas de medição baseados em transdutores angulares, cada sistema tem por base diferentes técnicas. É relevante mencionar 3 métodos, o primeiro utiliza técnicas de inércia para medir três eixos de rotação, o segundo utiliza sensores hidrodinâmicos magnetizados e o terceiro utiliza sensores giroscópicos [32].

2.2.2.2 Sensores MEMS

A tecnologia Microelectromechanical Systems, permitiu, nos recentes anos, o aparecimento de sensores miniaturizados, MEMS, que têm vindo a ser largamente utilizados dada a sua versatilidade baixo custo, um exemplo da sua utilização são os *Smartphones*. Os sensores MEMS são pequenos circuitos integrados que combinam componentes elétricos e mecânicos, sendo produzidos por tecnologias de micro fabricação e podem medir apenas alguns milímetros ou mesmo micrómetros. Estes sensores por serem pequenos e leves tornam atrativa a sua utilização no campo da EMA e devido ao baixo consumo de energia podem ser utilizados para a monitorização de estruturas, estas aplicabilidades foram estudadas por Berskhoun e Ma [33]. A sua utilização na medição das rotações revela-se muito atrativa, dada a reduzida massa e custo que apresentam, no entanto apresentam como limitação o facto de, a grande maioria destes, só permitir medições numa gama baixa de frequências.

3

Fabricação Aditiva

Neste capítulo será feita uma breve descrição sobre a Fabricação Aditiva (FA), será caracterizado o material a utilizar e ainda a influência da parametrização da impressão nas propriedades mecânicas da peça impressa.

3.1 Fabricação Aditiva

Nas últimas décadas a FA tem ganho algum destaque em diversas áreas de que são exemplo: a medicina, a automóvel, a espacial, entre outras. A FA consiste na deposição camada a camada de um material específico para a obtenção de um objeto ou peça.

Nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidas várias técnicas de FA, uma destas é a Fused Deposition Modeling (FDM). Esta consiste na produção direta de uma peça ou objeto através de um modelo obtido com recurso a modelação geométrica (CAD), utilizando um material termoplástico que é depositando camada a camada para obtenção do modelo criado. Esta técnica apresenta inúmeras vantagens de que são exemplos a possibilidade de obter geometrias complexas, a rapidez de processo e acessibilidade e a utilização de materiais biodegradáveis como o PLA.

Apesar de todos os desenvolvimentos nas áreas, o estudo das propriedades mecânicas, e especialmente das propriedades dinâmicas, das peças obtidas através destes processos e materiais padecem ainda de verificação e estudo científico. Isto porque a forma como as peças obtidas se

comportam em termos mecânicos não depende apenas do material, mas também de inúmeros parâmetros de impressão que podem variar, como o padrão de *Infill*, a percentagem de *Infill*, a orientação de impressão, o ângulo de deposição, velocidades de impressão, espessura de camada e temperatura de extrusão e do tabuleiro de impressão.

3.2 Parametrização vs Propriedades Mecânicas

Vários estudos foram realizados com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de impressão nas características mecânicas das peças, como o Módulo de *Young*, tensão de cedência e de rotura, resistência ao impacto e extensão à rotura, [34]-[43].

A orientação da impressão, que é determinada pela face da peça em contacto com o tabuleiro, permite ter maior resistência dependendo da direção da tensão criada pelos esforços. Isto é, a peça impressa resiste melhor a tensões cuja direção é paralela à deposição do material, desta forma os mecanismos de rotura irão atuar na estrutura molecular do material invés de atuarem nas ligações entre camadas, que são mais frágeis, [35][38].

A velocidade de impressão tem um grande efeito na consolidação da peça obtida. Quando esta aumenta a adesão entre camadas não será tão consistente e o arrefecimento mais acentuado, levando a uma diminuição das características mecânicas da peça, nomeadamente a diminuição da tensão de rotura, [36] [41].

A espessura de camada influencia as propriedades mecânicas da peça de diferente forma consoante as solicitações. Perante um esforço fletor o aumento da camada torna a peça mais resistente [42], o que para um esforço axial não se verifica [36][39], sendo que quanto menor espessura de camada maior a resistência à tração e maior tensão à rotura.

A percentagem de *infill* tem influência no Módulo de *Young*, sendo que quanto maior a percentagem de *infill* maior o valor do Módulo de *Young* [34] e maior o melhoramento das propriedades mecânicas [40], assim pode dizer-se que a rigidez aumenta. No entanto tal não acontece com a extensão à rotura, o aumento de *infill* até aos 75% permite uma maior extensão à rotura, mas a 100% de *infill* a extensão diminui [34][40], podendo dizer que o material se torna menos elástico e mais rígido. É importante referir que apenas dois padrões permitem *infill* até 100%, o padrão colinear e retilíneo.

Por sua vez, a escolha de diferentes padrões de preenchimento parece não influenciar significativamente qualquer um destes aspetos.

O ângulo de deposição tem efeitos mais complexos [34][35] no que toca às propriedades mecânicas das peças obtidas. Em geral um ângulo de 45° de deposição apresenta melhores características mecânicas, visto que o deslizamento entre camadas, que será a 45°, não está alinhado com qualquer esforço individual que se possa aplicar. Mas para um momento fletor o melhor ângulo de deposição será o de 55°.

O estudo das propriedades dinâmicas de peças obtidas por FDM encontra-se ainda nos seus primórdios, sendo que a informação quanto a estas propriedades ainda é bastante escassa. No entanto já foram realizados alguns estudos [34] que mencionam o módulo de armazenamento dinâmico e o módulo de perda das peças. Estes estudos revelaram que uma maior percentagem de *infill* permite uma melhor conservação de energia nas peças e em consequência uma menor perda de energia, amortecimento.

É ainda importante mencionar o estudo realizado por Bojan Banjanin *et al* [43] que constata a inconsistência de resultados obtidos aquando do estudo das propriedades mecânicas de espécimens desenvolvidos a partir de PLA e ABS. Ao contrário dos estudos antes mencionados o PLA apresentou características mecânicas mais fracas que o ABS para Ensaio de tração assim como uma maior variação nos resultados obtidos. Bojan Banjanin *et al* concluíram ainda que a adesão entre camadas parece influenciar bastante os resultados dos testes de tração uniaxial, mas não tanto perante Ensaio de compressão.

3.3 PLA -N

O PLA, ou Polyactic Acid, é uma substância amorfa sendo uma excelente opção para sistemas de FDM. As suas características mecânicas, como a resistência a abertura de fendas e encolhimento, permitem uma vasta gama de aplicabilidades.

Nesta dissertação foi utilizado um material que se constitui como um melhoramento do PLA, o PLA-N fabricado pela Filkemp. Este material é considerado pela Filkemp [44] como um bio polímero fabricado de forma a proporcionar peças com propriedades mecânicas superiores ao PLA mantendo a mesma facilidade de concessão, e é indicado para aplicações onde é necessária uma maior rigidez.

De acordo com testes realizados pelo fabricante [44] o PLA-N apresenta um aumento de 27 a 27.5% de resistência à torsão e de um aumento de 20% de resistência à flexão.

3.4 Impressão

O bloco em T foi modelado através do *software* ‘SolidWorks v27.2.0.51’, onde foi criado o ficheiro do modelo 3D (‘.3MF’) compatível com o *software* de FA. O desenho 2D representativo do bloco em T é apresentado na Figura X.

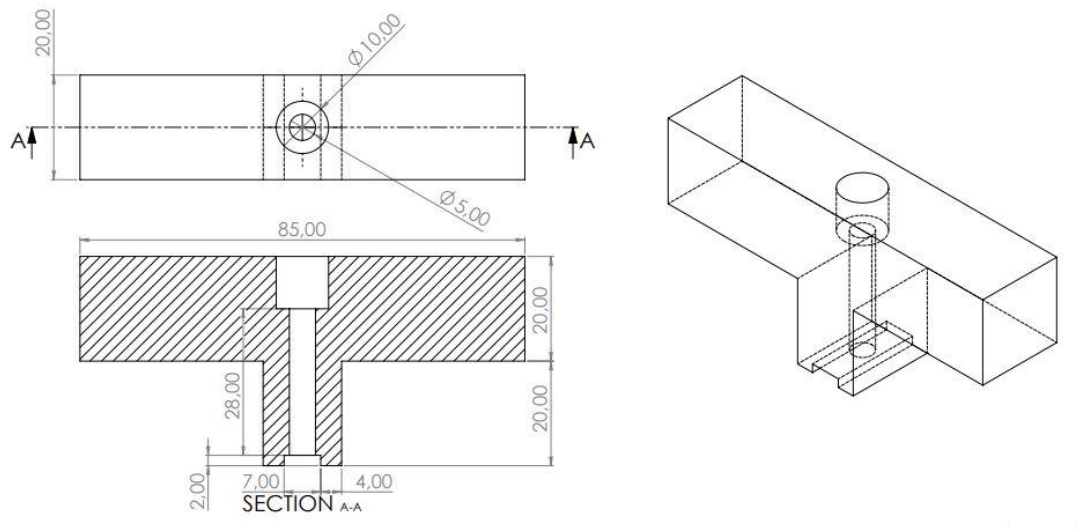


Figura 9 - Desenho do bloco em T com as respetivas cotas

O *software* utilizado para parametrizar a impressão e para obter o ficheiro *G-code* (‘.gcode’) foi o ‘UltimakerCura v5.0.1’. Neste *software* é possível parametrizar, visualizar e monitorizar a impressão-, como se encontra ilustrado na Figura 10 e apresentado na Tabela 2.

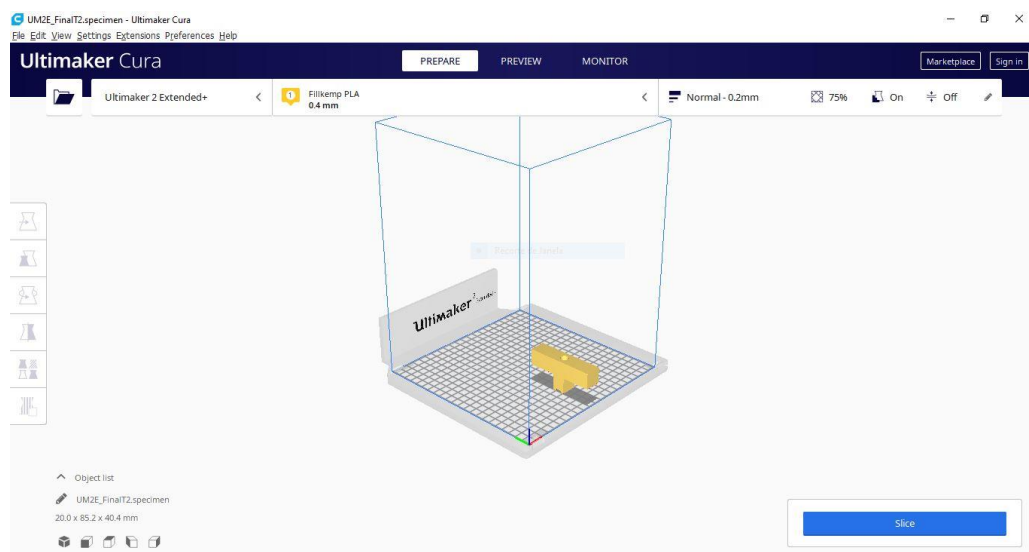


Figura 10 - Software ‘UltimakerCura v5.0.1’

Tabela 2 - Descrição de Funções representadas na Imagem 10

Nº da Função	Descrição da Função
1	<i>Prepare</i> – Janela onde se parametriza a impressão.
2	<i>Preview</i> – Janela onde se observa, camada a camada, a impressão de acordo com a parametrização realizada.
3	<i>Monitor</i> – Janela que permite monitorizar a impressão.
4	<i>Printer</i> – Permite escolher o modelo da impressora que irá efetuar a impressão.
5	<i>Fillament</i> – Permite escolher o filamento e diâmetro correspondente que irá ser utilizado para a impressão.
6	<i>Print Settings</i> – Permite parametrizar a impressão.
7	<i>Views</i> – Permite escolher diferentes vistas do tabuleiro de impressão.
8	<i>Move</i> – Permite mover a peça no tabuleiro.
9	<i>Scale</i> – Permite a alteração de dimensões mantendo ou não as proporções entre elas.
10	<i>Rotate</i> – Permite rodar a peça no tabuleiro em três direções.
11	<i>Mirror</i> – Permite inverter a peça no tabuleiro em três direções.
12	<i>Support Blocker</i> – Permite introduzir espaços vazios na impressão.
13	<i>Slicer</i> – Permite gerar a impressão, camada a camada, de acordo com a parametrização. Após gerar a impressão apresenta os detalhes da impressão (<i>Printing Details</i>).

Quase toda a parametrização da impressão é realizada através da função ‘*Printing Settings*’ representada na Figura 11 e descrita na Tabela 3.

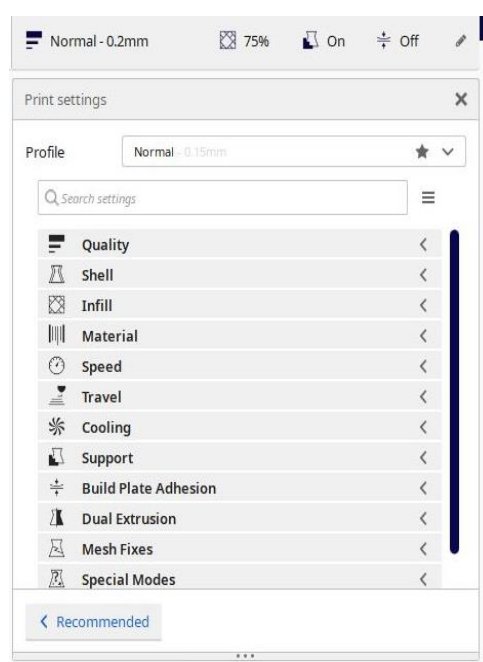


Figura 11 - 'Printing Details'

Tabela 3 - Descrição das funções ilustradas na Figura 10

Nome do Parâmetro/Função	Descrição
<i>Profile</i>	Permite escolher um perfil ou criar um perfil de impressão.
<i>Quality</i>	Permite definir as espessuras de camada e largura, que depende do 'nozzle' - extrusor de filamento.
<i>Shell</i>	Permite definir as dimensões e número de camadas exteriores.
<i>Infill</i>	Permite definir a % de preenchimento, padrão e orientação.
<i>Material</i>	Permite definir o <i>flow</i> do material para as diferentes camadas.
<i>Speed</i>	Permite definir as velocidades de impressão para cada tipo de camada.
<i>Travel</i>	Permite definir a velocidade do 'nozzle' em percursos de reposicionamento.
<i>Cooling</i>	Permite definir características do arrefecimento.
<i>Support</i>	Permite parametrizar os suportes da impressão.
<i>Build Plate Adhesion</i>	Permite escolher funções que otimizam a saída do filamento pelo 'nozzle' assim como a adesão da peça ao tabuleiro de impressão.
<i>Dual Extrusion</i>	Indisponível para a impressora escolhida.
<i>Mesh Fixes</i>	Permite manipular o preenchimento da peça.
<i>Special Modes</i>	Permite escolher, caso existam mais peças para a mesma impressão, imprimir ao mesmo tempo ou uma de cada vez, imprimir o molde da peça ou imprimir a peça em partes.

Após a parametrização a função 'Slicer' apresenta os restantes detalhes de impressão ('Printing Information') representados na Figura 12

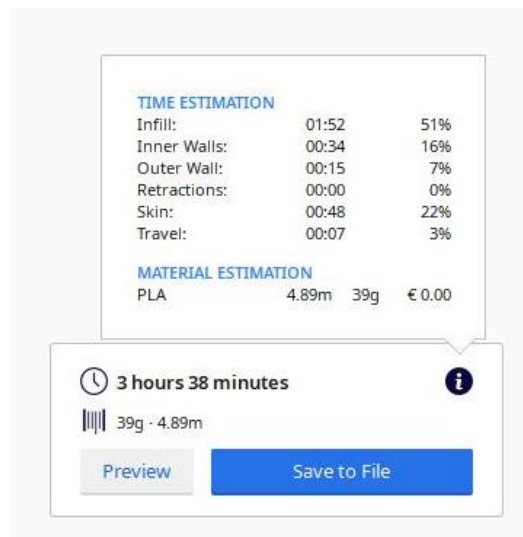


Figura 12 – Printing Information

3.5 Parametrização

Com base na pesquisa realizada optou-se por considerar alguns parâmetros fixos. Estes parâmetros são apresentados e valorizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros fixos de impressão

Parâmetro	Valor [SI]
Velocidade de deposição na parede exterior	40 [mm/s]
Velocidade de deposição do preenchimento	45 [mm/s]
Padrão de <i>infill</i>	Grid
Orientação da deposição	45 [°]
Temperatura do tabuleiro	60 [°C]
Temperatura do ‘nozzle’	220 [°C]
Espessura de camada	0.2 [mm]

O padrão de infill ‘Grid’ está representado na seguinte Figura.

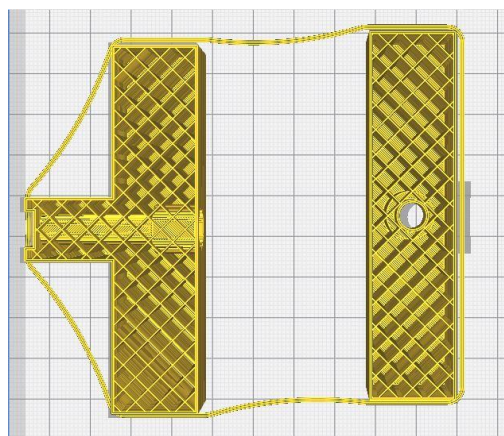


Figura 13- Representação do padrão 'Grid'

Os parâmetros variáveis têm como objetivo compreender de que forma a sua variação influencia o desempenho das peças impressas. Foram selecionados três parâmetros, os quais são apresentados na Tabela 5 com as correspondentes variações. Embora não seja mencionada na bibliografia a influência da espessura da parede exterior de peças impressas, este parâmetro foi considerado não só pela falta de informação, mas também pela possível melhoria da rigidez da peça impressa.

Tabela 5 - Parâmetros variáveis de impressão

Parâmetro	Valores [Unidade SI/Símbolo]
Espessura da parede exterior	1.5/3.0 [mm]
Orientação da impressão	<i>Upright/Flat</i> [UP/F]
Percentagem de <i>infill</i>	25/50/75 [%]

Ambas as orientações de impressão estão representadas em seguida:

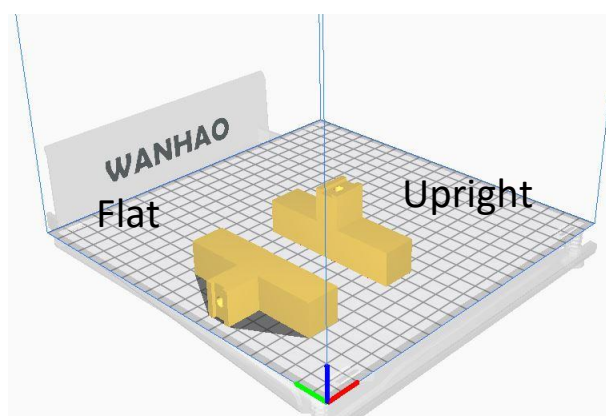


Figura 14 - Representação das orientações de impressão

Face aos parâmetros variáveis foram impressos 12 blocos T, que se encontram apresentados na Figura 14 e descritos na Tabela 5. Pode se observar os blocos na Figura 15.



Figura 15 – Sensores T

Tabela 6 – Espécimens

Espécimen	Espessura da parede exterior [mm]	Orientação de impressão	Percentagem de <i>infill</i>
I	1.5	UP	25
II	1.5	UP	50
III	1.5	UP	75
IV	1.5	F	25
V	1.5	F	50
VI	1.5	F	75
VII	3.0	UP	25
VIII	3.0	UP	50
IX	3.0	UP	75
X	3.0	F	25
XI	3.0	F	50
XII	3.0	F	75

Página em branco.

4

Aplicação Experimental

Neste capítulo serão apresentados e descritos os recursos utilizados, assim como os Ensaios realizados e os seus objetivos.

4.1 Recursos Utilizados

Os recursos utilizados para a realização do procedimento experimental foram os seguintes:

- Viga
- *Hardware* e *Software* de aquisição de dados
- Acelerómetros piezoelétricos
- Martelo Instrumentado (A e B)
- Amplificador/Condicionador de sinal

4.1.1 Estrutura

A estrutura analisada é uma viga de aço, ilustrada na Figura 15, de secção transversal retangular com 10 furos passantes localizados ao longo do comprimento da mesma, cujas coordenadas se encontram na Tabela 7. As suas propriedades são apresentadas na Tabela 8.



Figura 16 – Viga

Tabela 7 - Nós dos furos passantes e correspondentes localizações

Furo	Nó (m)
1	2 (0.01)
2	9 (0.082)
3	17 (0.169)
4	25 (0.245)
5	33 (0.327)
6	41 (0.408)
7	49 (0.49)
8	65 (0.654)
9	81 (0.817)
10	96 (0.969)

Tabela 8 - Propriedades mecânicas da viga segundo eixo x

Comprimento	980 [mm]
Largura	35 [mm]
Espessura	6 [mm]
Massa [kg]	1.476 [Kg]
Área de Secção Transversal [m ²]	2.1×10^{-4} [m ²]
Massa Volúmica [kg/m ³]	7000 [Kg.m ⁻³]
Segundo Momento de Área [m ⁴]	5.9×10^{-10} [m ⁴]
Módulo de Young [GPa]	207.5 [GPa]

Para efeitos desta dissertação, e de forma a obter um modelo refinado de Elementos Finitos para comparação dos sinais medidos através dos Sensores T, esta viga foi discretizada em 97 elementos, para uniformizar o comprimento dos diferentes elementos.

4.1.2 Hardware e Software

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o PROSIG P8012, com apenas uma porta do modelo 8404, ilustrado na Figura 15. Este sistema possui 4 entradas ADC para a ligação de transdutores e tacómetro, sendo que para efeitos desta dissertação foram conectados, em diferentes Ensaios, 3 acelerómetros e dois transdutores de força piezoelétricos.



Figura 17 - Sistema P8012

O *software* que permitiu processar os sinais obtidos e exportar os dados em formato Excel foi o DATS *Software* – Noise & Vibration Analysis. Este *software* é utilizado principalmente para análises de som e vibração, sendo usado em inúmeras atividades de engenharia e de processamento de sinal. Este *software* também possui módulos que permitem realizar Ensaios, como Ensaios de impacto e análises, como análises modais, entre outros.

Para a realização dos Ensaios experimentais desta dissertação foi utilizado o módulo Acquisition V1 – Hammer Impact. Este módulo permite captar e visualizar vários tipos de FRF (ilustrado na Figura 16), assim como os respectivos sinais no domínio do tempo, parametrizar a captação de sinal (ilustrada na Figura 17 e descrita na Tabela 7) e definir as janelas onde se observam os sinais obtidos através de 3 pré-testes (ilustrados na Figura 18 e especificados na Tabela 8).

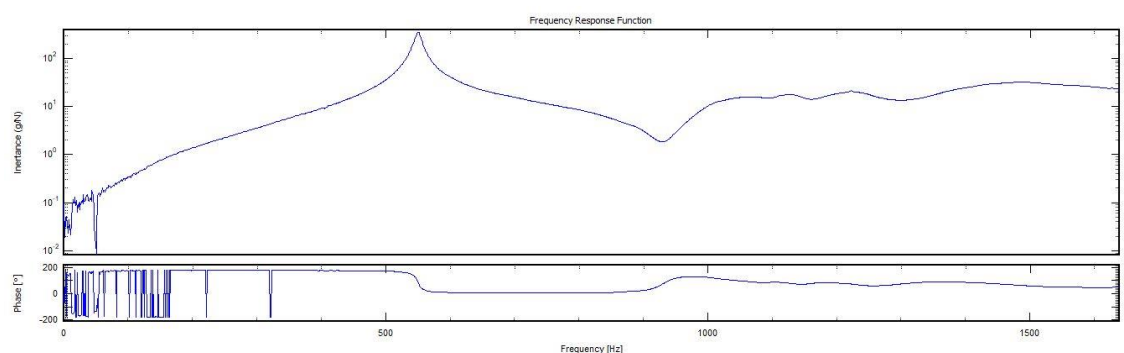


Figura 18 - FRF (magnitude do sinal e fase)



Figura 19 – Parâmetros de captação de sinal

Tabela 9 – Descrição dos parâmetros apresentados na Figura 19

Parâmetro	Descrição
<i>Upper Analysis Frequency</i>	Define o limite superior da gama de frequências a analisar.
<i>Frequency Resolution</i>	Define o intervalo de frequência cada ponto medido.
<i>Sample Rate</i>	Define o número de medições por segundo.
<i>Block Size</i>	Indica o número total de medições, por impacto.
<i>Nº of Averages</i>	Define o número de impactos a realizar.

