



João Filipe Ferreira Braz

Licenciatura em Ciências de Engenharia Mecânica

**Conceção e Validação de uma Mesa de
Vibração para a Calibração de
Acelerómetros**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professora Doutora Helena Victorovna Guitiss
Navas, FCT/UNL

Coorientador: Eng.º Luís Ribeiro, IPQ

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Paulo Vale Urgueira
Arguente: Doutora Maria Isabel Araújo Godinho
Vogal: Prof. Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2015

Conceção e Validação de uma Mesa de Vibração para a Calibração de Acelerómetros

COPYRIGHT © João Filipe Ferreira Braz, Faculdade de Ciências e tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

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

Agradecimentos

Gostaria de deixar umas palavras de agradecimento aos que estiveram presentes e contribuíram, de algum modo, para a realização desta dissertação, assim como todo o meu percurso académico.

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã, por toda a dedicação, incentivo e apoio que recebi ao longo da minha vida académica, possibilitando a concretização desta etapa.

Agradeço à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e a todos os professores que contribuíram para a minha formação académica, em especial, à Professora Doutora Helena Navas, por me ter proporcionado esta oportunidade de estágio, pela sua orientação, disponibilidade e apoio que recebi no decorrer deste trabalho.

Quero agradecer ao Instituto Português da Qualidade pela oportunidade de realização de um estágio que me foi dada, em especial, deixar uma palavra de agradecimento ao meu coorientador Engenheiro Luís Ribeiro, pela disponibilidade que apresentou, pela paciência, pela passagem de conhecimento ao longo do estágio e pelo apoio que recebi para a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial para com aqueles que estão comigo diariamente, como a minha namorada e amigos, que sempre me deram apoio e motivação para completar mais uma fase da minha vida.

Expresso também o meu agradecimento aos colegas que partilharam comigo esta experiência de estagiar no Instituto Português da Qualidade e que contribuíram, de certo modo, para a concretização deste trabalho, como também para um bom ambiente de estágio.

Por último, agradecer a todos os colegas com quem tive oportunidade de conviver e trabalhar ao longo de todo o curso.

Resumo

Com o decorrer do tempo, é premente o acompanhamento da evolução científica e tecnológica que se faz sentir em diversas áreas e, por isso, surgem novas exigências e desafios relacionados com a atividade metrológica, nomeadamente no que diz respeito ao crescimento da complexidade dos processos de calibração, assim como o aumento do rigor e produtividade dos métodos utilizados.

A presente dissertação foi realizada no âmbito de um estágio curricular no Laboratório de Aceleração e Vibrações do Departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade. O tema deste estudo resulta da procura contínua do melhoramento dos processos de calibração por parte desta instituição, nomeadamente na calibração de acelerómetros.

Os acelerómetros são dispositivos de ampla aplicação em diversas áreas de indústria e serviços e, por isso, a sua calibração tornou-se uma atividade importante naquele laboratório.

Este estudo adveio da necessidade de encontrar uma solução que aumentasse a produtividade do processo de calibração e a capacidade de resposta do laboratório, reduzindo o tempo de realização de cada calibração. O método de comparação *back-to-back* é o método secundário normalizado de calibração de acelerómetros utilizado no laboratório, que permite a calibração de apenas um acelerómetro por comparação com um outro de referência.

Com esse objetivo foi desenvolvida, construída e caracterizada uma mesa de vibração com a função de possibilitar a calibração de até oito acelerómetros em simultâneo ou possibilitar a sua fixação em situações em que, devido às suas características, não seja compatível com procedimento baseado no método *back-to-back*.

Esta solução, validada dentro de limites definidos de frequência, torna-se assim um elemento potenciador e alternativo no processo de calibração de acelerómetros pelo método de comparação.

Com a implementação de um novo sistema de aquisição de dados, que permita a aquisição de sinais de nove acelerómetros simultaneamente, a produtividade do processo de calibração poderá aumentar em oito vezes.

Palavras-Chave:

Acelerómetro; *Back-to-back*; Calibração; Comparação; Mesa de Vibração; Metrologia.

Abstract

Throughout time, it's in urgent need follow-up the science and technology evolution that is seen in many areas, so there are new demands and challenges related to metrological activity that emerge, particularly with regard to the growth in complexity of the processes of calibration, as well as increased accuracy and productivity of the used methods.

This dissertation was performed under a traineeship in the Acceleration and Vibrations Laboratory inserted in the Metrology Department of the Portuguese Institute for Quality. The theme of this study results of the continuous search for the improvement of calibration procedures by the latter, particularly in accelerometer calibration.

Accelerometers are widely applicable devices in several areas of industry and services and, therefore, its calibration has become an important activity in that laboratory.

This study emerged from the need to find a solution that increases the productivity of the calibration process and the laboratory response by reducing the time of each calibration. The *back-to-back* method of comparison is the secondary standardized method used in accelerometer calibration by the laboratory, which enables the calibration of only one accelerometer compared with another one of reference.

For this purpose it was developed, constructed and characterized a vibration table with the function of enabling the calibration of up to eight accelerometers simultaneously or enabling its attachment in cases where, due to its characteristics, is not compatible with the procedure based on *back to back* method.

This solution, validated within defined frequency limits, becomes an enhancer element and an alternative process of accelerometer calibration by the comparison method.

With the implementation of a new data acquisition system, allowing acquisition of nine accelerometers signals simultaneously, the productivity of the calibration process may increase by eight times.

Keywords:

Accelerometer; *Back-to-back*; Calibration; Comparison; Vibration table; Metrology.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e Objetivos da Dissertação.....	1
1.2. Estrutura da Dissertação	2
2. Metrologia.....	3
2.1. Enquadramento da Metrologia.....	3
2.2. Instituto Português da Qualidade	4
2.3. Laboratório Nacional de Metrologia	5
2.3.1. Laboratório de Aceleração e Vibrações.....	6
3. Fundamentos Teóricos.....	9
3.1. Vibração.....	9
3.1.1. Parâmetros de Vibração: Deslocamento, Velocidade e Aceleração.....	9
3.1.2. Níveis de Vibração	11
3.2. Medição de Vibração.....	12
3.2.1. Porquê Medir a Vibração?.....	12
3.3. Acelerómetros.....	13
3.3.1. Princípio de Funcionamento.....	14
3.3.2. Tipos de Acelerómetros e Principais Aplicações	16
3.3.2.1. Acelerómetros Potenciométricos.....	16
3.3.2.2. Acelerómetros LVDT.....	16
3.3.2.3. Acelerómetros de Relutância Variável.....	17
3.3.2.4. Acelerómetros Piezoresistivos.....	17
3.3.2.5. Acelerómetros Capacitivos.....	17
3.3.2.6. Acelerómetros Piezoelétricos	17
3.3.3. Características/Especificações dos Acelerómetros.....	18
3.3.4. Técnicas de Fixação de Acelerómetros e de Cabos.....	20
3.3.4.1. Montagem por aparafusamento	20
3.3.4.2. Montagem por colagem.....	22
3.3.4.3. Montagem magnética	22

3.3.4.4.	Montagem a cera	23
3.3.4.5.	Preparação da Superfície	23
3.3.4.6.	Cabos	23
3.3.5.	Influência das Condições Externas.....	24
3.4.	Calibração de Acelerómetros	25
3.4.1.	Calibração por Comparação (Método <i>back-to-back</i>)	26
3.4.1.1.	Método de Medição.....	26
3.4.1.2.	Condições de Medição	28
3.4.1.3.	Equipamento Utilizado.....	28
3.4.2.	Norma ISO 16063-21	29
4.	Desenvolvimento da Mesa de Vibração	31
4.1.	Requisitos e Recolha das Características Mais Importantes da Mesa de Vibração.....	31
4.2.	Pormenores Construtivos da Mesa de Vibração	33
4.2.1.	Conceção da Mesa de Vibração	34
4.2.2.	Escolha do Material.....	35
4.2.3.	Fixação da Mesa de Vibração ao <i>Shaker</i>	36
4.2.4.	Modelação da Mesa de Vibração	38
4.2.5.	Estudo de Frequência por Simulação	41
5.	Validação Experimental.....	45
5.1.	Introdução.....	45
5.2.	Procedimento Experimental.....	46
5.3.	Sistema Experimental	49
5.4.	Equipamento Utilizado	52
5.4.1.	Excitador de Movimento	52
5.4.2.	Controlador/Gerador de Sinais Sinusoidais.....	54
5.4.3.	Amplificador de Potência.....	54
5.4.4.	Condicionador de Sinal	55
5.4.5.	Multímetro.....	57
5.4.6.	Computador com Placa de Aquisição PCINI 6115	57

6. Princípios de Avaliação de Incertezas	61
6.1. Incertezas de Medição.....	62
6.2. Avaliação da Incerteza de Medição	67
6.2.1. Método de Avaliação de Tipo A	67
6.2.2. Método de Avaliação de Tipo B.....	68
6.2.3. Cálculo da Incerteza-Padrão da Grandeza de Saída	69
6.2.4. Número de Graus de Liberdade.....	70
6.2.5. Incerteza de Medição Expandida.....	71
6.2.6. Balanço da Incerteza Associada à Determinação do <i>Erro</i> _{final}	72
7. Apresentação, Processamento, Análise e Discussão de Resultados.....	75
7.1. Comparação entre os Dois Procedimentos Realizados	81
7.1.1. Estudo da Mesa de Vibração. Análise Gráfica	81
8. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	101
Bibliografia	107
Anexos	111
Anexos I – Resultados das Medições dos Ensaios Efetuados.....	113

Índice de Figuras

Figura 2.1 Instituto Português da Qualidade [6]	4
Figura 2.2 Laboratório de Aceleração e Vibrações [10]	7
Figura 2.3 Tabela retirada da base de dados do BIPM. Compilação das capacidades reconhecidas de medição e calibração do Instituto Português da Qualidade [11]	7
Figura 3.1 Diferenças de fase entre aceleração, velocidade e deslocamento: a) aceleração; b) velocidade; c) deslocamento. Figura adaptada de [15]	11
Figura 3.2 Acelerómetro piezoelétrico. Modelo 2224C [21]	14
Figura 3.3 Sistema básico massa-mola de um acelerómetro. Figura adaptada de [22]	15
Figura 3.4 Modelos de acelerómetros piezoelétricos: a) tipo <i>compression</i> ; b) tipo <i>shear</i> . Figura adaptada de [18]	18
Figura 3.5 Montagem por aparafusamento: a) Parafuso removível; b) Parafuso integrado. Figura adaptada de [26]	21
Figura 3.6 Adaptador [29]	22
Figura 3.7 Adaptadores magnéticos: a) Montagem correta (em superfícies planas); b) Montagem a evitar. Figura adaptada de [26]	23
Figura 3.8 Montagem dos cabos. Figura adaptada de [16]	24
Figura 3.9 Influência das condições externas nos resultados de medições de vibração. Figura adaptada de [16]	25
Figura 3.10 Exemplo de um sistema de medição para a calibração de acelerómetros por comparação a um acelerómetro de referência. Figura adaptada de [1]	27
Figura 3.11 Método <i>back-to-back</i>	29
Figura 4.1 Critérios de projeto	32
Figura 4.2 Mesa de vibração desenvolvida ligada ao <i>shaker</i> B&K 4805/12	33
Figura 4.3 Relação aceleração máxima vs massa. <i>Shaker</i> B&K 4805/12. Figura adaptada de [35]	34
Figura 4.4 Detalhes da mesa de referência quadrangular do <i>shaker</i> B&K 4805/4012 [35]	37
Figura 4.5 Parafusos e <i>inserts</i> utilizados	38
Figura 4.6 Exemplos de mesas de vibração para testes de vibração	38
Figura 4.7 <i>Shaker</i> 4805/4812: a) Vista em perspetiva; b) Vista de topo	39
Figura 4.8 Base superior da mesa de vibração que permite a fixação dos acelerómetros	40
Figura 4.9 Base inferior da mesa de vibração que permite a fixação ao <i>shaker</i>	40
Figura 4.10 Fixação da mesa de vibração	42
Figura 4.11 Geração da malha da mesa vibração	42
Figura 4.12 Resultado do estudo na primeira frequência natural	44
Figura 5.1 Procedimento de comparação com fixação <i>back-to-back</i> . Acelerómetro de referência e acelerómetro a comparar	46

Figura 5.2 Procedimento de comparação multicanal com mesa de vibração. Acelerómetro de referência (no centro) e quatro acelerómetros (um a comparar)	47
Figura 5.3 Sistema experimental do procedimento de comparação com fixação <i>back-to-back</i>	50
Figura 5.4 Sistema experimental (ideal) do procedimento de comparação multicanal com a mesa de vibração	50
Figura 5.5 Identificação das fixações da mesa de vibração.....	51
Figura 5.6 Fotografia do sistema experimental (com mesa de vibração).....	52
Figura 5.7 <i>Shaker</i> B&K 4805/12.....	53
Figura 5.8 Gerador de sinais sinusoidais B&K 1051	54
Figura 5.9 Amplificador de potência B&K tipo 2707.....	55
Figura 5.10 Condicionador B&K NEXUS 2691	55
Figura 5.11 Ajuste de sensibilidade dos quatro acelerómetros de carga	56
Figura 5.12 Sensibilidade do condicionador. Limites de frequência	56
Figura 5.13 Condicionador <i>ENDEVCO</i> 4416 B.....	56
Figura 5.14 Multímetro <i>Agilent</i> 3458A.....	57
Figura 5.15 Programa de parametrização e aquisição de dados	58
Figura 5.16 Dados gravados em <i>txt</i>	59
Figura 6.1 Esquema equivalente para um acelerómetro, cabo de interligação, condicionador e sistema de aquisição por medição em tensão RMS. Figura adaptada de [16].....	64
Figura 6.2 Esquema simplificado equivalente para a medição de um acelerómetro. Figura adaptada de [16]	65
Figura 7.1 2º Ensaio. Acelerómetro de referência B&K 8305 e acelerómetro ENDEVCO 224C ns FN94	75
Figura 7.2 Registo dos valores de erro de medição referente ao 2º Ensaio (representadas as frequências de 40 Hz e 80 Hz).....	76
Figura 7.3 Fixações da mesa de vibração numeradas.....	77
Figura 7.4 16º Ensaio. Acelerómetro de referência B&K 8305 (centro) e acelerómetro ENDEVCO 224C ns FN94 (Posição 7)	78
Figura 7.5 17º Ensaio. Acelerómetro de referência B&K 8305 (centro) e acelerómetro ENDEVCO 224C ns FN94 (Posição 8)	78
Figura 7.6 8º Ensaio. Acelerómetro de referência B&K 8305 (centro) e acelerómetro ENDEVCO 224C ns FN94 (Posição 1)	78
Figura 7.7 Registo dos valores de erro de medição referente ao 16º Ensaio (representadas as frequências de 40 Hz e 80 Hz).....	79
Figura 7.8 10º Ensaio. Acelerómetro de referência B&K 8305 (centro) e acelerómetro ENDEVCO 224C ns FN94 (Posição 1)	82
Figura 7.9 Resultados da diferença dos erros médios entre o 10º Ensaio e 2º Ensaio (posição 1).....	83

Figura 7.10 Resultados da diferença dos erros médios entre o 11º Ensaio e 1º Ensaio (posição 5).....	84
Figura 7.11 Resultados da diferença dos erros médios entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio (posição 7).....	85
Figura 7.12 Variação do <i>Erro</i> _{final} (%) entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio para $a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	88
Figura 7.13 Variação do <i>Erro</i> _{final} (%) entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio para $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	88
Figura 7.14 Resultados da diferença dos erros médios entre o 13º Ensaio e 2º Ensaio (posição 2).....	89
Figura 7.15 Resultados da diferença dos erros médios entre o 12º Ensaio e 1º Ensaio (posição 6).....	90
Figura 7.16 Resultados da diferença dos erros médios entre o 17º Ensaio e 2º Ensaio (posição 8).....	91
Figura 7.17 Resultados da diferença dos erros médios entre o 5º Ensaio e 4º Ensaio (posição 1).....	93
Figura 7.18 Resultados da diferença dos erros médios entre o 6º Ensaio e 4º Ensaio (posição 2).....	94
Figura 7.19 Resultados da diferença dos erros médios entre o 7º Ensaio e 4º Ensaio (posição 3).....	95
Figura 7.20 Resultados da diferença dos erros médios entre o 8º Ensaio e 2º Ensaio (posição 1).....	96
Figura 7.21 Resultados da diferença dos erros médios entre o 9º Ensaio e 2º Ensaio (posição 1).....	97
Figura 7.22 Resultados da diferença dos erros médios entre o 15º Ensaio e 3º Ensaio (posição 3).....	99
Figura 7.23 Resultados da diferença dos erros médios entre o 14º Ensaio e 3º Ensaio (posição 4)....	100
Figura 8.1 Resultados das comparações realizadas no intervalo de frequências compreendido entre 40 Hz e 2000 Hz	103
Figura 8.2 Resultados das comparações realizadas nas frequências de 80 Hz, 160 Hz e 320 Hz e 800 Hz	104

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 Unidades de acordo com o Sistema Internacional dos parâmetros de vibração. Tabela adaptada de [14]	10
Tabela 4.1 Propriedades dos materiais. Tabela adaptada de [33].....	35
Tabela 4.2 Características do <i>shaker</i> B&K 4805/4012. Tabela adaptada de [35].....	36
Tabela 4.3 Detalhes da mesa de referência quadrangular do <i>shaker</i> B&K 4805/4012. Tabela adaptada de [35]	37
Tabela 4.4 Resultados do cálculo das primeiras dez frequências naturais	43
Tabela 5.1 Características dos cinco acelerômetros utilizados.....	48
Tabela 5.2 Condições experimentais estabelecidas.....	48
Tabela 6.1 Fatores de expansão k para diferentes números de graus de liberdade efetivos v_{ef}	72
Tabela 6.2 Balanço de incerteza associado ao w	73
Tabela 7.1 Síntese dos ensaios efetuados pelo procedimento de comparação com fixação <i>back-to-back</i>	75
Tabela 7.2 Síntese dos ensaios efetuados pelo procedimento de comparação multicanal com mesa de vibração	77
Tabela 7.3 Comparação de ensaios entre os dois procedimentos.....	80
Tabela 7.4 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 10º Ensaio e 2º Ensaio.....	82
Tabela 7.5 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 11º Ensaio e 1º Ensaio.....	83
Tabela 7.6 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio.....	84
Tabela 7.7 Balanço de incerteza associado à determinação do $Erro_{final}(\%)$ entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio, $f = 40$ Hz e $a = 10$ m·s ⁻²	86
Tabela 7.8 Balanço de incerteza associado à determinação do $Erro_{final}(\%)$ entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio, $f = 40$ Hz e $a = 100$ m·s ⁻²	86
Tabela 7.9 Balanço de incerteza associado à determinação do $Erro_{final}(\%)$ entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio, $f = 1000$ Hz e $a = 10$ m·s ⁻²	87
Tabela 7.10 Balanço de incerteza associado à determinação do $Erro_{final}(\%)$ entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio, $f = 1000$ Hz e $a = 100$ m·s ⁻²	87
Tabela 7.11 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 13º Ensaio e 2º Ensaio.....	89
Tabela 7.12 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 12º Ensaio e 1º Ensaio.....	90

Tabela 7.13 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 17º Ensaio e 2º Ensaio.....	91
Tabela 7.14 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 5º Ensaio e 4º Ensaio.....	92
Tabela 7.15 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 6º Ensaio e 4º Ensaio.....	93
Tabela 7.16 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 7º Ensaio e 4º Ensaio.....	94
Tabela 7.17 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 8º Ensaio e 2º Ensaio.....	96
Tabela 7.18 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 9º Ensaio e 2º Ensaio.....	97
Tabela 7.19 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 15º Ensaio e 3º Ensaio.....	98
Tabela 7.20 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 14º Ensaio e 3º Ensaio.....	99
Tabela I.1 Resultados obtidos no 1º Ensaio	113
Tabela I.2 Resultados obtidos no 2º Ensaio	113
Tabela I.3 Resultados obtidos no 3º Ensaio	113
Tabela I.4 Resultados obtidos no 4º Ensaio	113
Tabela I.5 Resultados obtidos no 5º Ensaio	114
Tabela I.6 Resultados obtidos no 6º Ensaio	114
Tabela I.7 Resultados obtidos no 7º Ensaio	114
Tabela I.8 Resultados obtidos no 8º Ensaio	114
Tabela I.9 Resultados obtidos no 9º Ensaio	115
Tabela I.10 Resultados obtidos no 10º Ensaio	115
Tabela I.11 Resultados obtidos no 11º Ensaio	115
Tabela I.12 Resultados obtidos no 12º Ensaio	115
Tabela I.13 Resultados obtidos no 13º Ensaio	116
Tabela I.14 Resultados obtidos no 14º Ensaio	116
Tabela I.15 Resultados obtidos no 15º Ensaio	116
Tabela I.16 Resultados obtidos no 16º Ensaio	116
Tabela I.17 Resultados obtidos no 17º Ensaio	117

Abreviaturas

B&K	<i>Bruel&Kjaer</i>
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
CGPM	<i>Conférence Général des Poids et Mesures</i>
CIPM	<i>Comité International des Poids et Mesures</i>
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
I&D	Inovação e Desenvolvimento
IEPE	<i>Integral Electronics Piezoelectric</i>
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>LabView</i>	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LAV	Laboratório de Aceleração e Vibrações
LNM	Laboratório Nacional de Metrologia
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SI	Sistema Internacional
SPQ	Sistema Português da Qualidade
UNL	Universidade Nova de Lisboa
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

Simbologia

a	Aceleração
A	Ganho operacional do pré-amplificador
$Acel_r$	Acelerómetro de referência
$Acel_x$	Acelerómetro auxiliar
B	Fluxo magnético
C_a	Impedância capacitiva interna do acelerómetro
C_c	Impedância capacitiva interna do cabo e conetores
C_f	Capacidade de <i>feedback</i>
c_i	Coefficiente de sensibilidade
$Condi_r$	Condicionador ligado ao acelerómetro de referência
$Condi_x$	Condicionador ligado ao acelerómetro auxiliar “x”
C_p	Impedância capacitiva interna do pré-amplificador na entrada
C_t	Capacidade total
d	Deslocamento
E	Módulo de <i>Young</i>
$Erro_{back-to-back}$	Erro médio entre um acelerómetro auxiliar e o acelerómetro de referência relativo ao procedimento de comparação com fixação <i>back-to-back</i>
$Erro_{final}$	Diferença dos erros médios entre os dois procedimentos em comparação
$Erro_{final}(\%)$	Diferença dos erros médios entre os dois procedimentos em comparação em percentagem
$Erro_{mesa}$	Erro médio entre um acelerómetro auxiliar e o acelerómetro de referência relativo ao procedimento de comparação multicanal com mesa de vibração
f	Frequência
F	Força
g	Aceleração da gravidade (constante universal)

GDL	Graus de liberdade
I	Corrente
k	Constante de rigidez da mola
k	Fator de expansão
L	Comprimento do fio condutor
l_{btb}	Resolução da placa de aquisição de dados no procedimento <i>back-to-back</i>
l_{mesa}	Resolução da placa de aquisição de dados no procedimento multicanal
m	Massa
m_e	Massa do elemento móvel
n	Índice relativo ao procedimento e acelerómetro
N	Número de observações
\bar{q}	Média aritmética dos valores observados
Q_a	Carga gerada pelo acelerómetro piezoelétrico
q_j	Valores observados de índice j
R_a	Impedância resistiva interna do acelerómetro
R_c	Impedância resistiva interna do cabo e conetores
R_f	Resistência de <i>feedback</i>
R_p	Impedância resistiva de entrada do pré-amplificador
R_v	Impedância resistiva de entrada do voltímetro
S	Sensibilidade
$s(q)$	Desvio-padrão experimental
S_1	Sensibilidade do acelerómetro de referência
S_2	Sensibilidade do acelerómetro a calibrar
T	Período

U	Incerteza de medição expandida
u	Incerteza-padrão combinada
$u(q)$	Incerteza-padrão
$u(x_i)$	Incerteza-padrão das grandezas de entrada
$u(x_{iB})$	Incerteza-padrão das grandezas de entrada no método de avaliação de tipo B
$u(y)$	Incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída
v	Velocidade
V	Valor em tensão (pico)
V_1	Sinal de saída devolvido pelo transdutor de referência
V_2	Sinal de saída devolvido pelo transdutor a calibrar
V_{btbr}	Tensão em valor RMS do acelerómetro de referência “r” pelo procedimento <i>back-to-back</i>
V_{btbx}	Tensão em valor RMS do acelerómetro auxiliar “x” pelo procedimento <i>back-to-back</i>
V_e	Tensão de entrada do pré-amplificador
V_{mr}	Tensão em valor RMS do acelerómetro de referência “r” pelo procedimento multicanal
V_{mx}	Tensão em valor RMS do acelerómetro auxiliar “x” pelo procedimento multicanal
V_{RMS}	Valor em tensão (RMS)
V_s	Leitura da tensão de saída do pré-amplificador
w	Constante associada ao modelo matemático
X	Posição final
X_0	Posição inicial
X_i	Grandezas de entrada
x_i	Estimativa da grandeza de entrada
Y	Mensuranda
y	Estimativa da grandeza de saída

ΔA	Contribuição do pré-amplificador
Δl	Contribuição do sistema de aquisição
ΔV_e	Contribuição do acelerómetro
Δx	Extensão da mola
ν_{ef}	Número de graus de liberdade efetivos
ρ	Densidade

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Objetivos da Dissertação

Na procura contínua de melhorar a capacidade dos processos de calibração e de controlo metrológico, o Laboratório de Aceleração e Vibrações (LAV) do Departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade (IPQ) propôs um estágio no qual surge o desenvolvimento do estudo desta dissertação.

O objetivo principal consistia no estudo e desenvolvimento de uma solução que otimizasse um dos sistemas de medição, atualmente utilizados no laboratório conhecido pelo método *back-to-back*. Essa otimização passou pela fabricação e consequente avaliação de uma mesa de vibração, de modo a ser implementada no laboratório e com capacidade de dar resposta à necessidade de minimizar o tempo de calibração associado ao método utilizado. Naturalmente, quanto menor for o tempo necessário para a calibração pelo método de comparação, mais rapidamente o operador estará disponível para outro tipo de funções no laboratório.

Pretendeu-se validar esta nova solução através da comparação dos resultados obtidos pelo procedimento de comparação com fixação *back-to-back* em várias condições de funcionamento. De acordo com as recomendações da Norma ISO 16063-21 [1], os melhores resultados em termos de exatidão são tipicamente alcançados quando os dois acelerómetros (acelerómetro de referência e o acelerómetro que se pretende calibrar) são rigidamente fixados na configuração tipo *back-to-back*, com os respetivos eixos de sensibilidade paralelos à direção do movimento. Esta nova solução tem o mesmo princípio base procedimental que o método *back-to-back*, isto é, por comparação com um acelerómetro de referência.

Perceber as reais condições de aplicabilidade da nova solução, estudando o comportamento do dispositivo a conceber face a métodos tradicionais e reconhecidos, levaria a permitir obter a validação necessária à prossecução do objetivo de garantir as condições de otimização de uma solução multicanal simultânea de determinação de erros de acelerómetros em processos de calibração secundária.

Dado o reduzido intervalo de tempo disponível para a realização de um estudo completo de uma validação deste tipo e associado ao âmbito desta dissertação, ficarão certamente por clarificar alguns aspetos que potenciem alguma incoerência dos resultados obtidos, nomeadamente pela indisponibilidade de informação relativa à variação de fase associada à introdução de uma interface física entre o objeto de referência e o objeto auxiliar. Os resultados aqui apresentados não ficam comprometidos, servindo de base a um estudo posterior complementar que vise permitir a análise completa ao comportamento da nova solução experimental aqui abordada.

1.2. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é constituída por oito capítulos fundamentais que, por sua vez, se dividem em vários subcapítulos.

O primeiro capítulo é composto por uma parte introdutória, onde é apresentada a origem do projeto que sustenta este trabalho, descrevendo os seus principais objetivos.

No segundo capítulo procedeu-se à apresentação da dissertação, ao nível do local da realização da mesma, bem como a apresentação dos principais organismos institucionais de Metrologia ao nível Nacional e Internacional.

No terceiro capítulo são descritos os fundamentos teóricos que serviram de suporte ao estudo desta dissertação. São apresentadas as temáticas mais objetivas e relevantes nesse contexto.

O quarto capítulo apresenta uma análise ao método *back-to-back* referente à calibração de acelerómetros, contendo os principais requisitos da mesa de vibração desenvolvida face à análise realizada das necessidades e objetivos do projeto. É apresentada a conceptualização da mesa desenvolvida em função dos requisitos apresentados, descrevendo o raciocínio que levou ao desenvolvimento da mesma.

O quinto capítulo expõe a componente experimental que deu suporte a esta dissertação. Este capítulo dá a conhecer as condições estabelecidas em estudo de acordo com os objetivos do tema, os procedimentos executados neste trabalho bem como a descrição do modo operativo, assim como todos os instrumentos utilizados.

No sexto capítulo é apresentado o modelo matemático utilizado neste estudo, as várias componentes do cálculo de incertezas associado a esse modelo matemático e a sua adaptação ao contexto da dissertação.

No sétimo capítulo são descritos e apresentados os resultados experimentais referentes ao estudo de comparação efetuado nesta dissertação.

Para finalizar, no oitavo capítulo são apresentadas as conclusões relativamente aos resultados obtidos e da validade da nova solução preconizada neste trabalho.

2. Metrologia

A ciência da medição, a metrologia, é provavelmente a ciência mais antiga do mundo [2]. Desde há muito tempo que existe a necessidade de descrever alguma coisa com referência a pesos e medidas. A metrologia tornou-se uma atividade normal no nosso dia-a-dia, revelando-se também essencial e indispensável nos sectores da economia, da saúde, da segurança e do ambiente, constituindo uma infraestrutura tecnológica nas sociedades modernas. A ciência está completamente dependente da medição, e o conhecimento de como a metrologia é aplicada tornou-se uma necessidade fundamental em praticamente todas as atividades relacionadas com a ciência.