Determination of Trigger Level and Gain Settings

Excitation Trigger Level N

Click the 'Start Pre-Test' button and perform multiple impacts to determine the trigger level and gain settings (8 secs max duration).

☒ Start Pre-Test ☐ Stop Pre-Test

Determination of Response Windowing

Use Response Windowing ▾

Required attenuation of windowed response signals dB

Actual attenuation of unwindowed response signals dB

Exponential Window Decay ▾ %

Click the 'Start Window Test' button and perform a single impact to determine the response windowing.

☒ Start Window Test ☐ Stop Window Test

Excitation Windowing

Use Excitation Windowing ▾

Excitation Window Transition Start Point ▾ %

Excitation Window Transition Length ▾ %

Click the 'Start Window Test' button and perform a single impact to view the applied excitation windowing.

☒ Start Window Test ☐ Stop Window Test

Figura 20 - Janela de pré testes para definição de janelas de resposta e excitação

Tabela 10 - Descrição dos pré testes

Pré teste	Descrição
<i>Trigger Level & Gain Settings</i>	Permite definir o valor da força exercida através do qual se inicia automaticamente a medição, realizando vários impactos durante 8 segundos.
<i>Determination of Response Windowing</i>	Permite definir as janelas de resposta, atenuação dos sinais de resposta e decaimento exponencial, realizando um impacto na estrutura.
<i>Excitation Windowing</i>	Permite definir a janela de excitação, realizando um impacto na estrutura e ainda escolher a percentagem de sinal que corresponde à duração do impacto.

Para a análise modal de alguns resultados, nomeadamente dos Ensaios realizados aos Sensores T para obtenção das 1ª Frequências Naturais dos respetivos Sensores, foi utilizado o módulo Modal Analysis que permite a leitura da FRF captada assim como a identificação das frequências naturais e modos de vibração. O ambiente de trabalho deste módulo é representado na Figura 21 e algumas das suas funções são especificadas na Tabela 11.

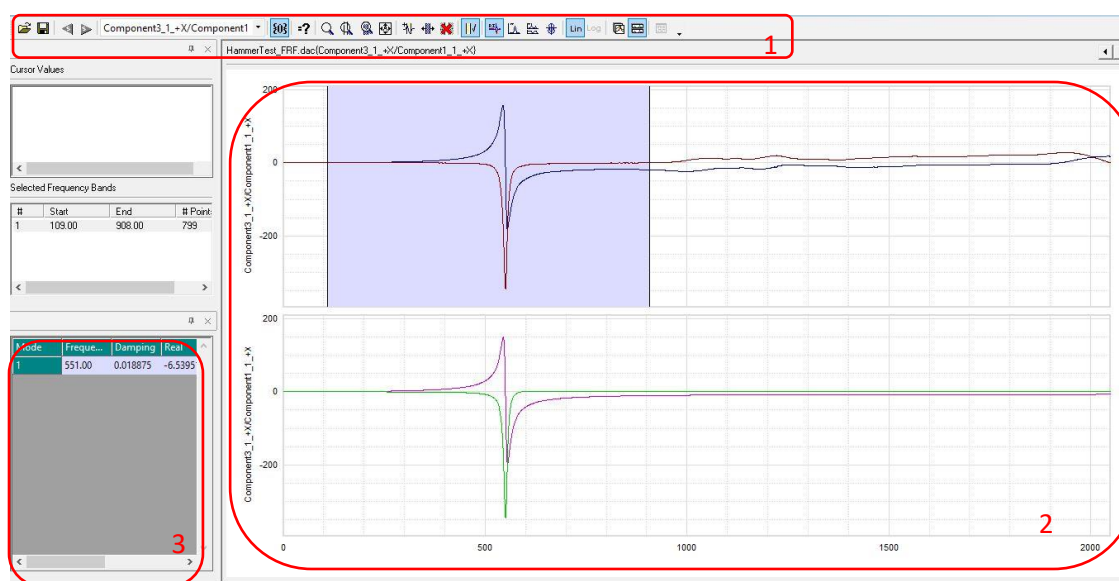


Figura 21 - Ambiente de trabalho do módulo Modal Analysis

Tabela 11 – Descrição das funções apresentadas na figura 21.

Nº	Função/Descrição
1	Permite abrir os resultados obtidos de um determinado teste, definir/modificar/eliminar bandas onde se pretende realizar a análise modal, fazer zoom em zonas onde se pretende observar o sinal com maior detalhe e executar a análise modal
2	Permite observar o sinal e as bandas definidas (região acinzentada)
3	Permite observar os resultados obtidos provenientes da análise modal de cada banda definida.

4.1.3 Acelerómetros

Foram utilizados três acelerómetros uniaxiais piezoelétricos Theta Shear Type 4507, produzidos pela Bruel & Kjaer, representado na Figura 22 e cujas especificações são apresentadas na Tabela 12.



Figura 22 - Acelerómetro Theta Shear Type 4507

Tabela 12 - Especificações do acelerómetro

Dimensões	$10 \times 10 \times 10 \text{ [mm]}$
Massa	$4,8 \times 10^{-3} \text{ [kg]}$
Sensibilidade	$100 \text{ [mV} \cdot \text{g}^{-1}\text{]}$
Alcance máximo	70 [g]
Gama de frequências	$1 - 6 \times 10^3 \text{ [Hz]}$
Fase de resposta	$\pm 5^\circ \text{ (3Hz - 2kHz)}$
Sensibilidade Transversal	$< 5\%$

Estes acelerómetros, através do efeito piezoelétricos, convertem um sinal elétrico em aceleração a partir da descarga elétrica gerada pela velocidade de deformação do cristal provocada pelo

movimento da massa sísmica no seu interior. Podemos observar uma vista explodida do acelerómetro na Figura 23 apresentando os componentes na Tabela 13.

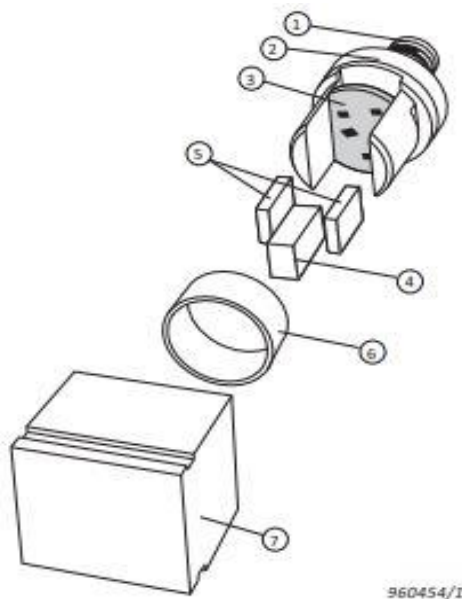


Figura 23 - Vista explodida do acelerómetro.

Tabela 13 - Legenda da Figura 21

Nº	Componente
1	Conector 10-32UNF
2	Top
3	Pré amplificador
4	Massa sísmica
5	Cristais piezoelétricos (2x)
6	Anel de fixação
7	Capa de Titânio

4.1.4 Martelo (A)

O martelo utilizado para aplicar uma força de impacto na viga a analisar foi o modelo 086C03, fabricado pela PCB, ilustrado na Figura 24 e cujas especificações são apresentadas na Tabela 14.



Figura 24 - Martelo (A)

Tabela 14 - Especificações do martelo (A)

Massa	$75 \times 10^{-3} [kg]$
Diâmetro da ponteira	$6.3 [mm]$
Sensibilidade	$2,25 (\pm 15\%) [mV \cdot N^{-1}]$
Alcance máximo	2224 N
Frequência de ressonância	$\geq 22000 [Hz]$

Este martelo permite utilizar 4 pontas diferentes para permitir um bom sinal face a superfícies mais ou menos rígidas. Após testar 3 pontas diferentes, concluiu-se que a ponta mais indicada seria a de plástico, modelo 084B04, de dureza média. Esta ponteira é ilustrada na Figura 25.



Figura 25 - Ponteira de plástico de dureza média

4.1.5 Martelo (B) e Amplificador de Sinal

Para poder excitar os Sensores T foi utilizado outro transdutor de força cujo modelo é o Type 8023 fabricado pela Bruel & Kjaer ilustrado na Figura 26 e cujas especificações se encontram na Tabela 15. Este martelo é indicado para estruturas leves e delicadas e foi utilizado com uma ponteira de aço cujo modelo é DB3041.

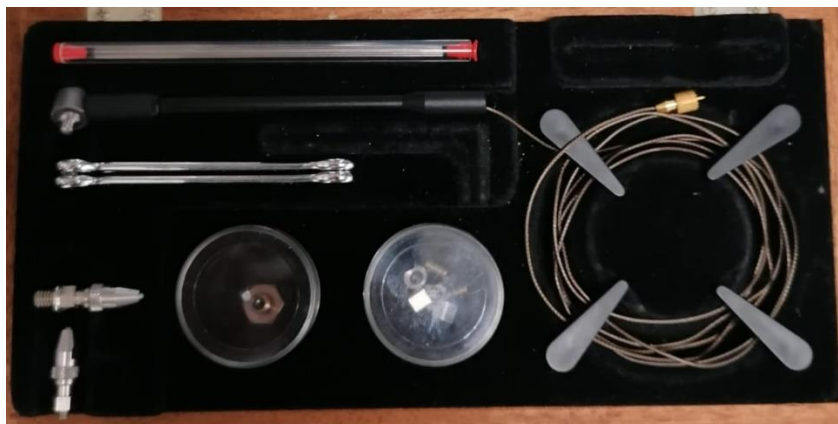


Figura 26 - Martelo (B)

Tabela 15- Especificações do martelo (B)

Massa	$3.2 \times 10^{-3} [kg]$
Diâmetro da ponteira	5 [mm]
Sensibilidade	$3.58 [\mu C \cdot N^{-1}]$
Alcance máximo	1000 [N]

Este martelo necessita de uma amplificação de sinal para poder ser lido pelo sistema P8012. Para este fim foi utilizado o Conditioning Amplifier Type 2626 dos mesmos fabricantes, é ilustrado na Figura 27 e os parâmetros utilizados encontram-se na Tabela 16.



Figura 27 - Amplificador de sinal

Tabela 16 - Descrição das funções do amplificador de sinal

Parâmetros	Descrição
Sensibilidade (Input)	Permite definir a sensibilidade do transdutor de força em $[\mu C \cdot N^{-1}]$
Sensibilidade (Output)	Permite definir a sensibilidade do sinal que vai ser lido pelo sistema P8012 em $[V \cdot N^{-1}]$
Gama de frequência	Permite definir o limite inferior e superior de frequência do sinal medido

4.2 Tratamento de Dados

Os dados exportados em formato Excel não são valores absolutos da receptância pretendida, mas sim dados correspondentes à magnitude e fase relativas à aceleração. Desta forma é necessário tratar estes dados de forma a obter a FRF de receptância. Primeiro é necessário representar a aceleração $[N \cdot g^{-1}]$ obtida através de,

$$\alpha(\omega) = a(\omega) + ib(\omega) \quad (4.1)$$

Onde ‘a’ representa a magnitude e ‘b’ a fase do sinal. Assim através da seguinte relação,

$$H(\omega) = \frac{g * \|\alpha(\omega)\|}{-(\omega i)^2} \quad (4.2)$$

Obtém-se a receptância $[m/N]$.

Uma vez obtida esta FRF experimental é necessário compará-la à FRF que se pretendia obter, ou seja, a FRF de referência. Para realizar esta comparação é utilizado um critério de correlação [45] chamado Cross Signature Scale Factor (CSF) cuja expressão é a seguinte:

$$CSF(\omega_i)_q = \frac{2|H_u(\omega_i)_q^H H_{ref}(\omega_i)_q|}{H_u(\omega_i)_q^H H_u(\omega_i)_q + H_{ref}(\omega_i)_q^H H_{ref}(\omega_i)_q} \quad (4.3)$$

sendo,

H_u → Representa a FRF medida,

H_{ref} → Representa a FRF de referência,

H → Representa o complexo conjugado transposto,

ω → Representa a frequência,

q → Representa a localização da excitação

O critério de correlação CSF foi escolhido pela sua capacidade de correlacionar apenas duas FRFs toma valores entre 0 e 1, o que significa nenhuma correlação e correlação completa respetivamente.

4.3 Ensaios e Objetivos

Para realizar os Ensaios definidos é necessário calibrar os pares acelerómetros/Martelo (A) e acelerómetros/Martelo (B). Após realizada a calibração são realizados 4 Ensaios com objetivos distintos, mas cujos resultados são essenciais para uma boa análise dos Ensaios consequentes. Estes objetivos passam por obter um modelo de EF que corresponda à viga a analisar, servindo assim de meio de comparação para as FRF de rotação obtidas através do Sensor T, perceber se os Sensores T se comportam como corpos rígidos e conhecer as suas gamas de utilização com base na 1ª Frequência Natural de cada Sensor T, comprovar a medição de translação através do Sensor T e por fim a obtenção das FRF de rotação com objetivo de comprovar a capacidade de medição de FRF de rotação através destes Sensores T.

4.3.1 Calibração dos pares Acelerómetros/Martelo

A calibração de acelerómetros tem como objetivo garantir que as grandezas medidas pelos acelerómetros representem valores reais, dado que a sua sensibilidade pode sofrer variações ao longo do tempo e utilização. Visto que se pretende medir FRF's é necessário garantir uma relação real entre a excitação e a resposta, tornando-se assim irrelevantes as quantidades individuais das mesmas, isto significa que não interessa se é medida a força real ou a resposta real desde que a relação entre as duas corresponda à realidade. Posto isto é possível aplicar uma técnica de calibração simples, baseada na 2ª Lei de Newton, ilustrada na Figura 28.

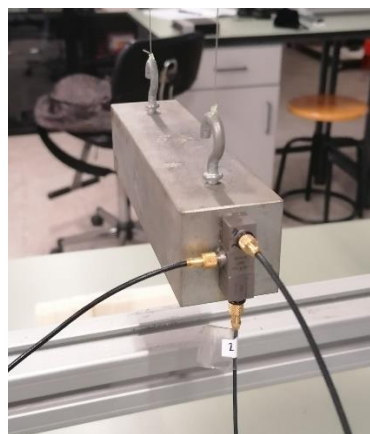


Figura 28 - Técnica de calibração

Esta técnica permite realizar a calibração através da excitação de um bloco de aço suspenso considerado rígido, ao qual os acelerómetros estão fixados. Uma vez medida a excitação e a

aceleração que o bloco adquire aquando da excitação, é possível obter um gráfico que representa a massa aparente do conjunto bloco e acelerómetros. Esta relação é ilustrada na equação 4.3.

$$Massa\ Aparente(\omega) = \frac{F_j(\omega)}{\ddot{X}_i(\omega)} \quad (4.3)$$

Foram realizados 3 impactos para cada medição da massa aparente, cujo o valor deverá ser 19,8, tendo sido necessárias 2 medições para a calibração acelerómetro/Martelo (A) e 3 para o par acelerómetro/Martelo (B). A cada medição, os dados relativos aos sinais captados foram retirados em formato Excel e processados em Octave de modo a obter o valor médio do sinal e um gráfico representativo da massa aparente, ajustando, se necessário, a sensibilidade de cada acelerómetro. A Figura 29 representa o gráfico da massa aparente obtida na 1ª calibração (C1) do par martelo (A) e acelerómetros. Os restantes encontram-se no Anexo I.

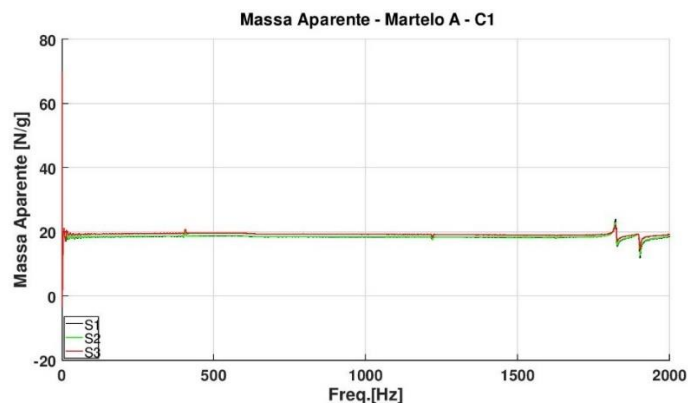


Figura 29 – Primeiro gráfico da massa aparente obtida pelo par martelo (A)/acelerómetros

Finalizadas as medições obtiveram-se os valores finais de sensibilidade para ambos os conjuntos martelo/acelerómetro representados na Tabela 17.

Tabela 17 - Sensibilidade dos acelerómetros após calibração

Sensor	Martelo A	Martelo B
Acelerómetro 1	106,2 mV. g ⁻¹	179,73 mV. g ⁻¹
Acelerómetro 2	105,8 mV. g ⁻¹	135,77 mV. g ⁻¹
Acelerómetro 3	100 mV. g ⁻¹	180,45 mV. g ⁻¹

4.3.2 Verificação da Análise de Elementos Finitos

O objetivo desta montagem é parametrizar um modelo de Elementos Finitos (EF) que corresponda ao modelo real da viga. Pois se for possível encontrar um modelo cuja FRF de

translação equivale à FRF de translação medida podemos assumir que a FRF de rotação medida pelos Sensores T deverá de ser igual à FRF de rotação obtida através deste modelo.

O modelo de EF foi construído considerando 97 elementos de viga, cada elemento possui dois nós e cada nó possui 2GDL, como se mostra na Figura 4.

Na montagem experimental a viga foi apoiada por forma a simular à situação de suspensão livre-livre. No ponto correspondente ao nó 81 da malha de EF foi colocado um acelerómetro para a obtenção da resposta em translação nesse ponto aquando da excitação do Martelo (A) noutro nó, nó 13 da mesma malha. A montagem experimental utilizada encontra-se ilustrada na Figura 30.



Figura 30 - Montagem experimental para a verificação do MEF

Uma vez obtida a receptância de translação foi gerado um algoritmo em *Octave* que atribuiu valores aos parâmetros físicos e mecânicos da viga ao modelo de EF, procurando o menor erro possível entre as Frequências Naturais obtidas e as Frequências Naturais obtidas através do modelo de EF. Posteriormente faz-se um ajuste variando o amortecimento do FEM obtido para alcançar um CSF ótimo.

A matriz amortecimento adicionada ao modelo deriva do amortecimento de Rayleigh, também definido como amortecimento proporcional, cuja expressão é apresentada a seguir:

$$[C]_{n \times n} = \gamma [K]_{n \times n} + \beta [M]_{n \times n} \quad (4.4)$$

Onde,

$\gamma, \beta \rightarrow$ Representam constantes de amortecimento que variam entre 10^{-4} a 10^{-10} .

Os parâmetros utilizados são descritos na Tabela 6 e a FRF correspondente está representada na Figura 31 juntamente com a FRF experimental. As Frequências Naturais obtidas através deste modelo e o erro associado a cada uma delas são apresentados na Tabela 18.

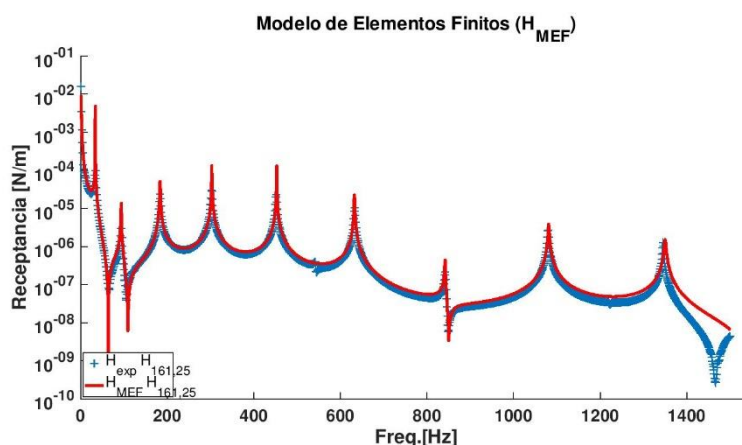


Figura 31 - Representação da FRF experimental (azul) e dos Elementos Finitos (vermelho)

Tabela 18 - Frequências naturais experimentais e provenientes do modelo de EF

Modo	Freq. Natural FEM [Hz]	Freq. Natural Experimental [Hz]	Erro Relativo [%]
1	33.79	34	0.06
2	96.63	96.6	0.03
3	183.51	183	0.27
4	303.27	302.4	0.29
5	452.91	451.9	0.22
6	632.43	633	0.09
7	841.79	842	0.02
8	1080.99	1079.6	0.13
9	1350.01	1345	0.37

O valor obtido para o fator de correlação CSF foi de 0.9, que embora não seja tão alto quanto o pretendido é uma aproximação boa para prosseguir com o estudo dos Sensores T.

4.3.3 Ensaio 1

Este Ensaio tem como objetivo conhecer a primeira frequência natural e o comportamento dinâmico de cada Sensor T em situação de encastramento, dado que será esta a condição em que se encontrará quando for ligado à viga. A situação de encastramento foi simulada através da fixação de cada Sensor T a um bloco com um parafuso, aplicando um torque, idêntico a todos os Sensores T, de 1.75Nm. O bloco por sua vez é fixado através de um macaco hidráulico com uma

pressão constante de 200 *bar*. Em cada Sensor T foram montados 2 acelerómetros, um em cada braço, equidistantes do centro do Sensor T. A Figura 32 ilustra a montagem descrita.

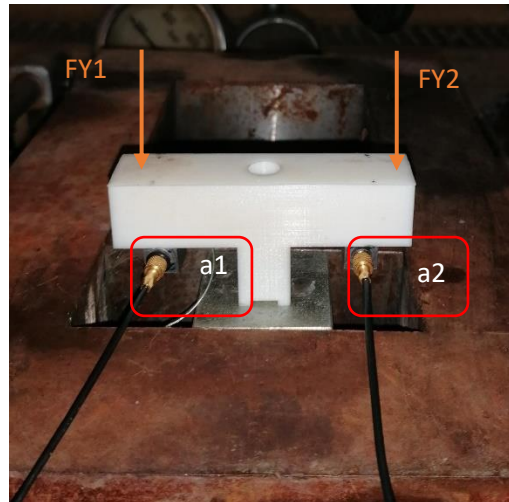


Figura 32 - Montagem experimental do Ensaio 1

O Sensor T foi excitado com o Martelo (B) primeiramente com uma força na direção *y*, *FY1*, num dos braços do Sensor T e posteriormente excitado com uma força na mesma direção, *FY2*, no braço contrário. Desta forma obtêm-se 4 FRFs. O objetivo deste procedimento é a comparação dos sinais dos acelerómetros, através do critério de correlação CSF, que se encontram no mesmo ponto da excitação e no ponto oposto ao da excitação, ou seja, comparar as medições diretas e as ‘indiretas’, respetivamente. A Tabela 19 esquematiza esta análise.

Tabela 19 - Esquematização da análise dos sinais dos diferentes acelerómetros

	CSF (medição direta)	CSF
<i>FY1</i>	a1	a2
<i>FY2</i>	a2	a1

4.3.4 Ensaio 2

Nesta montagem experimental a viga foi apoiada por forma a simular a situação de suspensão livre-livre. Cada Sensor T em análise foi instrumentado, com os 2 acelerómetros um em cada braço e fixo ao ponto correspondente ao nó 81 da malha de EF, foi também colocado no mesmo ponto, do lado oposto da viga, um terceiro acelerómetro, como ilustrado na Figura 33. A viga foi excitada com o Martelo (A) no ponto correspondente ao nó 13 da malha de EF. Os Sensor T foram fixados à viga com um torque igual ao utilizado no Ensaio 1.

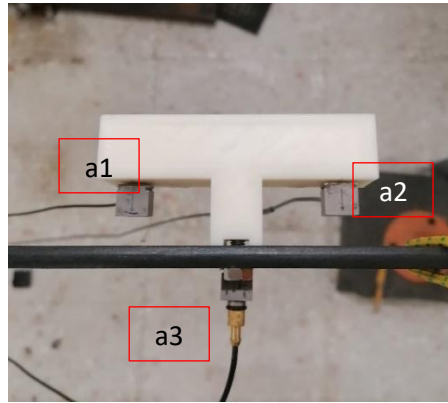


Figura 33 - Montagem experimental do Ensaio 2

O objetivo desta montagem foi determinar a FRF de translação a partir das FRFs medidas pelos acelerômetros montados no Sensor T utilizando a equação (2.2) e compará-la, através do critério de correlação CSF, com a FRF de referência, adquirida através do acelerômetro 3. Comprovando assim a capacidade de determinação das FRF de translação a partir dos Sensores T.

O critério de correlação CSF é utilizado em duas gamas de frequência, a primeira de 0Hz até à frequência natural do próprio Sensor T e a segunda de 0Hz até 1200Hz.

4.3.5 Ensaio 3

O Ensaio 3 tem como objetivo o propósito final desta dissertação, a medição de FRFs de rotação. Para tal a viga foi montada nas mesmas condições de apoio que as aplicadas no Ensaio 2. Cada Sensor T instrumentado é fixado na viga no ponto correspondente ao nó 81 da malha de EF, como ilustrado na Figura 34, e a viga foi excitada no ponto correspondente ao nó 13 da mesma malha. Os Sensores T foram fixados à viga com um torque idêntico aos Ensaios 1 e 2.



Figura 34 - Montagem experimental do Ensaio 3

São obtidas duas FRF em termos de aceleração de translação. Através da relação (2.3) estas são traduzidos numa FRF em termos de aceleração de rotação no ponto de acoplamento do bloco (nó 81). Posteriormente esta FRF em termos de aceleração é traduzida numa FRF em termos de receptância.

A qualidade desta FRF é avaliada comparando-a à correspondente FRF do modelo de EF. Para cada Sensor T foram feitas duas comparações, um considerando o efeito da massa do Sensor T instrumentado, do parafuso e porca, que permite a sua fixação à viga, H_{FEMT} , e outra negligenciando-o, H_{FEM} , pretendendo-se desta forma perceber a influência da massa dos Sensores T instrumentados no comportamento dinâmico da estrutura.

O FEM que considera o efeito da massa do conjunto Sensor T instrumentado, parafuso e porca é obtido através do modelo de EF da viga adicionando as propriedades mássicas (massa e momento de inércia de massa) do conjunto no nó 81 da malha de EF considerada. Obtendo-se assim doze modelos EF respetivos a cada conjunto viga, Sensor T instrumentado, parafuso e porca.

As propriedades mássicas do Sensor T (ST), que incluem o bloco T (B), acelerómetros (Acc) parafuso (P) e porca (por), são adicionadas, sob a forma de matriz, às duas coordenadas correspondentes ao nó 81 da malha do modelo de EF. Isto porque os acelerómetros, parafuso e porca têm um peso considerável relativamente ao peso de cada bloco em T. Esta matriz de massa do Sensor T é representada em seguida:

$$M_{ST} = \begin{bmatrix} m_{ST} & 0 \\ 0 & I_{ST} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Onde m_{ST} representa a massa e I_{ST} o momento de inércia de massa do Sensor T.

A m_{ST} é calculada através da seguinte equação:

$$m_{ST} = m_B + m_{Acc} + m_P + m_{por} \quad (4.6)$$

O I_{ST} é mais complexo de obter relativamente ao cálculo da massa e é obtido com recurso ao Teorema dos Eixos Paralelos. O I_{ST} é dado pela seguinte equação:

$$I_{ST} = I_B + m_B \bar{y}_B^2 + I_{Acc} + m_{Acc} \bar{y}_{Acc}^2 + I_P + m_P \bar{y}_P^2 + I_{por} + m_{por} \bar{y}_{por}^2 \quad (4.7)$$

Sendo I o momento de inércia de massa de cada elemento do conjunto e $\bar{y}$ é a distância do centro de massa de cada elemento ao ponto sobre o qual se dá a rotação (que se encontra no eixo neutro da viga), o nó 81.

Para realizar o seu cálculo é necessário observar a montagem do Sensor T e posteriormente calcular os momentos de inércia de massa correspondentes ao bloco, parafuso e porca. A montagem pode ser observada em seguida, estando representado com um ponto a amarelo o nó 81.

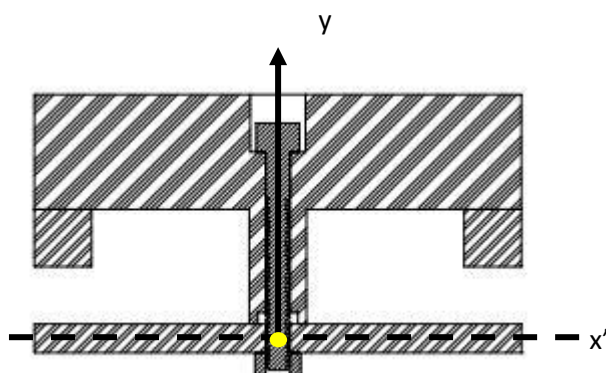


Figura 35 - Montagem do Sensor T na viga

Para calcular os termos da equação 4.7 referentes ao bloco é necessário subdividir o bloco em partes e calcular o centro de massa do bloco e o seu momento de inércia de massa. A divisão do bloco encontra-se na seguinte figura:

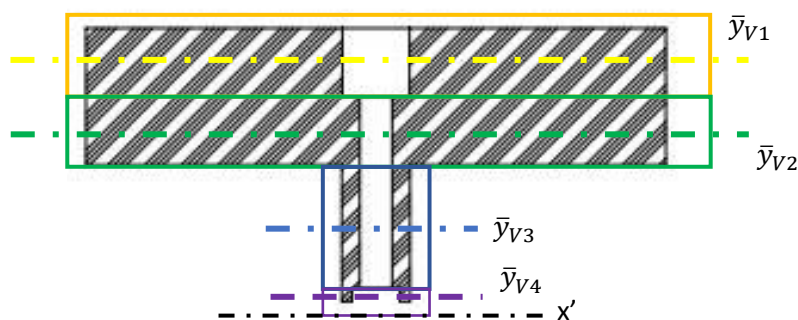


Figura 36 - Esquematização da divisão do bloco

Sendo os retângulos amarelo, verde, azul e roxo correspondentes ao Volume 1 (V1), Volume 2 (V2), Volume 3 (V3) e Volume 4 (V4) e as linhas a tracejado amarela, verde, azul e roxa correspondem à localização do centro de massa ($\bar{y}$) dos V1, V2, V3 e V4, correspondentemente, em relação ao eixo neutro da viga, representado pela linha a tracejado preta.

Os cálculos da massa de cada volume foram feitos por aproximação sendo que foi tida em conta uma distribuição uniforme do peso do bloco. Estes e os restantes cálculos, para a obtenção do I_B e de $\bar{y}_B$ são apresentados em seguida.

$$m_{Vi} = \frac{V_i}{V_B} \times m_B \quad (4.8)$$

$$\bar{y}_B = \frac{\sum_{i=1}^4 m_{Vi} \times \bar{y}_{Vi}}{m_B} \quad (4.9)$$

$$I_B = \sum_{i=1}^4 (I_{Vi} + m_{Vi} \times (\bar{y}_B - \bar{y}_{Vi})^2) \quad (4.10)$$

De seguida estão representados os acelerómetros e o respetivo centro de massa ($\bar{y}_{Acc}$) relativo ao eixo neutro da viga e os cálculos realizados.



Figura 37 - Acelerómetros e centro de massa

$$I_{Acc} = \sum_{i=1}^2 Acc_i \quad (4.11)$$

$$m_{Acc} = m_{Acc1} + m_{Acc2} \quad (4.12)$$

Para calcular o momento de inercia de massa do parafuso foi necessário usar uma metodologia idêntica à utilizada para o cálculo do momento de inércia de massa do Bloco. A sua esquematização e cálculos são apresentados em seguida.

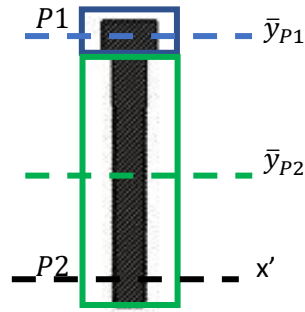


Figura 38 – Esquematização da divisão do Parafuso

$$m_{Pi} = \frac{V_{Pi}}{V_P} \times m_P \quad (4.13)$$

$$\bar{y}_P = \frac{\sum_{i=1}^2 m_{Pi} \times \bar{y}_{Pi}}{m_P} \quad (4.14)$$

$$I_P = \sum_{i=1}^2 (I_{Pi} + m_{Pi} \times (\bar{y}_P - \bar{y}_{Pi})^2) \quad (4.15)$$

O centro de massa da porca em relação ao eixo neutro está representado na seguinte figura.

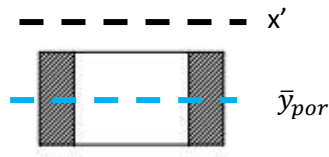


Figura 39 - Visualização da distância do centro de massa da porca ao eixo neutro da viga

5

Resultados Experimentais

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos em todos os Ensaio realizados. Para facilitar a análise de resultados é de novo apresentada a Tabela 5.

Tabela 5 – Espécimens

Espécimen	Espessura da parede exterior [mm]	Orientação de impressão	Percentagem de <i>infill</i>
I	1.5	UP	25
II	1.5	UP	50
III	1.5	UP	75
IV	1.5	F	25
V	1.5	F	50
VI	1.5	F	75
VII	3.0	UP	25
VIII	3.0	UP	50
IX	3.0	UP	75
X	3.0	F	25
XI	3.0	F	50
XII	3.0	F	75

5.1 Ensaio 1

Para cada Sensor T obtiveram-se 2 FRFs de translação em termos de aceleração que foram posteriormente traduzidas em receptância (eqs 4.1 e 4.2), $H_{a1}(\omega)$, do acelerômetro 1, e $H_{a2}(\omega)$, do acelerômetro 2, para as forças $FY1$ e $FY2$. As Figuras 40 e 41 representam as FRFs de translação, devidas a cada uma das forças aplicadas, obtidas através do Sensor T-I, todas as restantes FRF encontram-se no Anexo I.

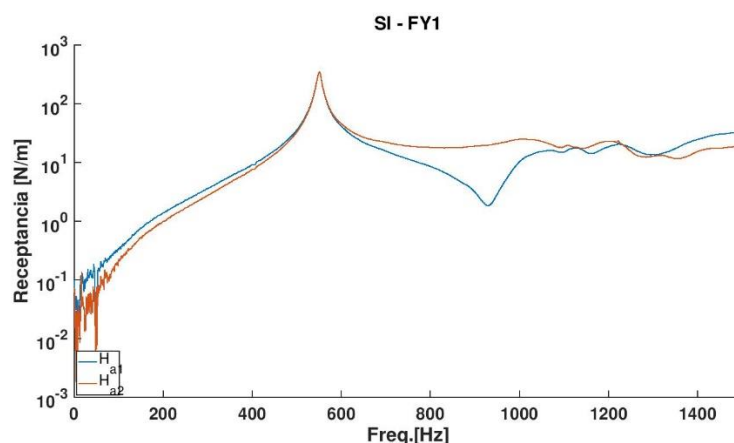


Figura 40 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - I

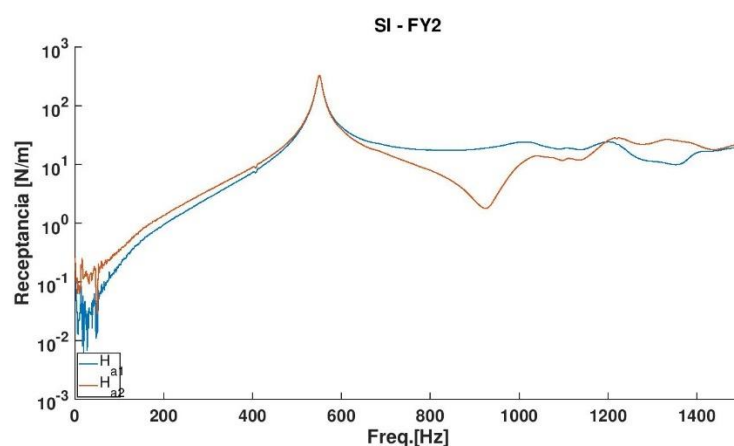


Figura 41 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - I

Posteriormente foram comparadas as FRF diretas e ‘indiretas’ do Sensor T - I, Figura 42 e 43 respetivamente, e calculados os correspondentes fatores de correlação CSF. As restantes comparações podem ser encontradas no Anexo II.

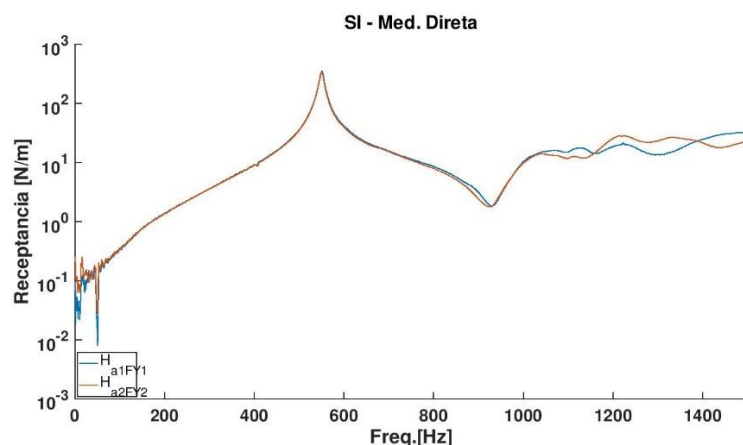


Figura 42 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - I

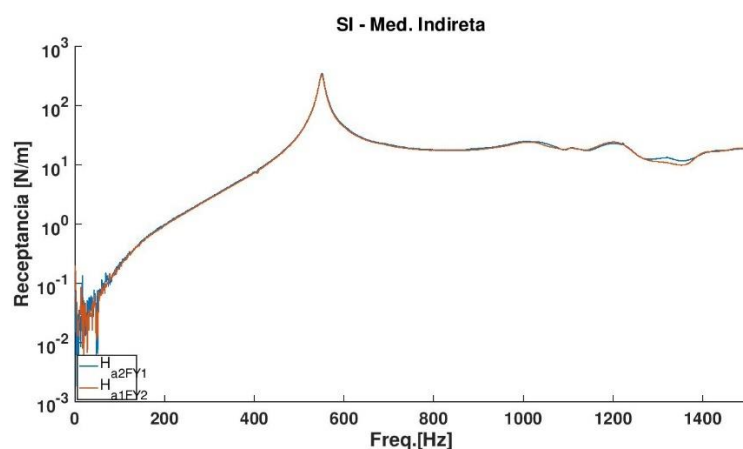


Figura 43 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - I

Os resultados obtidos para a identificação da 1ª Frequência Natural, ω_{n1} , de cada Sensor T encontram-se na Tabela 20, juntamente com a massa de cada Sensor T.

Tabela 20 - Resultados experimentais do Ensaio 1

	Sensor T	Massa [Kg. 10 ⁻³]	Δ Massa* [Kg. 10 ⁻³]	ω_{n1} [Hz]
G1	I	22	-	551
	II	30	8	519.2
	III	37	7	538.8
G2	IV	21	-	533.9
	V	30	9	541.2
	VI	37	7	550.4
G3	VII	30	-	621
	VIII	36	6	587.3
	IX	41	5	580.2
G4	X	30	-	599.3
	XI	35	5	597.7
	XII	41	6	587.8

*Variação de massa de um Sensor T para o consecutivo, nos respetivos grupos.

Para facilitar a análise os Sensores T, estes foram separados em 4 grupos (Tabela 18) de forma a conseguir compará-los consoante o parâmetro a avaliar, parâmetros estes definidos na Tabela 4. Na Tabela 21 são apresentados os grupos a comparar em função do parâmetro a avaliar.

Tabela 21 – Comparação de grupos para análise de parâmetros

Parâmetro	Grupos
% de <i>Infill</i>	G1
	G2
	G3
	G4
Orientação de Impressão	G1 e G2
	G3 e G4
Espessura da Parede Exterior	G1 e G3
	G2 e G4

Com o objetivo de perceber o efeito que o aumento da % de *Infill* pode acarretar na rigidez do Sensor T foram construídos os gráficos a seguir representados. Figura 44, 45, 46 e 47, onde se pode observar o valor obtido para a 1ª Frequência Natural de cada um dos Sensores T que compõem os quatro grupos.

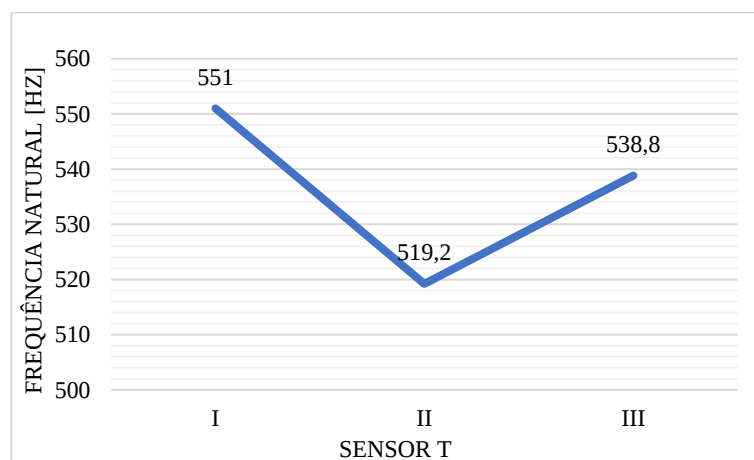


Figura 44 - Gráfico relativo ao efeito da variação de % de *Infill* na 1ª Freq. Natural de cada Sensor T do grupo G1 [esp. parede ext. 1,5mm; *Upright*]

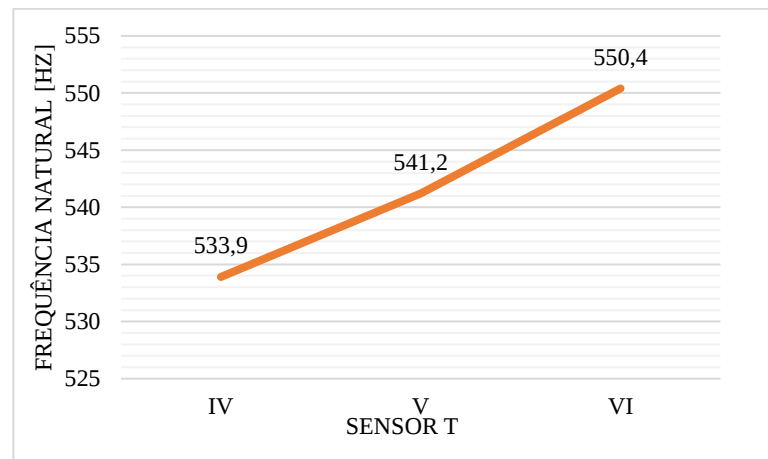


Figura 45 - Gráfico relativo ao efeito da variação de % de *Infill* na 1ª Freq. Natural de cada Sensor T do grupo G2 [esp. parede ext. 1,5mm; *Flat*]

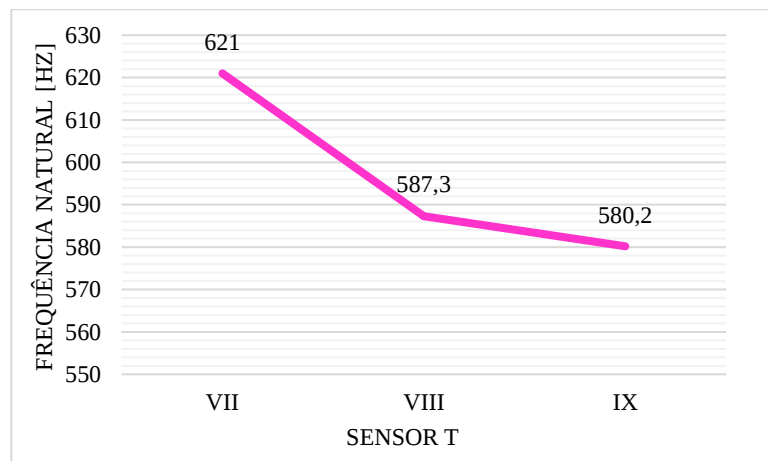


Figura 46 - Gráfico relativo ao efeito da variação de % de *Infill* na 1ª Freq. Natural de cada Sensor T do grupo G3 [esp. parede ext. 3,0mm; *Upright*]

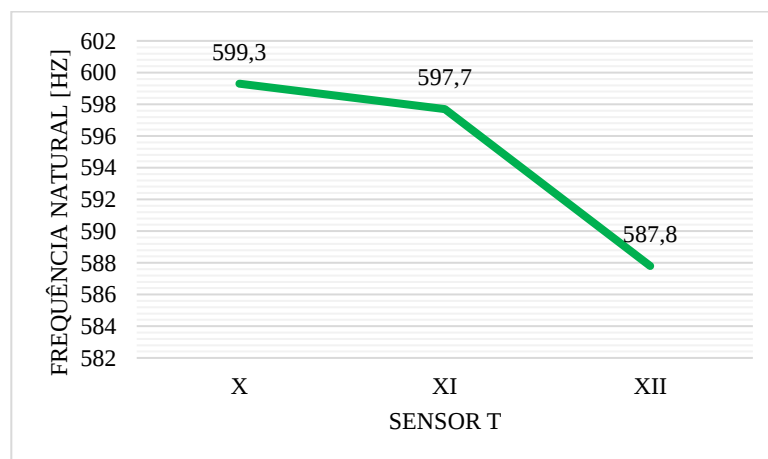


Figura 47 - Gráfico relativo ao efeito da variação de % de *Infill* na 1ª Freq. Natural de cada Sensor T do grupo G3 [esp. parede ext. 3,0mm; *Flat*]

No gráfico do grupo G1 observa-se uma descida da 1ª Frequência Natural dos Sensores T com o aumento da % de *infill* face ao primeiro Sensor, no entanto existe um ligeiro aumento da 1ª Frequência Natural do Sensor T - II para o Sensor T - III. Isto significa que o aumento de *infill* do Sensor T - I para o Sensor T - II contribui mais para o aumento da massa do que para o aumento da rigidez, assim como do Sensor I para o Sensor T - III, mas o aumento da 1ª Frequência Natural do Sensor T - II para o Sensor T - III sugere que o aumento de *infill*, de 50% para 75%, proporcionou um aumento maior na rigidez deste Sensor T do que na massa do mesmo.

O gráfico do grupo G2 apresenta uma evolução da 1ª Frequência Natural diferente de qualquer outro grupo. Verifica-se um aumento do valor da 1ª Frequência Natural consoante o aumento da percentagem de *infill*, o que revela que o aumento de *infill* contribuiu bastante para o aumento da rigidez face ao aumento de massa, que por sua vez é idêntico ao aumento de massa presente no grupo G1. Apesar do declive ser quase idêntico entre as frequências naturais dos Sensores T - IV e V e dos Sensores T - V e VI, parece que o aumento da rigidez de Sensor T em Sensor T foi o mesmo.

A diferença entre estes dois grupos prende-se com a orientação de impressão que no grupo G1 foi *Upright* e no grupo G2 foi *Flat*. O que leva a querer que a orientação de impressão é muito importante e condiciona o valor da 1ª Frequência Natural.