Durante a primeira exposição universal, em meados do século XIX, tornou-se premente a necessidade da existência de um sistema métrico decimal universal. Ocorreu em Paris, em 1875, uma Conferência Diplomática sobre o metro, onde dezassete países assinaram um tratado “A Convenção do Metro”. A convenção do metro é um tratado que criou o *Bureau International des Poids et Mesures*, BIPM, uma organização intergovernamental sob a autoridade da *Conférence Générale des Poids et Mesures*, CGPM, e supervisão do *Comité International des Poids et Mesures*, CIPM. A CGPM discute e examina o trabalho executado pelos Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM), e o BIPM faz recomendações sobre novas determinações da metrologia fundamental e em todos os outros domínios de atuação do BIPM. Hoje em dia, o BIPM é composto por 56 Estados Membros, incluindo os países mais industrializados [2][3].

2.1. Enquadramento da Metrologia

A metrologia é normalmente caracterizada segundo três enquadramentos [2]:

- 1) Metrologia científica ou fundamental
- 2) Metrologia aplicada ou industrial
- 3) Metrologia legal

A metrologia científica tem como objetivo o desenvolvimento e organização de padrões de medição e a sua manutenção bem como o estudo e desenvolvimento de novos métodos de medição e a melhoria contínua das suas capacidades. Esta vertente da metrologia constitui o nível mais elevado de exatidão dentro de cada domínio, promovida, de forma contínua, através da participação em projetos de investigação e desenvolvimento científico, de cooperação e de comparações interlaboratoriais [2].

A metrologia aplicada tem como missão garantir o funcionamento adequado dos instrumentos de medição utilizados na indústria bem como nos processos de produção e ensaio. Tem ainda como objetivo garantir a rastreabilidade dos resultados de medição obtidos naqueles contextos [2][4].

A metrologia legal elabora a legislação metrológica e promove a sua aplicabilidade, aprova modelos de instrumentos de medição e qualifica e acompanha entidades para a realização de operações de controlo metrológico. Esta desempenha um papel importante na economia e ao nível do bem-estar das populações, ao contribuir para o rigor, credibilidade e transparência das medições, seja no comércio ou em quaisquer outras aplicações, constituindo um elemento chave no desenvolvimento económico e social do país [2][4].

2.2. Instituto Português da Qualidade

O Instituto Português da Qualidade é um instituto público que, nos termos da sua lei orgânica aprovada pelo Decreto-Lei 71/2012, de 21 de março, alterado pelo Decreto-Lei n.º 80/2014, de 15 de maio, tem por missão a coordenação do Sistema Português da Qualidade (SPQ) e de outros sistemas de qualificação regulamentar que lhe forem conferidos por lei, a promoção e a coordenação de atividades que visem contribuir para demonstrar a credibilidade da ação dos agentes económicos, bem como o desenvolvimento das atividades necessárias à sua função de laboratório nacional de metrologia. O IPQ é o Organismo Nacional de Normalização e a Instituição Nacional de Metrologia. Deste modo, o IPQ assume-se como um agente privilegiado de mudança no país, ao nível da economia interna e da competitividade internacional [5]. De seguida é apresentado na Figura 2.1 o edifício principal do Instituto Português da Qualidade.



Figura 2.1 Instituto Português da Qualidade [6]

2.3. Laboratório Nacional de Metrologia

Uma das atribuições do IPQ é de gerir o Laboratório Nacional de Metrologia, nas suas componentes científica e aplicada, assegurando a realização, manutenção e desenvolvimento dos padrões nacionais das unidades de medida e a sua rastreabilidade ao Sistema Internacional (SI), promovendo a disseminação dos valores das unidades SI no território nacional [5].

Em conformidade com o disposto na Portaria nº 23/2013, de 24 de janeiro, ao LNM compete-lhe designadamente [7]:

- Exercer as funções de Instituição Nacional de Metrologia, representando o IPQ, nos órgãos de coordenação técnica das organizações europeias e internacionais de metrologia;
- Promover a dinamização do subsistema de metrologia;
- Realizar e manter os padrões nacionais das unidades de medida da responsabilidade direta do IPQ, bem como promover e coordenar a realização dos padrões nacionais descentralizados;
- Assegurar a sua rastreabilidade ao Sistema Internacional de unidades;
- Desenvolver e participar em projetos europeus e internacionais de investigação e desenvolvimento metrológico;
- Organizar e participar em comparações europeias e internacionais de padrões e instrumentos de medição;
- Promover e participar como laboratório de referência em programas de comparações nacionais;
- Calibrar padrões de referência e instrumentos de medição dos laboratórios acreditados e de outras entidades;
- Realizar ensaios de controlo metrológico de instrumentos de medição e produzir e certificar materiais de referência.

Alguns domínios de atividade do LNM são nomeadamente [8]:

- Aceleração e vibrações
- Comprimento
- Eletricidade e magnetismo
- Fotometria e radiometria
- Massa e grandezas derivadas

- Propriedade dos Líquidos
- Quantidade de matéria
- Temperatura
- Tempo e frequência
- Volume

2.3.1. Laboratório de Aceleração e Vibrações

O Laboratório de Aceleração e Vibrações do Instituto Português da Qualidade é o laboratório onde foi realizada a componente experimental desta dissertação. O LAV tem como principal missão a materialização, a manutenção e a disseminação da unidade de aceleração [9]. São objetivos do LAV [9]:

- Garantir a rastreabilidade desta unidade, possibilitando a sua disseminação a nível nacional;
- Participar ou coordenar projetos de I&D e comparações interlaboratoriais;
- Apoiar a metrologia legal;
- Desenvolver e implementar novos métodos e capacidades de medição.

No domínio da aceleração o metro é a unidade base do Sistema Internacional e é definido como: *O comprimento do trajeto percorrido pela luz, no vácuo, durante um intervalo de tempo de 1/299 792 458 do segundo* [9]. É a partir desta unidade de base que se deduz a unidade derivada de aceleração (a), metro por segundo quadrado ($m \cdot s^{-2}$).

Neste contexto, o LAV utiliza técnicas experimentais baseadas em interferometria laser, aceites internacionalmente como uma metodologia padrão normalizada (método primário) e que apresenta o maior nível de exatidão na disseminação daquela unidade.

Na figura seguinte são apresentadas duas imagens que representam o trabalho realizado no Laboratório de Aceleração e Vibrações do IPQ.

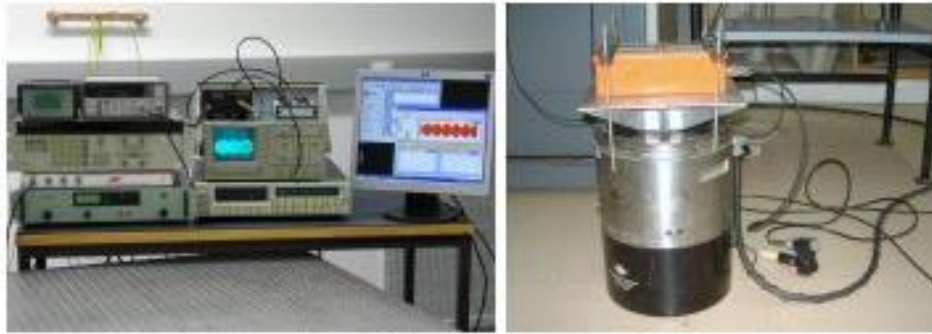


Figura 2.2 Laboratório de Aceleração e Vibrações [10]

Assim, o LAV apresenta capacidades de calibração de acelerómetros padrão por interferometria laser, sendo internacionalmente reconhecido com as seguintes capacidades:

Calibration and Measurement Capabilities

Acoustics, Ultrasound and Vibration, Portugal, IPQ (Instituto Português da Qualidade)



Calibration or Measurement Service			Measurand Level or Range			Measurement Conditions/Independent Variable		Expanded Uncertainty						
Quantity	Instrument or Test	Instrument Type or Method	Minimum value	Maximum value	Units	Parameter	Specifications	Value	Units	Coverage Factor	Level of Confidence	Is the expanded uncertainty a relative one?	NMI Internal Identifier	Comments
Charge sensitivity (modulus)	Accelerometer	Laser interferometry, ISO 16063-11			C/(m/s ²)	Frequency	40 Hz to 800 Hz	1.0	%	2	95%	Yes	201	Approved on 27 December 2007
Voltage sensitivity (modulus)	Acceleration measuring chain	Laser interferometry, ISO 16063-11			V/(m/s ²)	Frequency	40 Hz to 800 Hz	1.0	%	2	95%	Yes	202	Approved on 27 December 2007

Figura 2.3 Tabela retirada da base de dados do BIPM. Compilação das capacidades reconhecidas de medição e calibração do Instituto Português da Qualidade [11]

Para além do método primário realiza calibrações utilizando o método normalizado *back-to-back*, para calibrações de nível secundário e em situações em que os dispositivos a calibrar não permitam a aplicação da técnica interferométrica.

Como atividade paralela, o LAV realiza ainda ensaios de vibração para o que está apetrechado com condições técnicas que permitem cobrir a maioria das exigências definidas nas mais usuais Normas Internacionais. Estas Normas regulam a realização de ensaios de vibração (CEI 68 e MIL-STD810) bem como a prossecução dos estudos conducentes à determinação de características de equipamentos, com experiência reconhecida na realização de simulações de condições adversas de funcionamento ou transporte.

3. Fundamentos Teóricos

3.1. Vibração

A vibração é um fenómeno dinâmico observado num corpo ou numa partícula quando este executa um movimento oscilatório em torno de uma posição de equilíbrio [12][13][14]. Este movimento oscilatório é provocado quando o sistema é deslocado da sua posição de equilíbrio estável através da transferência ou armazenamento da energia resultante, por exemplo, da ação de forças exteriores ou de choques com outros corpos [13]. Quando as solicitações das forças atuantes num corpo terminam, este tem a tendência de restaurar a configuração inicial. Estas forças são denominadas forças de restituição, como é o exemplo da atuação da força gravítica no caso de um pêndulo em que o movimento do corpo se prolongará no tempo com uma oscilação harmónica até atingir a sua posição inicial de equilíbrio.

Associado ao movimento oscilatório de um corpo está o período (T) e a frequência de vibração (f). O período de vibração tem como unidade o segundo (s) e é o intervalo de tempo necessário para o movimento completar um ciclo, enquanto a frequência de vibração, o seu inverso, corresponde ao número de ciclos por unidade de tempo e tem como unidade o *Hertz* (Hz). Na Equação 3.1 é expressa a sua relação.

$$f = \frac{1}{T}$$

Equação 3.1

Em relação à classificação de vibração, esta pode ser classificada como livre ou forçada. Diz-se vibração livre quando o movimento se mantém devido às forças de restituição sendo o movimento oscilatório provocado apenas por um deslocamento inicial em relação à posição de equilíbrio estático ou por uma velocidade inicial. Em relação à vibração forçada, esta ocorre quando se aplica uma força variável no tempo [12].

3.1.1. Parâmetros de Vibração: Deslocamento, Velocidade e Aceleração

Quando se observa um determinado objeto a vibrar pode-se descrever o movimento desse objeto em termos de deslocamento (d), velocidade (v) e aceleração (a) [14]. O deslocamento máximo do sistema medido a partir da sua posição de equilíbrio é chamado de amplitude do movimento [12]. A forma e o período de vibração mantêm-se constantes quer seja considerado o parâmetro deslocamento, velocidade ou aceleração, ou seja, se uma das três variáveis é sinusoidal, as outras duas também o são, podendo variar apenas na amplitude e fase [14][15].

Em sinais sinusoidais, as amplitudes de deslocamento, velocidade e aceleração são relacionadas matematicamente por fatores que dependem da frequência. Por exemplo, para uma dada amplitude de

velocidade, a amplitude de deslocamento correspondente é maior em baixas frequências por um fator proporcional a $1/f$ enquanto a amplitude de aceleração é maior em altas frequências por um fator proporcional a f [14]. As três equações seguintes demonstram essas relações quando o movimento é sinusoidal considerando os seus valores de pico:

$$d = \frac{v}{\pi f} \quad \text{Equação 3.2}$$

$$v = \pi f d \quad \text{Equação 3.3}$$

$$a = 2\pi^2 f^2 d \quad \text{Equação 3.4}$$

Os parâmetros de vibração são tipicamente medidos em unidades que estão de acordo com os padrões internacionais (ISO). A Tabela 3.1 apresenta as unidades dos parâmetros de vibração mencionados.

Tabela 3.1 Unidades de acordo com o Sistema Internacional dos parâmetros de vibração. Tabela adaptada de [14]

Unidades de acordo com a ISO/IEC 80000-1	
Deslocamento, d	m
Velocidade, v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Aceleração, a	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Nota: $1 \text{ g} \approx 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)

As relações de fase destes três parâmetros são independentes da amplitude e frequência [15]. Existe uma diferença de fase entre a aceleração e o deslocamento de 180° , o que significa que quando o objeto alcança o seu deslocamento máximo da posição de equilíbrio, a aceleração é máxima na direção oposta (pontos 1 e 2 da Figura 3.1). Em relação à velocidade, existe uma diferença de fase de 90° em relação à aceleração assim como ao deslocamento. É máxima quando a aceleração e deslocamento são iguais a zero, que é quando o objeto passa pela posição de equilíbrio (pontos 3 e 4 da Figura 3.1).

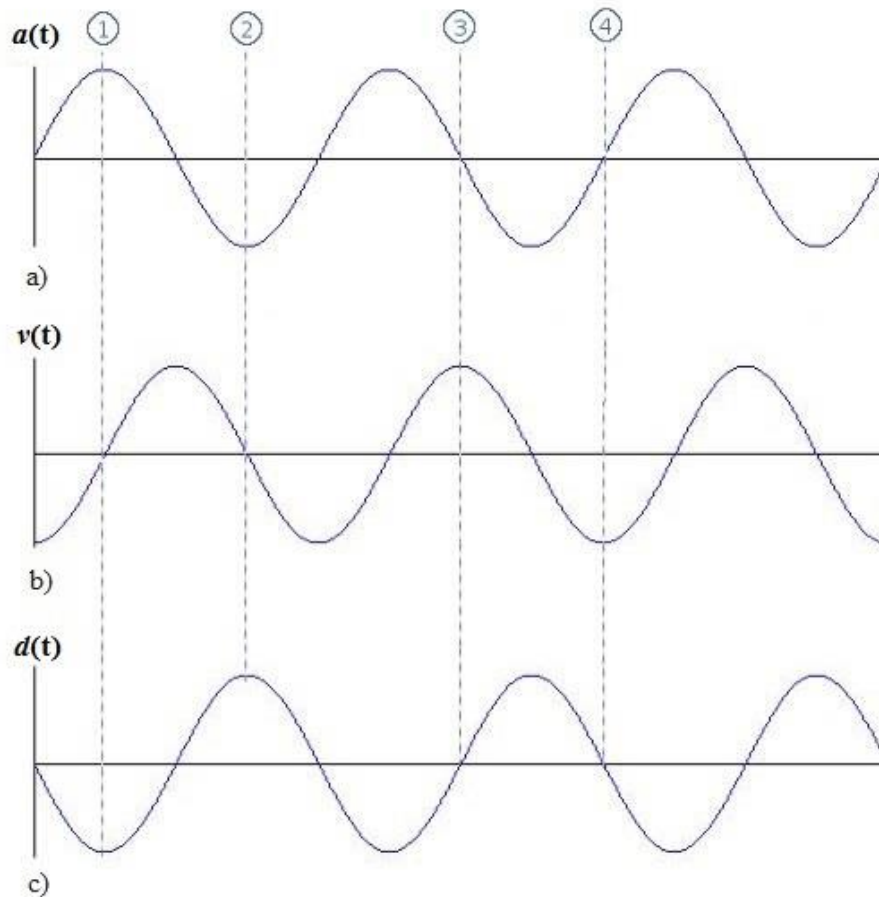


Figura 3.1 Diferenças de fase entre aceleração, velocidade e deslocamento: a) aceleração; b) velocidade; c) deslocamento. Figura adaptada de [15]

3.1.2. Níveis de Vibração

A amplitude de vibração é a característica que descreve a severidade da uma vibração e pode ser caracterizada de várias maneiras. A partir de transdutores especificamente concebidos para o efeito, aquele movimento é transformado num sinal elétrico que, em sinais sinusoidais, permite ser caracterizada através da determinação do seu valor RMS, pico-a-pico ou pico.

O valor RMS (*Root Mean Square*) é o valor mais utilizado e o mais relevante na medição da amplitude de vibração em ondas sinusoidais. Permite não só obter o histórico temporal da onda como reflete o respetivo conteúdo energético. O valor pico-a-pico pode ser útil no sentido em que indica a distância máxima entre picos de uma onda. O valor de pico é particularmente útil quando se pretende indicar a magnitude de vibrações de curta duração. Corresponde à amplitude máxima medida num período considerado, no entanto, não tem em conta o histórico temporal da onda [14][16].

3.2. Medição de Vibração

O desenvolvimento industrial, a fabricação de produtos de grande penetração comercial, a exigência dos consumidores finais e a especialização de oferta tecnológica tem permitido e facilitado o desenvolvimento de estruturas que dão suporte a produtos cada vez mais delicados e complicados, e a máquinas que são cada vez mais rápidas e complexas. Estes desenvolvimentos, grandemente orientados por imperativos económicos, estão implicitamente aliados com a procura de estratégias que envolvem custos mais baixos e com necessidades do aumento da eficiência.

As vibrações mecânicas estão sempre presentes em quaisquer máquinas ou estruturas. Na prática, é muito difícil evitar a vibração. Normalmente a vibração ocorre devido a efeitos dinâmicos podendo estar associada a erros admissíveis exagerados, folgas, rolamentos deteriorados, fricção entre as diferentes partes constituintes de cada máquina ou a forças desequilibradas em peças com movimento alternado e rotativo, como podem ser provenientes de elementos externos como a ação do vento. Muitas vezes, pequenas vibrações aparentemente insignificantes podem dar origem a situações de ressonância. A ressonância é a tendência de um sistema oscilar em máxima amplitude em frequências conhecidas como frequências naturais, que resulta em grandes amplitudes de vibração e ruído levando à degradação e falhas das partes constituintes de um sistema. No entanto, a vibração mecânica por vezes pode ser útil e é gerada intencionalmente, como por exemplo, a vibração das cordas de uma viola ou em martelos pneumáticos. Pelos efeitos negativos que as vibrações possam ter sobre o homem, equipamentos e estruturas das construções, há todo o interesse em desenvolver técnicas e equipamentos que as possam caracterizar segundo parâmetros pré-definidos a fim de avaliar riscos e proceder ao seu controlo [14][16].

3.2.1. Porquê Medir a Vibração?

A vibração é medida por muitas razões diferentes. Na generalidade, toda a vibração que não é controlável torna-se um fenómeno indesejável que pode dar origem a ruído e a stresse mecânico. Por isso, o fenómeno da vibração pode ser uma possível causa de falhas em estruturas. A medição de vibração é muito utilizada nas seguintes grandes áreas [16]:

- **Inspecção/monitoração de máquinas e diagnóstico de falhas** - como o próprio nome indica, técnicas de medição de níveis de vibração numa máquina podem ser aplicadas de modo a realizar diagnósticos de falhas e programar planos de manutenção preventiva. A análise ao espetro de vibração característica de uma máquina ao longo do seu ciclo de vida de utilização torna-se uma ferramenta essencial na monitoração de eventuais danos mecânicos;

- **Análise estrutural** - a medição de vibrações em estruturas é um poderoso método experimental para o estudo e determinação do comportamento dinâmico de uma estrutura. Com o devido equipamento de modo a dar suporte a este tipo de análise, esta fornece informações essenciais na verificação e modificação de pequenas e grandes estruturas;
- **Medição de vibração em humanos** - esta área preocupa-se em medir as vibrações que são transmitidas aos humanos. Em alguns setores da atividade humana, o corpo humano está constantemente exposto a vibrações mecânicas com maior ou menor perturbação do bem-estar, que podem provocar lesões irreversíveis e incapacidades nas pessoas expostas. O efeito da ação direta das vibrações de forte intensidade sobre o organismo, a curto ou a longo prazo, podem originar lesões fisiológicas e patologias graves. A medição dos níveis de vibração é depois relacionada com os critérios de conforto e a saúde humana pelos padrões internacionais;
- **Testes de vibração** - podem ser aplicados a projetos de engenharia ou a programas de teste em condições ambientais especificadas. Estes testes desempenham um papel importante pois permitem avaliar o comportamento de dispositivos ou estruturas quando sujeitos a solicitações idênticas àsquelas que podem ser encontradas em situações reais. Durante um teste de vibração, uma estrutura é submetida a níveis de vibração através de um excitador de movimento. A resposta da estrutura em estudo é analisada através da utilização de acelerómetros estrategicamente distribuídos. A generalidade destes ensaios é suportada por documentação normativa.

3.3. Acelerómetros

Tem havido uma maior necessidade de compreensão das causas de vibração e da resposta dinâmica de estruturas a forças vibratórias. Para adquirir tal compreensão é necessário que haja transdutores confiáveis e capazes de fornecer medições com elevada exatidão. Normalmente os acelerómetros são os transdutores mais utilizados quando se pretende medir vibrações devido a versatilidade e confiança que apresentam.

Os acelerómetros são transdutores ou sensores que medem acelerações [17][18]. Estes sensores, usados para medir a aceleração de um corpo, são de extrema importância devido à sua vasta aplicabilidade em diversas áreas [18]. A aceleração é definida como a taxa de variação de velocidade ao longo do tempo [19]. É uma medida de quão rapidamente a velocidade varia e pode ser obtida segundo uma, duas ou três direções, utilizando respetivamente acelerómetros uni, bi ou triaxiais [17]. Além de medirem acelerações, os acelerómetros podem ser utilizados na medição de inclinação, rotação, vibração, colisão e gravidade, constituindo um dispositivo de elevada utilidade [17]. Devido ao elevado

número de aplicações, existem diversas configurações de acelerômetros existentes no mercado. De acordo com as necessidades específicas de cada aplicação, existem diferentes tipos de acelerômetros com alcances, frequências naturais, amortecimentos e modos de fixação diversos. A diferença básica que cada tipo de acelerômetro pode apresentar é o método de deslocamento de massa [20]. Na Figura 3.2 é apresentada uma fotografia de um acelerômetro piezoelétrico.



Figura 3.2 Acelerômetro piezoelétrico. Modelo 2224C [21]

3.3.1. Princípio de Funcionamento

O termo “acelerômetro” refere-se ao transdutor que compreende um elemento sensor mecânico e um mecanismo, que converte o movimento mecânico num sinal elétrico de saída [19].

Os acelerômetros são constituídos tipicamente por uma massa de reação, suspensa por uma estrutura estacionária. Este dispositivo pode ser visto como um transdutor massa-mola, que se encontra no interior de um sensor, que por sua vez está ligado a um corpo [17]. A teoria do princípio de funcionamento de um acelerômetro pode ser compreendida de maneira simplista através das leis de Newton e da lei de Hooke. A 2ª lei de Newton afirma que se uma massa, m , for submetida a uma aceleração, a , então haverá uma força, F , que atua sobre essa massa (Equação 3.5). A lei de Hooke afirma que se uma mola, com determinada constante de rigidez, k , é alongada uma distância Δx a partir da sua posição de equilíbrio, então deverá existir uma força que atua sobre a mola (Equação 3.6) [22]. Após uma aceleração, a inércia faz com que a massa resista. A força exercida pela massa é equilibrada pela mola, e como o deslocamento permitido pela mola é proporcional à força aplicada, a aceleração do corpo é proporcional ao deslocamento da massa (Equação 3.8). A Equação 3.8 descreve a relação entre a constante de rigidez da mola, o deslocamento e a aceleração. Este princípio massa-mola é aplicado aos acelerômetros mais comuns [17]. A Figura 3.3 representa uma imagem que suporta a teoria do princípio de funcionamento de um acelerômetro através de um sistema massa-mola.

3.3.2. Tipos de Acelerómetros e Principais Aplicações

Existem vários tipos de acelerómetros e cada um possui características únicas, vantagens e desvantagens [17]. A escolha do tipo de acelerómetro pode variar de acordo com as diversas aplicações. Por exemplo, os acelerómetros de tamanho reduzido são concebidos para medir em altas frequências e usados em estruturas mais delicadas. Outros têm a função de medir a vibração simultaneamente em três planos perpendiculares (acelerómetros triaxiais), altas temperaturas, níveis muito baixos de vibração e altos níveis de choque [14]. Os acelerómetros são fortemente utilizados em diversas áreas. No sector militar, os acelerómetros podem ser utilizados desde o guiamento de mísseis até sistemas de navegação inercial para veículos aeroespaciais. Na vertente industrial, estes dispositivos têm sido utilmente utilizados na monitoração de vibrações de máquinas e equipamentos, como parte de rotinas de manutenção preditiva e preventiva [18]. Também são utilizados em ensaios de colisão e como parte do mecanismo de disparo de *airbags*, como também são aplicados em *smartphones*. Em aplicações médicas, os acelerómetros são muito utilizados na avaliação do movimento humano, na deteção de distúrbios de sono e na deteção de variáveis fisiológicas [17][18].

Segundo a sua construção existem no mercado diferentes tipos de acelerómetros [17][20][23]:

- Acelerómetros potenciométricos
- Acelerómetros LVDT
- Acelerómetros de relutância variável
- Acelerómetros piezoresistivos
- Acelerómetros capacitivos
- Acelerómetros piezoelétricos

3.3.2.1. Acelerómetros Potenciométricos

Este tipo de acelerómetro mede o movimento da massa e transmite-a sob a forma de uma resistência variável. A frequência natural destes dispositivos geralmente é abaixo dos 30 Hz, limitando a utilização na medição de vibração a baixas frequências [20].

3.3.2.2. Acelerómetros LVDT

Os acelerómetros LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) são o tipo de acelerómetros que medem o deslocamento da massa a partir do deslocamento linear. Nestes dispositivos, o núcleo constitui a massa sísmica e os seus deslocamentos são convertidos diretamente em valores de tensão. A

maioria destes acelerômetros tem a frequência natural abaixo dos 80 Hz e são normalmente usados para vibrações em estado estacionário e medições de vibração de baixas frequências [20].

3.3.2.3. Acelerômetros de Relutância Variável

Este tipo de acelerômetro tem como base o princípio indutivo. Neste caso existe uma massa que é normalmente um ímã permanente. A medição é realizada a partir de uma tensão induzida em torno de uma bobine à medida que a massa magnética se move sob a influência da aceleração. O acelerômetro de relutância variável é usado somente em estudos de vibrações e choques, porque produz um sinal de saída apenas quando a massa se encontra em movimento. Tipicamente a sua frequência natural é inferior a 100 Hz. Em termos de aplicações, este acelerômetro é muitas vezes usado em explorações petrolíferas com o objetivo de captar vibrações provenientes de rochas subterrâneas [20].

3.3.2.4. Acelerômetros Piezoresistivos

Os acelerômetros piezoresistivos, comparando com os piezoelétricos, substituem o elemento piezoelétrico por um componente piezoresistivo. A força exercida pela massa faz variar a resistência, que por sua vez é detetada por uma ponte *Wheatstone*. Estes acelerômetros têm a vantagem de conseguir medir acelerações até aos 0 Hz [17].

3.3.2.5. Acelerômetros Capacitivos

Este tipo de acelerômetro contém um condensador entre a massa e a estrutura de suporte, e a sensibilidade deste acelerômetro varia de acordo com as mudanças na capacidade entre estes [17]. Estes acelerômetros funcionam com base na detecção das mudanças de espaço entre as duas placas do condensador. Uma das placas está fixa enquanto a outra está ligada a uma massa inercial [23]. Estas variações de espaço são inversamente proporcionais à carga do condensador. Como resposta à aceleração, a capacidade elétrica varia, o que faz variar o sinal de saída do circuito [17].

3.3.2.6. Acelerômetros Piezoelétricos

Os acelerômetros piezoelétricos são os dispositivos usados em muitas aplicações para medir choques e vibrações [24]. Este tipo de dispositivo possui um elemento transdutor, com propriedades piezoelétricas, onde é gerada uma carga elétrica quando este é sujeito a uma pressão ou deformação [16][20]. O elemento transdutor produz assim um sinal elétrico proporcional ao movimento de uma massa que está ligada a este e que também é proporcional a uma aceleração aplicada na massa.

Materiais que exibem a propriedade piezoelétrica têm como base monocristais como o quartzo e sal de Rochelle [16]. Há uma relação muito linear entre a força aplicada e o sinal elétrico desenvolvido neste tipo de materiais para um grande intervalo de frequências. Em relação à frequência natural destes dispositivos, esta pode ser superior a 5 kHz de maneira que podem ser utilizados para medir vibrações e choques num amplo intervalo de frequências [20]. Tipicamente, dentro dos acelerômetros piezoelétricos uniaxiais existem dois tipos de modelos que variam de acordo com o seu princípio de funcionamento: o tipo *compression*, em que a massa sísmica comprime o elemento piezoelétrico, exercendo uma força perpendicular ao plano; e o tipo *shear*, em que a massa sísmica gera uma força tangencial no elemento piezoelétrico. A escolha adequada de um desses modelos depende da aplicação [14][18]. A Figura 3.4 apresenta uma imagem dos dois modelos mencionados.

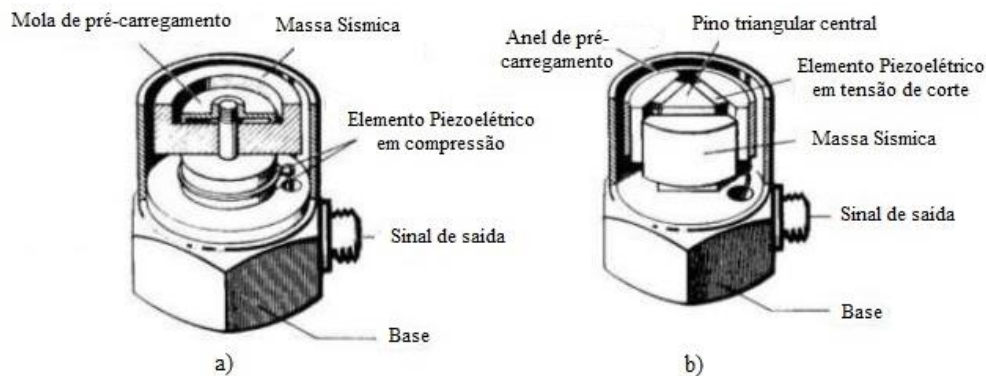


Figura 3.4 Modelos de acelerômetros piezoelétricos: a) tipo *compression*; b) tipo *shear*. Figura adaptada de [18]

Os acelerômetros piezoelétricos geram uma carga de baixa intensidade, da ordem do pico Coulombs, devido aos elementos piezoelétricos apresentarem uma alta impedância de saída. Geralmente a tensão elétrica é a grandeza mais comum de se trabalhar e, por isso, é utilizado um amplificador de carga para converter carga em tensão elétrica que por sua vez pode ser amplificada [18][24]. Alguns acelerômetros piezoelétricos já incluem eletrônica integrada e são chamados de IEPE (*Integral Electronics Piezoelectric*) [18]. Estes acelerômetros têm como vantagem a diminuição de ruídos derivada pela utilização de cabos muito longos, no entanto, como desvantagem apresentam uma maior sensibilidade às condições ambientais, nomeadamente quando são usados em altas temperaturas.