Por último nos gráficos dos grupos G3 e G4 a frequência natural tende a baixar consoante o aumento de *infill*. Tal pode dever-se ao facto do aumento de *infill* contribuir mais para o aumento da massa do Sensor T do que para a sua rigidez. Assim dado que a variação de *infill* de um Sensor T para o seguinte é igual e o aumento de massa é praticamente idêntico, deveriam observar-se duas retas com o mesmo declive entre pontos do gráfico, o que não acontece. A diferença entre estes dois grupos prende-se mais uma vez com a orientação de impressão em que no grupo G3 foi *Upright* e no grupo G4 foi *Flat*.

Para analisar o efeito da orientação de impressão os resultados foram colocados nos dois gráficos seguintes, o primeiro sobrepõe os grupos G1 e G2 e o segundo os grupos G3 e G4, Figura 48 e 49 respetivamente.

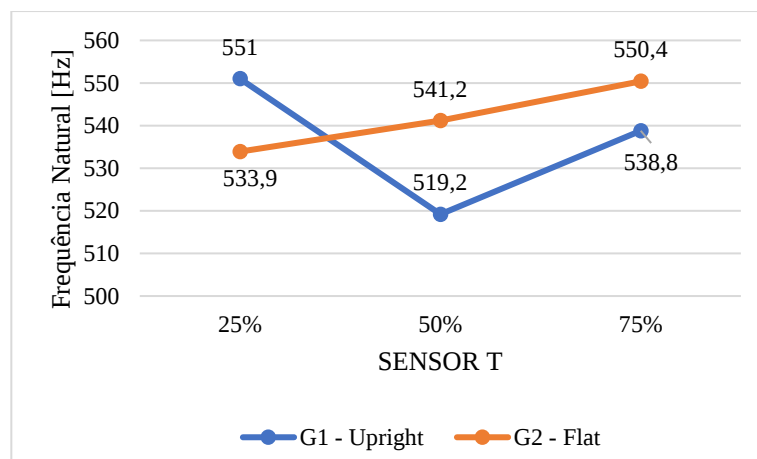


Figura 48 - Gráfico relativo ao efeito da variação da orientação de impressão nas 1ª Frequências Naturais dos Sensores T dos grupos G1 [esp. parede ext. 1,5mm; *Upright*] e G2 [esp. parede ext. 1,5mm; *Flat*]

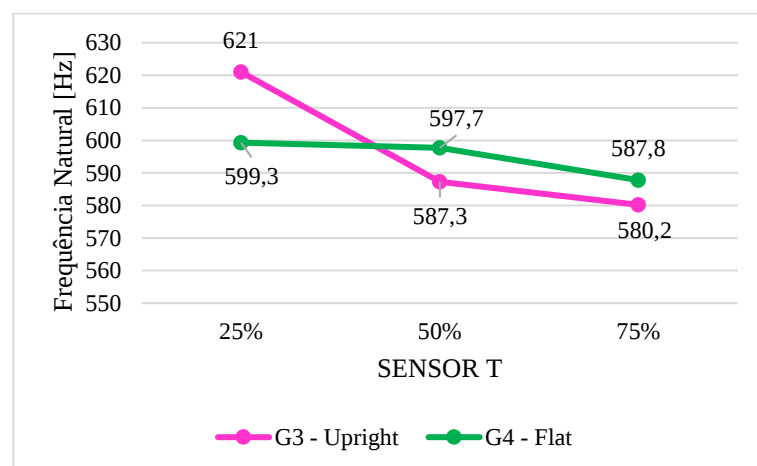


Figura 49 - Gráfico relativo ao efeito da variação da orientação de impressão nas 1ª Frequências Naturais dos Sensores T dos grupos G3 [esp. parede ext. 3,0mm; *Upright*] e G4 [esp. parede ext. 3,0mm; *Flat*]

Analisando os gráficos combinados de G1 com G2, em que a espessura de parede exterior é de 1,5 mm, e de G3 com G4, em que a espessura de parede exterior é de 3 mm, verifica-se que na impressão na direção *Flat* se verifica uma menor variação entre as frequências naturais medidas e em geral frequências maiores que a impressão na direção *Upright*. Isto já era esperado uma vez que, como mencionado na pesquisa bibliográfica, as peças impressas resistem melhor a esforços que provocam tensões paralelas às camadas das mesmas tornando-as mais rígidas. No entanto para a percentagem de *infill* de 25% não se verificou.

Para analisar o último parâmetro, a espessura da parede exterior dos Sensores T, são apresentados os gráficos conjuntos dos grupos G1 e G3 e dos grupos G2 e G4, Figura 50 e 51 respetivamente.

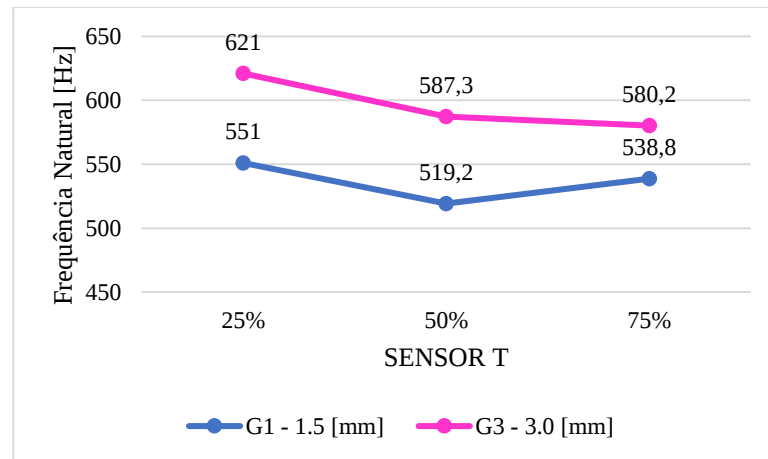


Figura 50 - Gráfico relativo ao efeito da variação da espessura da camada exterior nas 1ª Frequências Naturais dos Sensores T dos grupos G1 [esp. parede ext. 1,5mm; *Upright*] e G3 [esp. parede ext. 3,0mm; *Upright*]

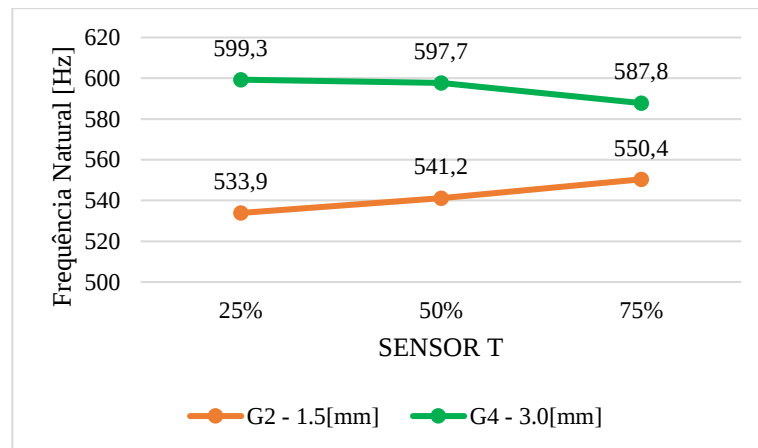


Figura 51 - Gráfico relativo ao efeito da variação da espessura da camada exterior nas 1ª Frequências Naturais dos Sensores T dos grupos G2 [esp. parede ext. 1,5mm; *Flat*] e G4 [esp. parede ext. 3.0 mm; *Flat*]

Para qualquer percentagem de *infill* e orientação de impressão, observa-se um valor da 1ª Frequência Natural superior nos Sensores T cuja espessura da parede exterior é de 3.0 mm. Isto faz parecer que o aumento da espessura de parede contribui mais para o aumento da rigidez do que para o aumento da massa, uma vez que se verificou que para qualquer percentagem de *infill* utilizada e orientação de impressão os Sensores T com uma parede exterior de 3.0 mm apresentaram um valor da 1ª Frequência natural superior aos impressos com uma parede exterior de 1.5 mm.

Analisados os gráficos anteriores para os valores da 1ª Frequência Natural obtidos para cada um dos Sensores T, foi posteriormente avaliado o valor do critério de correlação CSF obtido para as

FRFs medidas, definidas como diretas e indiretas, na gama de frequências de 0 – 1200Hz que se encontram apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - CSF para medições diretas e indiretas para cada um dos Sensores T

Sensor	CSF Direto	CSF Indireto	Média
I	0.988	0.990	0.961
II	0.881	0.956	
III	0.979	0.972	
IV	0.986	0.978	0.958
V	0.951	0.930	
VI	0.953	0.949	
VII	0.963	0.973	0.970
VIII	0.985	0.959	
IX	0.979	0.960	
X	0.946	0.945	0.959
XI	0.977	0.976	
XII	0.972	0.935	

Os resultados obtidos para o CSF foram no geral bastante satisfatórios, visto que apenas a medição direta do Sensor T - II se encontra abaixo de 0.90. A média do total dos CSF, das medições diretas e das medições indiretas, é de aproximadamente 0.96.

Observando os pares G1 com G2 e G3 com G4, pode se concluir que a orientação *Upright* (G1 e G3) apresentou os melhores resultados para o fator de correlação CSF. No entanto os Sensores T dos grupos G2 e G4 também apresentaram valores próximos de 1, o que revela que todos os Sensores T estão bem construídos, isto porque se obtiveram medidas praticamente semelhantes quer para as medições diretas quer indiretas, tal como era desejado e os valores obtidos para os fatores de correlação assim mostraram.

Observando os pares G1 com G3 e G2 com G4, pode se concluir que a espessura de parede, em concordância com a análise das Figuras 50 e 51, proporciona uma maior rigidez aos Sensores T.

Com estas correlações procurava-se perceber se o Sensor T se comportava como um corpo rígido perante a grandeza das forças aplicadas. Sendo que os acelerómetros em diferentes braços, mas nas mesmas condições, teriam de apresentar o mesmo sinal, tal é comprovado pelos valores altos de correlação.

5.2 Ensaio 2

No 2º Ensaio foram medidas no total 3 FRFs de translação, duas provenientes do Sensor T, $\alpha_{a1}(\omega)$ e $\alpha_{a2}(\omega)$, e uma de referência proveniente do 3º acelerômetro, $\alpha_{ref}(\omega)$, (secção 4.3.4). As medições obtidas em termos de aceleração foram posteriormente passadas para receptância (eqs 4.1 e 4.2). Para o Sensor T a receptância é definida por $H_{Sx}(\omega)$ sendo x o número do Sensor T, e para o acelerômetro de referência (3º acelerômetro) é apresentada como $H_{ref}(\omega)$. O objetivo deste Ensaio era verificar se a FRF de translação obtida pelo Sensor T através das medições dos acelerômetros colocados em cada um dos braços do Sensor T (eq 2.2) era semelhante à obtida através do Sensor de referência (3º acelerômetro). O ponto escolhido como ponto de medição foi o ponto correspondente ao nó número 81 da malha de elementos finitos. Na Figura 52 são apresentados os resultados obtidos para o Sensor T - I e as figuras referentes aos restantes Sensores T encontram-se no Anexo IV.

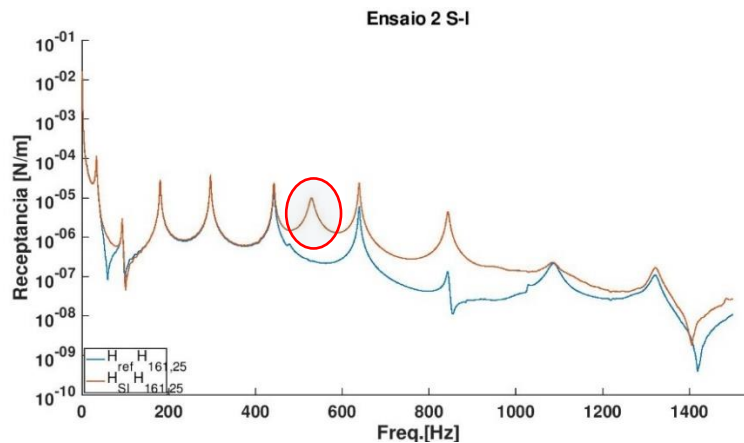


Figura 52 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - I e da FRF-T de referência

Analisando o gráfico da Figura 52 e os gráficos apresentados no Anexo IV é possível observar o efeito da 1ª Frequência Natural de cada Sensor T na FRF obtida através deste, uma vez que na gama de frequências de 450-600 Hz se observa uma 6ª Frequência Natural (curva a vermelho), próxima do valor obtido para a 1ª Frequência Natural do Sensor T, não sendo igual porque agora o Sensor T está acoplado à viga e não ao bloco rígido como se verificou no Ensaio 1 e portanto as condições de acoplamento não são totalmente iguais. Nas FRFs obtidas a partir do acelerômetro de referência é também possível observar o efeito da presença do Sensor T acoplado à viga, embora com uma expressão bastante mais reduzida (ver Anexo IV).

Na Tabela 23 é possível comparar a 1ª Frequência Natural obtida para cada um dos Sensores T para o Ensaio 1 (Sensor T acoplado ao bloco rígido), ω_{n1} , com a obtida no Ensaio 2 (Sensor T acoplado à viga no nó correspondente ao nó 81 da malha de EF), ω_{n2} .

Tabela 23 - Frequências Naturais obtidas de cada Sensor T para o Ensaio 1 e 2

Sensor	ω_{n1} [Hz]	ω_{n2} [Hz]
I	551	529
II	519.2	495
III	538.8	500
IV	533.9	502
V	541.2	511
VI	550.4	513
VII	621	561
VIII	587.3	535
IX	580.2	525
X	599.3	550
XI	597.7	543
XII	587.8	534

Observando o valor da 1ª Frequência Natural de cada Sensor T registadas no Ensaio 2 e comparando com o obtido no Ensaio 1, é possível constatar uma descida desta em todos os Sensores T. No entanto mantem-se o mesmo gradiente de Frequências Naturais que o registado no Ensaio 1, isto é, quando a variação da 1ª Frequência Natural de um Sensor T para o seguinte é positiva no Ensaio 1, esta é positiva no Ensaio 2, assim como para as variações negativas.

Um dos motivos para a diminuição da 1ª Frequência Natural de todos os Sensores T verificada no Ensaio 2 pode dever-se ao facto de agora o Sensor T estar acoplado à viga que tem uma dinâmica própria e não ao bloco rígido prensado na prensa Hidráulica, portanto as condições de acoplamento não são exatamente iguais.

Os resultados obtidos utilizando os critérios de correlação CSF para cada Sensor T para a gama de $0 - \omega_n$ [Hz] e de $0 - 1200$ [Hz] são apresentados na Tabela 24. Dado que se verificaram novos valores para a 1ª Frequência Natural dos Sensores T, a gama de frequência de $0 - \omega_n$ [Hz] utilizada terá em conta as Frequências Naturais registadas neste Ensaio, ou seja, ω_{n2} .

Tabela 24 – Valor do fator de correlação CSF para cada um dos Sensores T para ambas as gamas de frequência.

Sensor	CSF ω_{n2}	CSF 1200Hz
I	0.894	0.649
II	0.889	0.640
III	0.887	0.645
IV	0.857	0.669
V	0.844	0.642
VI	0.850	0.650
VII	0.824	0.636
VIII	0.862	0.635
IX	0.872	0.651
X	0.831	0.649
XI	0.881	0.644
XII	0.851	0.655
Média	0.812	0.647

Analisando os dados da Tabela 24 fica clara a diferença obtida entre os valores do fator de correlação CSF na gama de frequência de $0 - \omega_{n2}$ Hz e os valores obtidos para a gama de $0 - 1200$ Hz.

Observa-se que o valor de CSF obtido para a primeira gama de frequências estudada ($0 - \omega_{n2}$ Hz) em todos os sensores T apresenta valores de correlação superiores, querendo isto dizer que existe uma similaridade maior entre a FRF obtida com o Sensor T e o acelerómetro de referência, na primeira gama de frequências em análise do que na segunda gama ($0 - 1200$ Hz), tais valores já eram esperados uma vez que observando o gráfico Figura 52 (Sensor T-I) se observa que as duas curvas deixam de estar sobrepostas na gama de frequências mais alta (Anexo IV restantes Sensores T)

5.3 Ensaio 3

Neste Ensaio obtiveram-se 2 FRFs que foram utilizadas para deduzir a FRF de rotação pretendida (eq. 2.3), no ponto referente ao nó 81 da malha de EF. Após a dedução da FRF de rotação, com o Sensor T, H_{Sx} onde x indica o número do Sensor T, esta é representadas em 2 gráficos, um que a compara a H_{FEM} , receptância de rotação correspondente ao nó 81 da mesma malha proveniente do modelo de EF que não considera a massa do Sensor T, e o segundo compara-a a H_{FEMT} ,

receptância de rotação correspondente ao nó 81 da mesma malha proveniente do modelo de EF que considera a massa do Sensor T. A Figura 53 e 54 representam respectivamente os gráficos anteriormente descritos, os restantes gráficos são apresentados no Anexo V.

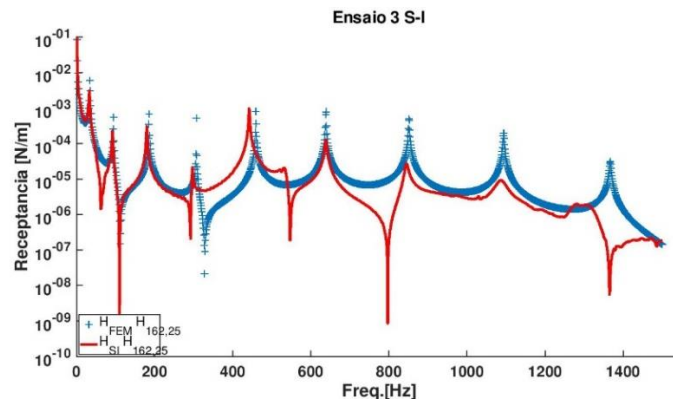


Figura 53 - Gráfico da FRF-R deduzida de SI e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T - I

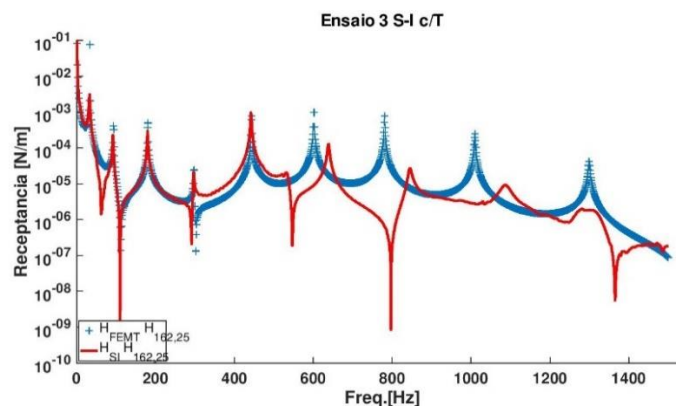


Figura 54 - Gráfico da FRF-R deduzida de SI e FRF-R do FEM considerando a massa do Sensor T - I

É possível observar nos gráficos deste Ensaio que, à semelhança dos gráficos apresentados referentes ao Ensaio 2, a 1ª Frequência Natural dos Sensores T tem efeito na receptância de rotação obtida através dos mesmos. Foram verificadas as Frequências Naturais registadas na FRF medida de cada Sensor T e percebeu-se que não só diferem das Frequências Naturais registadas no Ensaio 1, como algumas também diferem das registadas no Ensaio 2. Uma vez que no Ensaio 2 se tinham verificado Frequências Naturais diferentes do que as verificadas no Ensaio 1, seria de esperar que as Frequências verificadas no Ensaio 3 fossem diferentes do Ensaio 1, mas idênticas às do Ensaio 2. Os valores para as Frequências Naturais registadas neste Ensaio, ω_{n3} , são apresentadas na Tabela 25, assim como os valores de ω_{n1} e ω_{n2} .

Tabela 25 - Frequências Naturais dos Sensores T para cada Ensaio.

Sensor	ω_{n1} [Hz]	ω_{n2} [Hz]	ω_{n3} [Hz]
I	551	529	547
II	519.2	495	490
III	538.8	500	489
IV	533.9	502	497
V	541.2	511	512
VI	550.4	513	513
VII	621	561	571
VIII	587.3	535	547
IX	580.2	525	523
X	599.3	550	534
XI	597.7	543	536
XII	587.8	534	535

Analisando os valores da Tabela 23 podemos observar que as Frequências Naturais, ω_{n3} , obtidas para os Sensores T - V, VI, IX e XII no Ensaio 3 são idênticas às Frequências Naturais, ω_{n2} , dos Sensores T obtidas no Ensaio 2, como era de esperar. No entanto a variação que se verificou nas Frequências Naturais do Ensaio 1, ω_{n1} , e do Ensaio 2, ω_{n2} não se manteve neste Ensaio. Isto é, apesar de existir uma variação de Frequência Natural medida de Sensor T para Sensor T idêntica nos Ensaios 1 e 2, no Ensaio 3 tal não se verificou.

Os resultados obtidos para os critérios de correlação CSF correspondentes a cada Sensor T para a gama de $0 - \omega_n$ [Hz] e de $0 - 1200$ [Hz] são apresentados na Tabela 24. Dado que se verificaram novos valores para as Frequências Naturais dos Sensores T neste Ensaio, a gama de frequência de $0 - \omega_n$ [Hz] utilizada terá em conta as Frequências Naturais registadas neste Ensaio, ou seja, ω_{n3} .

Tabela 26 - CSF para o Ensaio 3

Sensor	FEM (sem massa Sensor)				FEM (com a massa do Sensor)			
	CSF (ω_{n3})	Média	CSF 1200Hz	Média	CSF (ω_{n3})	Média	CSF 1200Hz	Média
I	0.713	0.70	0.712	0.7	0.837	0.846	0.726	0.69
II	0.70		0.712		0.844		0.673	
III	0.685		0.675		0.856		0.68	
IV	0.719	0.71	0.692	0.68	0.844	0.849	0.736	0.71
V	0.682		0.639		0.804		0.685	
VI	0.727		0.72		0.898		0.70	
VII	0.762	0.735	0.702	0.70	0.891	0.889	0.721	0.70
VIII	0.719		0.691		0.886		0.689	
IX	0.723		0.715		0.891		0.696	
X	0.751	0.756	0.737	0.72	0.873	0.878	0.71	0.70
XI	0.737		.717		0.889		0.698	
XII	0.780		0.717		0.873		0.684	

Observando os gráficos compilados é possível observar um comportamento diferente da FRF deduzida antes e depois da 1ª Frequência Natural, ω_{n3} . Antes da 1ª Frequência Natural a FRF deduzida parece assemelhar-se mais com a FRF proveniente do FEM que considera a massa do Sensor T (ver Figura 47 e Anexo VI), no entanto para frequências superiores a FRF deduzida assemelha-se mais à FRF proveniente do FEM que não considera a massa do Sensor T (ver Figura 46 e Anexo V). Pode ainda observar-se que na situação em que não é contabilizado o efeito da massa do Sensor T no modelo de EF as Frequências Naturais da curva calculada pelo Sensor T apresentam uma melhor concordância nos picos correspondentes às das Frequências Naturais do modelo.

Através da Tabela 24 podemos constatar que para a gama de $0 - \omega_{n3} \text{ Hz}$ os valores obtidos para o fator de correlação CSF foram superiores na situação em que no modelo de EF foi tida em conta a massa do Sensor T, facto este que confirma o referido anteriormente.

Os Sensores T que permitiram os resultados mais parecidos com os obtidos através do modelo de EF que não considera a massa do Sensor T foram os Sensores T - III, IV, VI, VII, VIII, IX, X, XI e XII. No entanto nenhum Sensor T conseguiu o propósito pretendido que era medir corretamente a FRF de rotação.

Página em branco.

6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

O objetivo desta dissertação era a caracterização dinâmica de Sensores T e a medição de rotações. Para atingir o objetivo foram realizados diferentes Ensaio com o intuito de avaliar diferentes aspectos relativos aos Sensores T impressos.

Perante os resultados obtidos no Ensaio 1 foi possível perceber que não existiu um desenvolvimento coerente das Frequências Naturais obtidas face à variação de parâmetros. Os resultados são até contraditórios, exceto quanto ao parâmetro de espessura de camada exterior que de uma maneira geral proporcionou uma maior rigidez aos Sensores T.

Face à elevada correlação verificada quer para as medições diretas quer para as indiretas em todos os Sensores T. Mostrando que os Sensores T apresentam o comportamento esperado e assim sendo que se encontram bem construídos, para a gama de frequências estudada (0 a 1200Hz).