3.3.3. Características/Especificações dos Acelerômetros

Quando se pretende selecionar um acelerômetro para um determinado uso é recomendado compreender as suas especificações de modo a que a escolha do modelo ou tipo de acelerômetro seja a mais adequada. As especificações de um acelerômetro incluem especificações dinâmicas, especificações

elétricas e especificações mecânicas. Algumas das especificações mais importantes de um acelerómetro são as que se seguem:

- **Sensibilidade:** é a relação entre o sinal elétrico de saída e a grandeza física de entrada, ou seja, refere-se à capacidade de um acelerómetro detetar movimento. No caso dos acelerómetros piezoelétricos convencionais, a sensibilidade S é dada em $\text{pC}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ e nos IEPE, em $\text{mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ [14][19][25];
- **Eixo de sensibilidade:** os acelerómetros são projetados para detetar a grandeza física de entrada referente a um ou mais eixos. Os acelerómetros uniaxiais (um eixo) apenas detetam movimentos ao longo de um plano, sendo desprezável a sua resposta às solicitações segundo outros. Já os acelerómetros triaxiais são projetados para responder a movimentos segundo três planos ortogonais [19];
- **Amplitude dinâmica:** a amplitude dinâmica refere-se à amplitude de vibração máxima que o acelerómetro consegue medir antes de ocorrer distorção do sinal gerado. Na prática, o limite inferior da amplitude de operação é determinado pelo ruído presente no sistema de medição, enquanto o limite superior de operação é determinado pelo comportamento estrutural do acelerómetro [15][19][20];
- **Resposta à frequência:** a especificação da resposta à frequência de um acelerómetro mostra o desvio máximo da sua sensibilidade ao longo de um intervalo de frequência. Os limites do intervalo de frequência são determinados pela própria constituição do acelerómetro [14][19];
- **Sensibilidade transversal:** no caso dos acelerómetros piezoelétricos uniaxiais, estes são projetados de modo a terem sensibilidade referente a um único eixo. Porém, o eixo de máxima sensibilidade pode apresentar um certo deslocamento do eixo projeto, originando assim uma “sensibilidade transversal”. Normalmente, os fabricantes informam o desvio máximo da sensibilidade em relação ao eixo de montagem originado pela sensibilidade transversal e é expressa em percentagem da sensibilidade axial. Idealmente, a percentagem deveria convergir para valores muito próximos de 0 %, porém pode ir até aos 5 % [19];
- **Linearidade:** A linearidade é uma medida da resposta de saída (*output*) de um acelerómetro ao longo de um intervalo de amplitude especificada. Especifica os limites do sinal de saída que o acelerómetro pode diferir em relação a uma linearidade ótima. A amplitude linear é válida apenas para uma frequência singular e é especificada em percentagem [14][19];
- **Polaridade de saída:** descreve a direção do sinal de saída do acelerómetro (seja positivo ou negativo), dada uma determinada direção de aceleração de entrada [19];

- **Tamanho e massa:** A massa e o tamanho de um acelerómetro são fatores importantes na medição de vibração de sistemas mais leves, pois tamanhos e massas mais elevados podem alterar as características do objeto a ser testado. A massa dos acelerómetros deve ser significativamente menor do que a massa do sistema pelo qual a medição será realizada [14][18][19].

3.3.4. Técnicas de Fixação de Acelerómetros e de Cabos

Para uma boa resposta ao movimento de uma determinada superfície pela qual um acelerómetro esteja fixado, é importante que a montagem desse acelerómetro seja a mais adequada, nomeadamente a qualidade de ligação, a fim de obter melhores resultados. Na prática, existem vários métodos de montagem de acelerómetros e a escolha de um deles pode variar em cada caso. No entanto, é importante saber qual o mais apropriado.

Os métodos de montagem mais conhecidos são [26]:

- Montagem por aparafusamento
- Montagem por colagem
- Montagem magnética
- Montagem a cera

3.3.4.1. Montagem por aparafusamento

O método de montagem mais usado quando se pretende fazer a ligação de um acelerómetro a uma superfície é a montagem por aparafusamento. Sempre que possível deve-se dar preferência a este tipo de montagem pois apresenta os melhores resultados devido à força de ligação que é feita por parte do parafuso, entre o acelerómetro e a superfície que se pretende ligar [24]. Deste modo, fica assegurado que o acelerómetro recebe o mesmo movimento que o objeto que está ligado a ele para qualquer condição a que este seja sujeito. Existem duas configurações típicas tal como representado na Figura 3.5: a primeira, o parafuso prisioneiro é removível; e a segunda, o parafuso prisioneiro é parte integral do acelerómetro (não removível).

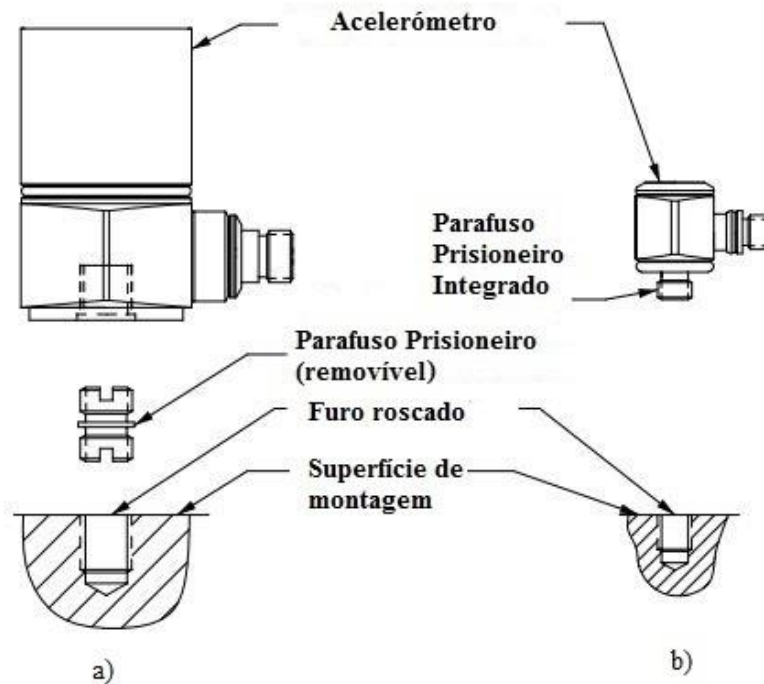


Figura 3.5 Montagem por aparafusamento: a) Parafuso removível; b) Parafuso integrado. Figura adaptada de [26]

A Figura 3.5 mostra as duas configurações referidas anteriormente. Contudo, a configuração a) é mais usual pelas seguintes razões:

- O parafuso sendo removível possibilita o acesso mais facilitado quando se pretende restaurar a superfície de contacto do acelerômetro;
- No caso em que a rosca do parafuso não se encontre nas devidas condições de utilização, o parafuso, sendo removível, seria facilmente substituído;
- Se desejado, o acelerômetro poderá ser ligado a um objeto através de outro método de montagem, como por exemplo, montagem por colagem;
- Em determinados casos, poderá ser importante orientar o conector para uma determinada direção e, assim, bastaria substituir o parafuso por um outro com diferentes características.

A montagem de acelerômetros por aparafusamento pode ser determinante no desempenho de um acelerômetro. Os parafusos são feitos normalmente de materiais em que as propriedades mecânicas apresentam uma alta resistência à tração e baixo módulo de elasticidade, como por exemplo, o berílio. Isto significa que o parafuso será muito forte e relativamente elástico, uma combinação perfeita para unir duas superfícies sujeitas a forças constantes. Na montagem do parafuso é recomendado que seja primeiramente roscado no acelerômetro, de maneira garantir que este entre sensivelmente até metade.

Depois, já com a montagem entre o parafuso e o acelerómetro efetuada, com o aperto recomendado, liga-se o acelerómetro à superfície [26][27].

3.3.4.2. Montagem por colagem

Por vezes surgem situações em que a montagem do acelerómetro por aparafusamento é impraticável. São exemplos, a montagem de acelerómetros em superfícies finas ou em superfícies onde a perfuração não é possível. Nestes casos, a montagem de acelerómetros por colagem pode ser o tipo de montagem mais prática e fácil.

Alguns acelerómetros são projetados de forma a serem ligados a uma superfície através deste método. Em alternativa, podem ser utilizados adaptadores ou bases que se ligam aos acelerómetros através de aparafusamento, de maneira a que este tipo de montagem seja aplicada (Figura 3.6). Em relação ao modo como se aplica, normalmente a cola é colocada em primeiro lugar na superfície onde se pretende instalar o acelerómetro e, posteriormente, o acelerómetro é colocado no respetivo local. O tipo de cola recomendado depende das aplicações em particular, variando com a temperatura ou tipo de superfície [28].



Figura 3.6 Adaptador [29]

3.3.4.3. Montagem magnética

A montagem de acelerómetros através de adaptadores magnéticos é usada quando se pretende ligar os acelerómetros a superfícies magnéticas como a motores ou compressores. O acelerómetro é ligado ao adaptador magnético normalmente através de um parafuso. A utilização desses adaptadores deve ser feita com algum cuidado especial (Figura 3.7). Este tipo de montagem não traduz grande confiança a frequências acima de 1 kHz [26].

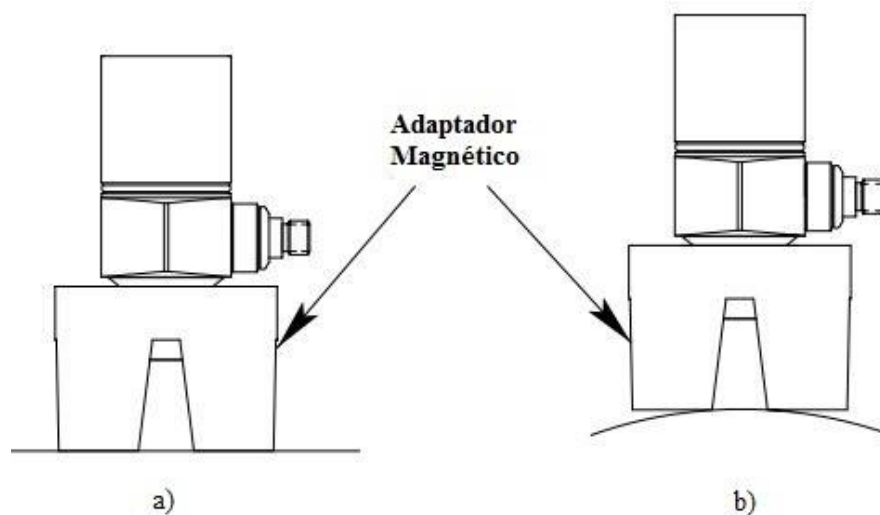


Figura 3.7 Adaptadores magnéticos: a) Montagem correta (em superfícies planas); b) Montagem a evitar. Figura adaptada de [26]

3.3.4.4. Montagem a cera

Este tipo de método não é muito recomendado na montagem de acelerómetros a superfícies mas pode ser aplicado como alternativa na ausência de melhores soluções. A inconsistência da espessura e o baixo módulo de rigidez da cera pode tornar os resultados inconfiáveis a altas frequências [26].

3.3.4.5. Preparação da Superfície

Na montagem de acelerómetros é muito importante que haja um cuidado especial em relação à planeza entre as superfícies em contacto. Para obter os melhores resultados de medição, especialmente em altas frequências, é essencial preparar a superfície onde o acelerómetro será colocado, como também a própria base do acelerómetro. É importante que a base de superfície dos acelerómetros corresponda às especificações de planeza fornecida pelo fabricante. Antes da montagem de qualquer acelerómetro é sempre conveniente garantir que a superfície se encontra limpa e em boas condições. De maneira a maximizar a transmissibilidade a altas frequências para o acelerómetro, por vezes, é aplicado entre a base do acelerómetro e a superfície de montagem uma camada fina de massa silicone [26][27].

3.3.4.6. Cabos

De modo a evitar incorretas medições de vibração, os cabos devem ser bem orientados e colocados junto à estrutura onde é colocado o acelerómetro, tal como representado na Figura 3.8. A colocação descuidada dos cabos, isto é, se os cabos se encontrarem dobrados ou enrolados entre si, pode

introduzir ruído nas medições realizadas. Um fenómeno conhecido pela vibração mecânica do próprio cabo é o efeito triboelétrico. É um fenómeno que é problemático a baixos níveis de vibração e que também origina ruído prejudicial nas medições efetuadas [16][27][28].

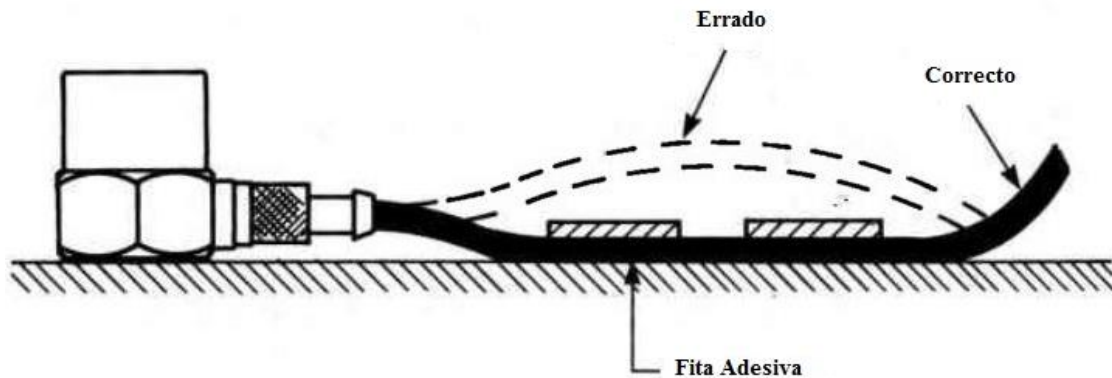


Figura 3.8 Montagem dos cabos. Figura adaptada de [16]

3.3.5. Influência das Condições Externas

Os acelerómetros são concebidos de maneira a ter o mínimo de sensibilidade em relação às várias influências externas. Um dos fatores que mais influencia os resultados de medição é a temperatura. Uma vez que o comportamento dos materiais piezoelétricos é dependente da temperatura, a sua sensibilidade é fortemente afetada por alterações daquele fator de influência, pelo que a sua caracterização tem em conta esta variável. Tipicamente, os fabricantes destes dispositivos indicam nas especificações a relação ‘sensibilidade vs temperatura’, de modo a permitir as devidas correções quando os mesmos são utilizados em condições extremas. Tal como a temperatura, a má montagem dos acelerómetros ou a existência de vibrações transversais durante as medições são fatores que podem afetar os resultados de medição. Na figura abaixo (Figura 3.9) apresenta-se algumas dessas influências que podem contribuir para a dispersão dos resultados de medição.

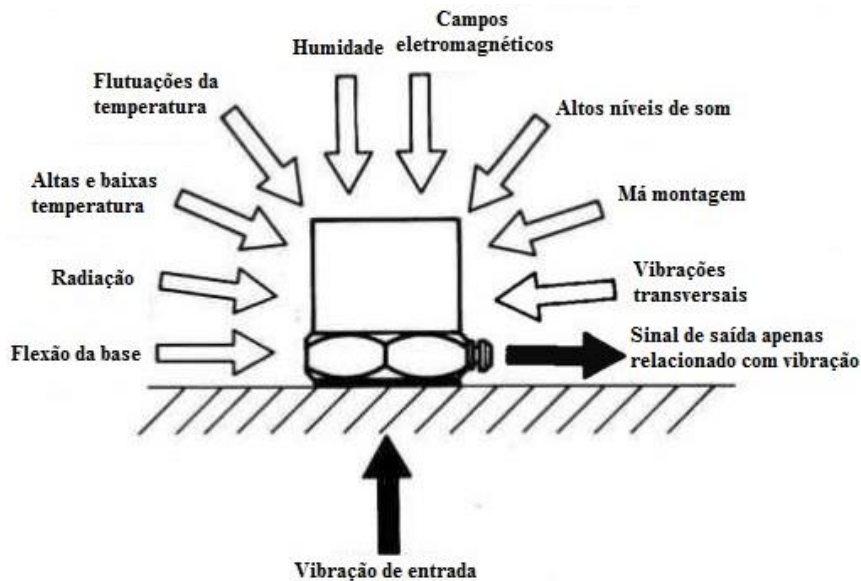


Figura 3.9 Influência das condições externas nos resultados de medições de vibração. Figura adaptada de [16]

3.4. Calibração de Acelerómetros

Com o objetivo de assegurar a confiança e a integridade dos resultados de uma medição, é necessário que o comportamento do sistema utilizado seja conhecido com rigor, de modo a determinar e contabilizar eventuais erros sistemáticos e aleatórios adquiridos ao longo do seu tempo utilização.

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), calibração é a operação que estabelece, sob condições especificadas, num primeiro passo, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; num segundo passo, utiliza esta informação para estabelecer uma relação que visa a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação [30]. Como os acelerómetros são um dos principais componentes de um sistema de medição no domínio da vibração, a sua calibração torna-se necessária e muito importante por duas razões [31]: 1) os acelerómetros podem ser sujeitos a ambientes severos podendo resultar em apreciáveis alterações nas suas características operacionais; 2) obter rastreabilidade a padrões e garantir sob condições legais os requisitos exigidos pelo consumidor e que evidenciem a confiabilidade do transdutor.

A calibração de um acelerómetro consiste em determinar a sua sensibilidade para o grau de liberdade de movimento para o qual foi projetado, isto é, a sensibilidade referente ao eixo principal de vibração. De assinalar a importância que as entidades reconhecidas para realizar estas operações dão ao fato de se dever considerar sempre a possibilidade de calibrar a cadeia de medição completa, constituída pelo transdutor, neste caso o acelerómetro, associado ao seu cabo de ligação e respetivo condicionador.

Dependendo das especificações e do nível de exigência necessários, existem no mercado dispositivos com características diferentes: dispositivos com especificações que permitem a sua utilização como acelerómetros-padrão, dispositivos em que a exigência se adequa às necessidades industriais e dispositivos de grande aplicabilidade e consumo.

Assim, a calibração pode ser de dois tipos: calibração primária ou absoluta e calibração secundária ou de comparação [18]. Na calibração primária, a sensibilidade do acelerómetro é determinada através de medições absolutas envolvendo o uso de técnicas interferométricas e é o método mais utilizado quando se pretende realizar a calibração de acelerómetros-padrão permitindo a transferência de rastreabilidade [18]. Na calibração secundária ou de comparação, a sensibilidade do dispositivo a calibrar é obtida através da comparação da sensibilidade de um acelerómetro de referência (padrão).

No enquadramento desta dissertação apenas se refere este segundo tipo de calibrações.

3.4.1. Calibração por Comparação (Método *back-to-back*)

3.4.1.1. Método de Medição

O método de comparação *back-to-back* tem como princípios básicos a aplicação de um movimento harmónico no acelerómetro-padrão e no acelerómetro que se pretende calibrar, e a comparação dos respetivos sinais de saída. Através de um excitador de movimento aplica-se uma vibração sinusoidal ao conjunto acelerómetro de referência e acelerómetro que se pretende calibrar. Uma vez que os sinais elétricos produzidos pelos dispositivos dependem dos materiais usados na sua construção, torna-se necessário adequar o respetivo condicionador. Para os acelerómetros de carga é necessário utilizar um pré-amplificador de carga, onde o sinal é convertido em tensão elétrica, que por sua vez é amplificada e medida. Os acelerómetros de tensão geram uma tensão em função da aceleração ou velocidade a que são sujeitos e, neste caso, não se utiliza o pré-amplificador de carga, sendo o seu sinal lido diretamente pelo sistema depois de amplificado.

Como já referido, a sensibilidade (desconhecida) do acelerómetro a calibrar é calculada com base na comparação entre a amplitude do sinal de saída do acelerómetro-padrão com a mesma amplitude medida no acelerómetro a calibrar. O modelo matemático para a determinação da sensibilidade é descrito pela seguinte equação [1]:

$$S_2 = \frac{V_2}{V_1} \cdot S_1$$

Equação 3.9

Onde:

- S_1 é a sensibilidade do acelerómetro de referência

- S_2 é a sensibilidade do acelerómetro a calibrar
- V_1 é o sinal de saída devolvido pelo transdutor de referência
- V_2 é o sinal de saída devolvido pelo transdutor a calibrar

Quando ambos os acelerómetros são sujeitos ao movimento vibratório introduzido pelo excitador de movimento, a razão do respetivo sinal de saída em tensão irá ser proporcional às respetivas sensibilidades. Como a sensibilidade do acelerómetro-padrão é já conhecida, a sensibilidade do acelerómetro a calibrar pode ser exatamente determinada. De acordo com as recomendações da Norma ISO 16063-21 [1], os melhores resultados em termos de exatidão são tipicamente alcançados quando os dois acelerómetros são rigidamente fixados na configuração tipo *back-to-back*, com os respetivos eixos de sensibilidade paralelos à direção do movimento. Resultados menos confiáveis podem ser produzidos devido a: imperfeições no alinhamento dos acelerómetros em relação ao eixo principal de medição, rigidez no acoplamento, variações de temperatura ou devido à vibração dos cabos ligados aos acelerómetros. Na Figura 3.10 é representado um exemplo de um sistema experimental inerente ao método *back-to-back*.

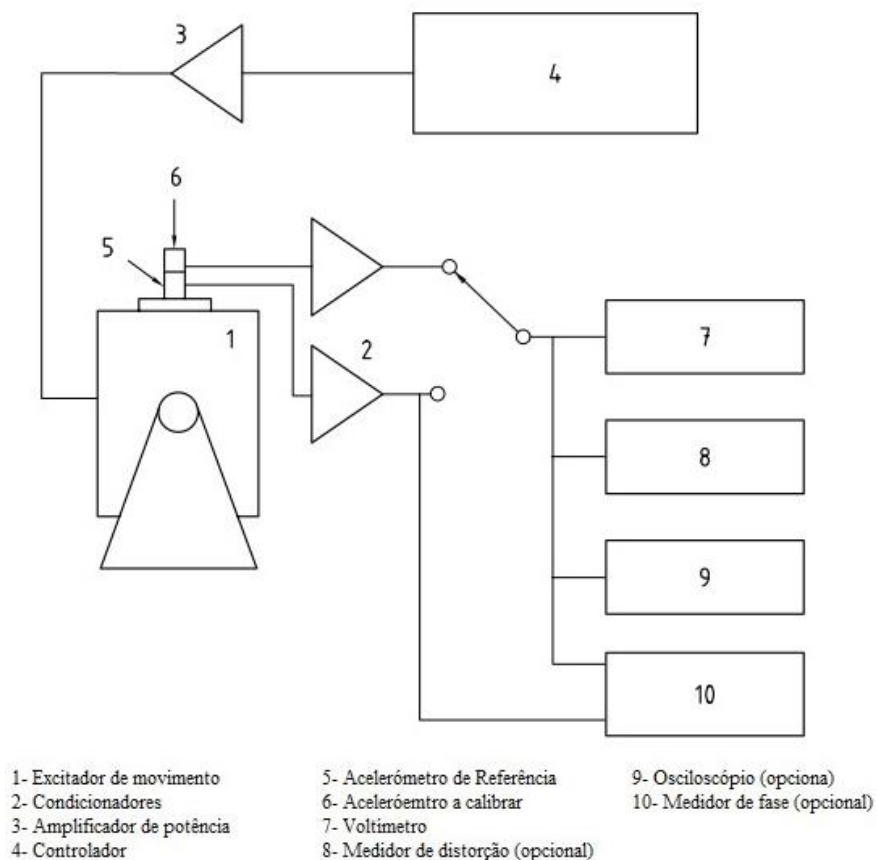


Figura 3.10 Exemplo de um sistema de medição para a calibração de acelerómetros por comparação a um acelerómetro de referência. Figura adaptada de [1]

3.4.1.2. Condições de Medição

Como dito anteriormente, sempre que possível, a calibração de um acelerómetro deve ser efetuada na configuração tipo *back-to-back* [1]. A montagem do acelerómetro-padrão à superfície de referência do excitador de movimento deve ser efetuada sempre com o mesmo valor de aperto especificado. Antes de uma calibração, as superfícies de contacto, tanto na superfície do excitador de movimento como ambos os acelerómetros, devem ser previamente examinadas de modo a verificar se estão limpas e que estejam em conformidade com as especificações de planeza fornecida pelo fabricante [1].

Para cada calibração, as condições de medição devem ser devidamente registadas, designadamente as referentes aos seguintes parâmetros: frequências de excitação, amplitudes de aceleração, aperto de montagem e valores médios ambientais de temperatura e humidade relativa. Existe documentação que refere e normaliza valores nominais típicos que caracterizam estes parâmetros, nomeadamente a Norma ISO 16063-21.

3.4.1.3. Equipamento Utilizado

Tipicamente, o equipamento utilizado para a implementação deste método é representado na Figura 3.10. Em função dos intervalos de medição pretendidos e da massa em deslocamento dos acelerómetros, podem ser utilizados diferentes tipos de equipamentos. Os constituintes do sistema experimental associados à calibração pelo método *back-to-back* consistem:

- Acelerómetro a calibrar
- Acelerómetro-padrão
- Excitador de movimento
- Amplificador de potência
- Controlador de vibração
- Condicionadores
- Multímetro ou voltímetro
- Chave dinamométrica
- Computador com *software* de controlo instalado

3.4.2. Norma ISO 16063-21

A Norma ISO 16063-21, criada em 2003 e preparada pelo comité técnico ISO/TC 108, tem como objetivo descrever a calibração de transdutores por comparação. Os métodos descritos nesta Norma tanto podem ser aplicados através da comparação de um transdutor padrão calibrado por métodos primários como pela comparação de transdutores calibrados por outros níveis hierárquicos de calibração.

Esta Norma explica o funcionamento de métodos de calibração por comparação e especifica quais os instrumentos e procedimentos que devem ser utilizados cumprindo certas condições impostas em laboratório de acordo com este tipo de calibrações.

De acordo com a Norma ISO 16063-21, a frequência do sinal de excitação aplicada ao acelerómetro deve estar compreendida entre 0,4 Hz e 10 kHz num intervalo dinâmico de amplitude de aceleração entre $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ [1].

A Figura 3.11 ilustra o método *back-to-back*, método de calibração secundário que se efetua atualmente no Laboratório de Aceleração e Vibrações do Instituto Português da Qualidade.



Figura 3.11 Método *back-to-back*

4. Desenvolvimento da Mesa de Vibração

Este capítulo tem como principal objetivo apresentar o desenvolvimento de uma mesa de vibração face à necessidade de encontrar uma solução que minimize o tempo de calibração de acelerómetros pelo método de comparação. O método de calibração *back-to-back* limita o tempo de calibração de acelerómetros pois como descrito anteriormente, a calibração é efetuada por comparação de apenas um acelerómetro a calibrar com um outro acelerómetro de referência.

O projeto iniciou-se com a realização de um estudo de contextualização e consequente desenvolvimento de conceção através da recolha de informação dos principais requisitos da mesa de vibração. Uma mesa de vibração tem como ideia básica garantir a melhor transmissão possível das forças produzidas pelo excitador de movimento para o objeto para o qual se pretende fazer o teste de vibração [32]. É comum não ser possível fixar o objeto que se pretende testar diretamente no excitador de movimento e, portanto, estas mesas são importantes no sentido de tornar possível a fixação desses objetos, funcionando como a transição entre o excitador e o objeto que se pretende colocar em teste de vibração [33][34].

O desenvolvimento do projeto visa apresentar uma solução construtiva com a finalidade de aumentar a produtividade do método de calibração utilizado no LAV, implementando uma nova solução de medição, respeitando os requisitos e especificações funcionais com a definição dos meios utilizados no processo de desenvolvimento, de modo a justificar e a viabilizar a solução encontrada.

4.1. Requisitos e Recolha das Características Mais Importantes da Mesa de Vibração

A conceção da mesa de vibração foi realizada com base na identificação dos principais requisitos do projeto. Estes requisitos visam identificar as funcionalidades pretendidas e as limitações inerentes à mesa de vibração. Em projetos de mesas de vibração, é muito importante considerar várias propriedades físicas, como o material, a dimensão, a massa, a rigidez ou a forma [32].

Para o seu desenvolvimento teve-se em atenção a escolha destas propriedades físicas, bem como a identificação das limitações e constrangimentos, o estabelecimento das características mais importantes, a tecnologia adequada e os custos associados. Na Figura 4.1 são apresentados os principais critérios que se tiveram em consideração na conceção da mesa de vibração.

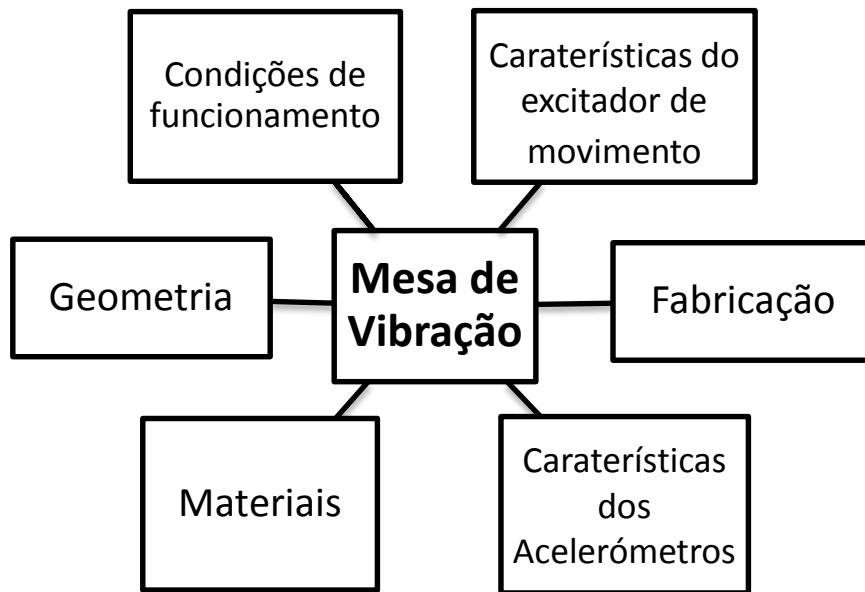


Figura 4.1 Critérios de projeto

As limitações e necessidades que foram consideradas durante o desenvolvimento da mesa de vibração para a otimização da calibração de acelerómetros por comparação foram as seguintes:

- Permitir a ligação de nove acelerómetros, em que uma das ligações seria destinada para o acelerómetro-padrão (referência) e as oito restantes para os acelerómetros auxiliares;
- Considerar o incremento de massa provocado pela ligação dos acelerómetros à mesa de vibração;
- Considerar o acoplamento entre a mesa de vibração e o excitador de movimento existente no laboratório;
- Definir uma geometria simplificada da mesa de modo a facilitar a sua fabricação, permitindo também uma redução de custos associado a essa fabricação;
- Escolher um material que apresente elevados níveis de rigidez e de fácil aquisição no mercado, permitindo também uma redução de custos no processo de fabricação;
- Considerar na escolha do material a massa final da mesa de vibração, pois não poderá ultrapassar o limite disponibilizado pela força disponível no excitador de movimento;
- Conhecer as condições de funcionamento, nomeadamente as relativas aos intervalos de frequências e acelerações estabelecidas, garantindo a melhor transmissão do movimento.

4.2. Pormenores Construtivos da Mesa de Vibração

A mesa de vibração foi desenvolvida de acordo com os requisitos e limitações descritas anteriormente. Esta mesa foi modelada tendo em principal consideração as características do *shaker* (excitador de movimento) utilizado no laboratório, de modo a estabelecer ligação ao mesmo, o número e tipo de ligações referentes aos acelerómetros a colocar em teste. Com a implementação da mesa de vibração no sistema experimental atual no laboratório de vibrações, irá ser possível realizar ensaios de caracterização da mesa de vibração para posterior análise da informação técnica e estatística associada ao estudo de comparação pretendido. O estudo de comparação realizado irá permitir analisar o comportamento da mesa face aos sinais de saída dos acelerómetros ligados à mesma, em comparação com os sinais de saída dos acelerómetros obtidos pelo procedimento de comparação com fixação *back-to-back*. Depois da obtenção e análise dos dados provenientes dos diferentes procedimentos, parte-se para a sua comparação de forma a validar a aplicação da mesa de vibração na calibração de acelerómetros.

A Figura 4.2 ilustra a mesa de vibração desenvolvida no âmbito do trabalho realizado referente ao desenvolvimento de uma mesa de vibração para a integração num sistema experimental para a calibração de acelerómetros.

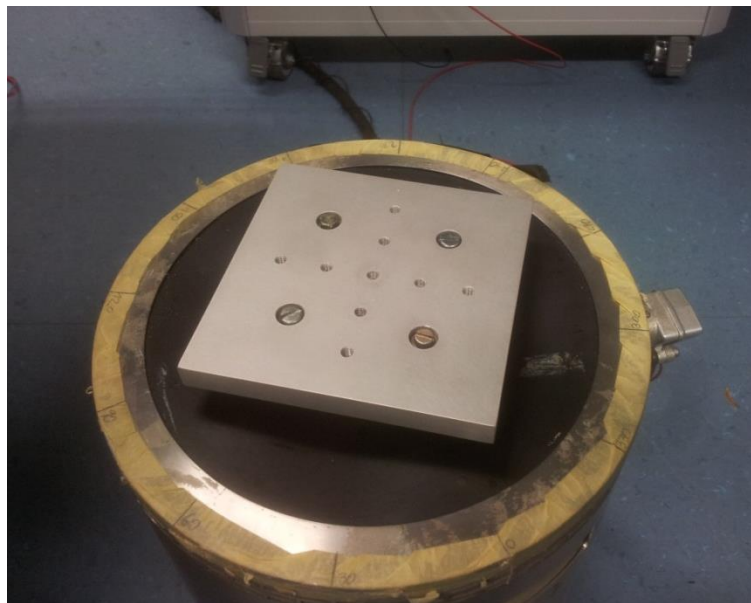


Figura 4.2 Mesa de vibração desenvolvida ligada ao *shaker* B&K 4805/12

Como se pode verificar na figura acima, a vantagem do uso da mesa de vibração, em comparação com o método *back-to-back*, reside na capacidade de possibilitar a montagem de nove acelerómetros por aparafusamento, em que o acelerómetro de referência é colocado no centro da mesa e os restantes à sua volta, possibilitando, se validada, a calibração de vários acelerómetros simultaneamente.

4.2.1. Conceção da Mesa de Vibração

No excitador de movimento utilizado no laboratório (*shaker* eletrodinâmico), as forças provenientes da bobine de condução são transmitidas através de um esqueleto que está ligado a uma superfície de referência através de dois parafusos em cada canto (Figura 4.7). Entre a superfície de referência do *shaker* e os acelerómetros estará a mesa de vibração desenvolvida. Pretende-se com a mesa de vibração que os acelerómetros recebam a força que é aplicada pelo *shaker* com o mínimo de distorção e perda de intensidade. Para isso a mesa de vibração deverá ser o mais rígido possível. É a condição número 1 na conceção deste tipo de estruturas [33]. A partir da segunda lei de Newton, sabe-se que a aceleração é inversamente proporcional à massa. Logo, o nível de aceleração que o *shaker* poderá atingir é inversamente proporcional à massa total que tem de conduzir e, portanto, tendo em conta que a força do *shaker* tem limitações, a mesa de vibração deverá ser o mais leve possível. Esta é a condição número 2 [33]. Alguns parâmetros foram pré-determinados na conceção da mesa de vibração. A massa da mesa de vibração, por exemplo, foi limitada pela massa dos acelerómetros e pela força disponível pelo *shaker*. A geometria da mesa foi determinada, em parte, por ter que ser ligada ao *shaker* e, por outra parte, por permitir a ligação dos acelerómetros. A Figura 4.3 representa a relação entre a aceleração máxima e a massa que o *shaker* utilizado no laboratório pode suportar.

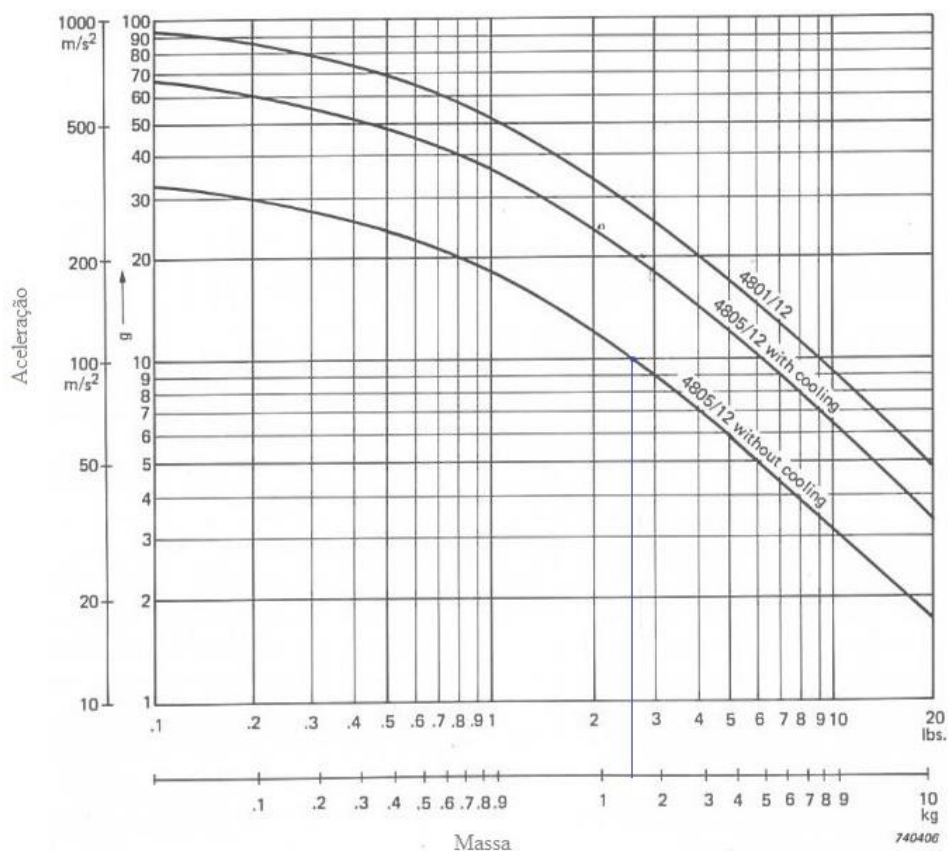


Figura 4.3 Relação aceleração máxima vs massa. *Shaker* B&K 4805/12. Figura adaptada de [35]

Através da Figura 4.3, pode-se determinar facilmente a massa máxima do conjunto mesa de vibração e acelerómetros permitida pelo *shaker* B&K 4805/12 utilizado nos ensaios experimentais. A aceleração máxima imposta nos ensaios experimentais será de $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. No quinto capítulo são apresentadas as condições experimentais estabelecidas neste estudo. Sabendo a aceleração, a massa total que o *shaker* a utilizar poderá suportar sem arrefecimento é de aproximadamente 1,50 kg, tal como se pode verificar na Figura 4.3. Sabendo a massa do elemento móvel que se encontra no interior do *shaker* (Tabela 4.2) e subtraindo esse valor aos 1,50 kg, determina-se a massa máxima final do conjunto mesa de vibração e acelerómetros. Teoricamente, 1,05 kg é o valor máximo de massa que o *shaker* referido poderá suportar. De maneira a garantir o bom funcionamento do *shaker* e considerando os limites de massa conhecidos, projetou-se a mesa de vibração de modo a que o conjunto mesa de vibração e acelerómetros ficasse sensivelmente abaixo de 1 kg. Os acelerómetros utilizados em estudo são acelerómetros da B&K e *Endevco*, sendo todos eles relativamente pequenos com massas compreendidas entre 0,01 kg a 0,04 kg.

A massa correspondente à mesa de vibração produzida foi de 0,589 kg, pelo que respeita um dos requisitos definidos. No quinto capítulo são apresentados os acelerómetros utilizados no estudo da mesa de vibração.

4.2.2. Escolha do Material

Os materiais normalmente considerados na construção de mesas de vibração são o aço, alumínio e magnésio [33]. A relação entre o módulo de *Young* e a densidade é um fator controlador para a frequência natural de uma estrutura. Como se pode verificar na Tabela 4.1, a sua relação é praticamente a mesma e, como tal, a escolha do material não afetará significativamente a frequência natural da mesa de vibração. Contudo a escolha de um destes materiais irá decerto afetar a sua massa, no caso do aço, e no caso do magnésio, o custo [33].

Tabela 4.1 Propriedades dos materiais. Tabela adaptada de [33]

	Aço	Alumínio	Magnésio
Módulo de <i>Young</i> /Módulo de Proporcionalidade Longitudinal (E), (Pa)	$20,7\cdot 10^{10}$	$6,9\cdot 10^{10}$	$4,14\cdot 10^{10}$
Densidade (ρ), (kg/m^3)	7840	2770	1800
E/ρ , ($(\text{N}\cdot\text{m})/\text{kg}$)	$2,65\cdot 10^7$	$2,49\cdot 10^7$	$2,3\cdot 10^7$

O processo de fabricação também é um fator que determina a escolha do material. Embora o magnésio seja um metal mais leve, a sua escolha levaria ao aumento nos custos associados à fabricação da mesa de vibração. Na maior parte das aplicações, o alumínio é o material mais escolhido [32].

Tendo em conta as considerações referidas, a escolha do material usado na construção da mesa de vibração foi o alumínio. Foi portanto requisitado a produção de uma mesa de vibração em alumínio série 6082 sem tratamento térmico e com um serviço opcional (extra) de anodização. O processo de anodização oferece à peça a cor natural do alumínio e, para a maior parte dos produtos anodizados, um tempo de vida extremamente longo oferecendo vantagens significativas do ponto de vista económico e de manutenção [36]. Em relação ao alumínio, foi escolhido uma liga da série 6000, mais especificamente a série 6082, sendo uma das ligas com propriedades mecânicas mais elevadas desta série. Caracteriza-se pela adição de manganês à sua composição química e é considerada ideal para aplicações estruturais com boa resistência à corrosão e boa tenacidade. A liga 6082 também oferece boas características de acabamento e responde bem a anodização [37][38].

4.2.3. Fixação da Mesa de Vibração ao *Shaker*

Como já referido, o excitador de movimento utilizado nesta dissertação foi o *shaker* da B&K 4805/12. De seguida são apresentadas algumas características que se tiveram em conta para a fixação e modelação da mesa de vibração, considerando o movimento de translação da mesa na direção vertical (eixo y). De seguida, através da Tabela 4.2, Figura 4.4 e Tabela 4.3 são apresentadas essas mesmas características.

Tabela 4.2 Características do *shaker* B&K 4805/4012. Tabela adaptada de [35]

Força com arrefecimento (N)	370
Força sem arrefecimento (N)	155
Massa elemento móvel (kg)	0,45
Deslocamento máximo (mm)	13
Frequência de ressonância (Hz)	7200
Localização dos pontos de montagem (Quadrado, lado em mm)	53,9

Geometria da mesa de referência do *shaker*

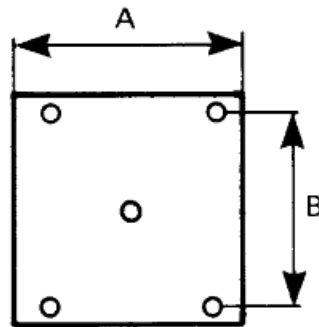


Figura 4.4 Detalhes da mesa de referência quadrangular do *shaker* B&K 4805/4012 [35]

Na Tabela 4.3 são apresentadas as dimensões da superfície de referência do *shaker* B&K 4805/4812 para a montagem da mesa de vibração.

Tabela 4.3 Detalhes da mesa de referência quadrangular do *shaker* B&K 4805/4012. Tabela adaptada de [35]

Modelo	4812
A (mm)	66,5
B (mm)	53,9
Profundidade do furo (mm)	7,5
Tamanho da rosca (mm)	M5 x 0,8
Profundidade da rosca (mm)	3,9

Nos quatro cantos estão posicionados quatro furos roscados tal como ilustrado na Figura 4.4. Os parafusos que fazem a ligação da mesa de vibração ao *shaker* não foram colocados em contato direto nesses quatro furos. De modo a não danificar os furos roscados com a montagem e desmontagem da mesa de vibração no *shaker*, foram aplicados nos mesmos *inserts*. A vantagem da utilização de *inserts* está na eventualidade de se algum se danificar, este poderá facilmente ser substituído por outro, ao contrário dos furos roscados da mesa de referência do *shaker*. Na Figura 4.5 são representados os parafusos e *inserts* utilizados para a fixação da mesa de vibração ao *shaker*.



Figura 4.5 Parafusos e *inserts* utilizados

4.2.4. Modelação da Mesa de Vibração

Esta fase do projeto consistiu no desenho da mesa de vibração através do programa de desenho assistido por computador *SolidWorks*. O *SolidWorks* é uma aplicação de desenho automático com parametrização que permite esboçar ideias de forma a criar modelos 3D [39].

A estratégia para a modelação da mesa de vibração foi a simplicidade da sua forma geométrica de modo a facilitar o seu fabrico e, ao mesmo tempo, ter a funcionalidade desejada.

A figura seguinte apresenta alguns modelos de mesas de vibração usados em testes de vibração que serviram como base para a modelação da mesa de vibração.



Figura 4.6 Exemplos de mesas de vibração para testes de vibração

Esta modelação foi feita a partir das características geométricas e dimensionais da mesa de referência do *shaker* (Figura 4.4 e Tabela 4.3). A primeira abordagem foi desenhar a base inferior da mesa de modo a permitir a fixação desta ao *shaker* (Figura 4.7).

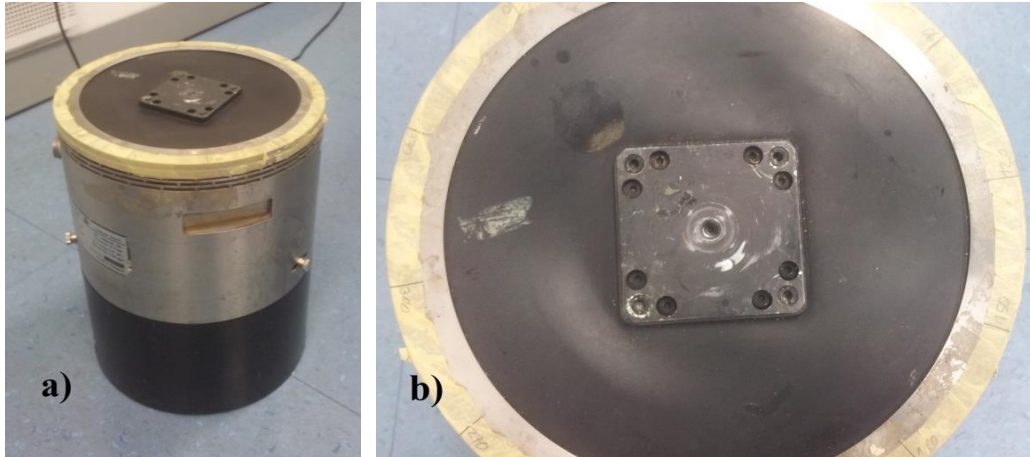


Figura 4.7 *Shaker* 4805/4812: a) Vista em perspetiva; b) Vista de topo

Depois da base da mesa desenhada, procedeu-se ao desenho da face superior da mesa, local onde foi idealizado a montagem de nove acelerómetros. O método de fixação usado na ligação dos acelerómetros à mesa de vibração foi método de montagem por aparafusamento. De modo a garantir repetibilidade nas medições, o aperto de todos os acelerómetros foi efetuado através de uma chave dinamométrica com os valores de aperto recomendados pelos seus fabricantes. Além de garantir repetibilidade, garante a correta montagem do acelerómetro prevenindo eventuais danos.

Na estrutura, aplicaram-se os furos para a ligação ao *shaker*, como para a ligação por aparafusamento dos acelerómetros existentes no laboratório, tendo em conta as suas dimensões e características. Nas figuras que se seguem (Figura 4.8 e Figura 4.9) é representada a mesa de vibração desenvolvida em *SolidWorks* ilustrando a base superior e inferior da mesma.

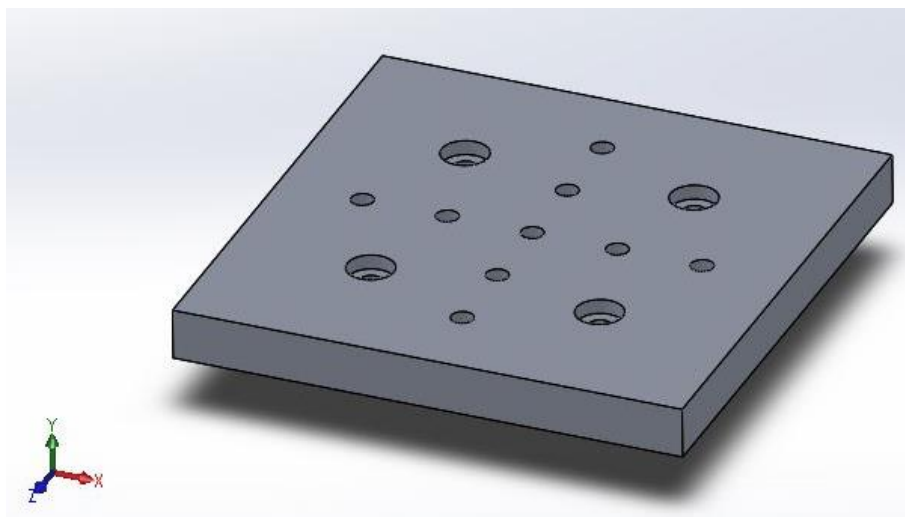


Figura 4.8 Base superior da mesa de vibração que permite a fixação dos acelerômetros

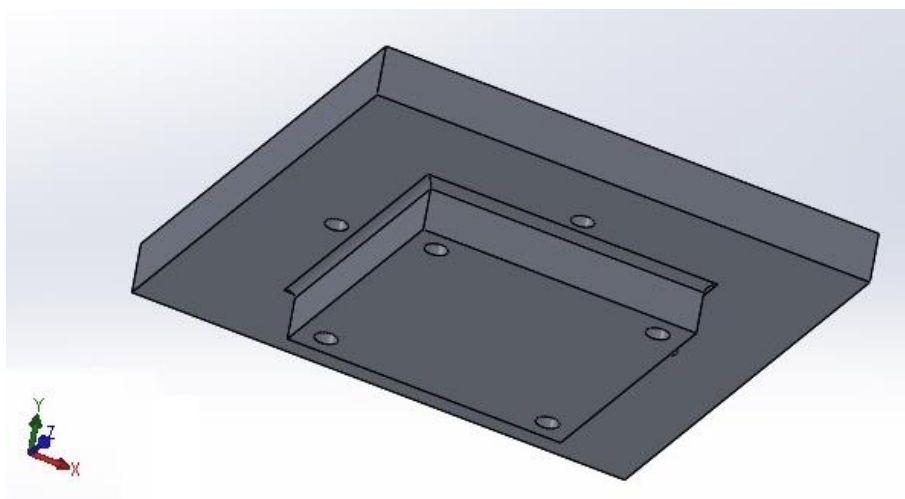


Figura 4.9 Base inferior da mesa de vibração que permite a fixação ao *shaker*

A mesa de vibração tem nove furos roscados com uma distância mínima de 20 mm entre furos, de maneira a que os acelerômetros a ligar sejam fáceis de manusear, tanto na montagem à mesa de vibração como na desmontagem. O tamanho de rosca dos nove furos foi dimensionado a partir das especificações mecânicas dos acelerômetros e, por isso, foram feitos furos roscados de tamanho M5 com 0,8 de passo de modo a respeitar essas especificações.

A base de dados do *SolidWorks* possui uma grande variedade de materiais, incluindo diversas ligas de alumínio. Das ligas de alumínio existentes no *SolidWorks*, aplicou-se ao modelo desenhado o alumínio 6061 que se aproximou da liga utilizada na produção da mesa de vibração. Através da ferramenta *Mass Properties* do programa, foi possível estimar a massa da mesa projetada tendo em conta o material escolhido. A massa estimada pelo programa foi de aproximadamente 0,600 kg, muito próxima

do valor da massa real da mesa de vibração produzida (0,589 kg) e, portanto, dentro dos limites de massa admissíveis pelo *shaker*.

4.2.5. Estudo de Frequência por Simulação

A prevenção de frequências de ressonância é um dos fatores críticos de projeto para este tipo de estruturas [33]. É importante manter as frequências naturais da mesa de vibração pelo menos 50 % acima da frequência imposta pelo *shaker* [34]. Quando a frequência de excitação iguala uma frequência natural do sistema, ocorre o fenômeno de ressonância, caracterizado por grandes amplitudes de resposta com pequenas amplitudes de excitação ou de entrada, podendo levar a falhas mecânicas.

Para o estudo deste fator tão importante, realizou-se um estudo de frequência através da ferramenta *Simulation* do programa *SolidWorks*, de modo a obter as primeiras frequências naturais da mesa de vibração e verificar se as primeiras frequências naturais estão fora do intervalo de frequências estabelecidas nas condições experimentais. O *SolidWorks Simulation* é uma ferramenta de simulação e recorre ao método dos elementos finitos, permitindo a realização de análises estruturais, térmicas, fadiga, etc., e, nomeadamente, análises modais ou de frequência de modelos concebidos.

Em relação ao procedimento efetuado no *SolidWorks Simulation*, a simulação de frequência para o cálculo das frequências naturais foi composta pelas seguintes etapas:

- Definição das unidades de análise;
- Seleção do material;
- Criação do estudo de frequência;
- Aplicação das fixações;
- Geração da malha;
- Execução da análise;
- Análise dos resultados.

As unidades que foram utilizadas para efetuar esta análise estão de acordo com o Sistema Internacional de Unidades. Em relação ao material, como referido anteriormente, foi selecionado o alumínio 6061. Depois da criação do estudo, a simulação implicou a seleção do tipo de fixação da mesa vibração e a definição da malha. Como já referido, a mesa de vibração foi fixada ao *shaker* com recurso a parafusos aplicados nos quatro cantos da mesma, tal como indicado na Figura 4.10. Esta fixação restringe o movimento da mesa nas três direções. A funcionalidade utilizada no *SolidWorks Simulation* que simulou este tipo de fixação denomina-se “*fixed geometry*”.

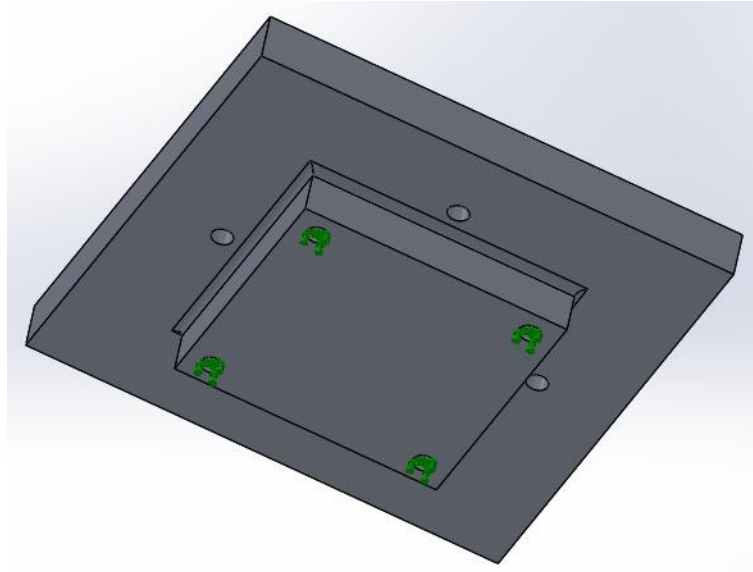


Figura 4.10 Fixação da mesa de vibração

Em relação à geração da malha, foi definida uma malha “fina” (Figura 4.11) e, portanto, com maior número de nós e elementos, proporcionando uma maior qualidade a este estudo de frequência. A geração da malha é um fator importante para este tipo de análise pois é o processo que permite a divisão de um domínio do problema ou modelo que se pretende estudar.

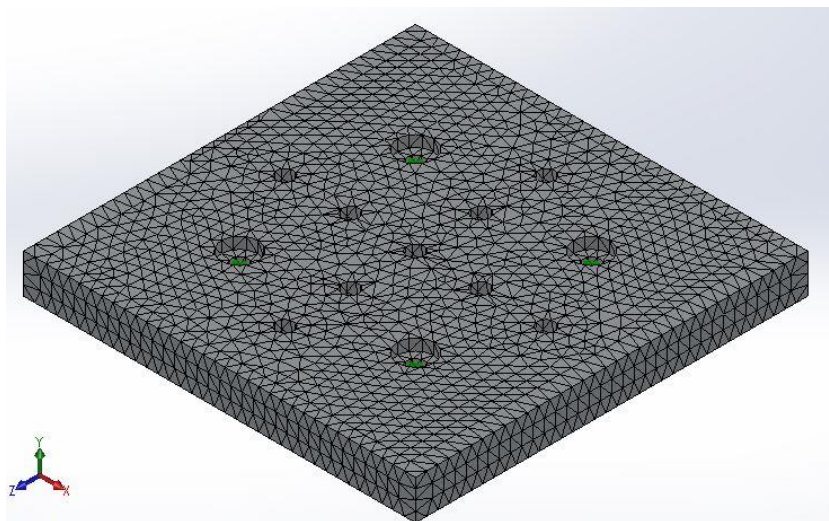


Figura 4.11 Geração da malha da mesa vibração

Após a definição destes parâmetros, o programa efetuou o cálculo das incógnitas do problema, determinando assim as frequências naturais e modos de vibração da mesa de vibração (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 Resultados do cálculo das primeiras dez frequências naturais

Frequências naturais	Frequência (Hz)
1	6886
2	6903
3	6903
4	6963
5	8154
6	9579
7	9581
8	12276
9	12503
10	14095

Como se pode observar na tabela, foram calculadas as primeiras dez frequências naturais. No presente estudo, apenas interessava determinar as primeiras frequências naturais de maneira a verificar se as frequências calculadas estariam acima (pelo menos 50 % acima [34]) do valor máximo de frequência estabelecido em estudo. De acordo com as condições experimentais estabelecidas neste estudo (Tabela 5.2 do capítulo seguinte), como se pode verificar na tabela acima representada, as primeiras frequências naturais encontram-se muito acima da maior frequência imposta pelo excitador de movimento, pelo que é prevenido o fenómeno de ressonância na mesa de vibração concebida.

A Figura 4.12 ilustra o resultado do estudo de frequência no primeiro modo de vibração da mesa de vibração que ocorre na primeira frequência natural, onde se pode verificar que as zonas solicitadas a maiores deslocamentos ocorrem nas extremidades (representado a verde e a vermelho). A zona representada a azul ilustra deslocamentos praticamente nulos, coincidindo com as furações destinadas à fixação dos acelerómetros na mesa de vibração.