Os resultados obtidos com o Ensaio 2 apresentam bons valores de correlação entre a FRF de translação de referência e a FRF de translação obtida através do Sensor T para a gama de frequências de 0 até à Frequência Natural ω_{n2} do correspondente Sensor T, não se verificando o mesmo para frequências superiores a esta.

No Ensaio 3, onde se tinha como objetivo obter a FRF de rotação com cada um dos Sensores T, verificou-se que a melhor correlação entre a FRF de rotação determinada com o Sensor T e a

determinada utilizando o modelo de EF só se verificava também para a gama que vai de 0 Hz até à vizinhança da 1ª Frequência Natural do Sensor T. Pode-se então concluir que estes Sensores T apresentam uma gama de frequência útil de 0 a 400-450Hz.

6.2 Trabalhos Futuros

Sendo que nesta dissertação não foram avaliados todos os parâmetros, seria interessante continuar a explorá-los, como por exemplo utilizar diferentes padrões de *infill* assim como uma orientação de impressão de 45° e/ou 55°, ou até mesmo variar as velocidades de impressão.

Face à inconsistência de resultados apresentados, seria oportuno realizar estes Ensaios imprimindo vários Sensores T com os mesmos parâmetros de forma a avaliar a variação de propriedades dinâmicas dos Sensores T, teoricamente iguais.

Outro trabalho futuro seria a otimização topológica ao bloco T de forma a aumentar a sua rigidez e poder obter uma 1ª Frequência Natural superior à obtida nesta dissertação.

Também terá interesse realizar este estudo e utilizar o Sensor T de alumínio, já comprovado, de forma a comparar as limitações de ambos.

Referências Bibliográficas

- [1] – R. Cook, D. Malkus, M. Plesha, e R. Witt, 2001, Concepts and Applications of Finite Element Analysis. University of Wisconsin - Madison.
- [2] – N. M. M. Maia, J. M. M. Silva, J. He, N. A. J. Lieven, R. M. Lin, G. W. Skingle, W. To, and A. P. V. Urgueira, 1997, Theoretical and Experimental Modal Analysis, 1st ed. Research Studies Press LTD.
- [3] - P. G. Coelho e J. B. Cardoso, 2012, Métodos Computacionais Em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- [4] - N. M. M. Maia, A. P. V. Urgueira and R. A. B. Almeida and T. A. N. Silva. Response Modeling, Handbook of Experimental Structural Dynamics, Ed R.Allemang, Peter Avitabile, (Springer-Verlag New York) ISBN 978-1-4614-4546-3.
- [5] – J. E. Smith, 1969, Shock and Vibration Bulletin 40, 51-84, “Measurment of the total strutral mobility matrixes”.
- [6] - D. J. Ewins and M. G. Sainsbury, 1972, Shock and Vibration Bulletin 42, 105-122. “Mobility measurments for the vibration analysis of connected strutures”.
- [7] – T. Gialamas, D. Tsahalis, L. Bregant, D. Otte, H. Vander Auweraer, 1996, “Substructuring by means of FRFs:Some Investigations on the Significance of RotationalDofs”, Proc. 14th IMAC, Dearborn (MI), 612-625.
- [8] – Urgueira A.P.V., 1989 “Dynamic analysis of coupled structures using experimental data”, Ph.D. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- [9] – G. W. Skingle, 1989, “Structural dynamic modification using experimental data”, Ph. D. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- [10] – M. L. M. Duarte, D. J. Ewins, 1995, “Some insights into de importance of rotational degrees-of-freedom and residual terms in couples structure analysis”, Proceedings of the 13th IMAC.
- [11] – M. L. M. Duarte, D. J. Ewins, 2000, “Rotational degrees of freedom for structural coupling analysis via finite-difference technique with residual compensation”, Mechanical Systems and Signal Processing 14(2), 205-227.

- [12] – M. L. M. Duarte, D. J. Ewins, 1997, “Mass-residual approach for the compensation of high frequency residual terms”, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- [13] - Mottershead, J. E., Kyprianou, A., & Ouyang, H., 2005, Structural modification. Part 1: rotational receptances. *Journal of Sound and Vibration*, 284(1-2), 249–265.
- [14] - O’Callahan, J. C., Chou, C.-M., & Avitabile, P., 1984, “Study of a Local Eigenvalue Modification Procedure using a Generalized Beam Element.”, American Control Conference.
- [15] - Cafeo, J. A., Trethewey, M. W., & Sommer, H. J., 1995, “Beam Element Structural Dynamics Modification Using Experimental Modal Rotational Data”, *Journal of Vibration and Acoustics*, 117(3A), 265.
- [16] – Cafeo, J. A., Trethewey, M. W., & Sommer, H. J., 1992, “Measurement and application of experimental rotational degrees of freedom for mode shape refinement”, *The International journal of analytical and experimental modal analysis*, 7(4), 255-269
- [17] - C. Yasuda, P. J. Tiehle, D. L. Brown, 1984, “An estimation method for rotational degrees of freedom using a mass additive technique”, 2nd IMAC, Orlando, USA.
- [18] – S. Helderweirt, H. V. der Auweraer, P. Mas, L. Bregant, D. Casagrande, 2001, “Application of accelerometer-based rotational degree of freedom measurements for engine subframe modelling”, *IMAC*, vol. 2, 1298-1304.
- [19] – S. S. Sattinger, 1980, *Shock and Vibration Bulletin* 50 Part 2, 17-27, “A method for experimentally determining rotational mobilities of structures”.
- [20] – M. L. M. Duarte, 1996, “Experimentally-derived structural models for use in further dynamic”, Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- [21] – Z. Liu, X. Song, Y. Zhao, L. Cai, H. Guo, J. Ma, 2013, “Stiffness identification of spindle-toolholder joint based on finite difference technique and residual compensation theory”, *Advances in Mechanical Engineering*, Hindawi Publishing Corporation.
- [22] – Y. Yeh and H. Z. Cummins, 1964, “Localized fluid flow measurements with a HeNe laser spectrometer”, *Appl. Phys. Lett.*, vol.4, no.10, 176-178.
- [23] – Q. V. Davis and W. K. Kulczyk, 1969, “Vibration of turbine blades measured by means of a laser”, *Nature*, vol.222, 208-209.
- [24] – W. K. Kulczyk and Q. V. Davis, 1973, “Laser doppler instrument for measurement of vibration of moving turbine blades”, *Proc. Inst. Electr. Eng.*, no. 9, 1017-1023.

- [25] - Tabatabai, H., Oliver, D.E., Rohrbaugh, J.W., Papadopoulos, C., 2013, “Novel Applications of Laser Doppler Vibration Measurements to Medical Imaging. Sens Imaging” 14, 13–28
- [26] – D. Oliver, 1988, “Non-contact vibration imager for wide range of component sizes and displacement amplitudes”, IMAC VI, 629-638.
- [27] – M. Bello, F. La Gala, W. D. Ambrogio, and A. Sestieri, 2000, “Dynamic rotation estimates using low cost PZT’s”, ISMA25 Conference.
- [28] - Cicogna, T.R. & Varoto, Paulo & Trindade, Marcelo, 2008, “Angular FRF assessment using piezoceramic bimorphs applied to beams and isotropic plates”, 23rd International Conference on Noise and Vibration Engineering, ISMA 2008, 3, 1447-1462.
- [29] – L. Ivarsson and M. A. Sanderson, 2000, “Design, theory and validation of a Low Mass 6-d.o.f. Transducer”, J Sound Vib., vol 230, 661-688.
- [30] – D. H. Wang and G. yuan, 2011, “A six-degree-of-freedom acceleration sensing method based on six coplanar single-axis accelerometers”, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 60, no. 4, 1433-1442.
- [31] - Di Maio, D., & Copertaro, E., 2013, “Experimental validation of a newly designed 6 degrees of freedom scanning laser head: Application to three-dimensional beam structure”, Review of Scientific Instruments, 84(12), 121708.
- [32] - Algrain, M. C., & Saniie, J. 1991, “Estimation of 3D angular motion using gyroscopes and linear accelerometers”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 27(6), 910–920.
- [33] – S. Beskhyroun and Q. Ma, 2012, “Low-cost accelerometers for experimental modal analysis”, 15th World Conf. Earthq. Eng. Lisbon Port..
- [34] - Aw, Y.Y.; Yeoh, C.K.; Idris, M.A.; Teh, P.L.; Hamzah, K.A.; Sazali, S.A., 2018, “Effect of Printing Parameters on Tensile, Dynamic Mechanical, and Thermoelectric Properties of FDM 3D Printed CABS/ZnO Composites”, *Materials* , 11, 466.
- [35] - Galeja, Mateusz & Hejna, Aleksander & Kosmela, Paulina & Kulawik, Arkadiusz, 2020, “Static and Dynamic Mechanical Properties of 3D Printed ABS as a Function of Raster Angle”, *Materials*. 13. 297.
- [36] - Christiyan, Jaya & Chandrasekhar, U. & Karodi, Venkateswarlu, 2016, “A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 114.

- [37] - Cantrell, Jason & Rohde, Sean & Damiani, David & Gurnani, Rishi & DiSandro, Luke & Anton, Josh & Young, Andie & Jerez, Alex & Steinbach, Douglas & Kroese, Calvin & Ifju, Peter, 2017, “Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts”.
- [38] - Vukasovic, Tomás & Vivanco, Juan & Celentano, Diego & Garcia-Herrera, Claudio, 2019 “Characterization of the mechanical response of thermoplastic parts fabricated with 3D printing”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- [39] - Kovan, Volkan & Tezel, Tugce & Camurlu, Hasan & Topal, Eyüp, 2018, “Effect of printing parameters on mechanical properties of 3D printed PLA/Carbon Fiber composites.
- [40] - Seol, Kyoung-SU & Zhao, Panxi & Shin, Byoung-Chul & Zhang, Sung-Uk, 2018, “Infill Print Parameters for Mechanical Properties of 3D Printed PLA Parts”, The Korean Society of Manufacturing Process Engineers.
- [41] - Zakaria, Hazem & Khan, Shah & Sabtu, S & Ibrahim, M., 2019, “Mechanical properties of commercial PLA filament as 3D printed parts utilizing fused filament fabrication”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 670.
- [42] - Nugroho, A & Ardiansyah, Riki & Isna, Lathifa & Larasati, Intan, 2018, “Effect of layer thickness on flexural properties of PLA (PolyLactid Acid) by 3D printing”, Journal of Physics: Conference Series.
- [43] – Banjanin, B., Vladic, G., Pál, M., Balos, S., Dramicanin, M., Rackov, M., & Knezevic, I., 2018, “Consistency analysis of mechanical properties of elements produced by FDM additive manufacturing technology”. *Matéria* (Rio de Janeiro), 23(4).
- [44] - <https://www.goprint3d.co.uk/filkemp-pla-n.html> 03/09/2020
- [45] - E. Dascotte e J. Strobbe, 1999, «Updating Finite Element Models using FRF Correlation Functions», Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference - IMAC XVII, pp. 1169–1174.

Anexos

Anexo I

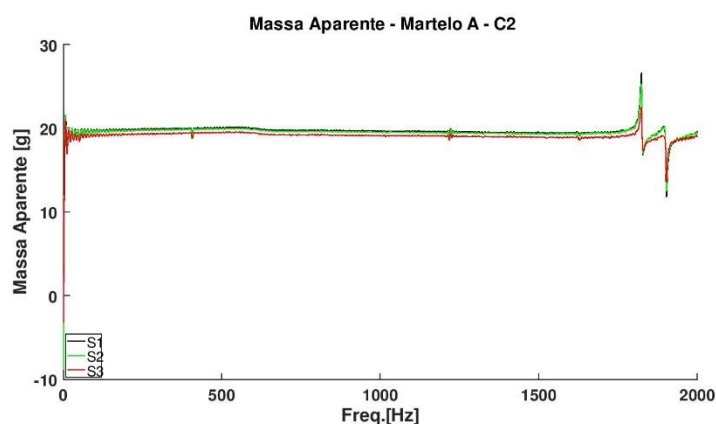


Figura 55 - Segundo gráfico da massa aparente obtida pelo par martelo (A)/acelerómetros

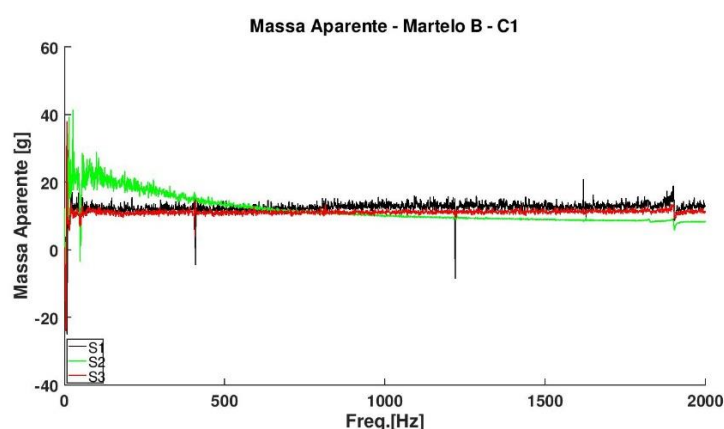


Figura 56 - Primeiro gráfico da massa aparente obtida pelo par martelo (B)/acelerómetros

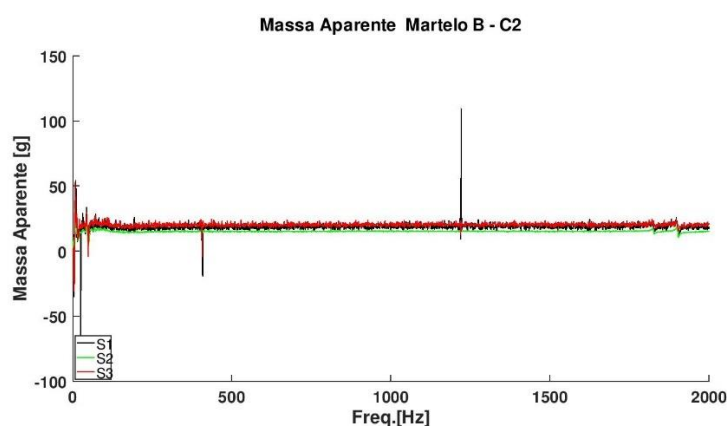


Figura 57 - Segundo gráfico da massa aparente obtida pelo par martelo (B)/acelerómetros

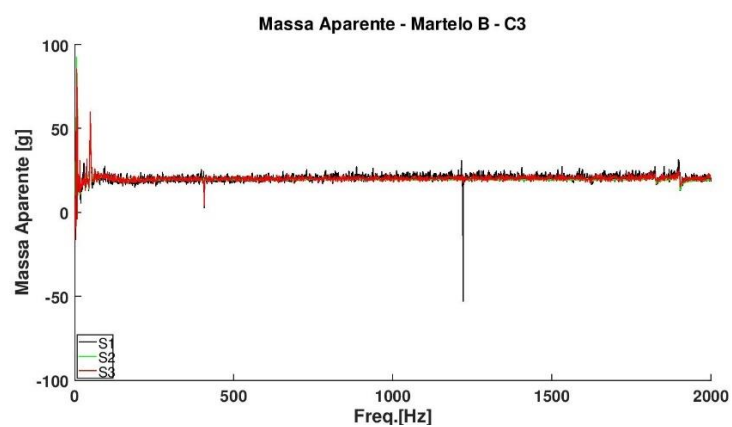


Figura 58 - Terceiro gráfico da massa aparente obtida pelo par martelo (B)/acelerómetros