Model name: Mesa
Study name: Modal test at 6061 Mesa 1
Plot type: Frequency Displacement1
Mode Shape : 1 Value = 6886.4 Hz

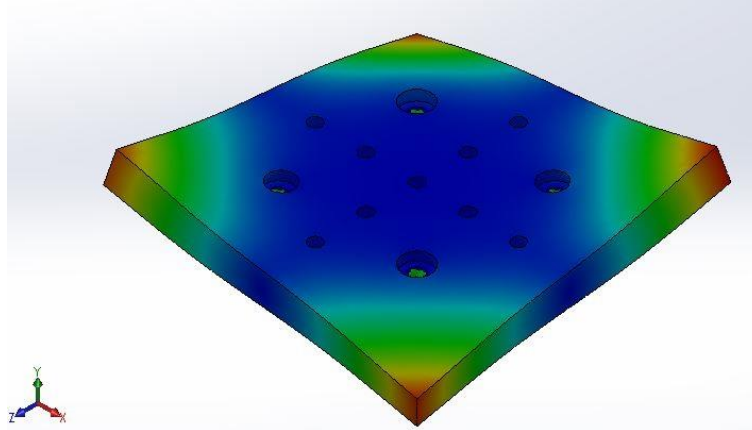


Figura 4.12 Resultado do estudo na primeira frequência natural

5. Validação Experimental

No presente capítulo será descrito a componente experimental de suporte a esta dissertação.

5.1. Introdução

Foi adotada a hipótese de comparar resultados obtidos por diferentes realizações experimentais, nomeadamente pelo procedimento do documento de referência (método de comparação *back-to-back* descrito na Norma ISO 16063-21) e o procedimento expedito a validar, com base na mesma metodologia do documento de referência, permitindo a determinação simultânea de erros de calibração em diferentes acelerómetros, pela utilização de um sistema de aquisição de dados com múltiplas entradas.

Está-se perante uma situação que envolve a utilização de vários equipamentos e consequentes fontes de erro e incerteza, o que poderia levar a uma dificuldade acrescida nesta componente experimental, pelo que foi tido especial cuidado nas condições de utilização dos diferentes componentes do sistema. Assim, utilizando para um mesmo acelerómetro, o mesmo valor de torque de aperto, o mesmo canal de entrada no mesmo condicionador de sinal, com o mesmo cabo de interligação com a devida correta fixação, o mesmo canal no sistema de aquisição, as mesmas condições nominais de aceleração e frequência, as condições ambientais proporcionadas por um ambiente laboratorial estável, nas duas realizações experimentais a comparar, ficam eliminadas aquelas fontes de erro e incerteza, restando como componentes de fontes de incerteza aquelas inerentes à determinação do erro entre as duas situações e que resultam apenas da disposição física num elemento adicional, a mesa desenvolvida.

De forma a compreender o comportamento da mesa nos diversos pontos de fixação dos acelerómetros, realizaram-se vários ensaios experimentais com diferentes acelerómetros. Tendo em conta os cinco acelerómetros estabelecidos em estudo, em que um deles é utilizado como acelerómetro de referência, foram efetuados quatro ensaios pelo procedimento de fixação de acelerómetros *back-to-back*. Já pelo procedimento de comparação multicanal com recurso à mesa de vibração realizaram-se no total treze ensaios, fazendo variar a disposição dos acelerómetros auxiliares nas furações efetuadas na mesa de vibração desenvolvida, com vista a compreender o comportamento da mesma.

Foi idealizado como parte do sistema experimental a existência de uma placa de aquisição multicanal. Porém, no decorrer dos ensaios foi detetada uma limitação no sistema implementado relativa ao número de canais disponíveis e capacidades previstas no *software* desenvolvido, tendo sido então optada a solução de utilizar apenas dois canais de medição, obrigando por isso à realização de vários ensaios de modo a estudar os vários pontos de fixação, pelo que se refletiu num maior tempo despendido nestes.

Variando a disposição dos acelerómetros na mesa, foram mantidos nesta mais acelerómetros do que aqueles de que se adquiriam os sinais (referência e auxiliar), funcionando como *dummy masses*, para que os resultados tivessem em consideração a existência das massas dos restantes acelerómetros durante os ensaios, a fim de simular a simultaneidade de aquisição de sinais de vários acelerómetros.

Por fim, depois dos ensaios efetuados e dos respetivos dados adquiridos através dos dois procedimentos realizados, pretendeu-se validar o novo procedimento multicanal com recurso à mesa de vibração através da comparação com o procedimento de comparação com fixação *back-to-back* descrito na Norma ISO 16063-21.

5.2. Procedimento Experimental

O procedimento experimental aplicado aos acelerómetros envolvidos em estudo é dividido em duas partes fundamentais:

- Realização de ensaios com recurso à fixação de acelerómetro seguindo o descrito no método *back-to-back* (procedimento de comparação com fixação *back-to-back*);
- Realização de ensaios com recurso à mesa de vibração desenvolvida que visa permitir a fixação por aparafusamento de até nove acelerómetros (procedimento de comparação multicanal).

Estes dois procedimentos realizados no LAV diferenciam-se apenas na forma como os acelerómetros são dispostos. Os elementos constituintes do sistema experimental mantêm-se constantes para os dois procedimentos, sendo a única diferença a utilização da mesa de vibração. A Figura 5.1 e Figura 5.2 apresentam os dois procedimentos realizados referentes ao procedimento de comparação com fixação *back-to-back* e à nova solução de comparação multicanal com recurso à mesa de vibração, respetivamente.

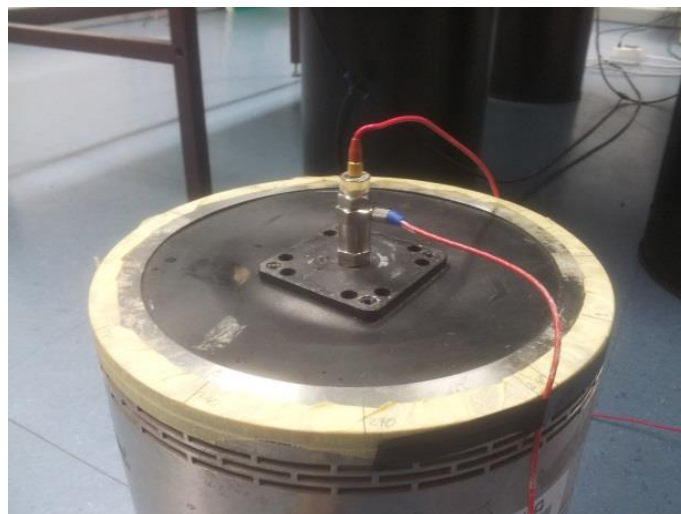


Figura 5.1 Procedimento de comparação com fixação *back-to-back*. Acelerómetro de referência e acelerómetro a comparar

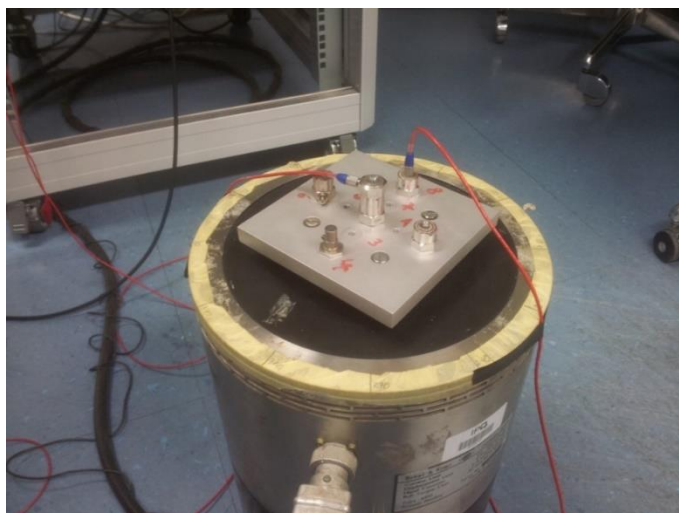


Figura 5.2 Procedimento de comparação multicanal com mesa de vibração. Acelerómetro de referência (no centro) e quatro acelerómetros (um a comparar)

Uma vez efetuados os ensaios para cada procedimento, respeitando as mesmas condições de funcionamento, o que se pretende é comparar o valor dos erros médios determinados em ambos os procedimentos. O erro médio é dado em % do valor em tensão RMS medido entre os acelerómetros auxiliares por comparação ao acelerómetro de referência. O acelerómetro-padrão B&K 8305 (Tabela 5.1) foi utilizado como referência em todos os ensaios a partir do qual foi determinado o erro por comparação com cada um dos acelerómetros designados como auxiliares.

Como já referido, estas condições de medição apresentadas foram mantidas para os dois procedimentos de maneira a garantir repetibilidade nas condições de medição. Ou seja, a única diferença dos dois procedimentos reside na utilização da mesa de vibração, com o intuito da comparação entre estes dois procedimentos apenas depender da diferente disposição de fixação dos acelerómetros.

Na Tabela 5.1 são apresentadas algumas características bem como as condições de medição dos cinco acelerómetros envolvidos no estudo desta dissertação

Tabela 5.1 Características dos cinco acelerômetros utilizados

Características e condições de medição					
Modelo	B&K 8305 /ns 2243388 (Referência)	ENDEVCO 224C ns FN92	ENDEVCO 224C ns FN94	B&K 4370 ns 10695	B&K 4397 ns 10794
Tipo	Piezoelétrico/carga	Piezoelétrico/carga	Piezoelétrico/carga	Piezoelétrico/carga	Piezoelétrico/tensão
Sensibilidade nominal	0,129 pC/(m·s ⁻²)	1,235 pC/(m·s ⁻²)	1,173 pC/(m·s ⁻²)	9,9 pC/(m·s ⁻²)	0,9827 mV/(m·s ⁻²)
Resposta em amplitude	1 %	5 %	5 %	5 %	2 %
Linearidade	0,5 %	1 %	1 %	2%	1%
Condicionador	B&K NEXUS 2691 Canal 1	B&K NEXUS 2691 Canal 2	B&K NEXUS 2691 Canal 3	B&K NEXUS 2691 Canal 4	ENDEVCO 4416B-
Fixação	Aparafusamento Aperto com chave dinamométrica: 1,8 N·m	Aparafusamento Aperto com chave dinamométrica: 1,6 N·m	Aparafusamento Aperto com chave dinamométrica: 1,6 N·m	Aparafusamento Aperto com chave dinamométrica: 1,6 N·m	Aparafusamento com adaptador Aperto com chave dinamométrica: 1 N·m
Cabo	ENDEVCO3090C (317 pf)	ENDEVCO 3060A (383 pf)	ENDEVCO 3090C (315 pf)	ENDEVCO 3090C (312 pf)	EW1175 B&K

Na tabela seguinte (Tabela 5.2) é apresentado o resumo das condições experimentais dos ensaios realizados através dos dois procedimentos de medição acima referidos.

Tabela 5.2 Condições experimentais estabelecidas

Condições Experimentais				
Acelerações nominais	Frequências	Sensibilidade no condicionador	Sinal de excitação (a ajustar em cada leitura)	
				Valor nominal a ler no multímetro em modo ACV SYNC
m·s ⁻²	Hz	mV/(m·s ⁻²)	mV (pico)	mV (RMS)
10	40, 80, 160 320, 800, 1000 e 2000	10	100,0	70,711
20	40, 80, 160 320, 800, 1000 e 2000	10	200,0	141,421
50	40, 80, 160 320, 800, 1000 e 2000	10	500,0	353,553
100	40, 80, 160 320, 800, 1000 e 2000	10	1000,0	707,107

Os acelerômetros utilizados foram colocados nos dois sistemas experimentais com o objetivo de produzir um sinal elétrico de saída proporcional aos valores de amplitude de aceleração e frequência a

que são sujeitos. Esta amplitude de aceleração resulta do movimento de translação vertical (eixo y) que é imposto ao acelerómetro, por meio de um excitador de movimento. A aceleração e frequência foram programadas por um gerador de sinais sinusoidais. Como se pode verificar na Tabela 5.2, para cada uma das sete frequências estabelecidas, fez-se o registo dos sinais de saída dos acelerómetros para cada uma das quatro acelerações. Relativamente à sensibilidade do condicionador, este foi programado para ter uma sensibilidade de $10 \text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$. Assim, para uma aceleração de $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, o valor de pico do sinal de excitação é de 100 mV . Porém, tanto o multímetro como a aplicação de rotina de aquisição de dados em *LabView* foram programados para ler os valores em tensão RMS. Através da Equação 5.1, calculou-se o valor RMS para o conjunto de valores nominais a ler no multímetro correspondente às acelerações que foram estabelecidas em estudo.

$$V_{\text{RMS}} = \frac{V}{\sqrt{2}}$$

Equação 5.1

Onde:

- V_{RMS} = valor em tensão (RMS)
- V = valor em tensão (pico)

As condições ambientais durante os ensaios foram aproximadamente as mesmas daquelas que são essenciais na calibração de acelerómetros segundo a Norma ISO 16063-21. As condições relativamente à temperatura e humidade relativa foram as seguintes:

- Temperatura: $(23 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$;
- Humidade relativa: $(50 \pm 10) \%$.

5.3. Sistema Experimental

O sistema experimental implementado é representado nas figuras que se seguem. Como já referido anteriormente, a ideia da solução com a mesa de vibração desenvolvida é proporcionar a montagem de mais acelerómetros do que pela configuração *back-to-back*.

Na Figura 5.3 e Figura 5.4 são apresentados os diagramas de blocos do sistema experimental referente aos dois procedimentos efetuados, com os seus componentes essenciais, bem como as ligações estabelecidas entre os mesmos.

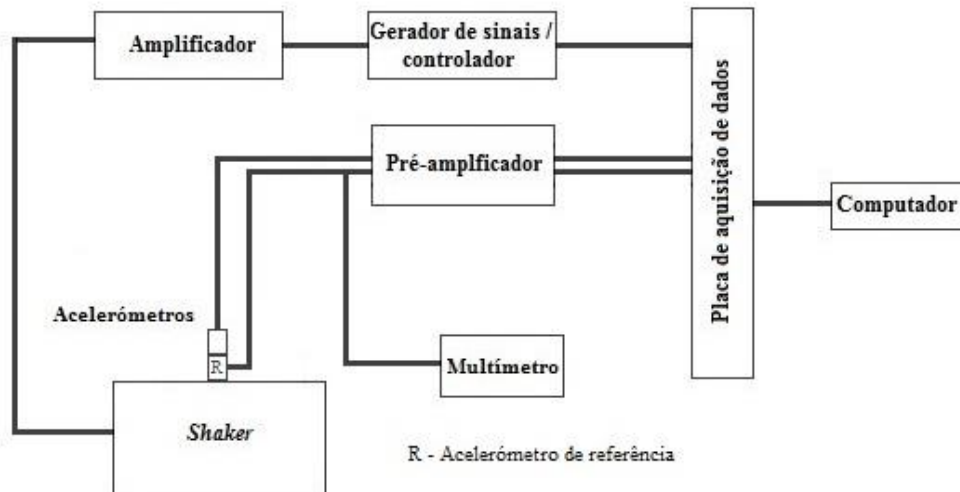


Figura 5.3 Sistema experimental do procedimento de comparação com fixação *back-to-back*

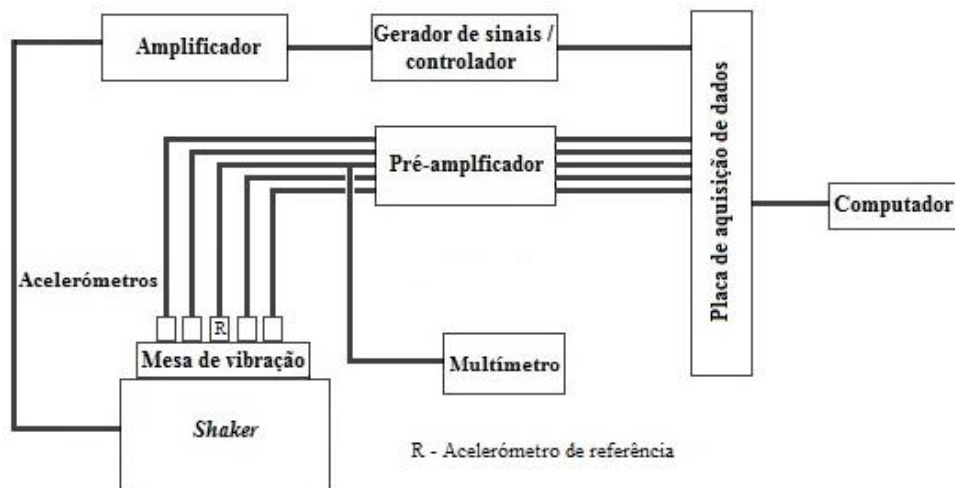


Figura 5.4 Sistema experimental (ideal) do procedimento de comparação multicanal com a mesa de vibração

A Figura 5.4 apresenta o diagrama de blocos do sistema experimental ideal em que se estaria na presença de uma placa de aquisição de dados multicanal com vista (pelo menos cinco entradas como representado) a possibilitar a leitura e aquisição dos sinais de vários acelerômetros simultaneamente.

Assim, para o procedimento de comparação com recurso à mesa de vibração foi necessário efetuar vários ensaios de modo a caracterizar e analisar as oito posições da mesa de vibração.

Com vista a estudar os vários pontos de fixação, estes foram numerados procedendo-se à sua identificação. As oito posições usadas no estudo de caracterização da mesa de vibração foram numeradas conforme apresentado na Figura 5.5.

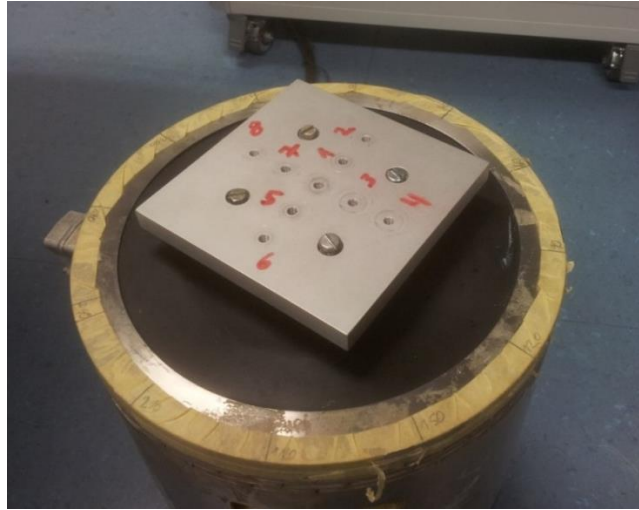


Figura 5.5 Identificação das fixações da mesa de vibração

O sistema implementado funcionou em malha aberta e, portanto, sem realimentação, devido a serem utilizados pontos fixos estáveis, em frequência e aceleração, e não ser expectável alterações dinâmicas no comportamento mecânico do sistema, sendo apenas necessária a imposição de um valor nominal de aceleração, garantido pela sua monitorização através da utilização do multímetro digital.

Todo o sistema experimental foi controlado através do gerador de sinais e através de um computador equipado com uma placa de aquisição de dados. A aplicação em *LabView* instalada no computador proporcionou a aquisição e análise de dados desenvolvidos, de modo a que após a aquisição, fosse possível efetuar o seu processamento para a comparação dos erros médios dos dois procedimentos referenciados.

De seguida é apresentada uma fotografia do sistema experimental com a mesa de vibração (Figura 5.6) onde se observa todos os constituintes do sistema à exceção do computador, bem como a disposição desses constituintes no laboratório.

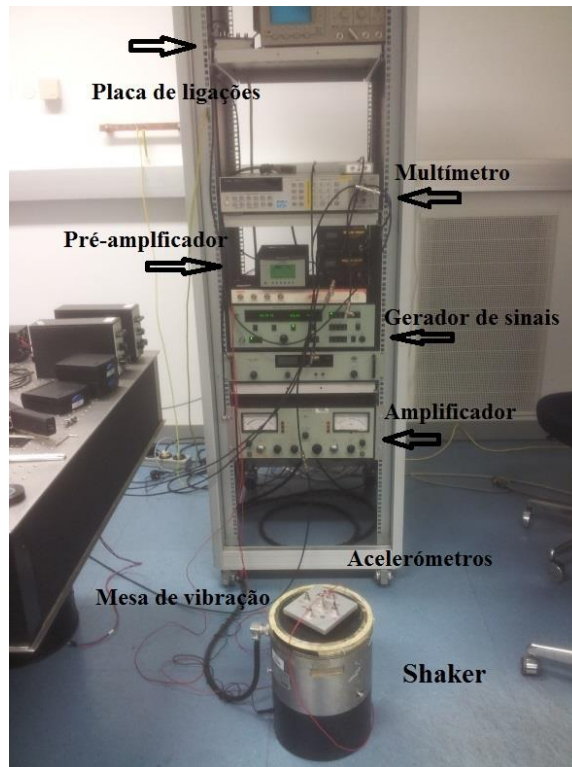


Figura 5.6 Fotografia do sistema experimental (com mesa de vibração)

5.4. Equipamento Utilizado

5.4.1. Excitador de Movimento

Um excitador de vibração eletrodinâmico é responsável por transformar energia elétrica em energia mecânica (vibração). As forças geradas pelo excitador são devidas à interação entre uma corrente alternada numa bobina e um campo magnético.

Quando a corrente elétrica passa num enrolamento de comprimento L , imerso num campo magnético, é gerada uma força F , proporcional à corrente I e à intensidade de fluxo magnético B , acelerando a base do excitador. A magnitude da força é dada pela Equação 5.2:

$$F = BIL$$

Equação 5.2

Onde:

- F = Força (N)
- B = Fluxo magnético (T)

- I = Corrente (A)
- L = Comprimento do fio condutor (m)

O campo magnético é produzido por um íman permanente em excitadores pequenos como no presente caso e por um eletroímã em grandes excitadores. A corrente é fornecida pelo amplificador. O amplificador recebe o sinal de excitação do controlador e o amplifica enviando para a bobina. Estas bobinas são instaladas em conjunto com um elemento móvel com uma determinada massa num eixo central. Como o sinal é alimentado pelas bobinas, são estas que se movem produzindo assim uma força (vibração). Desta forma, pode-se obter a aceleração produzida pelo *shaker* de acordo com a Equação 5.3, onde m é a massa do objeto a fixar e m_e é a massa correspondente ao elemento móvel [35].

$$a = \frac{F}{m + m_e}$$

Equação 5.3

O movimento vertical correspondente a um sinal sinusoidal estável e de baixa distorção durante as medições, imposto nos acelerómetros, foi conseguido através da utilização do excitador de movimento. Em altas frequências, podem existir movimentos de vibração imprevisíveis entre a mesa de vibração e a superfície de referência do *shaker*, e entre os acelerómetros e a mesa de vibração. Essas vibrações geram distorção harmónica na forma de onda de saída [18]. O movimento sinusoidal foi realizado segundo um eixo bem definido, uma vez que o objetivo foi impor ao acelerómetro um deslocamento vertical, desprezando a amplitude dos deslocamentos laterais.

Tal como referido no quarto capítulo, o excitador de movimento utilizado foi o *shaker* B&K 4805 com “cabeça” B&K 4812 (Figura 5.7).

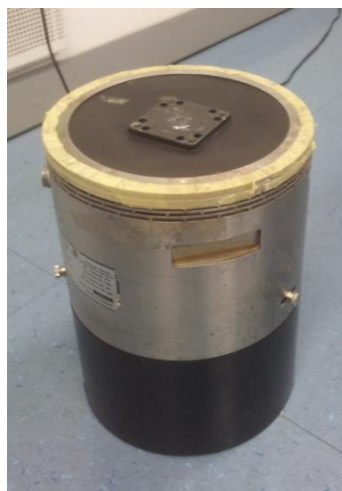


Figura 5.7 *Shaker* B&K 4805/12

5.4.2. Controlador/Gerador de Sinais Sinusoidais

O objetivo do controlador de vibração é, não só, gerar o sinal elétrico que corresponda ao movimento desejado e segundo um programa pré-definido, como garantir que o movimento real obtido no sistema a vibrar, não tenha distorção dinâmica ao longo do ensaio. Este controle é obtido através de utilização de uma malha de realimentação comparando o sinal gerado com o sinal obtido. O tipo de teste ou ensaio que se pretende é definido por um teste específico associado a parâmetros bem definidos. Estes parâmetros são programados no controlador por forma a obter o resultado pretendido no excitador de vibração. O teste a realizar pode ser de vários tipos, de acordo com o tipo de sinal e da sua variação ao longo do tempo ou da frequência. O modo como o controlador é programado é importante devido às especificações técnicas do excitador de vibração, pois qualquer destes equipamentos tem valores máximos admissíveis que não devem ser excedidos de maneira a não danificar o equipamento [13].

O controlador ou gerador de sinais sinusoidais utilizado foi o modelo B&K 1051. De acordo com as condições experimentais estabelecidas, este controle implicou a seleção do valor da frequência de ensaio [40; 80; 160; 320; 800; 1000 e 2000] Hz e o valor de amplitude do sinal sinusoidal que produzam uma aceleração de [10, 20, 50 e 100] $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. A Figura 5.8 apresenta o gerador de sinais sinusoidais utilizado nos ensaios experimentais.



Figura 5.8 Gerador de sinais sinusoidais B&K 1051

5.4.3. Amplificador de Potência

O amplificador de potência recebe o sinal de excitação enviado pelo controlador de vibração e amplifica este sinal aplicando-o ao *shaker*. O amplificador utilizado foi o amplificador B&K 2707 e é representado na Figura 5.9. Durante as medições o amplificador esteve com o ganho no máximo.



Figura 5.9 Amplificador de potência B&K tipo 2707

5.4.4. Condicionador de Sinal

O pré-amplificador de carga utilizado no procedimento experimental foi o condicionador B&K NEXUS 2691 (Figura 5.10). Existem dois tipos básicos de condicionadores que podem ser usados em acelerômetros piezoelétricos [16]:

- Pré-amplificadores de carga: produzem uma saída em tensão proporcional a uma entrada de carga;
- Pré-amplificadores de tensão: produzem uma saída em tensão proporcional a uma entrada em tensão.



Figura 5.10 Condicionador B&K NEXUS 2691

O pré-amplificador foi programado para os quatro acelerômetros de carga em estudo, ajustando-se a respectiva sensibilidade de cada acelerômetro em cada um dos quatro canais (Figura 5.11). De acordo com a Tabela 5.2 e com a Figura 5.11, pode-se verificar a que sensibilidade o condicionador foi programado e a que canal no pré-amplificador corresponde cada acelerômetro. Em relação aos intervalos de frequência, tendo em conta as frequências estabelecidas, o limite de baixa de frequência foi programado a 0,1 Hz e o limite máximo de frequência a 3 kHz (Figura 5.12).

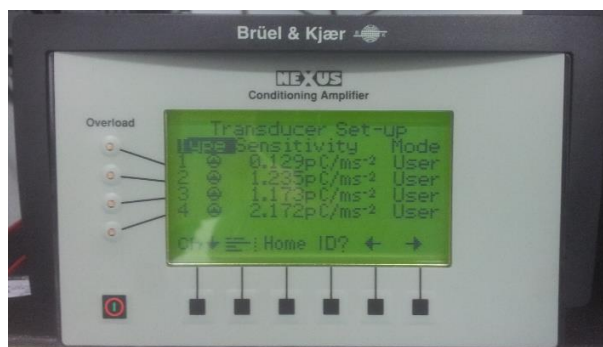


Figura 5.11 Ajuste de sensibilidade dos quatro acelerômetros de carga

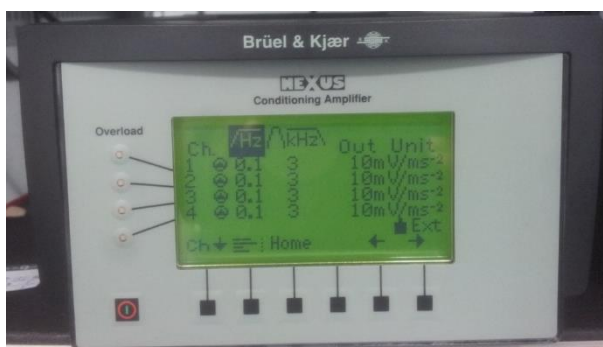


Figura 5.12 Sensibilidade do condicionador. Limites de frequência

No caso do acelerômetro de tensão ou tipo *Delta-Tron*, não se utilizou o pré-amplificador de carga, mas sim o condicionador *ENDEVCO* modelo 4416 B de modo a amplificar o sinal já em tensão gerado pelo acelerômetro. Na figura seguinte apresenta-se o condicionador *ENDEVCO* também utilizado.



Figura 5.13 Condicionador *ENDEVCO* 4416 B

figura seguinte é apresentado a interface do programa em *LabView* utilizado na parametrização e aquisição de dados de todos os ensaios efetuados de acordo com as condições experimentais estabelecidas.

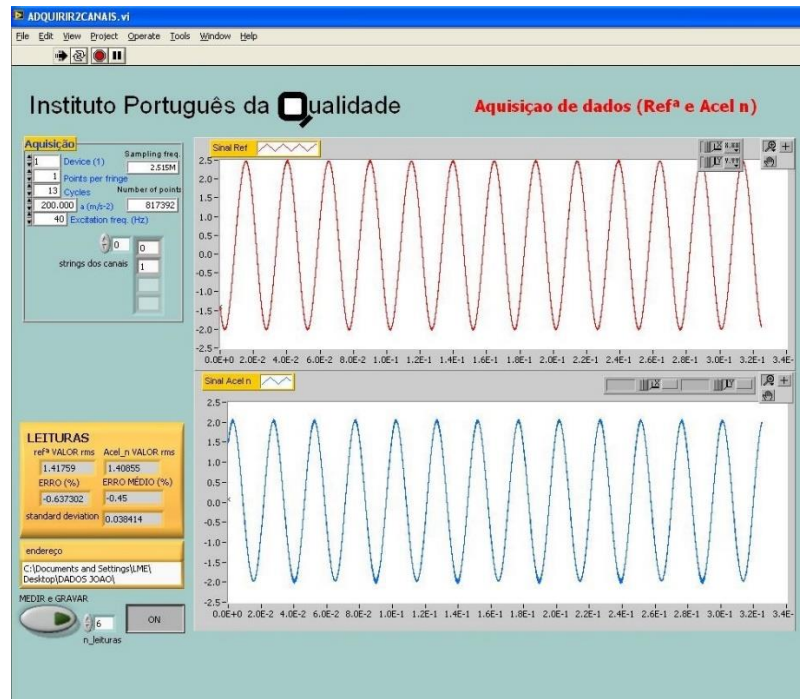


Figura 5.15 Programa de parametrização e aquisição de dados

A aplicação continha o algoritmo indispensável para o cálculo da sua melhor frequência de amostragem para o que era necessário ajustar os parâmetros do programa de parametrização e aquisição de dados. Esses parâmetros foram nomeadamente:

- *Points per fringe* (Pontos de franja)
- *Cycles* (ciclos)
- *a* - Aceleração à entrada ($m \cdot s^{-2}$)
- *Excitation Freq.* (Frequência de excitação) (Hz)

A escolha do número de pontos de franja bem como o número de ciclos determinou o tamanho da amostra adquirida em cada ensaio. A seleção destes valores procurou encontrar um tamanho de amostra que demonstrasse o sinal bem definido e ao mesmo tempo um tamanho de amostra que permitisse fazer uma aquisição sem sobrecarregar a placa PCI, mantendo o compromisso definido pelo teorema de *Nyquist*. Segundo este, a frequência de amostragem de um sinal analógico, para que possa posteriormente ser reconstituído com o mínimo de perda de informação, deverá ser igual ou maior a

duas vezes, à maior frequência do espectro desse sinal. Como se pode verificar pela Figura 5.15, a visualização dos dois sinais permitiu a comparação dos mesmos de acordo com as condições de aceleração e frequência impostas, com vista a verificar o seu comportamento sinusoidal.

Após a realização da aquisição (“MEDIR e GRAVAR”), o programa gravou automaticamente os dados recolhidos num ficheiro em formato *txt* (Figura 5.16). Posteriormente, os dados obtidos relativamente ao erro médio e desvio padrão foram colocados numa folha de cálculo de ficheiro *Excel*, com o objetivo de efetuar o tratamento e análise dos mesmos.

Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda
7,101712E-2	7,224269E-2	1,725739E+0		
7,101091E-2	7,236401E-2	1,905487E+0		
7,099780E-2	7,234113E-2	1,892079E+0		
7,104345E-2	7,238888E-2	1,893818E+0		
7,107256E-2	7,241793E-2	1,892959E+0		
7,107212E-2	7,240515E-2	1,875593E+0		
5,000000E+0	1,891987E+0	1,066891E-2		
9,765625E-2	-1,074219E-1			
9,765625E-2	-1,074219E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,765625E-2	-1,074219E-1			
9,765625E-2	-1,074219E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,765625E-2	-1,025391E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,765625E-2	-1,025391E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,765625E-2	-1,025391E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,765625E-2	-1,025391E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,765625E-2	-1,123047E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,277344E-2	-1,123047E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,277344E-2	-1,074219E-1			
9,765625E-2	-1,025391E-1			
9,765625E-2	-1,074219E-1			

Figura 5.16 Dados gravados em *txt*

Dos dados gravados após a aquisição efetuada, de acordo com a Figura 5.16 (representado a laranja), a primeira coluna faz corresponder às seis leituras dos dados lidos pelo acelerómetro de referência em valores de tensão RMS, a segunda coluna correspondente às seis leituras do acelerómetro auxiliar também em valores de tensão RMS e, a terceira coluna, o erro em % entre os dois acelerómetros. No próximo capítulo será explicado como esse erro é calculado. Representado a azul, encontra-se o resumo dos valores lidos, em que a primeira coluna corresponde ao número das últimas leituras de uma amostragem (cinco leituras), a segunda coluna corresponde ao erro médio (%) das cinco leituras e a terceira coluna corresponde ao desvio padrão (%) associado a esse erro médio. São estes valores (representado a azul) que foram introduzidos na folha de cálculo para cada ponto de medição em todos os ensaios. Os dados selecionados a verde fazem corresponder à última aquisição de dados relativos aos sinais do acelerómetro de referência (primeira coluna em valores absolutos de tensão) e do acelerómetro auxiliar (segunda coluna em valores absolutos de tensão).

6. Princípios de Avaliação de Incertezas

Quando se pretende quantificar uma medição, o verdadeiro valor de uma grandeza é considerado único e, na prática, impossível de ser conhecido, obrigando, devido à quantidade intrinsecamente incompleta de detalhes na definição da grandeza, a associar àquela quantificação uma incerteza [30]. Assim, uma medição só está completa quando contém um valor atribuído à mensuranda e a incerteza de medição associada a esse valor [40]. A mensuranda é a grandeza que se pretende medir [30]. A incerteza de medição é o parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a uma mensuranda. Essas incertezas podem ser determinadas diretamente na medição, como por exemplo, numa simples observação ou numa avaliação baseada na experiência; como podem ser provenientes de origens externas à medição, tais como as grandezas associadas aos padrões de medição calibrados, aos materiais de referência certificados ou aos dados de referência obtidos dos manuais [40]. Desta maneira, o resultado de medição é apenas uma aproximação, sendo um conjunto de valores atribuídos a uma mensuranda, juntamente com toda a informação pertinente disponível [30].

Os resultados obtidos em trabalhos experimentais vêm afetados de erros de medição e pode-se dividi-los em duas componentes: erros sistemáticos e erros aleatórios. O erro sistemático é uma componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível. O valor de referência para um erro sistemático é um valor verdadeiro, ou valor medido de um padrão com incerteza de medição desprezável, ou um valor convencional. Num erro sistemático as suas causas podem ser conhecidas ou desconhecidas e pode-se aplicar uma correção para compensar um erro sistemático conhecido [30]. O erro aleatório é uma componente dos erros de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. O valor de referência para um erro aleatório é a média que resultaria de um número infinito de medições repetidas da mesma mensuranda. Os erros aleatórios de um conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser resumida pela sua esperança matemática, a qual é geralmente assumida como sendo zero, e pela sua variância. Este erro é calculado através da diferença entre o erro de medição e o erro sistemático [30].

De acordo com o método de medição, o balanço de melhor incerteza é determinado em concordância com o modelo matemático associado. Com vista a obter uma avaliação e estimativa da incerteza de medição foi usado o procedimento sequencial descrito no GUM como um guia prático, que enuncia os seguintes passos [40]:

- Expressar em termos matemáticos a dependência da mensuranda (Y) em relação às grandezas de entrada (X_i);
- Listar todos os componentes de incerteza;
- Calcular a incerteza-padrão para cada componente de incerteza;
- Avaliar o tipo de incerteza (A ou B);

- Calcular os respectivos coeficientes de sensibilidade;
- Calcular a incerteza combinada;
- Calcular o fator de expansão k ;
- Calcular a incerteza de medição expandida

6.1. Incertezas de Medição

No cálculo de incertezas para a determinação da diferença dos erros associado à comparação entre os dois procedimentos realizados nessa dissertação, lidou-se apenas com uma única mensuranda ou grandeza de saída Y , que depende de um certo número de grandezas de entrada X_i ($i=1,2, \dots, N$), respeitando a relação funcional:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \text{Equação 6.1}$$

Desta forma, a função f é responsável por modelar o procedimento de medição e método de avaliação de incertezas, representando a variação da grandeza de saída Y em função dos valores de entrada X_i .

As medições estão sujeitas a várias fontes de incerteza, sendo difícil a sua exata medição, tanto do seu valor como do valor da própria incerteza. Dado isso, por forma a criar algum facilitismo ao processo, numa estimativa da mensuranda Y , a estimativa da grandeza de saída designada por y , é obtida através da Equação 6.1 usando as estimativas das grandezas de entrada x_i para os valores das grandezas de entrada X_i . Posto isto, tem-se:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad \text{Equação 6.2}$$

Neste estudo, a grandeza de saída ou a mensuranda y , corresponde ao $Erro_{final}$. Esta grandeza dependeu de um certo número de grandezas de entrada x_i ($i=1,2,..N$) respeitando a relação funcional da Equação 6.2, onde:

- Grandeza de saída $y = Erro_{final}$, que corresponde à diferença dos erros médios entre os dois procedimentos;
- Grandezas de entrada $x_i = Erro_{mesa}$ e $Erro_{back-to-back}$, como indicado pela relação matemática abaixo que define o $Erro_{final}$.

$$Erro_{\text{final}} = Erro_{\text{mesa}} - Erro_{\text{back-to-back}}$$

Equação 6.3

Onde:

- $Erro_{\text{final}}$ = Diferença dos erros médios entre os dois procedimentos;
- $Erro_{\text{mesa}}$ = Erro médio entre um acelerômetro auxiliar e o acelerômetro de referência relativo ao procedimento de comparação multicanal com mesa de vibração;
- $Erro_{\text{back-to-back}}$ = Erro médio entre um acelerômetro auxiliar e o acelerômetro de referência relativo ao procedimento de comparação com fixação *back-to-back*.

Tanto o erro correspondente ao procedimento de comparação multicanal com mesa de vibração como o correspondente ao procedimento de comparação com fixação *back-to-back*, foram calculados segundo a mesma relação matemática, variando apenas na disposição física dos acelerômetros resultante da utilização da mesa de vibração, mantendo as mesmas condições nas duas realizações experimentais a comparar. Como já referido, essas mesmas condições implicaram na utilização para um mesmo acelerômetro, o mesmo valor nominal de torque de aperto, o mesmo canal de entrada no mesmo condicionador de sinal, com o mesmo cabo de interligação, o mesmo canal no sistema de aquisição, as mesmas condições nominais de aceleração e frequência, e as condições ambientais proporcionadas por um ambiente laboratorial estável nas duas realizações experimentais a comparar.

Para o procedimento de comparação com fixação *back-to-back*, o erro foi calculado segundo a equação:

$$Erro_{\text{back-to-back}} = \frac{V_{btbx} - V_{btbr}}{V_{btbr}}$$

Equação 6.4

Onde:

- V_{btbx} = Tensão em valor RMS do acelerômetro auxiliar “x” a comparar com o acelerômetro de referência pelo procedimento *back-to-back* (V);
- V_{btbr} = Tensão em valor RMS do acelerômetro de referência “r” pelo procedimento *back-to-back* (V)

Com a mesma relação, agora para o procedimento de comparação multicanal com mesa de vibração, o erro foi calculado segundo a equação:

$$Erro_{mesa} = \frac{V_{mx} - V_{mr}}{V_{mr}}$$

Onde:

- V_{mx} = Tensão em valor RMS do acelerómetro auxiliar “x” a comparar com o acelerómetro de referência pelo procedimento de comparação multicanal (V);
- V_{mr} = Tensão em valor RMS do acelerómetro de referência “r” pelo procedimento de comparação multicanal (V)

No final, cada um dos resultados relativos ao $Erro_{mesa}$ e $Erro_{back-to-back}$ foram expressos em percentagem, a partir dos quais se determinou o resultado final definido como $Erro_{final}$ (%).

Explicação teórica do modelo matemático

A Figura 6.1 representa o circuito equivalente de um acelerómetro piezoelétrico ligado através de um cabo de interligação a um pré-amplificador de carga, que por sua vez está ligado a um sistema de aquisição de dados (voltímetro).

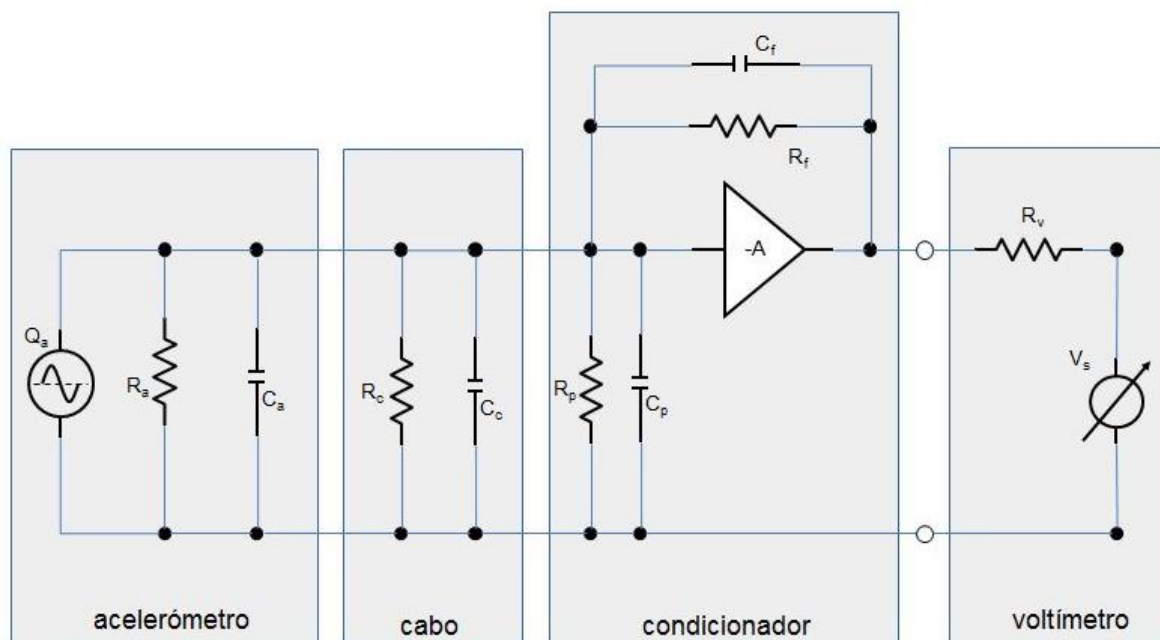


Figura 6.1 Esquema equivalente para um acelerómetro, cabo de interligação, condicionador e sistema de aquisição por medição em tensão RMS. Figura adaptada de [16]

Onde:

- Q_a = Carga gerada pelo acelerómetro piezoelétrico (proporcional à aceleração aplicada)
- R_a = Impedância resistiva interna do acelerómetro
- C_a = Impedância capacitiva interna do acelerómetro
- R_c = Impedância resistiva interna do cabo e conetores
- C_c = Impedância capacitiva interna do cabo e conetores
- R_p = Impedância resistiva de entrada do pré-amplificador
- C_p = Impedância capacitiva interna do pré-amplificador na entrada
- R_f = Resistência de *feedback*
- C_f = Capacidade de *feedback*
- A = Ganho operacional do pré-amplificador
- R_v = Impedância resistiva de entrada do voltímetro
- V_s = Leitura da tensão de saída do pré-amplificador

O circuito equivalente da Figura 6.1 pode ser simplificado tal como é representado na Figura 6.2:

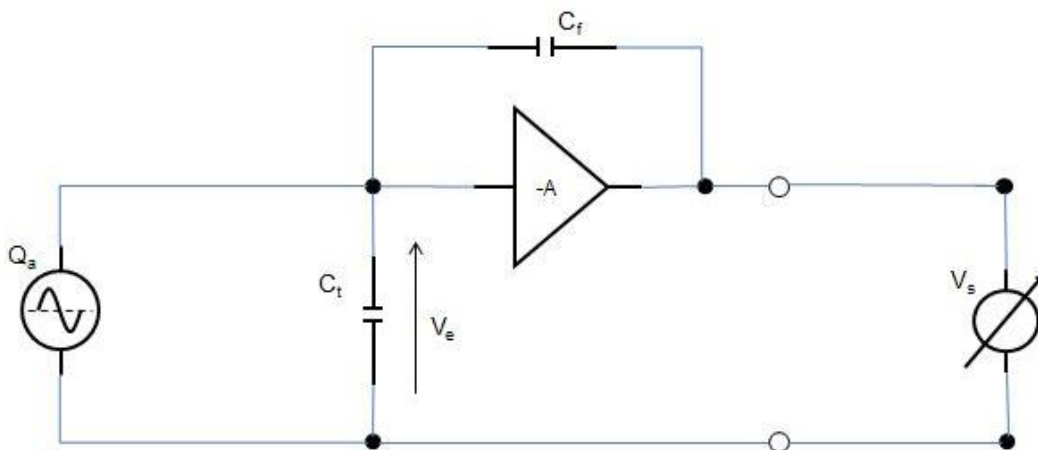


Figura 6.2 Esquema simplificado equivalente para a medição de um acelerómetro. Figura adaptada de [16]

Onde:

- Q_a = Carga gerada pelo acelerómetro piezoelétrico (proporcional à aceleração aplicada)

- C_t = Capacidade total
- V_e = Tensão de entrada do pré-amplificador que resulta de $\frac{Q_a}{C_t}$
- A = Ganho operacional do pré-amplificador
- C_f = Capacidade de *feedback*
- V_s = Leitura da tensão de saída do pré-amplificador

A tensão de entrada e tensão de saída, V_e e V_s estão relacionadas segundo a Equação 6.6:

$$V_s = -A \cdot V_e \quad \text{Equação 6.6}$$

Associados aos valores adquiridos pelo sistema, subsistem as componentes de incerteza aliadas aos erros sistemáticos existentes no sistema e provocados pelo desconhecimento do verdadeiro valor das grandezas obtidas pelo acelerómetro, do ganho e linearidade do pré-amplificador, bem como do erro devido ao sistema de aquisição, sendo cada medição representada segundo o modelo:

$$V_{s(n)} = (-A_{(n)} \cdot \Delta A) \cdot (V_{e(n)} \cdot \Delta V_e) \times \Delta l \quad , \quad n = \text{btb}_x, \text{btb}_r, m_x \text{ e } m_r \quad \text{Equação 6.7}$$

Onde:

- ΔA = Contribuição do pré-amplificador
- ΔV_e = Contribuição do acelerómetro
- Δl = Contribuição do sistema de aquisição
- n = Procedimento e acelerómetro

Aplicando ao modelo matemático apresentado tem-se que:

$$\text{Erro}_{\text{final}} = \frac{(-A_{(m_x)} \cdot \Delta A \cdot V_{e(m_x)} \cdot \Delta V_e \cdot \Delta l) - (-A_{(m_r)} \cdot \Delta A \cdot V_{e(m_r)} \cdot \Delta V_e \cdot \Delta l)}{(-A_{(m_r)} \cdot \Delta A \cdot V_{e(m_r)} \cdot \Delta V_e \cdot \Delta l)} - \frac{(-A_{(\text{btb}_x)} \cdot \Delta A \cdot V_{e(\text{btb}_x)} \cdot \Delta V_e \cdot \Delta l) - (-A_{(\text{btb}_r)} \cdot \Delta A \cdot V_{e(\text{btb}_r)} \cdot \Delta V_e \cdot \Delta l)}{(-A_{(\text{btb}_r)} \cdot \Delta A \cdot V_{e(\text{btb}_r)} \cdot \Delta V_e \cdot \Delta l)} \quad \text{Equação 6.8}$$

A simplificação da Equação 6.8 resulta:

$$Erro_{\text{final}} = \frac{A_{(m_x)} \cdot V_{e(m_x)}}{A_{(m_r)} \cdot V_{e(m_r)}} - \frac{A_{(btb_x)} \cdot V_{e(btb_x)}}{A_{(btb_r)} \cdot V_{e(btb_r)}} \quad \text{Equação 6.9}$$

A simplificação demonstra que uma vez que são utilizadas as mesmas condições experimentais em ambos os procedimentos, nomeadamente a utilização de equipamentos exatamente nas mesmas condições de ganho e sensibilidade referentes aos acelerómetros, do pré-amplificador e placa de aquisição de dados, as contribuições descritas desaparecem. Todavia, do conhecimento intrínseco associado à utilização em ambiente laboratorial daqueles instrumentos, é-se obrigado a contabilizar no cálculo da incerteza global, as componentes associadas às especificações resultantes da linearidade de cada acelerómetro e do condicionador bem como da resolução do sistema de aquisição que não podem ser desprezadas. Resulta portanto a necessidade de associar uma constante w que “adquira” aquelas contribuições, passando o modelo matemático a considerar no cálculo das incertezas a ser definido como:

$$Erro_{\text{final}} = w \cdot \left(\frac{V_{m_x}}{V_{m_r}} - \frac{V_{btb_x}}{V_{btb_r}} \right) \quad \text{Equação 6.10}$$

Em que:

- $w = 1$ (constante)

6.2. Avaliação da Incerteza de Medição

A incerteza de medição associada às estimativas das grandezas de entrada x_i é avaliada de acordo com dois métodos de avaliação diferenciados, “Tipo A” e “Tipo B”. A avaliação de Tipo A é aquela que é feita através da análise estatística de séries de observações. A avaliação de tipo B é o tipo de avaliação por métodos de análise não estatística de séries de observações baseando-se noutro conhecimento científico [40].

6.2.1. Método de Avaliação de Tipo A

A avaliação de tipo A da incerteza-padrão é feita a partir da análise de várias observações de uma determinada grandeza de entrada, onde os resultados da medição são obtidos nas mesmas condições de medição [40]. Neste caso, a incerteza-padrão u é obtida através do cálculo do desvio-padrão experimental da média dos valores individualmente observados (Equação 6.11).

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q})$$

Equação 6.11

Onde:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (q_j - \bar{q})^2}$$

Equação 6.12

$$\bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N q_j$$

Equação 6.13

Em que:

- $s(q)$ - Desvio-padrão experimental
- \bar{q} - Média aritmética dos valores observados q_j ($j = 1, 2, \dots, N$)
- N - Número de observações

6.2.2. Método de Avaliação de Tipo B

Este método de avaliação da incerteza-padrão é a avaliação de incerteza associada a uma estimativa x_i de uma grandeza de entrada X_i , baseada numa análise científica que se concentra na informação disponível sobre a variabilidade possível X_i . Exemplos deste tipo de valores são provenientes de [40]:

- Dados de medições prévias
- Incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais
- Dados de referência de materiais
- Dados provenientes de calibração e outros certificados

Nas situações correspondentes às grandezas do tipo B utilizou-se uma distribuição de probabilidade retangular, para a variabilidade possível de x_i . A incerteza-padrão associada foi então determinada através de:

$$u(x_{iB}) = \frac{u(x_i)}{\sqrt{3}} \quad \text{Equação 6.14}$$

6.2.3. Cálculo da Incerteza-Padrão da Grandeza de Saída

Se as grandezas de entrada não são correlacionadas entre si, o quadrado da incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída y é calculado pela expressão:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad \text{Equação 6.15}$$

Desta forma, a grandeza $u_i(y)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) representa a contribuição para a incerteza-padrão associada à estimativa de saída y , que resulta da incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de entrada x_i . Esta grandeza pode ser vista como o produto da incerteza-padrão associada à estimativa de entrada x_i multiplicada pelo coeficiente de sensibilidade c_i :

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad \text{Equação 6.16}$$

O coeficiente de sensibilidade c_i descreve como a estimativa da grandeza de saída y é influenciada pelas variações de cada uma das estimativas das grandezas de entrada x_i , ou seja, representa a derivada parcial da função modelo f em relação a X_i avaliada nas estimativas x_i da grandeza de entrada. Este coeficiente é calculado de acordo com a equação:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{Equação 6.17}$$

De acordo com a Equação 6.10, para a incerteza da tensão de saída RMS do acelerómetro auxiliar, assim como para a incerteza associada ao desvio-padrão experimental da tensão de saída RMS, relativamente ao método *back-to-back*, calculou-se a derivada parcial da função $Erro_{final}$ em relação a V_{btbx} . A expressão para o cálculo c_i foi:

$$c_i = \frac{\partial Erro_{final}}{\partial V_{btbx}} = -w \cdot \left(\frac{1}{V_{btb_r}} \right) \quad \text{Equação 6.18}$$

Onde:

– c_i (1/V)

Analogamente, foi calculado as derivadas parciais da função $Erro_{\text{final}}$ em relação às restantes grandezas de entrada. As expressões para o cálculo de c_i foram:

$$c_i = \frac{\partial Erro_{\text{final}}}{\partial V_{\text{btb}_r}} = w \cdot \left(\frac{V_{\text{btb}_x}}{V^2_{\text{btb}_r}} \right) \quad \text{Equação 6.19}$$

Onde:

$$- c_i (1/V)$$

$$c_i = \frac{\partial Erro_{\text{final}}}{\partial V_{\text{m}_x}} = w \cdot \left(\frac{1}{V_{\text{m}_r}} \right) \quad \text{Equação 6.20}$$

Onde:

$$- c_i (1/V)$$

$$c_i = \frac{\partial Erro_{\text{final}}}{\partial V_{\text{m}_r}} = -w \cdot \left(\frac{V_{\text{m}_x}}{V^2_{\text{m}_r}} \right) \quad \text{Equação 6.21}$$

Onde:

$$- c_i (1/V)$$

$$c_i = \frac{\partial Erro_{\text{final}}}{\partial w} = \frac{V_{\text{m}_x}}{V_{\text{m}_r}} - \frac{V_{\text{btb}_x}}{V_{\text{btb}_r}} \quad \text{Equação 6.22}$$

Onde:

$$- c_i (\text{adimensional})$$

6.2.4. Número de Graus de Liberdade

De acordo com a grandeza, seja do tipo A ou do tipo B, o número de graus de liberdade, GDL , assume um determinado valor.

Para as incertezas associadas a grandezas do tipo A é considerado:

$$GDL = (N - 1)$$

Equação 6.23

Onde:

- N - número de observações para cada ensaio

Para as incertezas associadas a grandezas do tipo B é considerado:

$$GDL = 50$$

Equação 6.24

6.2.5. Incerteza de Medição Expandida

A incerteza de medição expandida U é determinada através da multiplicação da incerteza padrão $u(y)$ da estimativa da grandeza de saída por um fator de expansão k , tal como é representado na seguinte equação [40]:

$$U = k \cdot u(y)$$

Equação 6.25

Onde:

- U - Incerteza de medição expandida

A estimativa do fator de expansão k , corresponde a uma determinada probabilidade expandida que tenha em conta a fiabilidade da incerteza-padrão $u(y)$ da estimativa da grandeza de saída y .

A fiabilidade da incerteza-padrão da estimativa de saída é determinada pelo número de graus de liberdade efetivos, ν_{ef} , que é aproximadamente representado pela combinação dos números de graus de liberdade efetivos das diferentes contribuições para a incerteza $u_i(y)$.

O número de graus de liberdade efetivos, ν_{ef} , é determinado pela fórmula de *Welch-Satterthwait*, segundo a Equação 6.26

$$\nu_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

Equação 6.26

Onde:

- $u_i(y)$ – Contribuições para a incerteza-padrão da estimativa de saída y ;

- v_i – Número de graus de liberdade efetivos do componente da incerteza-padrão.

Depois de calculados os valores de graus de liberdade efetivos, o valor de k é obtido recorrendo à Tabela 6.1, que por sua vez é baseada numa distribuição t de *Student* avaliada para uma probabilidade expandida de 95,45 %.

Tabela 6.1 Fatores de expansão k para diferentes números de graus de liberdade efetivos v_{ef}

v_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

Pode-se observar na Tabela 6.1 os fatores de expansão k representados para diferentes números de graus de liberdade efetivos. No caso em que o valor de v_{ef} calculado não for inteiro, deverá escolher-se o inteiro imediatamente inferior.

O resultado completo de uma medição apresenta-se sob forma da Equação 6.27, consistindo na estimativa y e da mensuranda e na incerteza expandida associada U .

$$Y = y \pm U$$

Equação 6.27

6.2.6. Balanço da Incerteza Associada à Determinação do $Erro_{final}$

Como referido anteriormente, a contabilização do w no cálculo da incerteza global teve como componentes associadas à sua determinação, valores típicos correspondentes à linearidade de cada acelerómetro, a linearidade do condicionador e da resolução na medição de amplitude da placa de aquisição de dados.

Acelerómetro de referência - linearidade: 0,5 %

Acelerómetro auxiliar (no caso do modelo 224C) - linearidade: 1%

Condicionador Nexus - linearidade: 0,02 dB

De modo a obter a linearidade em percentagem calculou-se a linearidade do condicionador *Nexus* através da seguinte equação:

$$Condi. = 10^{0,02/20}$$

Equação 6.28

Placa de aquisição 12 bits

Para um sinal de entrada no sistema de aquisição de amplitude de 20 V (pico-a-pico), calculou-se a linearidade da placa de aquisição de acordo com a sua resolução através da seguinte equação:

$$l = ((\frac{20}{2^{12}})/20))/2$$

Equação 6.29

Como modelo de propagação de incertezas associado a w foi determinado um valor típico de 1,36E-02 tal como apresentado na tabela seguinte:

Tabela 6.2 Balanço de incerteza associado ao w

Fonte de incerteza	Estimativa do valor	Tipo de avaliação (Tipo A ou tipo B)/Distribuição de probabilidade	Incerteza-padrão [$u(x_i)$]	Coefficientes de sensibilidade c_i	Componente quadrática ($c_i \cdot u(x_i)$) ²	Nº de graus de liberdade
$Acel_x$	1,00E-02	B/retangular	5,77E-03	1,00E+00	3,33E-05	50
$Acel_r$	5,00E-03	B/retangular	2,89E-03	1,00E+00	8,33E-06	50
$Condi_x$	2,31E-03	B/retangular	1,33E-03	1,00E+00	1,77E-06	50
$Condi_r$	2,31E-03	B/retangular	1,33E-03	1,00E+00	1,77E-06	50
I_{btb}	1,22E-04	B/retangular	7,05E-05	1,00E+00	4,97E-09	50
I_{mesa}	1,22E-04	B/retangular	7,05E-05	1,00E+00	4,97E-09	50
Incerteza Combinada, $U_c(y)$					6,72E-03	
neff					8,61E+01	
Fator de expansão, k					2,03E+00	
Incerteza expandida, U					1,36E-02	

No capítulo seguinte será apresentado quatro exemplos de balanços de incertezas realizados, tendo em conta a contabilização do w no cálculo da incerteza global, para a determinação da variação $Erro_{final}$ na comparação entre os dois procedimentos.

7. Apresentação, Processamento, Análise e Discussão de Resultados

Este capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados obtidos através dos dois procedimentos realizados neste trabalho, bem como a sua interpretação. De acordo com o modelo matemático apresentado, depois dos dados determinados através dos dois procedimentos, procedeu-se à sua comparação, de modo a demonstrar a validação da nova solução. Foi utilizado o modelo matemático descrito (Equação 6.3), no sentido de se comparar os dois procedimentos realizados através dos sinais de saída dos acelerómetros.

A primeira etapa experimental consistiu na realização dos ensaios pelo procedimento de comparação com recurso à fixação de acelerómetros seguindo o descrito no método *back-to-back*. Para este procedimento foram realizados quatro ensaios (Tabela 7.1), tendo em conta os cinco acelerómetros considerados em estudo (Tabela 5.1), em que um deles é o acelerómetro de referência.