Anexo II

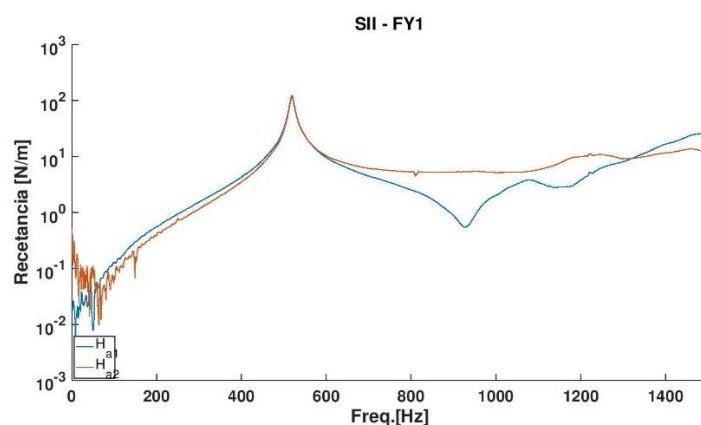


Figura 59 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - II

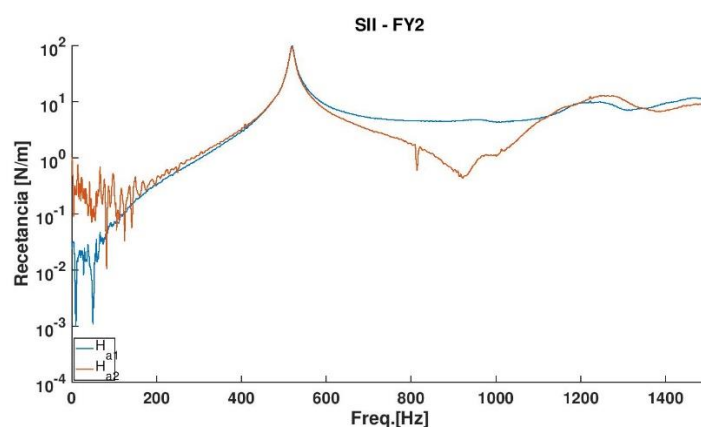


Figura 60 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - II

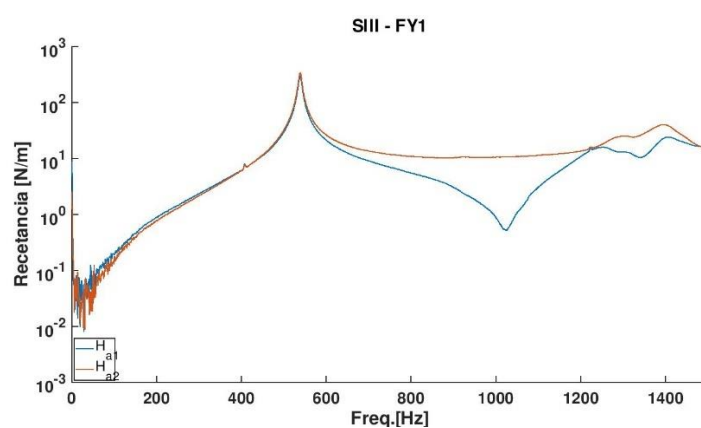


Figura 61 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - III

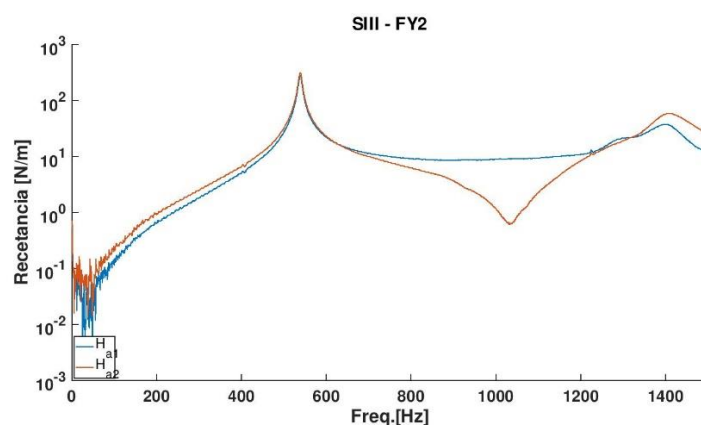


Figura 62 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - III

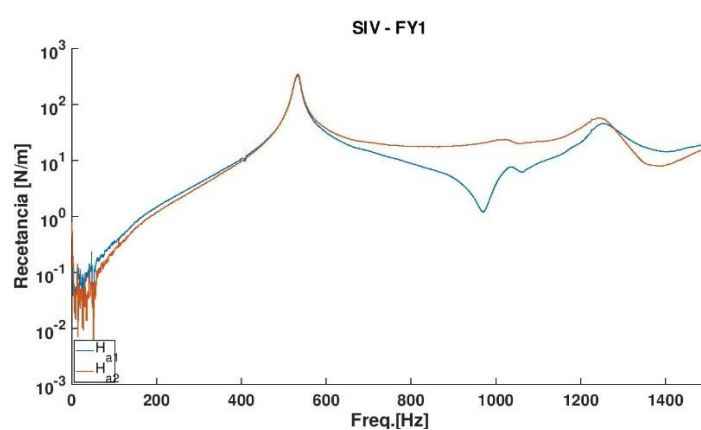


Figura 63 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - IV

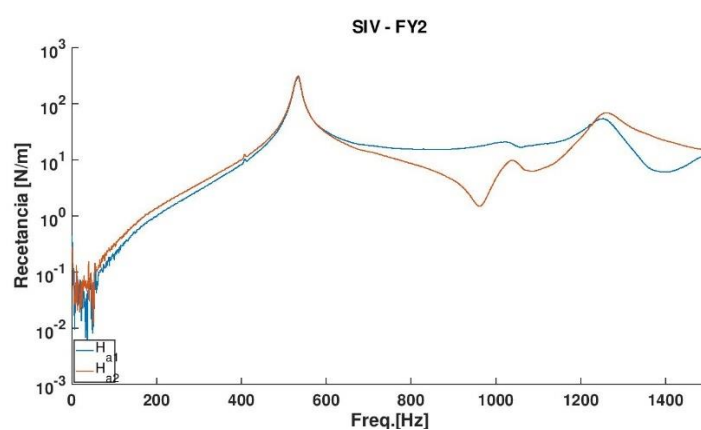


Figura 64 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - IV

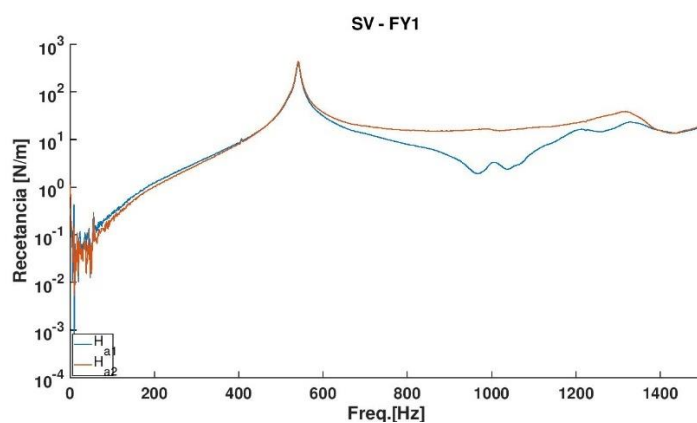


Figura 65 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - V

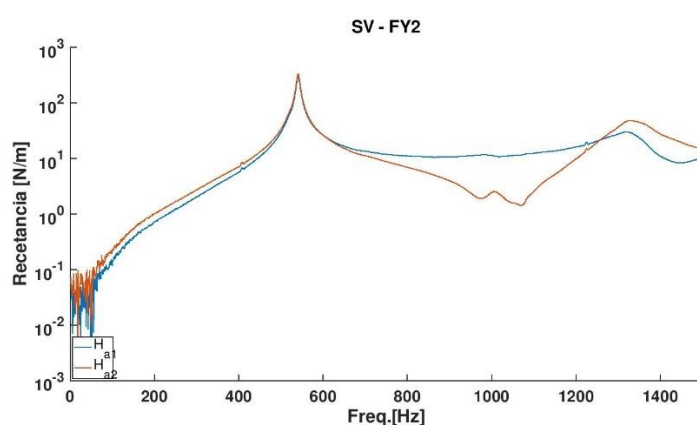


Figura 66 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - V

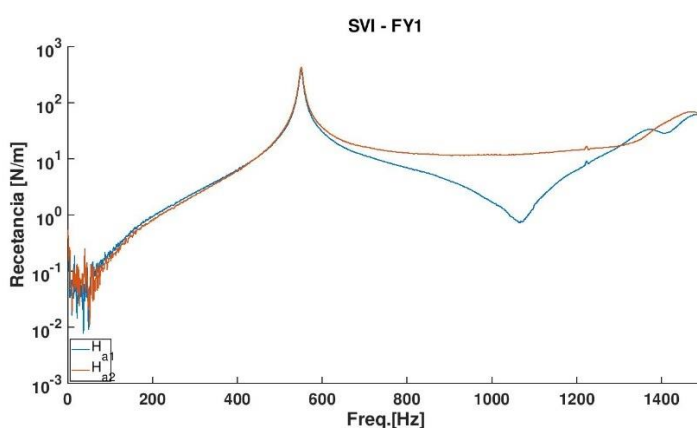


Figura 67 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - VI

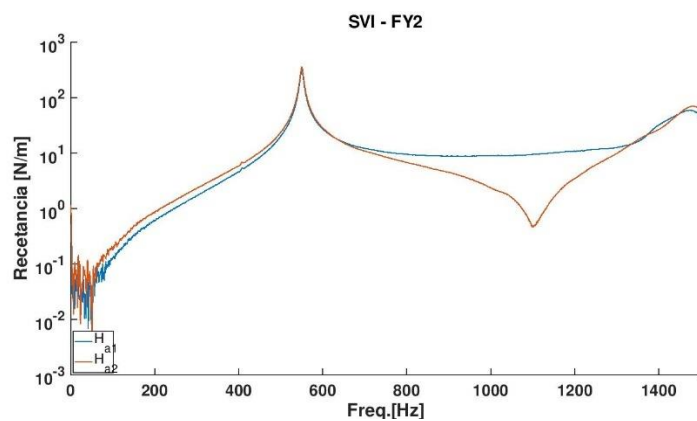


Figura 68 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - VI

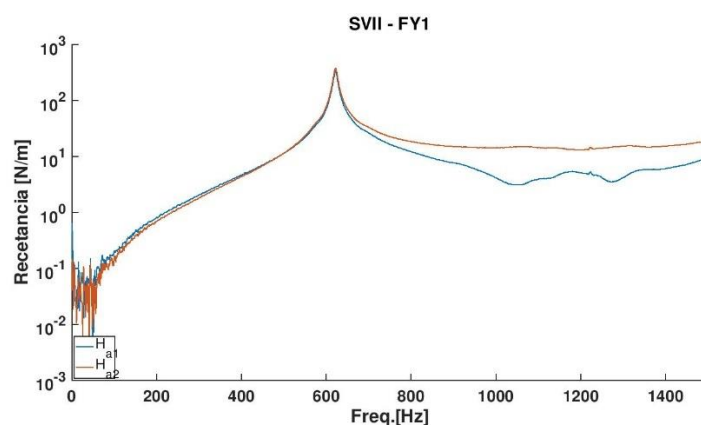


Figura 69 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - VII

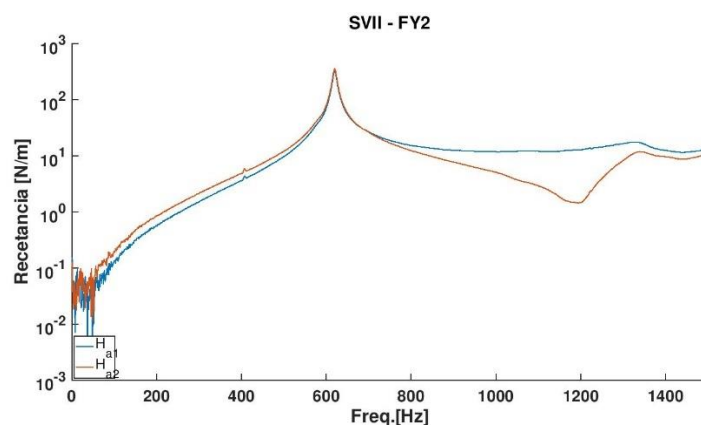


Figura 70 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - VII

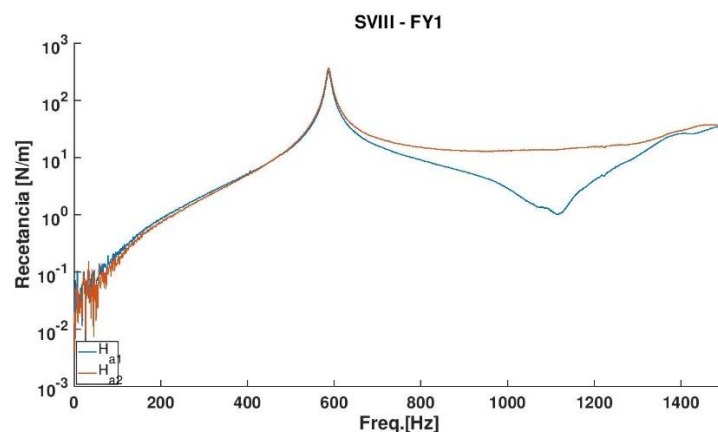


Figura 71 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - VIII

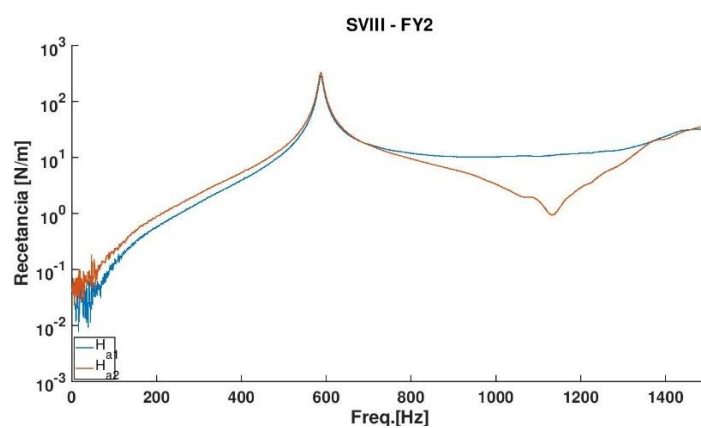


Figura 72 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - VIII

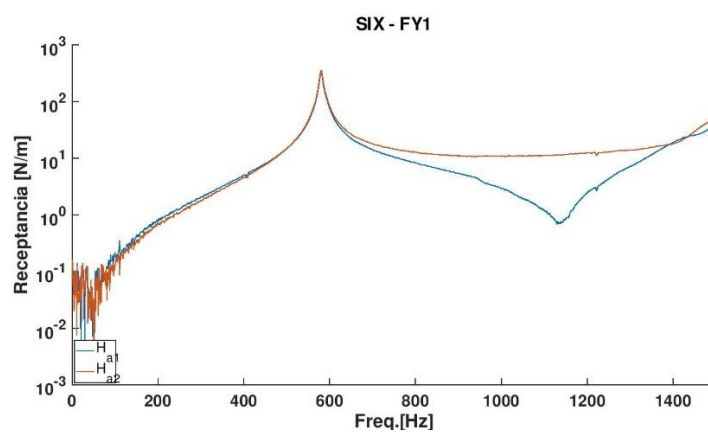


Figura 73 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - IX

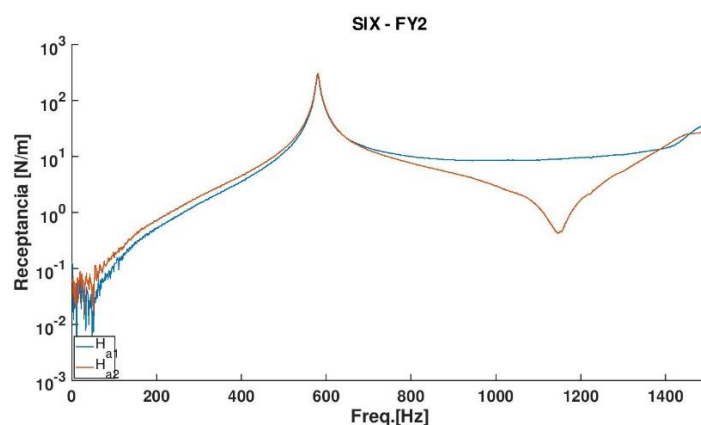


Figura 74 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - IX

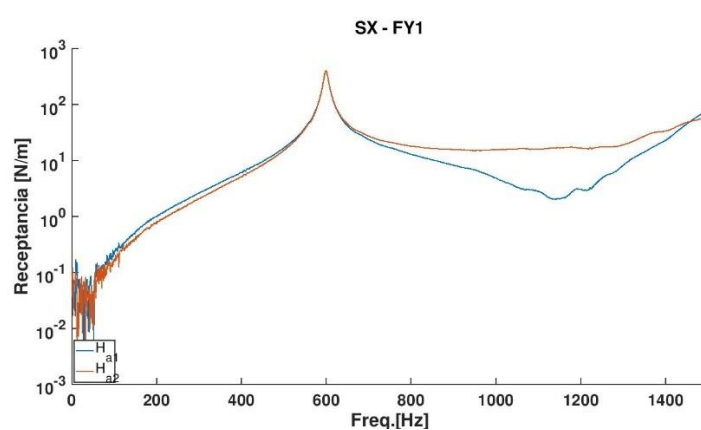


Figura 75 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - X

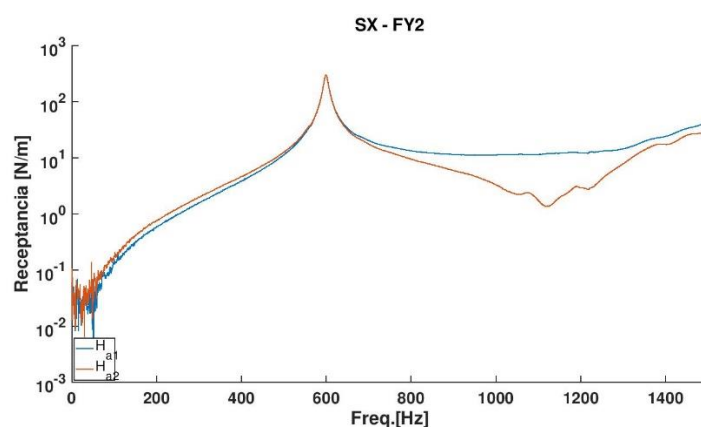


Figura 76 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - X

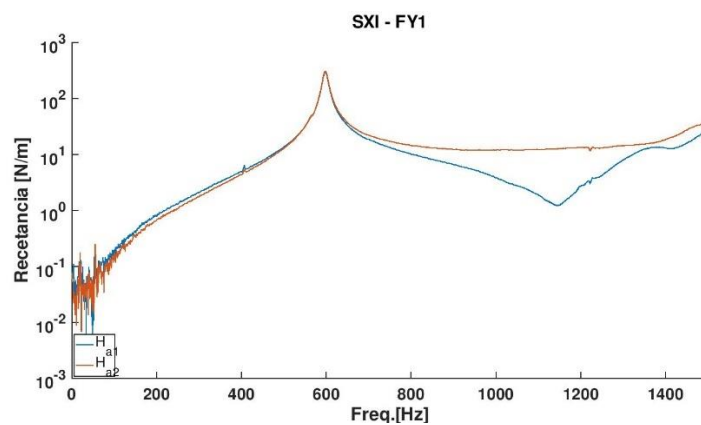


Figura 77 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - XI

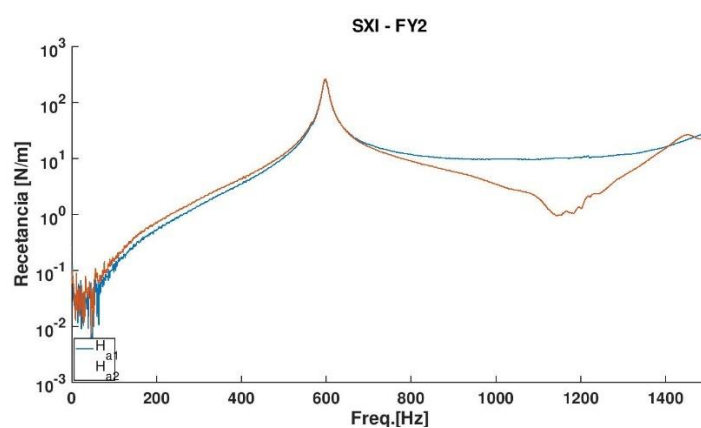


Figura 78 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - XI

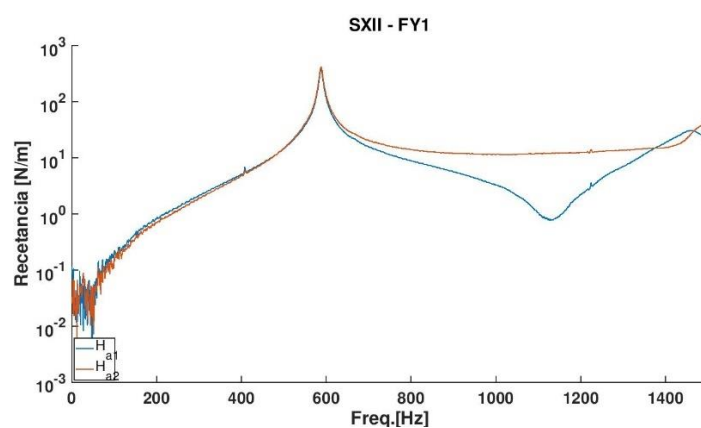


Figura 79 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY1 do Sensor T - XII