Tabela 7.1 Síntese dos ensaios efetuados pelo procedimento de comparação com fixação *back-to-back*

Procedimento de comparação com fixação <i>back-to-back</i>	
Nº Ensaio	Acelerómetro auxiliar utilizado
1	ENDEVCO 224Cns FN92
2	ENDEVCO 224C ns FN94
3	B&K 4367 ns 687035
4	B&K 4397 ns 10794

Na Figura 7.1 apresenta-se uma fotografia que ilustra a disposição dos acelerómetros relativamente ao 2º Ensaio.

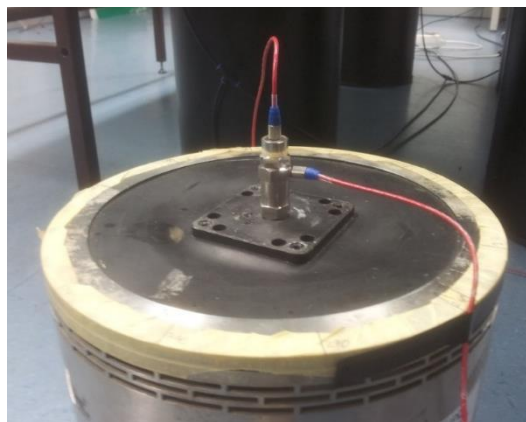


Figura 7.1 2º Ensaio. Acelerómetro de referência B&K 8305 e acelerómetro ENDEVCO 224C ns FN94

Na Figura 7.2 é apresentado parte da folha de cálculo referente ao 2º Ensaio efetuado, onde foram registados os valores de erro (representados em percentagem (%)) adquiridos pela aplicação *LabView*. A média apresentada (em %) corresponde à média das três aquisições realizadas para cada condição de frequência e aceleração e é inserida no modelo matemático de forma a determinar o $Erro_{final}$ (%).

Estudo inicial de acelerómetros pelo método <i>back-to-back</i> (determinação do erro em % de valor <i>RMS</i>) 2º ENSAIO														
Acelerómetro de ref:		B&K 8305/ns 2243388 / sens.: 0,129 pC/ms ⁻²			Cabo		3090C ENDEVCO (317 pf)		Placa de ligação, canal 0					
Acelerómetro em estudo:		ENDEVCO 224C / ns FN94 / sens.: 1,173 pC/ms ⁻²			Cabo		3090C ENDEVCO (315 pf)		Placa de ligação canal 3					
Condições Experimentais					Frequências Nominais de Ensaio (Hz)									
acelerações nominais	sensibilidade no condicionador	Sinal de excitação (a ajustar em cada leitura)			40					80				
		valor nominal a ler no mult. modo ACV SYNC	valor nominal a ler no mult. modo ACV SYNC	valor nominal a ler no mult. modo ACV SYNC	data/hora	n_leituras	Valor colocado no gerador	erro	desvio padrão	data/hora	n_leituras	Valor colocado no gerador	erro	desvio padrão
ms ⁻²	g	mV/ms ⁻²	mV (pico)	mV (RMS)				%	%				%	%
10	1,02	10	100,0	70,711	1-12-14 10:50	5	163 mV	2,91	0,03	1-12-14 12:57	5	59,9 mV	2,66	0,05
20	2,04	10	200,0	141,421	1-12-14 11:04	5	322 mV	2,09	0,02	1-12-14 13:10	5	119 mV	1,81	0,02
50	5,10	10	500,0	353,553	1-12-14 11:54	5	776 mV	2,62	0,01	1-12-14 14:32	5	309 mV	1,87	0,03
100	10,20	10	1000,0	707,107	1-12-14 12:27	5	1,50 V	3,07	0,00	1-12-14 14:55	5	622mV	1,95	0,03
10	1,02	10	100,0	70,711	1-12-14 10:50	5	163 mV	2,92	0,04	1-12-14 12:57	5	59,9 mV	2,76	0,05
20	2,04	10	200,0	141,421	1-12-14 11:04	5	322 mV	2,04	0,02	1-12-14 13:10	5	119 mV	1,75	0,01
50	5,10	10	500,0	353,553	1-12-14 11:54	5	776 mV	2,60	0,01	1-12-14 14:32	5	309 mV	1,86	0,01
100	10,20	10	1000,0	707,107	1-12-14 12:27	5	1,50 V	3,06	0,01	1-12-14 14:55	5	622mV	1,96	0,02
10	1,02	10	100,0	70,711	1-12-14 10:50	5	163 mV	2,90	0,03	1-12-14 12:57	5	59,9 mV	2,68	0,02
20	2,04	10	200,0	141,421	1-12-14 11:04	5	322 mV	2,08	0,01	1-12-14 13:10	5	119 mV	1,77	0,02
50	5,10	10	500,0	353,553	1-12-14 11:54	5	776 mV	2,61	0,01	1-12-14 14:32	5	309 mV	1,87	0,01
100	10,20	10	1000,0	707,107	1-12-14 12:27	5	1,50 V	3,06	0,00	1-12-14 14:55	5	622mV	2,01	0,02
ms ⁻²								Média	desvio padrão				Média	desvio padrão
10								2,91	0,01				2,70	0,05
20								2,07	0,02				1,78	0,03
50								2,61	0,01				1,87	0,00
100								3,06	0,01				1,97	0,03

Figura 7.2 Registo dos valores de erro de medição referente ao 2º Ensaio (representadas as frequências de 40 Hz e 80 Hz)

Na segunda etapa, realizaram-se os ensaios pelo procedimento de comparação multicanal com recurso à mesa de vibração desenvolvida. Foram realizados no total treze ensaios, onde se variou a disposição dos acelerómetros ao longo da mesa em cada ponto de fixação, de modo a comparar os erros nas diferentes fixações da mesa de vibração. As diferentes combinações da disposição dos acelerómetros são apresentadas na Tabela 7.2. Em relação ao acelerómetro de referência, este foi colocado no centro da mesa (ponto de fixação central), mantendo-se na mesma posição em todos os ensaios efetuados.

Tabela 7.2 Síntese dos ensaios efetuados pelo procedimento de comparação multicanal com mesa de vibração

Procedimento de comparação multicanal com mesa de vibração			
Nº Ensaio	Acelerómetro auxiliar utilizado	Posição	Posição das massas (acelerómetros auxiliares) fixadas (<i>dummy masses</i>)
5	B&K 4397 ns 10794	1	-
6	B&K 4397 ns 10794	2	-
7	B&K 4397 ns 10794	3	-
8	ENDEVCO 224Cns FN94	1	-
9	ENDEVCO 224Cns FN94	1	5
10	ENDEVCO 224Cns FN94	1	3, 5 e 7
11	ENDEVCO 224Cns FN92	5	1, 3 e 7
12	ENDEVCO 224Cns FN92	6	2, 4 e 8
13	ENDEVCO 224Cns FN94	2	4, 6 e 8
14	B&K 4367 ns 687035	4	2, 6 e 8
15	B&K 4367 ns 687035	3	1, 5 e 7
16	ENDEVCO 224C ns FN94	7	1, 3 e 5
17	ENDEVCO 224C ns FN94	8	2, 4 e 6

Como já referido no quinto capítulo, os oito furos roscados que permitem a fixação dos acelerómetros foram numerados (Figura 5.5), de modo a definir devidamente as posições da mesa de vibração. A Figura 7.3 ilustra a mesa de vibração com as oito fixações numeradas.

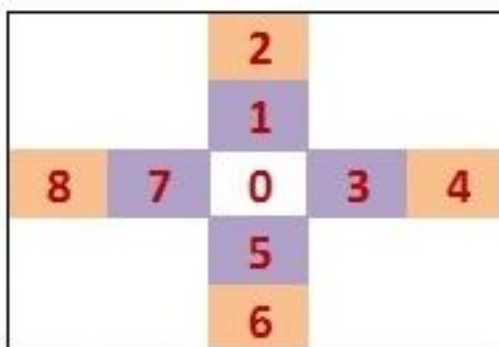


Figura 7.3 Fixações da mesa de vibração numeradas

Em concordância com a Tabela 7.2, nas três figuras que se seguem (Figura 7.4, Figura 7.5 e Figura 7.6) apresentam-se fotografias que exemplificam as diferentes disposições dos acelerómetros nos ensaios efetuados pelo procedimento de comparação multicanal com a mesa de vibração.

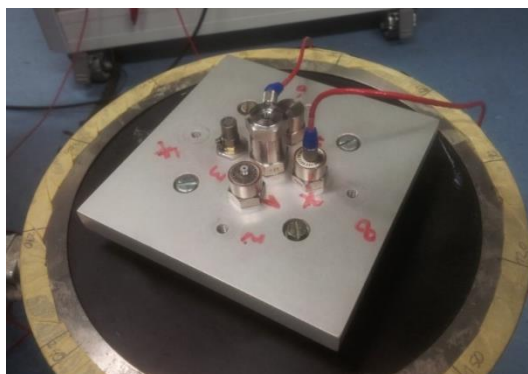


Figura 7.4 16º Ensaio. Acelerómetro de referência B&K 8305 (centro) e acelerómetro ENDEVCO 224C ns FN94 (Posição 7)

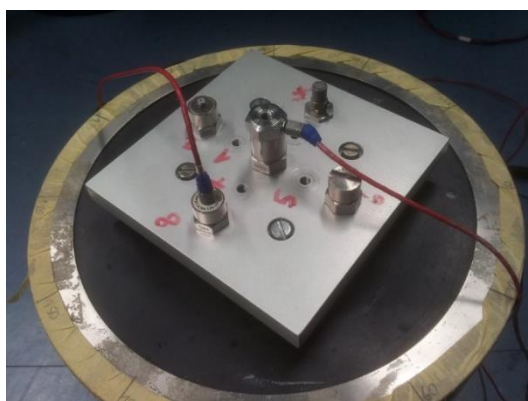


Figura 7.5 17º Ensaio. Acelerómetro de referência B&K 8305 (centro) e acelerómetro ENDEVCO 224C ns FN94 (Posição 8)

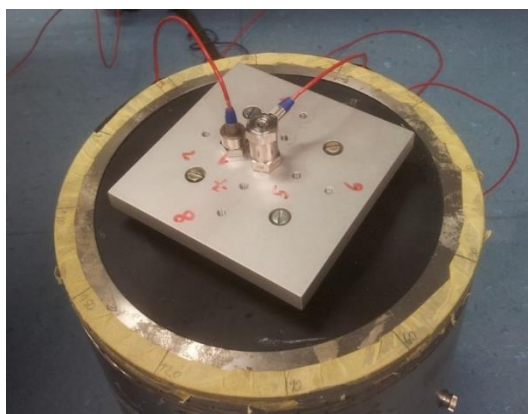


Figura 7.6 8º Ensaio. Acelerómetro de referência B&K 8305 (centro) e acelerómetro ENDEVCO 224C ns FN94 (Posição 1)

Como apresentado anteriormente, agora para o 16º Ensaio, a Figura 7.7 apresenta parte da folha de cálculo onde foram registados os valores de erro adquiridos pela aplicação *LabView*.

Estudo de acelerómetros pelo método multicanal com mesa de vibração (Posição 7 com mais 3 acelerómetros (pos. 1,3 e 5) (de														
Acelerómetro de ref#:		B&K 8305/ns 2243388 / sens.: 0,129 pC/ms ⁻²			Cabo		3090C ENDEVCO (317 pf)		Placa de ligação, canal 0					
Acelerómetro em estudo:		ENDEVCO 224C / ns FN94 / sens.: 1,173 pC/ms ⁻²			Cabo		3090C ENDEVCO (315 pf)		Placa de ligação canal 3					
Condições Experimentais					Frequências Nominais de Ensaio (Hz)									
acelerações nominais	sensibilidade no condicionador	Sinal de excitação (a ajustar em cada leitura)			40					80				
		mV/ms ⁻²	mV (pico)	valor nominal a ler no mult. modo ACV SYNC	data/hora	n_leituras	Valor colocado no gerador	erro	desvio padrão	data/hora	n_leituras	Valor colocado no gerador	erro	desvio padrão
ms ⁻²	g						%	%				%	%	
10	1,02	10	100,0	70,711	12-12-14 13:04	5	135 mV	1,89	0,01	12-12-14 15:15	5	112 mV	2,71	0,04
20	2,04	10	200,0	141,421	12-12-14 13:50	5	266 mV	1,09	0,01	12-12-14 15:31	5	231 mV	1,71	0,02
50	5,10	10	500,0	353,553	12-12-14 14:19	5	654 mV	1,56	0,01	12-12-14 15:46	5	582 mV	1,80	0,02
100	10,20	10	1000,0	707,107	12-12-14 14:56	5	1,26 V	1,98	0,01	12-12-14 16:00	5	1,15 V	2,07	0,01
10	1,02	10	100,0	70,711	12-12-14 13:04	5	135 mV	1,84	0,03	12-12-14 15:15	5	112 mV	2,63	0,04
20	2,04	10	200,0	141,421	12-12-14 13:50	5	266 mV	1,06	0,01	12-12-14 15:31	5	231 mV	1,70	0,03
50	5,10	10	500,0	353,553	12-12-14 14:19	5	654 mV	1,57	0,01	12-12-14 15:46	5	582 mV	1,83	0,01
100	10,20	10	1000,0	707,107	12-12-14 14:56	5	1,26 V	1,98	0,01	12-12-14 16:00	5	1,15 V	2,08	0,02
10	1,02	10	100,0	70,711	12-12-14 13:04	5	135 mV	1,83	0,04	12-12-14 15:15	5	112 mV	2,62	0,05
20	2,04	10	200,0	141,421	12-12-14 13:50	5	266 mV	1,09	0,01	12-12-14 15:31	5	231 mV	1,67	0,01
50	5,10	10	500,0	353,553	12-12-14 14:19	5	654 mV	1,56	0,02	12-12-14 15:46	5	582 mV	1,81	0,01
100	10,20	10	1000,0	707,107	12-12-14 14:56	5	1,26 V	1,97	0,01	12-12-14 16:00	5	1,15 V	2,09	0,02
ms ⁻²							Média	desvio padrão				Média	desvio padrão	
10							1,85	0,03				2,65	0,05	
20							1,08	0,02				1,69	0,02	
50							1,56	0,01				1,81	0,02	
100							1,98	0,00				2,08	0,01	

Figura 7.7 Registo dos valores de erro de medição referente ao 16º Ensaio (representadas as frequências de 40 Hz e 80 Hz)

De acordo com o pretendido, com o objetivo de adquirir os sinais dos acelerómetros nos dois procedimentos referenciados, para condições de amplitude de aceleração e frequência definidas em $a = [10, 20, 50 \text{ e } 100] \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $f = [40, 80, 160, 320, 800, 1000 \text{ e } 2000] \text{ Hz}$ respetivamente, foram realizadas medições para cada ponto de aceleração e frequência em todos os ensaios efetuados.

Na tabela seguinte (Tabela 7.3) são apresentadas as comparações efetuadas entre os dois procedimentos realizados. Tendo em conta os cinco acelerómetros utilizados em estudo, como se pode verificar na Tabela 7.3, a comparação entre os dois procedimentos foi feita de forma a que o acelerómetro auxiliar, a comparar com o acelerómetro de referência, fosse o mesmo nos dois procedimentos. Como já referido, o acelerómetro de referência B&K 8305 foi utilizado em todos os ensaios experimentais estando subentendido nas tabelas apresentadas neste capítulo.

Tabela 7.3 Comparação de ensaios entre os dois procedimentos

Comparação de ensaios entre os dois procedimentos		
Procedimento <i>back-to-back</i>	Acelerómetro auxiliar utilizado	Procedimento multicanal
1º Ensaio	ENDEVCO 224C ns FN92	11º Ensaio
1º Ensaio	ENDEVCO 224C ns FN92	12º Ensaio
2º Ensaio	ENDEVCO 224C ns FN94	8º Ensaio
2º Ensaio	ENDEVCO 224C ns FN94	9º Ensaio
2º Ensaio	ENDEVCO 224C ns FN94	10º Ensaio
2º Ensaio	ENDEVCO 224C ns FN94	13º Ensaio
2º Ensaio	ENDEVCO 224C ns FN94	16º Ensaio
2º Ensaio	ENDEVCO 224C ns FN94	17º Ensaio
3º Ensaio	B&K 4367 ns 687035	14º Ensaio
3º Ensaio	B&K 4367 ns 687035	15º Ensaio
4º Ensaio	B&K 4397 ns 10794	5º Ensaio
4º Ensaio	B&K 4397 ns 10794	6º Ensaio
4º Ensaio	B&K 4397 ns 10794	7º Ensaio

O que constituiu o fator mais importante e que melhor caracterizou o modelo matemático utilizado, com vista a comparar os dois procedimentos entre si, foi a necessidade de garantir que as condições de medição fossem exatamente as mesmas nos dois procedimentos, pelo que houve um cuidado especial e metódico de modo a garantir essas mesmas em todos os ensaios efetuados.

Procurou-se perceber de que forma o erro calculado no procedimento de comparação multicanal com recurso à mesa de vibração (variando as diferentes disposições dos acelerómetros ao longo da mesa) variava com o erro calculado através do procedimento de comparação com fixação *back-to-back* em cada condição de frequência e aceleração. A comparação entre os dois procedimentos, avaliada pela diferença entre os valores de erro determinados pelo procedimento de comparação multicanal com o procedimento de comparação com fixação *back-to-back*, permitiu tirar algumas conclusões acerca da validação da mesa de vibração e compreender em que condições se poderia aplicar esta nova solução de medição.

De acordo com o objetivo principal da dissertação, analisou-se a validade do procedimento de comparação multicanal com recurso à mesa de vibração desenvolvida, ao nível da frequência de excitação, num intervalo de medição entre 40 Hz e 2000 Hz nos oito pontos de fixação da mesa de vibração.

7.1. Comparação entre os Dois Procedimentos Realizados

As tabelas e gráficos apresentados neste subcapítulo representam os resultados finais deste trabalho experimental, efetuando-se a comparação dos resultados obtidos entre os dois procedimentos.

Em anexo (Anexo I) encontram-se as tabelas processadas dos resultados dos ensaios efetuados nos dois procedimentos. Nas tabelas e gráficos da comparação entre os dois procedimentos, que serão apresentados de seguida, procurou-se perceber o que acontece quando se faz variar no procedimento de comparação multicanal, as posições interiores (próximas do centro) de quatro acelerómetros (em que três desses foram usados como *dummy masses*) fixados simetricamente para posições mais afastadas do centro da mesa, comparando estes resultados com os resultados obtidos pelo procedimento de comparação com fixação *back-to-back*. Assim, irá ser apresentado a comparação entre os dois procedimentos, onde foram estudadas as oito fixações numeradas na mesa de vibração, simulando o caso em que se adquiria simultaneamente os sinais de quatro acelerómetros auxiliares a comparar com o acelerómetro de referência. De forma a perceber qual a influência do incremento de massa da mesa de vibração, também se apresentará o estudo em três pontos de fixação da mesa de vibração onde não foram usados *dummy masses* e, noutro caso, em que se estudou um ponto de fixação usando apenas um acelerómetro como *dummy mass*.

7.1.1. Estudo da Mesa de Vibração. Análise Gráfica

Nas comparações que se seguem são apresentadas as tabelas e gráficos correspondentes aos resultados dos valores de $Erro_{final}$ (%) em relação às posições interiores da mesa de vibração (1, 5 e 7), em que são usados três acelerómetros auxiliares como *dummy masses*. A análise da posição interior 3 nas condições referidas será deixada para última análise neste subcapítulo.

A Figura 7.8 apresenta uma fotografia do 10º Ensaio. Tal como indicado na Tabela 7.2, a Figura 7.8 ilustra na posição 1 o acelerómetro auxiliar (ENDEVCO 224C ns FN94), no centro o acelerómetro de referência e nas posições 3, 5 e 7 os restantes acelerómetros auxiliares funcionando como *dummy masses*. Como já referido, o acelerómetro auxiliar, a comparar com o acelerómetro de referência, foi o mesmo nos dois procedimentos referenciados, efetuando assim a comparação destes.

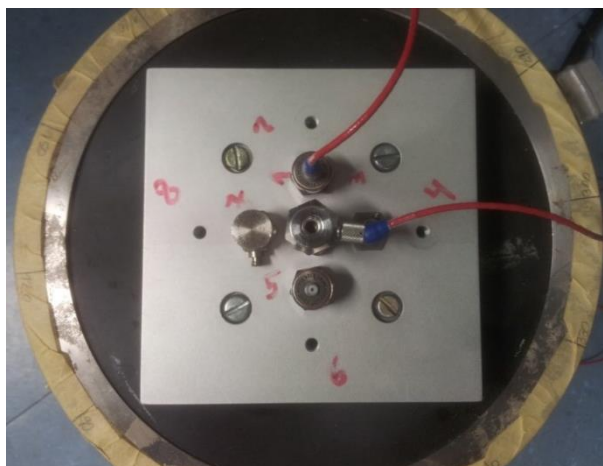


Figura 7.8 10º Ensaio. Acelerómetro de referência B&K 8305 (centro) e acelerómetro ENDEVCO 224C ns FN94 (Posição 1)

A Tabela 7.4 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 10º Ensaio (procedimento multicanal) e o 2º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.4 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 10º Ensaio e 2º Ensaio

Diferença dos erros médios, Erro _{final} (%)							
10º Ensaio e 2º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. (m·s ⁻²)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	0,56	0,79	1,16	0,06	0,23	-0,39	-1,21
20	0,70	0,77	0,77	0,04	0,17	-0,31	-1,20
50	0,68	0,91	1,06	0,91	0,16	-0,29	-1,37
100	0,52	1,07	1,20	0,51	0,06	-0,27	-1,45

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.9) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.4.

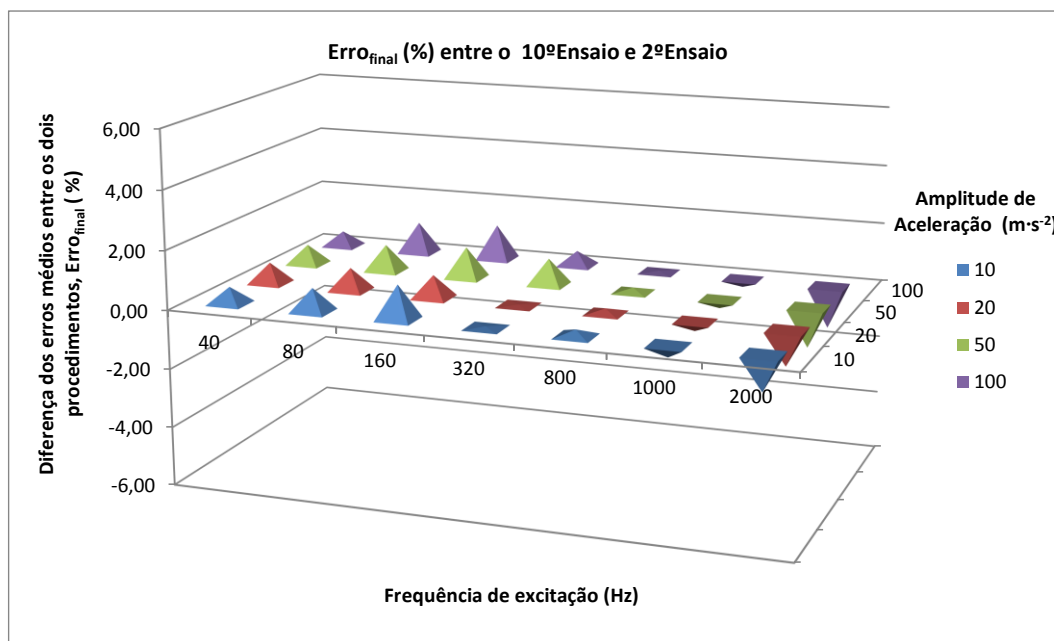


Figura 7.9 Resultados da diferença dos erros médios entre o 10º Ensaio e 2º Ensaio (posição 1)

Analisando o gráfico da Figura 7.9, pode-se verificar que no intervalo de frequências e acelerações estudado, a diferença de erros entre os dois procedimentos tem um comportamento semelhante, correspondente a um valor máximo de -1,45 %.

Analogamente, são apresentadas as tabelas e gráficos correspondentes aos valores da diferença dos erros médios entre os dois procedimentos ($Erro_{final} (\%)$), de modo a estudar as restantes fixações numeradas da mesa de vibração, tendo em consideração as fixações de três outros acelerómetros auxiliares usados como *dummy masses*.

A Tabela 7.5 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 11º Ensaio (procedimento multicanal) e o 1º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.5 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 11º Ensaio e 1º Ensaio

Diferença dos erros médios, $Erro_{final} (\%)$							
11º Ensaio e 1º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	-1,30	-0,20	-0,32	1,03	1,24	1,20	-0,24
20	-0,63	-0,04	-0,46	0,99	1,01	1,26	0,43
50	-0,58	-0,03	-0,34	0,99	1,00	1,33	0,53
100	-0,33	0,13	-0,05	1,18	1,19	1,32	0,56

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.10) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.5.

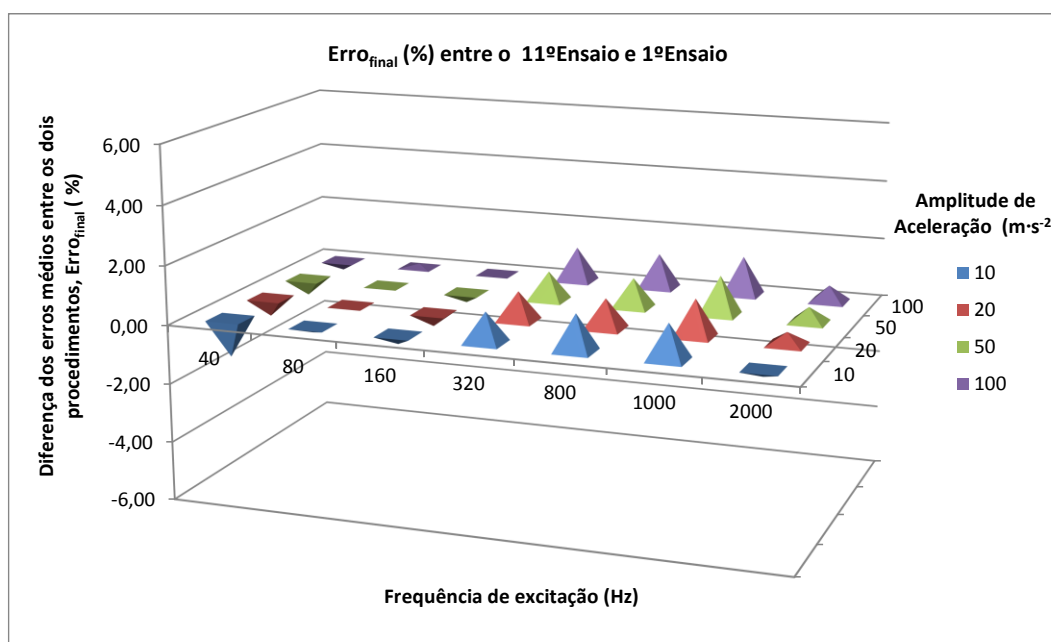


Figura 7.10 Resultados da diferença dos erros médios entre o 11º Ensaio e 1º Ensaio (posição 5)

Ao analisar o gráfico da Figura 7.10 pode-se verificar que no intervalo de frequências e acelerações estudado, a diferença de erros entre os dois procedimentos tem um comportamento semelhante, correspondendo a um valor máximo de 1,33 %.

A Tabela 7.6 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 16º Ensaio (procedimento multicanal) e o 2º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.6 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio

Diferença dos erros médios, $Erro_{final}$ (%)							
16º Ensaio e 2º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	-1,06	-0,04	0,07	-0,08	-0,50	-1,09	-3,04
20	-0,99	-0,08	0,02	-0,13	-0,59	-1,23	-3,42
50	-1,04	-0,06	0,07	-0,14	-0,71	-1,32	-3,42
100	-1,08	0,11	0,53	0,27	-0,31	-1,04	-3,28

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.11) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.6.

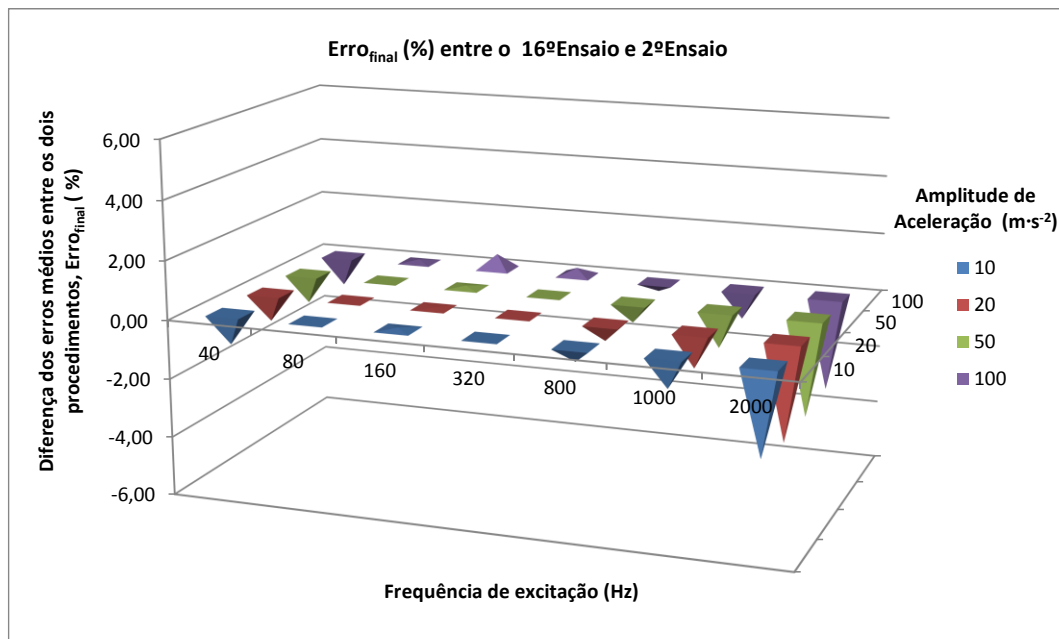


Figura 7.11 Resultados da diferença dos erros médios entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio (posição 7)

Analisando o gráfico da figura acima, verifica-se um comportamento idêntico na resposta em frequência até 1000 Hz. No entanto, os melhores resultados ocorrem no intervalo de frequência compreendido entre 80 Hz e 800 Hz. À frequência de 2000 Hz é notório o aumento dos valores de $Erro_{final}$ (%), correspondente a um valor máximo de -3,42 %.