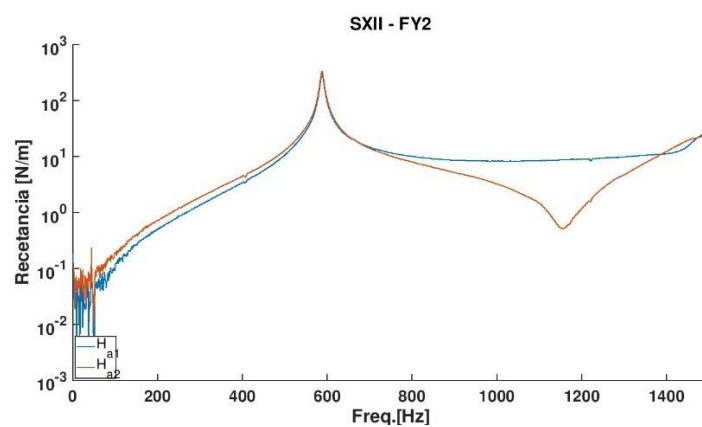


Figura 80 - Gráfico de FRF-T captadas para a força FY2 do Sensor T - XII

Anexo III

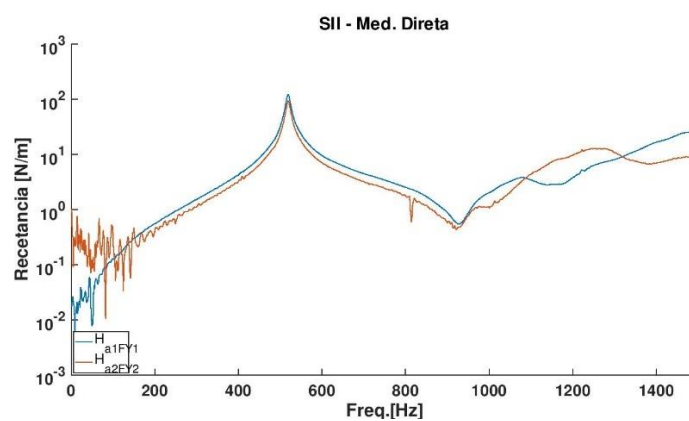


Figura 81 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - II

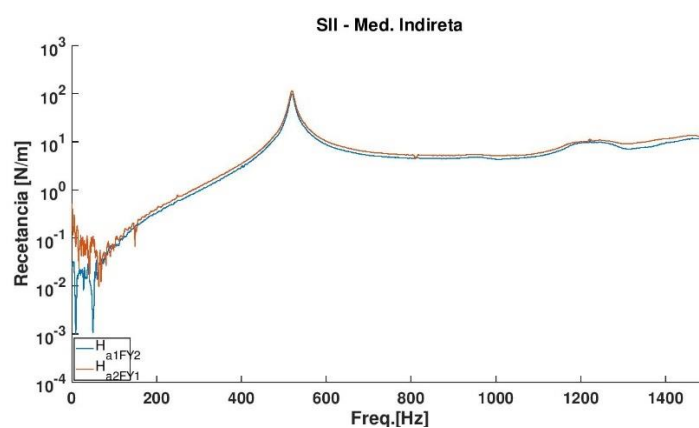


Figura 82 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - II

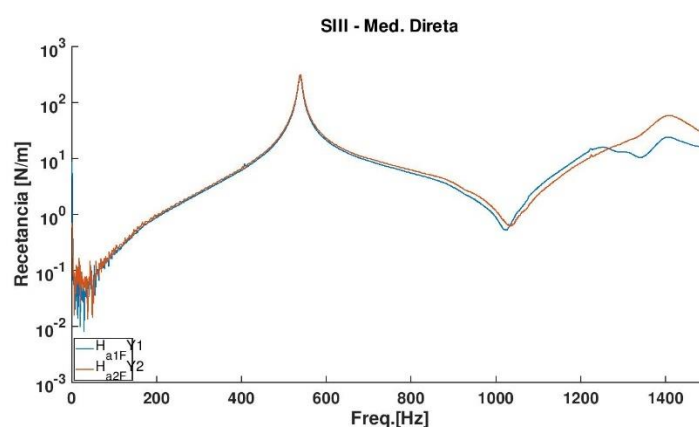


Figura 83 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - III

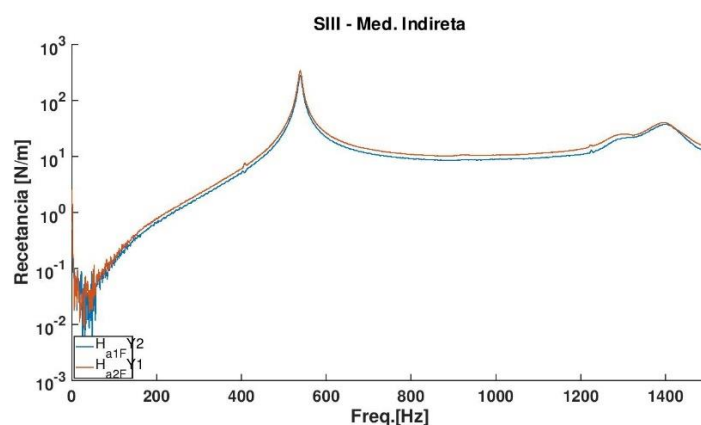


Figura 84 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - III

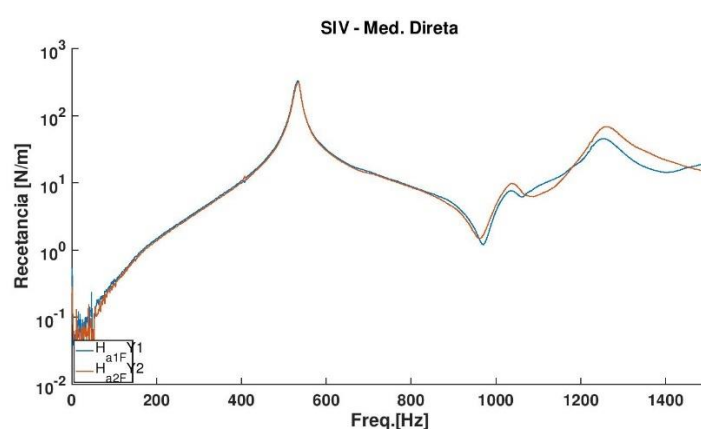


Figura 85 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - IV

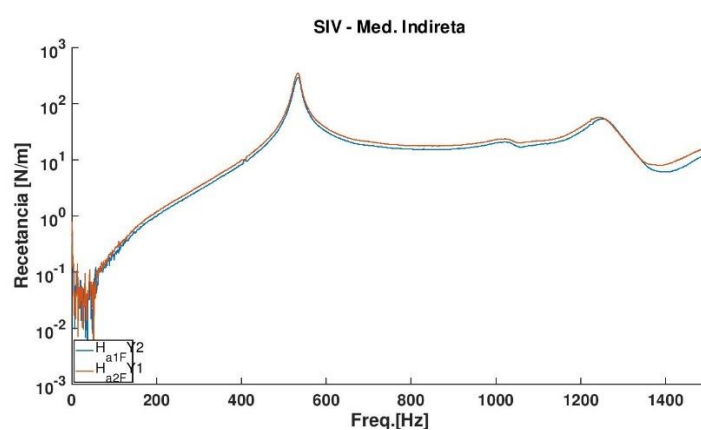


Figura 86 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - IV

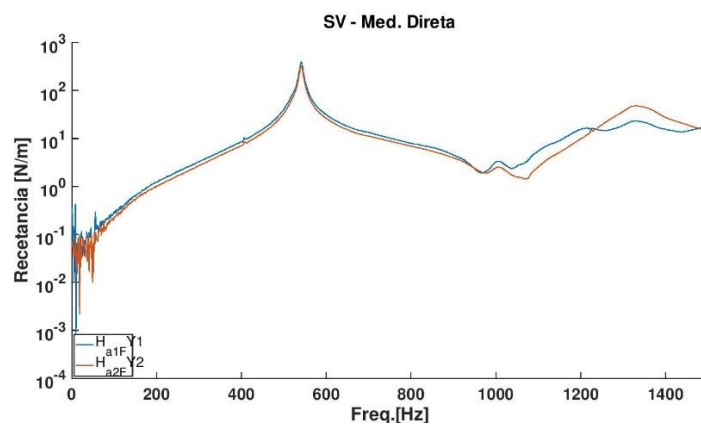


Figura 87 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - V

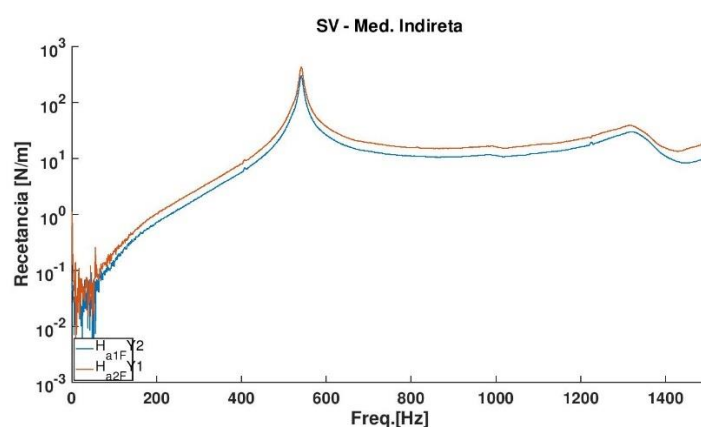


Figura 88 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - V

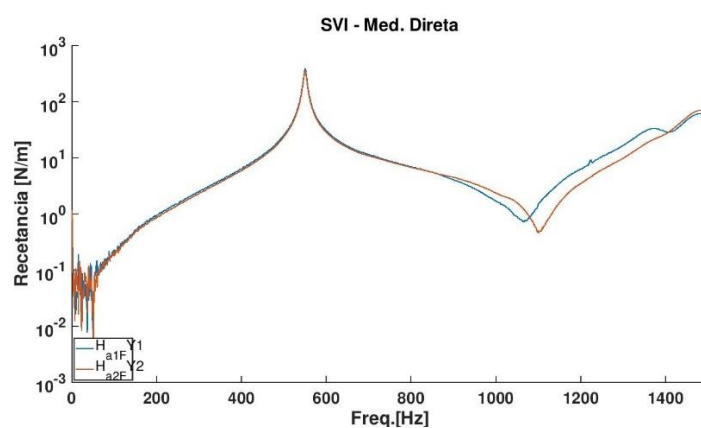


Figura 89 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - VI

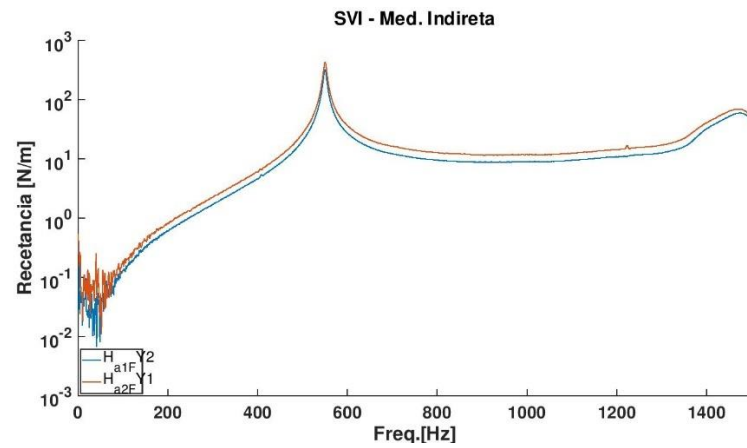


Figura 90 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - VI

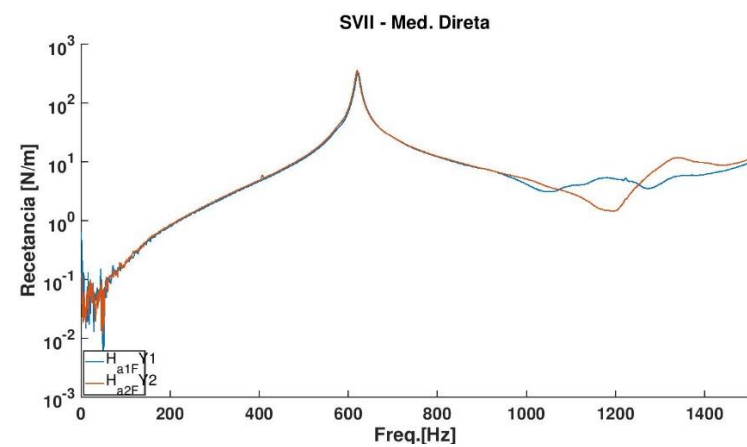


Figura 91 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - VII

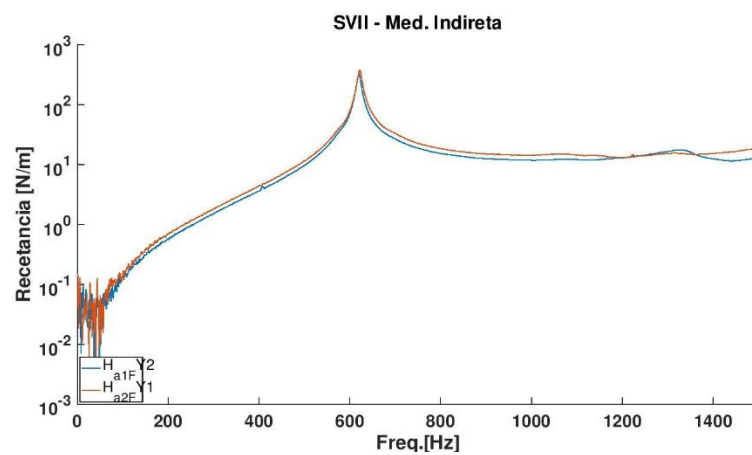


Figura 92 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - VII

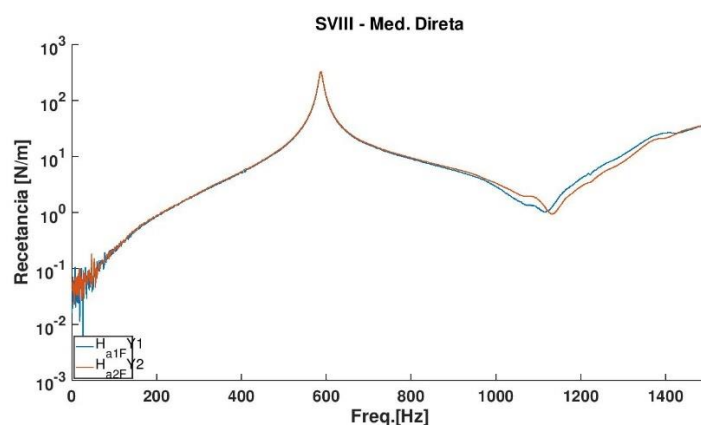


Figura 93 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - VIII

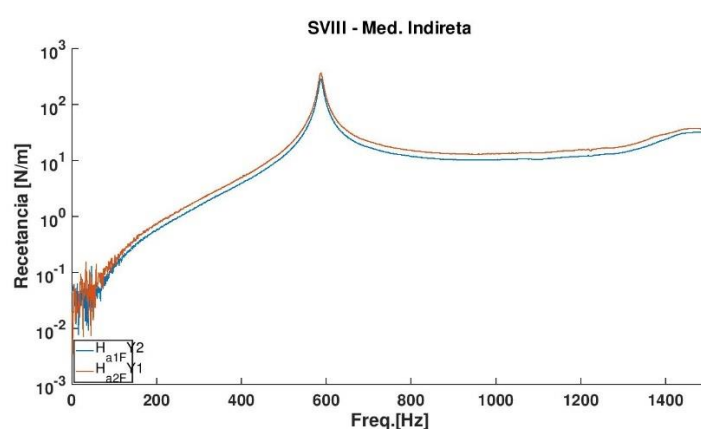


Figura 94 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - VIII

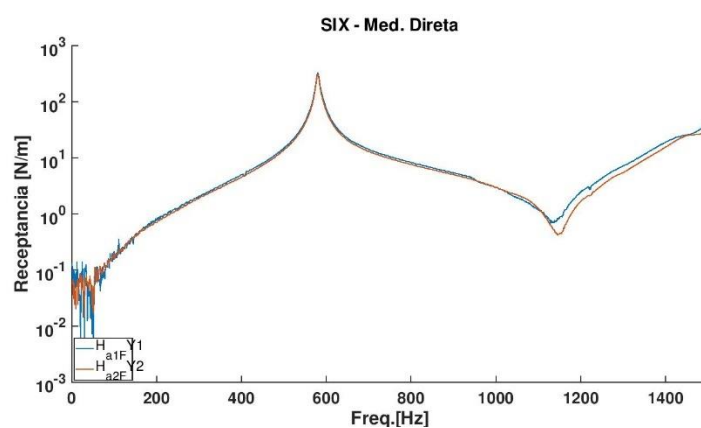


Figura 95 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - IX

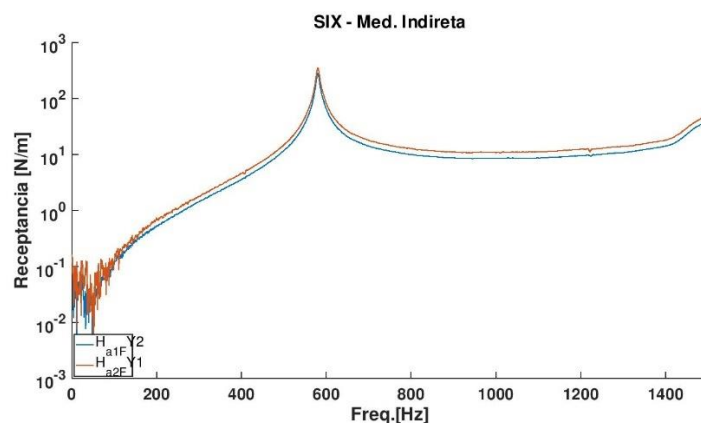


Figura 96 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - IX

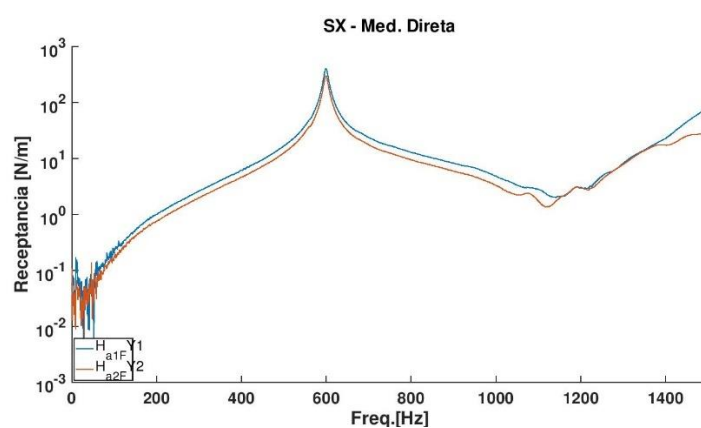


Figura 97 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - X

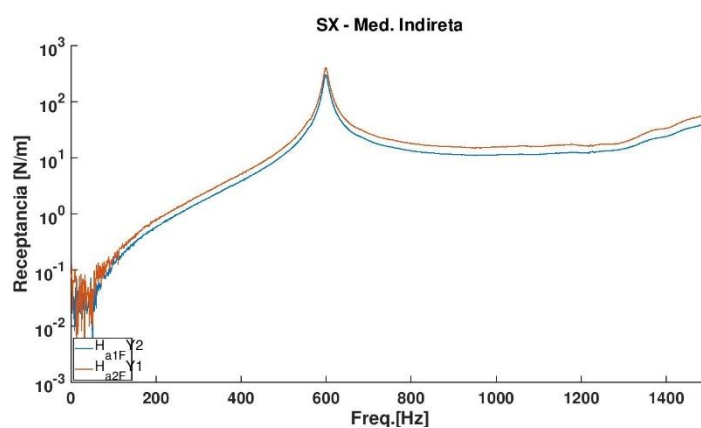


Figura 98 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - X

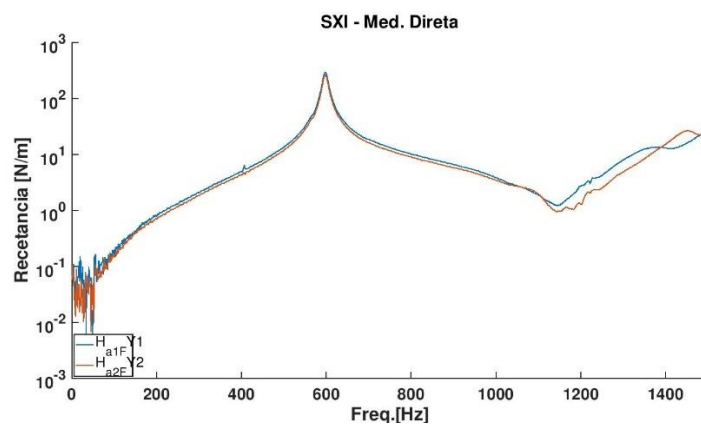


Figura 99 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - XI

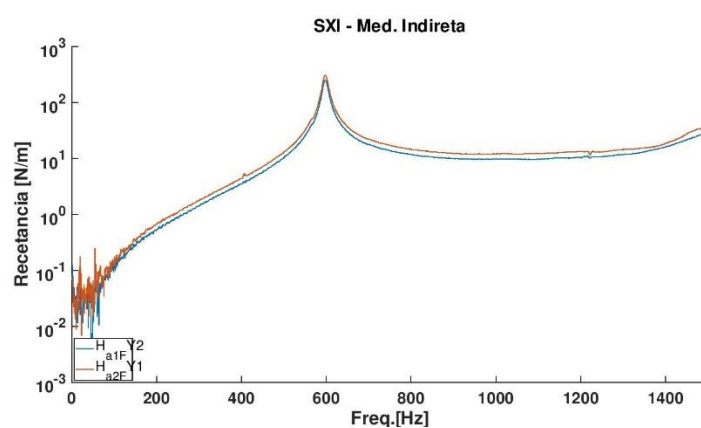


Figura 100 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - XI

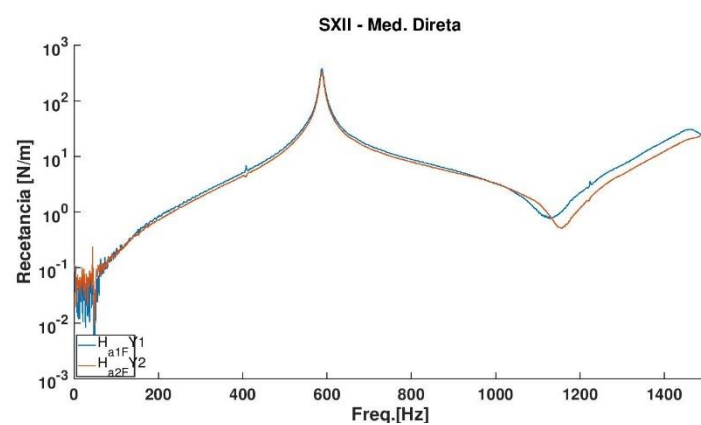


Figura 101 - Gráfico de FRF-T Diretas – Sensor T - XII

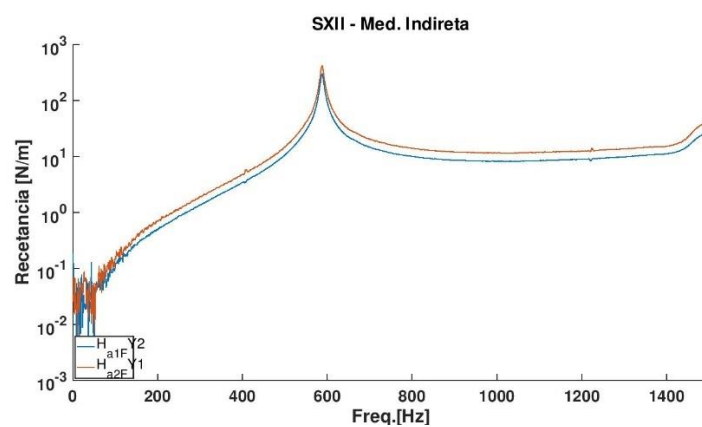


Figura 102 - Gráfico de FRF-T Indiretas – Sensor T - XII

Anexo IV

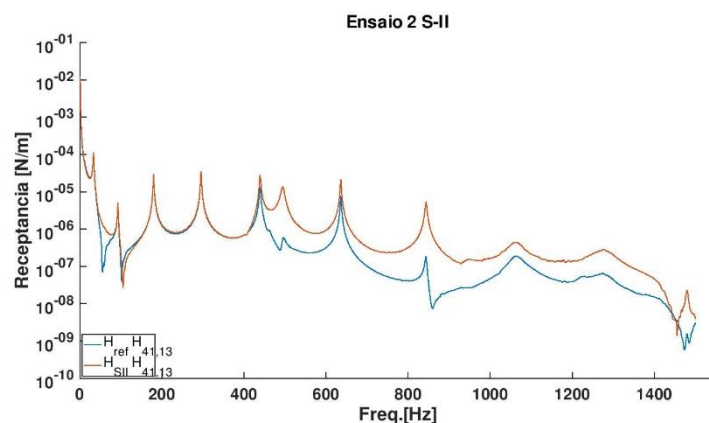


Figura 103 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - II e da FRF-T de referência

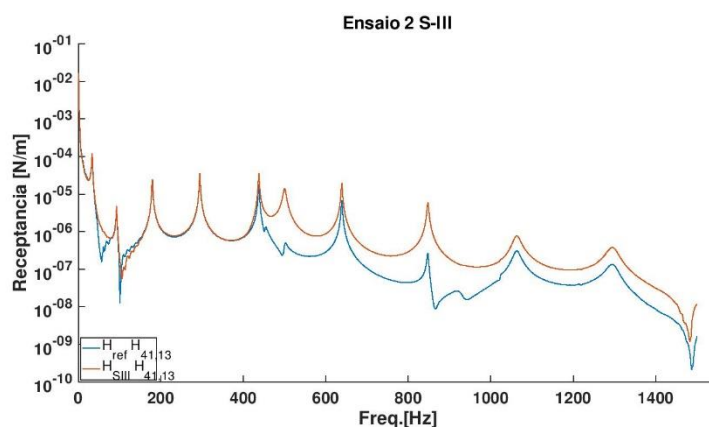


Figura 104 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - III e da FRF-T de referência

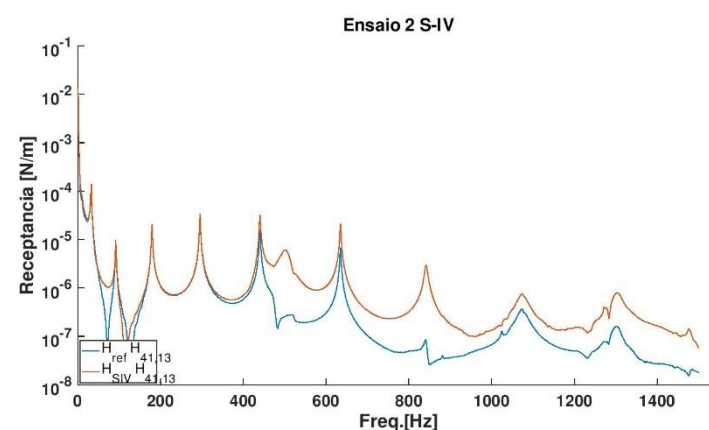


Figura 105 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - IV e da FRF-T de referência

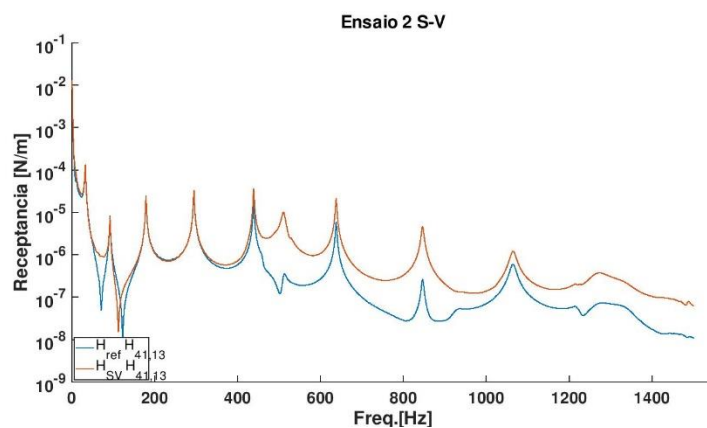


Figura 106 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - V e da FRF-T de referência

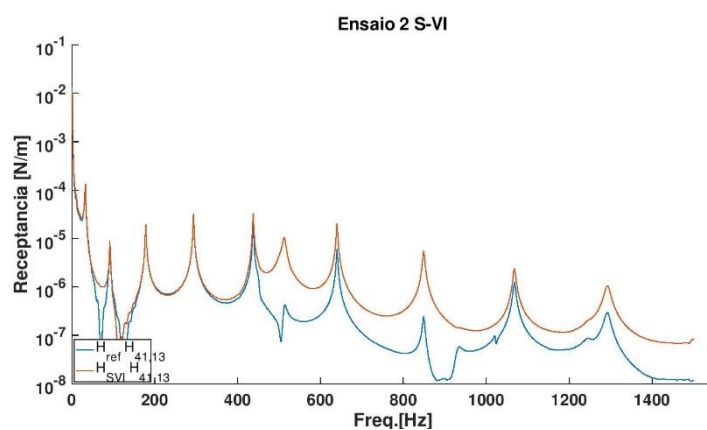


Figura 107 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - VI e da FRF-T de referência

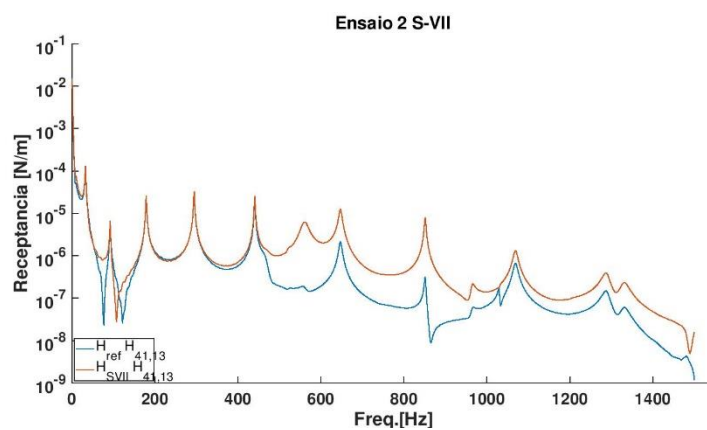


Figura 108 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - VII e da FRF-T de referência

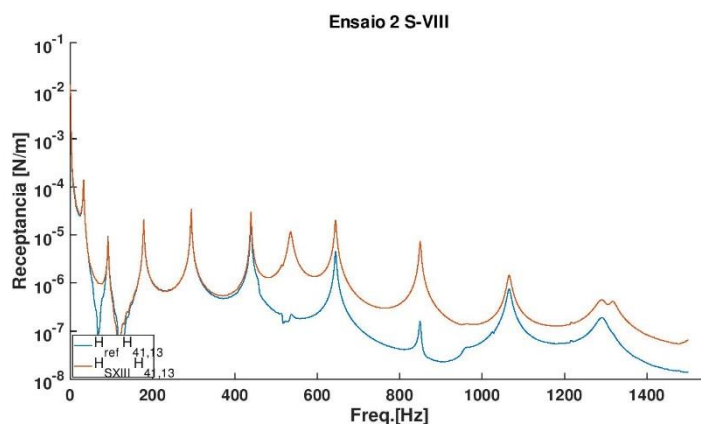


Figura 109 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - VIII e da FRF-T de referência

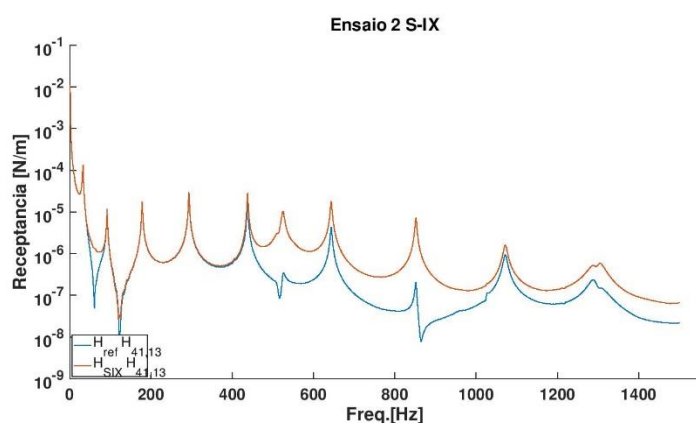


Figura 110 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - IX e da FRF-T de referência

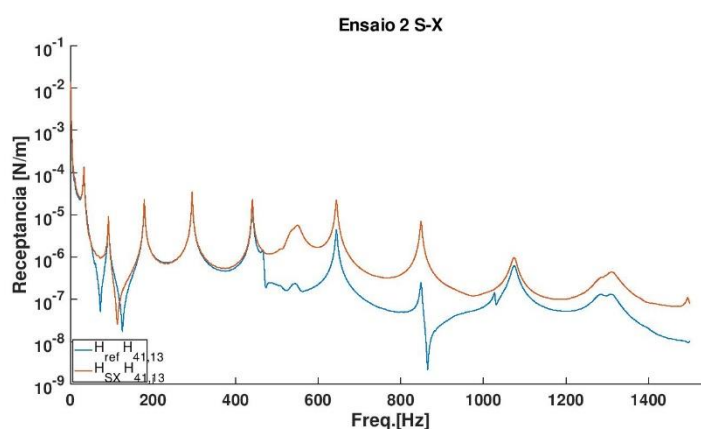


Figura 111 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - X e da FRF-T de referência

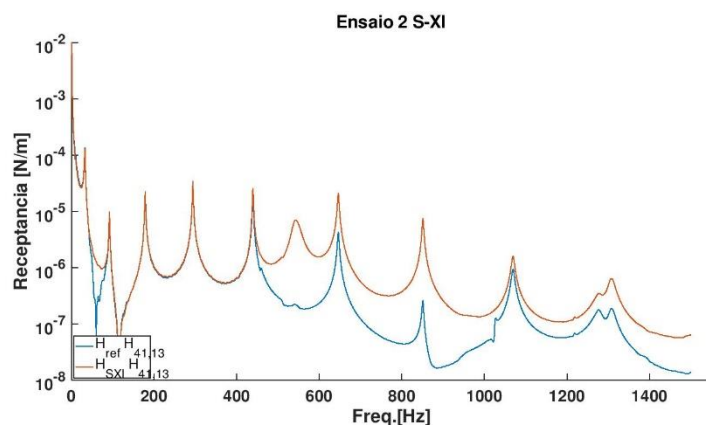


Figura 112 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - XI e da FRF-T de referência

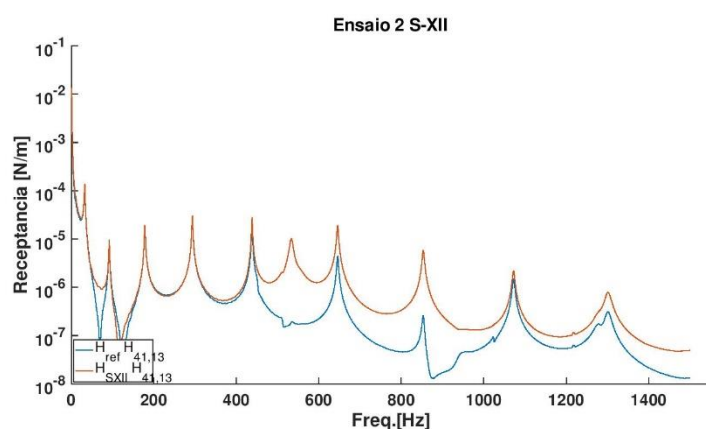


Figura 113 - Gráfico da FRF-T do Sensor T - XII e da FRF-T de referência

Anexo V

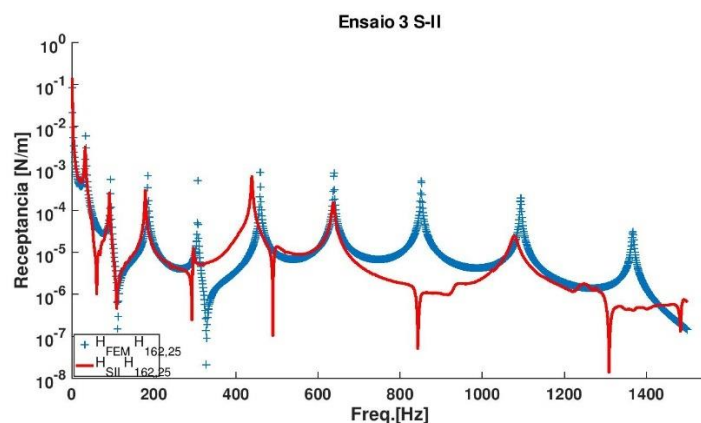


Figura 114 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-II e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T

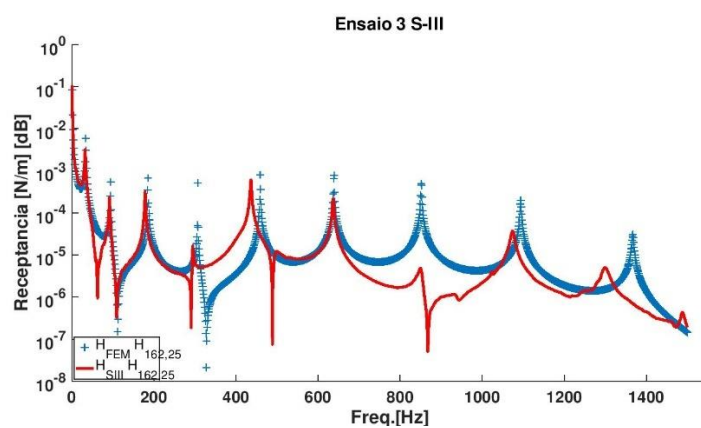


Figura 115 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-III e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T

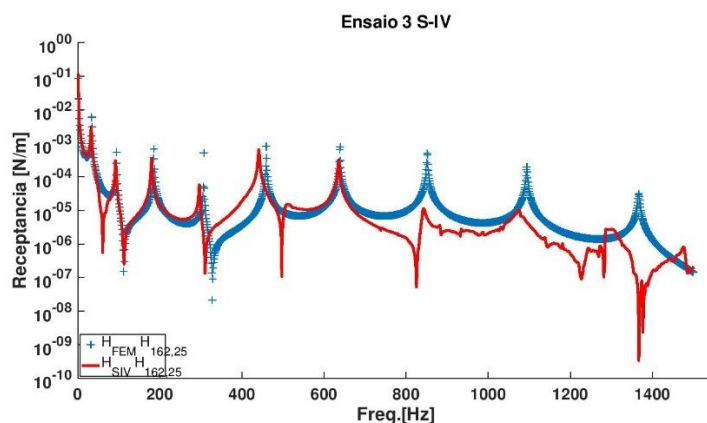


Figura 116 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-IV e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T

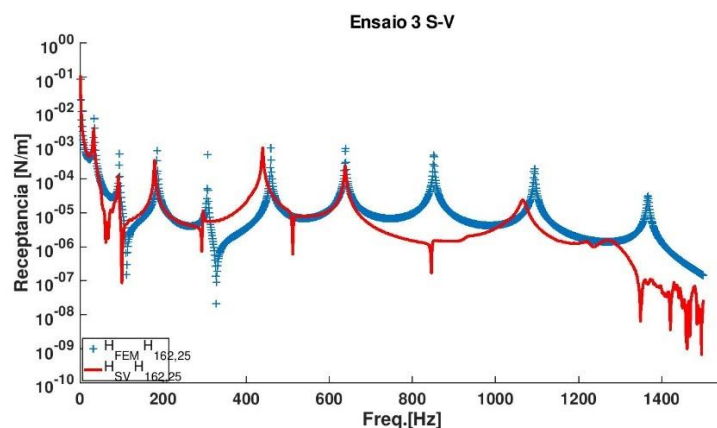


Figura 117 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-V e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T

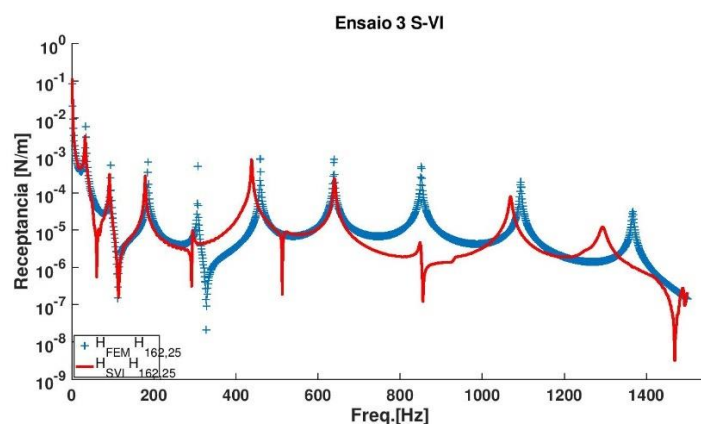


Figura 118 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-VI e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T

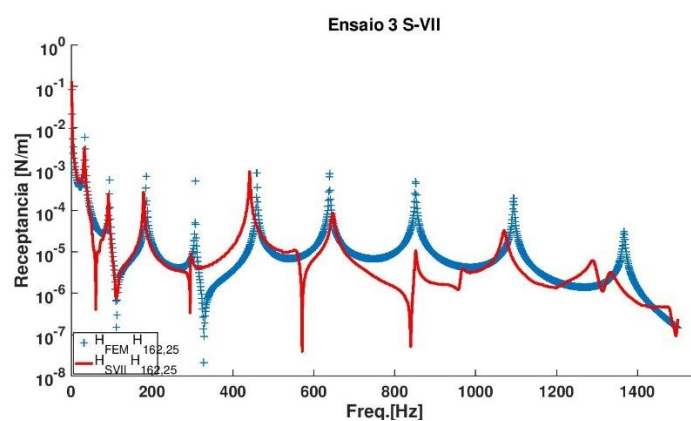


Figura 119 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-VII e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T

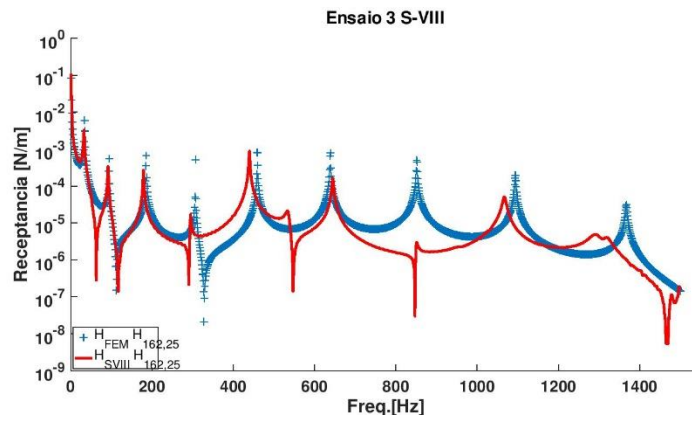


Figura 120 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-VIII e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T

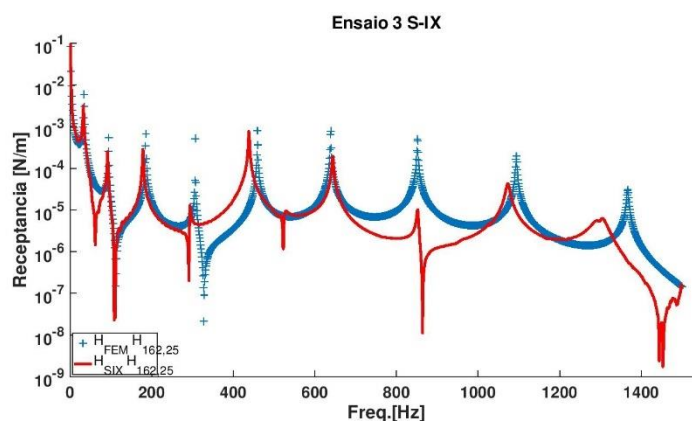


Figura 121 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-IX e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T

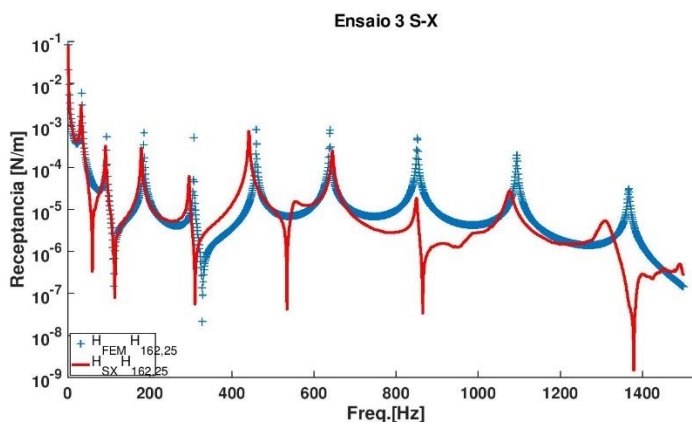


Figura 122 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-X e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T

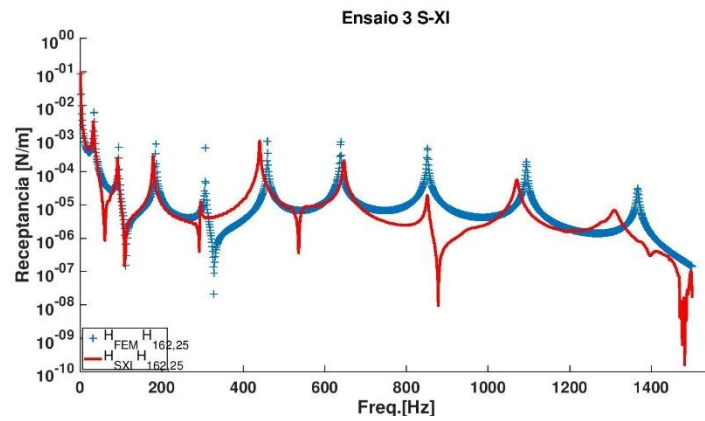


Figura 123 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-XI e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T

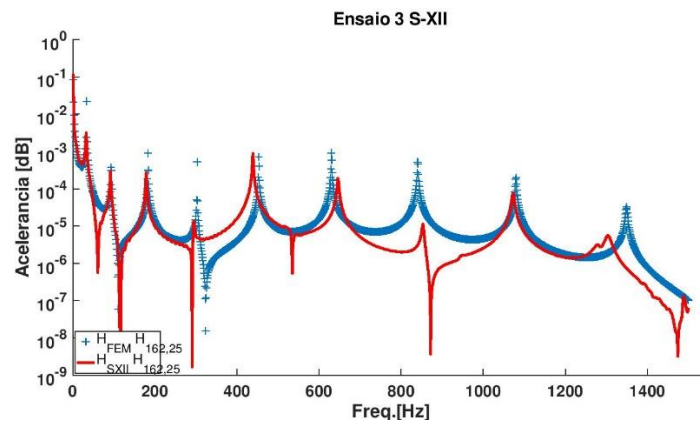


Figura 124 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-XII e FRF-R do FEM sem considerar a massa do Sensor T

Anexo VI

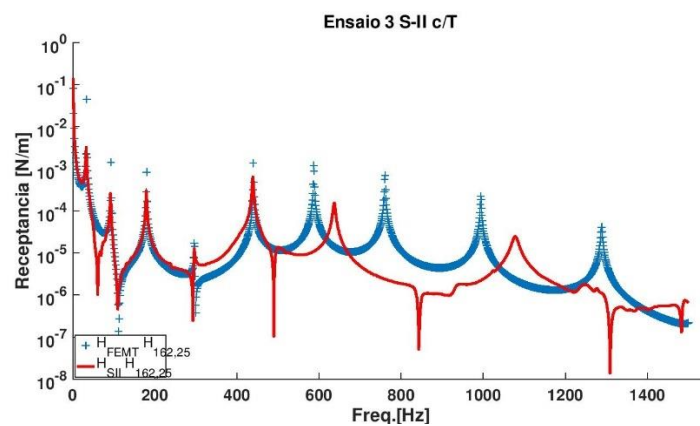


Figura 125 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-II e FRF-R do FEM que considera a massa do Sensor T

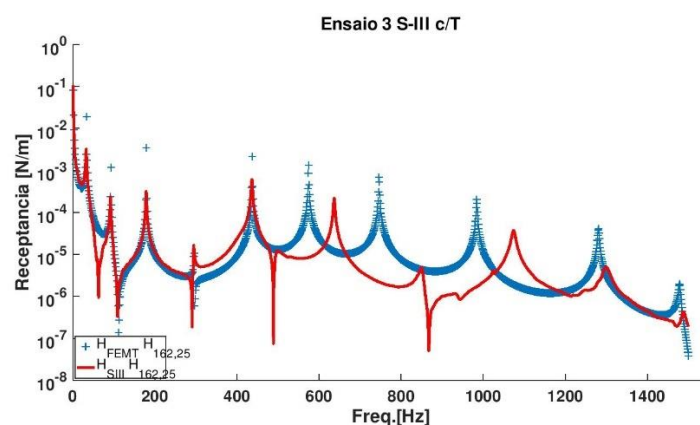


Figura 126 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-III e FRF-R do FEM que considera a massa do Sensor T

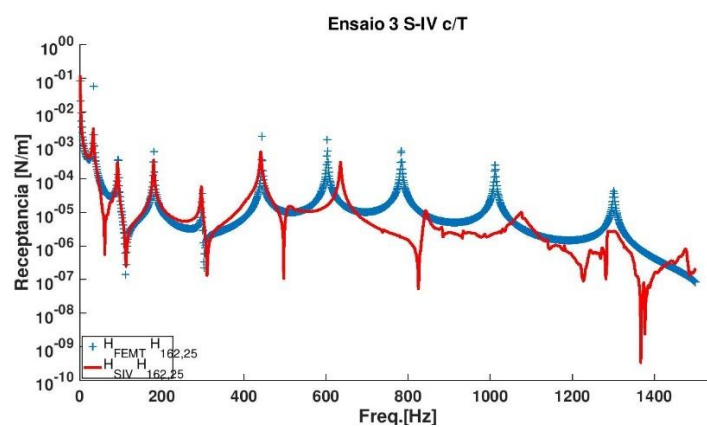


Figura 127 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-IV e FRF-R do FEM que considera a massa do Sensor T

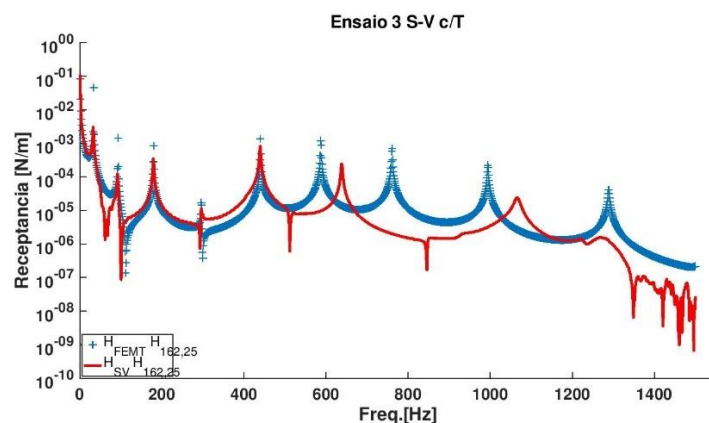


Figura 128 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-V e FRF-R do FEM que considera a massa do Sensor T

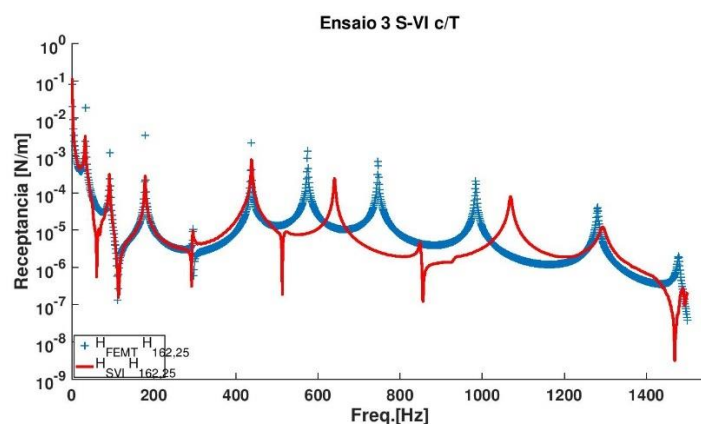


Figura 129 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-VI e FRF-R do FEM que considera a massa do Sensor T

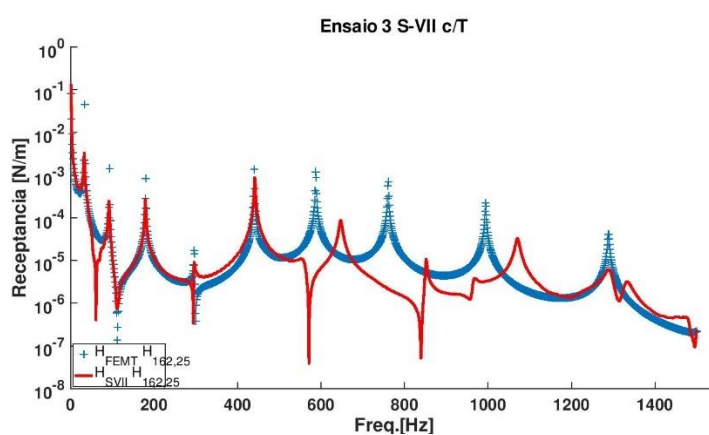


Figura 130 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-VII e FRF-R do FEM que considera a massa do Sensor T

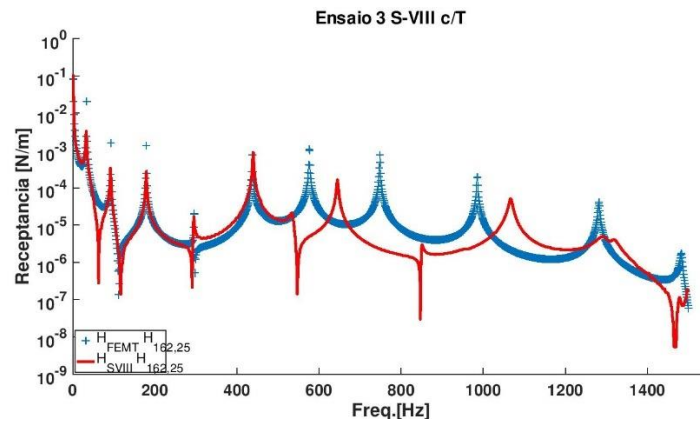


Figura 131 - - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-VIII e FRF-R do FEM que considera a massa do Sensor T

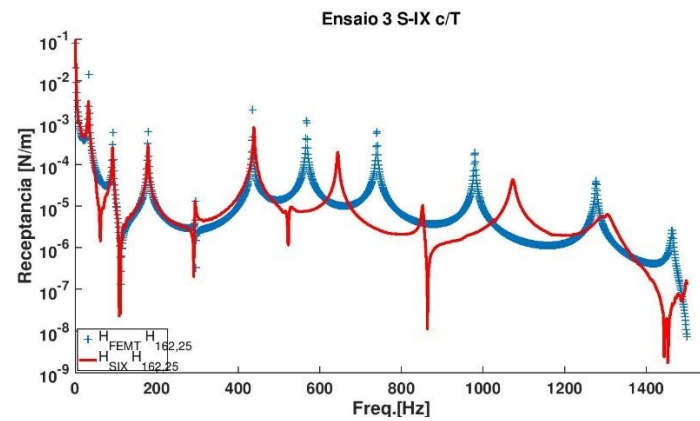


Figura 132 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-IX e FRF-R do FEM que considera a massa do Sensor T

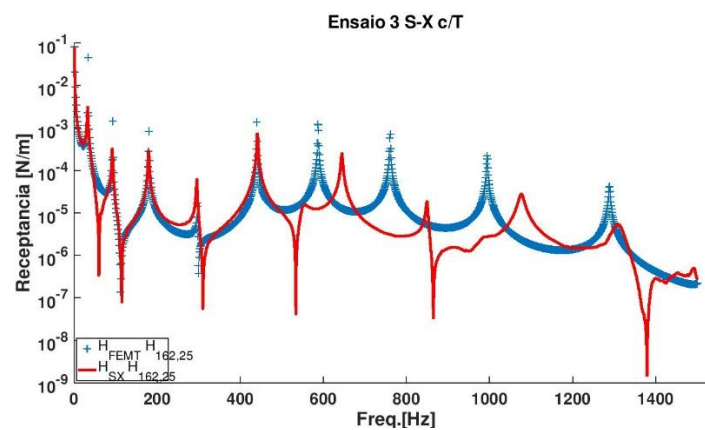


Figura 133 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T-X e FRF-R do FEM que considera a massa do Sensor T

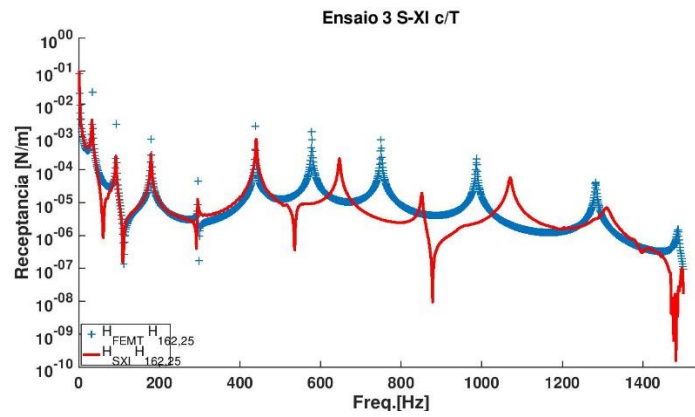


Figura 134 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T - XI e FRF-R do FEM que considera a massa do Sensor T

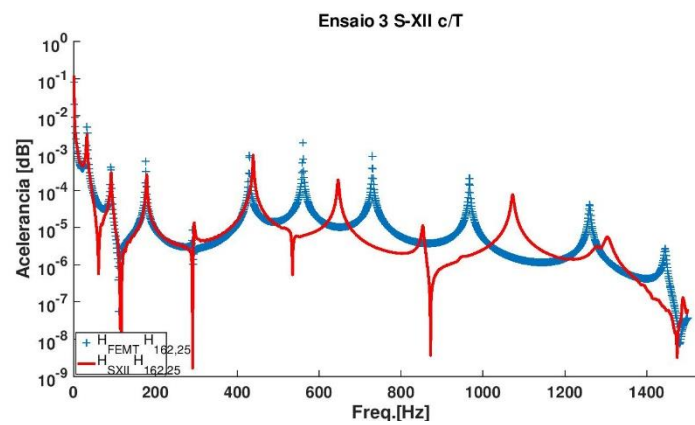


Figura 135 - Gráfico da FRF-R deduzida de Sensor T - XII e FRF-R do FEM que considera a massa do Sensor T