Nas tabelas seguintes apresenta-se quatro exemplos de balanços de incertezas realizados, nomeadamente para a determinação da variação do $Erro_{final}$ (%) entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio, para acelerações de $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ nas frequências de 40 Hz e 1000 Hz.

Tabela 7.7 Balanço de incerteza associado à determinação do $Erro_{final}$ (%) entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio, $f = 40$ Hz e $a = 10$ m·s⁻²

Fonte de incerteza	Estimativa do valor	Tipo de avaliação (Tipo A ou tipo B)/Distribuição de probabilidade	Incerteza-padrão [$u(x_i)$]	Coefficientes de sensibilidade c_i	Componente quadrática $(c_i \cdot u(x_i))^{22}$	Nº de graus de liberdade
V_{btr}	7,06E-02 V	A/Normal	1,04E-04 V	1,46E+01 V ⁻¹	2,31E-06	2
V_{btbx}	7,26E-02 V	A/Normal	1,11E-04 V	-1,42E+01 V ⁻¹	2,48E-06	2
V_{mr}	7,09E-02 V	A/Normal	1,49E-04 V	-1,44E+01 V ⁻¹	4,60E-06	2
V_{mx}	7,22E-02 V	A/Normal	1,66E-04 V	1,41E+01 V ⁻¹	5,50E-06	2
w	1,00E+00	B/retangular	7,88E-03	-1,06E-02	7,02E-09	50
$Erro_{final}$ (%)	-1,06 %		Incerteza Combinada, U_c (y)		3,86E-03	
			neff		7,06	
			Fator de expansão, k		2,43	
			Incerteza expandida, U		9,37E-03	
			Incerteza expandida, U		0,94 %	

Tabela 7.8 Balanço de incerteza associado à determinação do $Erro_{final}$ (%) entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio, $f = 40$ Hz e $a = 100$ m·s⁻²

Fonte de incerteza	Estimativa do valor	Tipo de avaliação (Tipo A ou tipo B)/Distribuição de probabilidade	Incerteza-padrão [$u(x_i)$]	Coefficientes de sensibilidade c_i	Componente quadrática $(c_i \cdot u(x_i))^2$	Nº de graus de liberdade
V_{btr}	7,05E-01 V	A/Normal	1,12E-03 V	1,46E+00 V ⁻¹	2,68E-06	2
V_{btbx}	7,27E-01 V	A/Normal	1,13E-03 V	-1,42E+00 V ⁻¹	2,56E-06	2
V_{mr}	7,08E-01 V	A/Normal	8,64E-04 V	-1,44E+00 V ⁻¹	1,55E-06	2
V_{mx}	7,22E-01 V	A/Normal	8,66E-04 V	1,41E+00 V ⁻¹	1,50E-06	2
w	1,00E+00	B/retangular	7,88E-03	-1,08E-02	7,29E-09	50
$Erro_{final}$ (%)	-1,08 %		Incerteza Combinada, U_c (y)		2,88E-03	
			neff		7,49	
			Fator de expansão, k		2,43	
			Incerteza expandida, U		7,00E-03	
			Incerteza expandida, U		0,70 %	

Tabela 7.9 Balanço de incerteza associado à determinação do $Erro_{\text{final}}(\%)$ entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio, $f = 1000 \text{ Hz}$ e $a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Fonte de incerteza	Estimativa do valor	Tipo de avaliação (Tipo A ou tipo B)/Distribuição de probabilidade	Incerteza-padrão $[u(x_i)]$	Coefficientes de sensibilidade c_i	Componente quadrática $(c_i \cdot u(x_i))^2$	Nº de graus de liberdade
V_{btbr}	7,07E-02 V	A/Normal	8,12E-05 V	1,41E+01 V^{-1}	1,30E-06	2
V_{btbx}	7,03E-02 V	A/Normal	1,07E-04 V	-1,41E+01 V^{-1}	2,29E-06	2
V_{mr}	7,07E-02 V	A/Normal	3,23E-05 V	-1,39E+01 V^{-1}	2,02E-07	2
V_{mx}	6,95E-02 V	A/Normal	2,63E-05 V	1,42E+01 V^{-1}	1,39E-07	2
w	1,00E+00	B/retangular	7,88E-03	-1,10E-02	7,45E-09	50
$Erro_{\text{final}}(\%)$	-1,09 %		Incerteza Combinada, $U_c(y)$		1,99E-03	
			neff		4,44	
			Fator de expansão, k		2,87	
			Incerteza expandida, U		5,70E-03	
			Incerteza expandida, U		0,57 %	

Tabela 7.10 Balanço de incerteza associado à determinação do $Erro_{\text{final}}(\%)$ entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio, $f = 1000 \text{ Hz}$ e $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Fonte de incerteza	Estimativa do valor	Tipo de avaliação (Tipo A ou tipo B)/Distribuição de probabilidade	Incerteza-padrão $[u(x_i)]$	Coefficientes de sensibilidade c_i	Componente quadrática $(c_i \cdot u(x_i))^2$	Nº de graus de liberdade
V_{btbr}	7,10E-01 V	A/Normal	8,10E-04 V	1,39E+00 V^{-1}	1,27E-06	2
V_{btbx}	7,01E-01 V	A/Normal	8,31E-04 V	-1,41E+00 V^{-1}	1,37E-06	2
V_{mr}	7,09E-01 V	A/Normal	1,43E-03 V	-1,38E+00 V^{-1}	3,87E-06	2
V_{mx}	6,93E-01 V	A/Normal	1,46E-03 V	1,41E+00 V^{-1}	4,22E-06	2
w	1,00E+00	B/retangular	7,88E-03	-1,05E-02	6,80E-09	50
$Erro_{\text{final}}(\%)$	-1,04 %		Incerteza Combinada, $U_c(y)$		3,28E-03	
			neff		6,36	
			Fator de expansão, k		2,52	
			Incerteza expandida, U		8,25E-03	
			Incerteza expandida, U		0,82 %	

Nas duas figuras seguintes (Figura 7.12 e Figura 7.13) representam-se graficamente as variações dos valores do $Erro_{final}$ (%) obtidos na comparação entre o 16º Ensaio e o 2º Ensaio para uma amplitude de aceleração de excitação de $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Nestes dois casos que se apresentam, os valores de incerteza expandida associados ao $Erro_{final}$ (%) variam na ordem de 0,5 % a 1 % ao longo do intervalo de frequências estudadas.

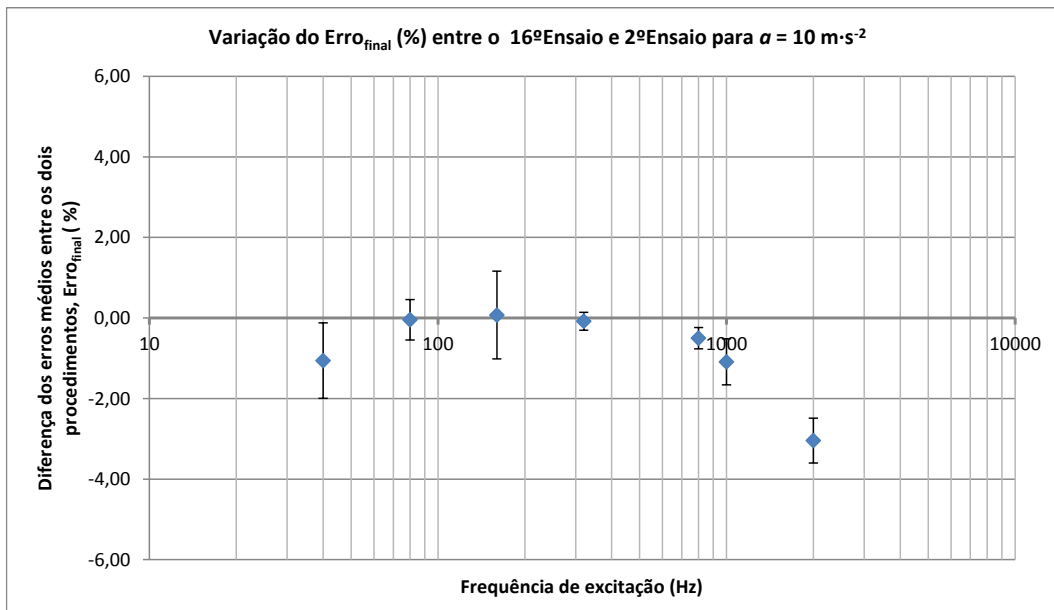


Figura 7.12 Varição do $Erro_{final}$ (%) entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio para $a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

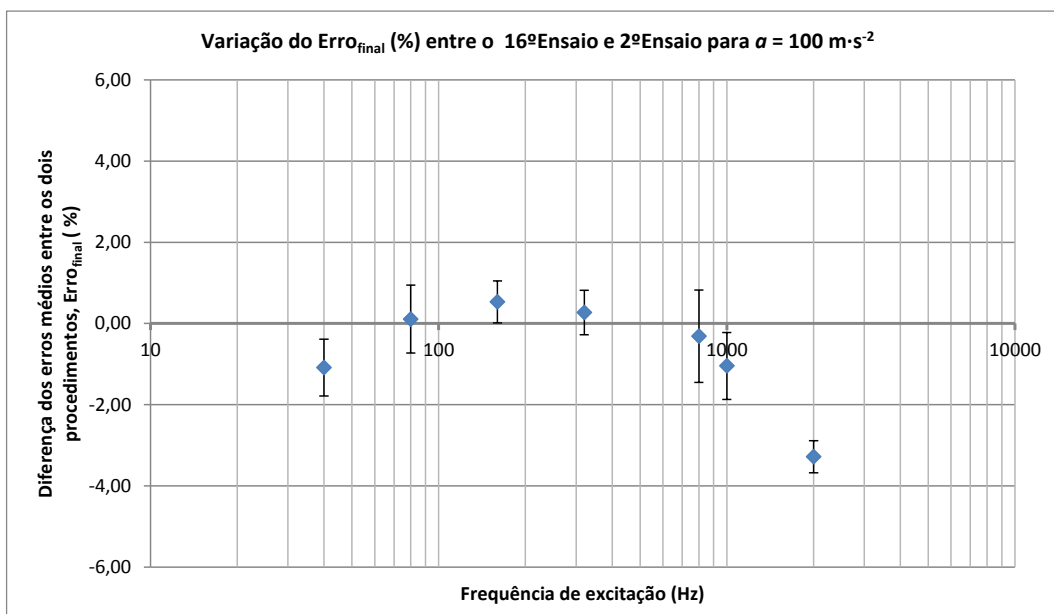


Figura 7.13 Varição do $Erro_{final}$ (%) entre o 16º Ensaio e 2º Ensaio para $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

De seguida são apresentadas as tabelas e gráficos correspondentes aos resultados de $Erro_{final}$ (%) em relação às posições mais afastadas da mesa de vibração (2, 6 e 8), usando três acelerómetros auxiliares como *dummy masses*. Tal como anteriormente, agora para a posição 4 da mesa de vibração, a análise dessa posição nas condições referidas será deixada também para último neste subcapítulo.

A Tabela 7.11 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 13º Ensaio (procedimento multicanal) e o 2º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.11 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 13º Ensaio e 2º Ensaio

Diferença dos erros médios, $Erro_{final}$ (%)							
13º Ensaio e 2º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	0,01	0,24	0,42	-1,17	-0,37	-1,21	-0,32
20	0,19	0,38	0,43	-1,04	-0,23	-1,26	-0,57
50	0,33	0,49	0,81	-1,01	-0,33	-1,25	-0,77
100	0,01	0,77	1,11	-0,77	-0,25	-1,19	-0,63

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.14) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.11.

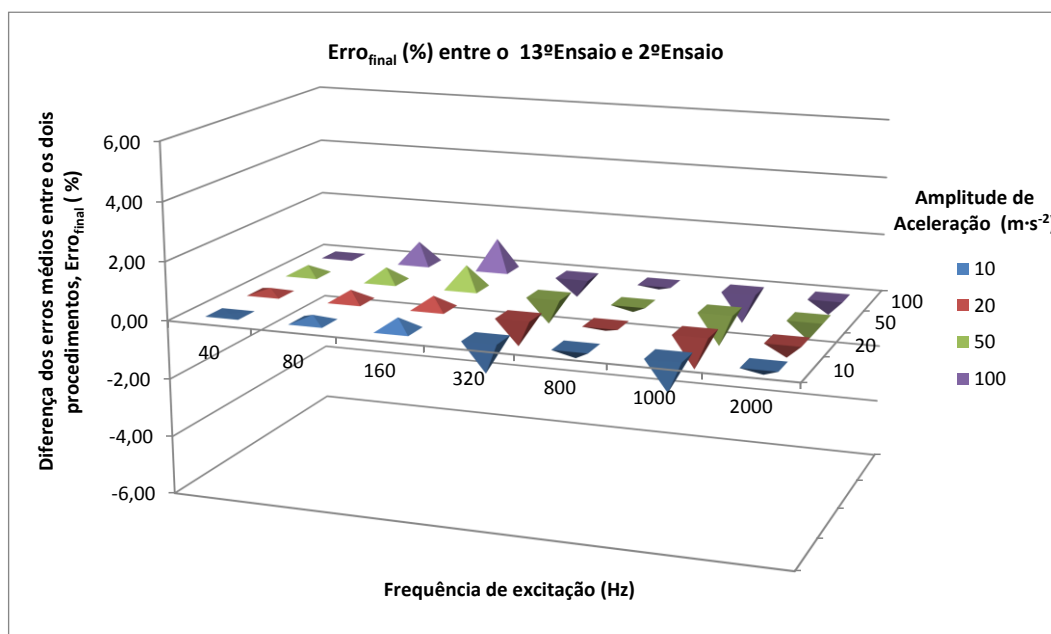


Figura 7.14 Resultados da diferença dos erros médios entre o 13º Ensaio e 2º Ensaio (posição 2)

De acordo com o gráfico da Figura 7.14, verifica-se um comportamento semelhante da diferença dos erros entre os dois procedimentos no intervalo de frequências e acelerações estudado. O valor máximo de $Erro_{final}$ (%) é de -1,26 %.

A Tabela 7.12 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 12º Ensaio (procedimento multicanal) e o 1º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.12 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 12º Ensaio e 1º Ensaio

Diferença dos erros médios, $Erro_{final}$ (%)							
12º Ensaio e 1º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	-1,69	-0,43	-0,81	1,34	1,16	1,88	3,35
20	-1,34	-0,19	-0,57	1,24	1,20	2,00	3,26
50	-0,92	-0,21	-0,85	1,21	1,16	2,06	3,29
100	-0,81	-0,47	-0,55	1,46	1,12	1,97	3,12

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.15) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.12.

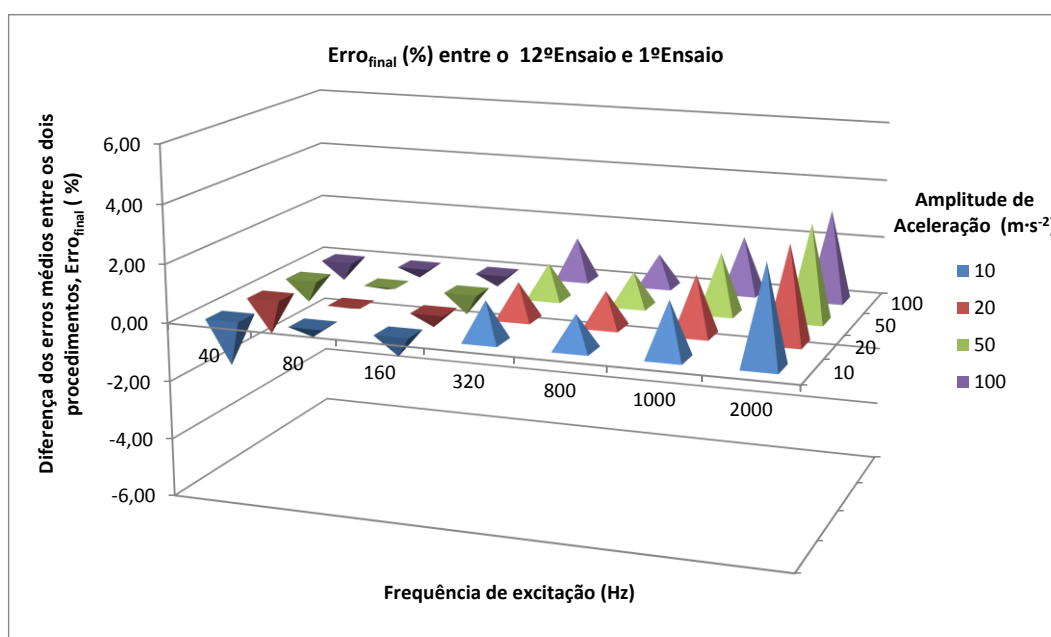


Figura 7.15 Resultados da diferença dos erros médios entre o 12º Ensaio e 1º Ensaio (posição 6)

No gráfico apresentado na Figura 7.15 verifica-se, no intervalo de frequências e acelerações estudado, um comportamento semelhante na resposta em frequência até 1000 Hz. Ainda assim, os melhores resultados ocorrem no intervalo de frequência compreendido entre 80 Hz e 800 Hz. À frequência de 2000 Hz verifica-se a maior diferença de erros ao longo do intervalo de acelerações, traduzindo-se num valor máximo de 3,35 %.

A Tabela 7.13 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 17º Ensaio (procedimento multicanal) e o 2º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.13 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 17º Ensaio e 2º Ensaio

Diferença dos erros médios, $Erro_{final}$ (%)							
17º Ensaio e 2º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	-1,17	0,01	0,15	-0,98	-0,92	-2,34	-4,52
20	-1,02	0,04	0,11	-1,07	-1,07	-2,42	-4,66
50	-0,99	0,20	0,46	-0,99	-1,17	-2,36	-4,62
100	-1,45	0,15	0,71	-0,60	-0,87	-2,23	-4,07

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.16) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.13.

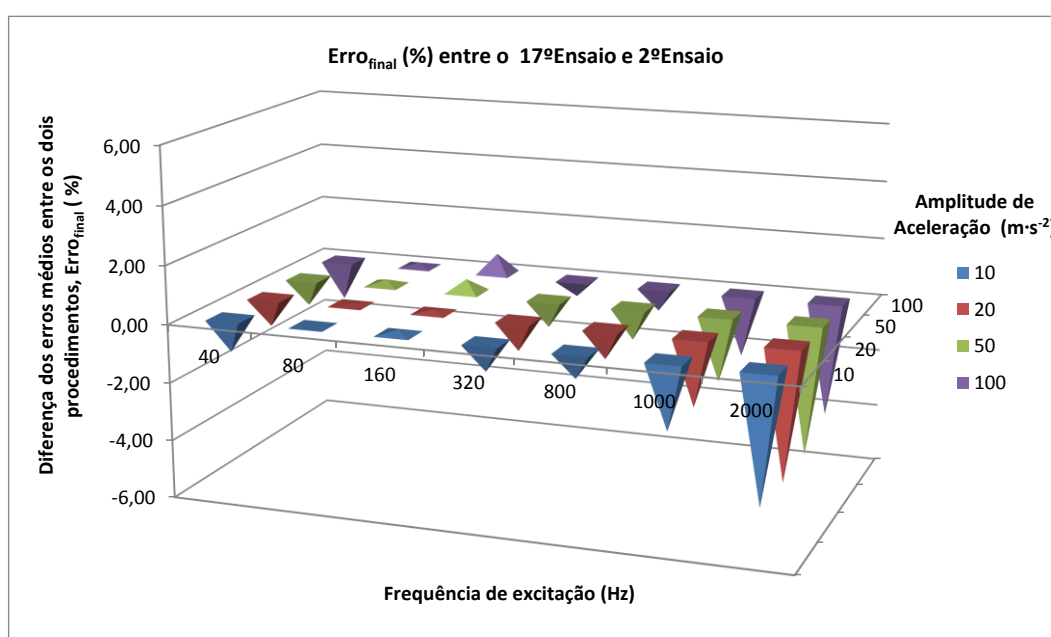


Figura 7.16 Resultados da diferença dos erros médios entre o 17º Ensaio e 2º Ensaio (posição 8)

Analisando o gráfico da Figura 7.16 pode-se verificar que, no intervalo de frequências e acelerações estudado, a diferença dos erros entre os dois procedimentos tem um comportamento semelhante na resposta em frequência até 800 Hz. Verifica-se que para a frequência de 2000 Hz, o $Erro_{final}$ (%) aumenta significativamente em todo o intervalo de aceleração, correspondendo a um valor máximo de -4,66 %.

Nos quatro casos seguintes apresentam-se os resultados da comparação entre os dois procedimentos nas posições seguidamente referidas, sem a fixação de acelerómetros auxiliares que funcionariam como *dummy masses*, ou seja, nestes quatro casos (relativos ao procedimento de comparação multicanal) apenas foram fixados na mesa de vibração o acelerómetro de referência e o acelerómetro auxiliar.

A Tabela 7.14 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 5º Ensaio (procedimento multicanal) e o 4º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.14 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 5º Ensaio e 4º Ensaio

Diferença dos erros médios, $Erro_{final}$ (%)							
5º Ensaio e 4º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	-0,07	-0,34	0,38	-0,58	-0,36	-1,52	-2,97
20	-0,33	-0,47	0,11	-0,58	-0,24	-1,63	-3,18
50	-0,08	-0,39	0,13	-0,59	-0,33	-1,43	-3,16
100	-0,01	-0,13	0,57	-0,23	-0,41	-1,46	-3,32

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.17) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.14.

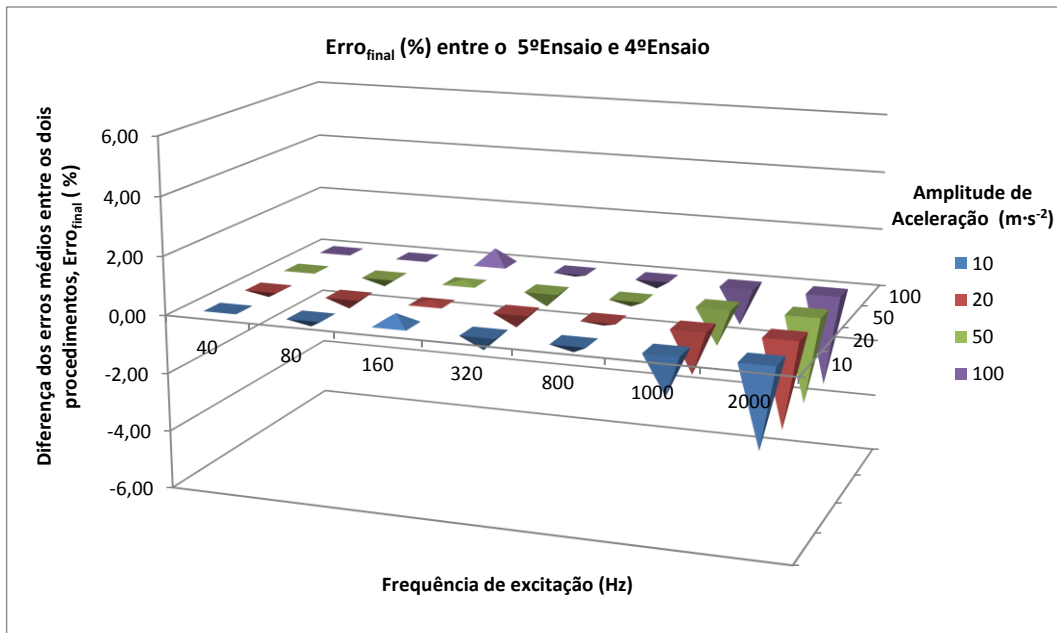


Figura 7.17 Resultados da diferença dos erros médios entre o 5º Ensaio e 4º Ensaio (posição 1)

De acordo com o gráfico da Figura 7.17 verifica-se que, no intervalo de frequências e acelerações estudado, a diferença dos erros entre os dois procedimentos tem um comportamento semelhante na resposta em frequência até 800 Hz. Verifica-se um aumento significativo dos valores de $Erro_{final}$ (%) em todo o intervalo de aceleração na frequência de excitação igual a 2000 Hz, correspondendo a um valor máximo de -3,32 %.

A Tabela 7.15 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 6º Ensaio (procedimento multicanal) e o 4º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.15 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 6º Ensaio e 4º Ensaio

Diferença dos erros médios, $Erro_{final}$ (%)							
6º Ensaio e 4º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	0,61	0,35	0,92	-1,56	-0,12	-1,68	-2,42
20	0,00	0,40	0,55	-1,49	-0,20	-1,95	-2,85
50	0,08	0,15	0,67	-1,45	-0,33	-1,76	-2,72
100	0,42	0,28	0,71	-1,49	-0,42	-1,73	-3,03

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.18) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.15.

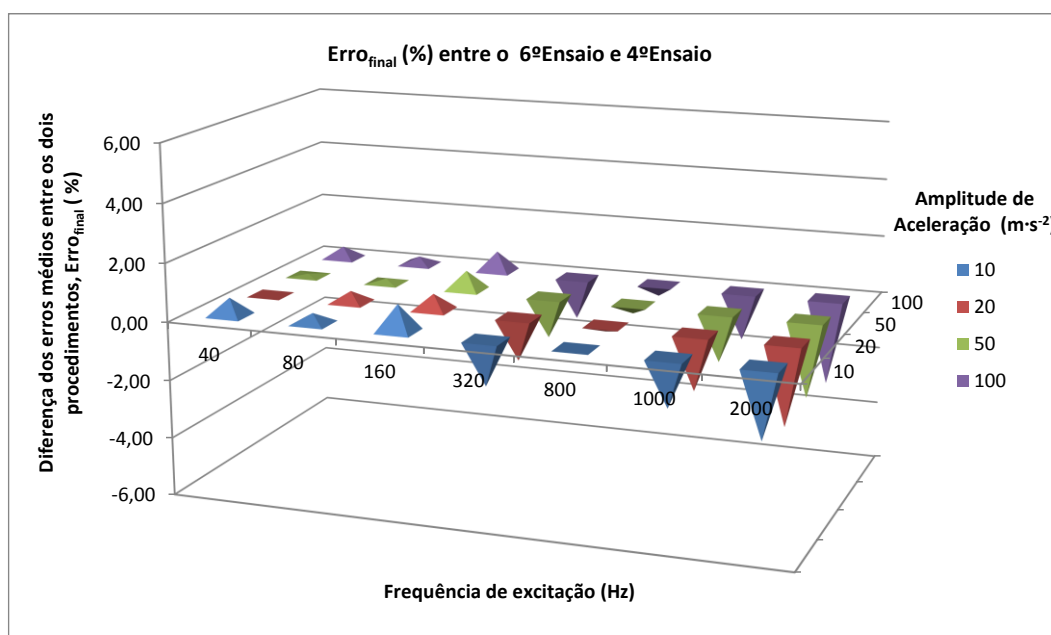


Figura 7.18 Resultados da diferença dos erros médios entre o 6º Ensaio e 4º Ensaio (posição 2)

Analisando o gráfico da figura acima (Figura 7.18), verifica-se um comportamento semelhante na resposta em frequência até 800 Hz. À semelhança da análise gráfica anterior, é notório o aumento dos valores de $Erro_{final}$ (%) na frequência de excitação igual a 2000 Hz, correspondendo a um valor máximo de -3,3 %.

A Tabela 7.16 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 7º Ensaio (procedimento multicanal) e o 4º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.16 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 7º Ensaio e 4º Ensaio

Diferença dos erros médios, $Erro_{final}$ (%)							
7º Ensaio e 4º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	0,51	0,25	-0,01	0,08	1,08	1,48	0,74
20	0,08	0,02	-0,39	0,04	1,05	1,55	0,90
50	0,26	-0,13	-0,32	0,06	0,99	1,43	0,89
100	0,53	0,04	-0,18	0,20	1,06	1,63	0,57

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.19) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.16.

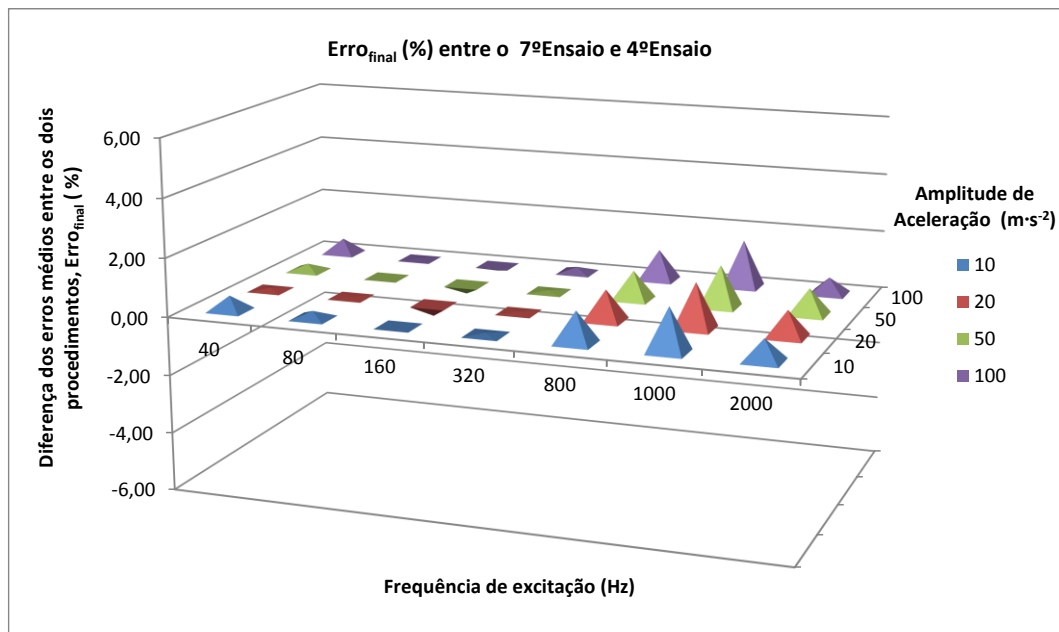


Figura 7.19 Resultados da diferença dos erros médios entre o 7º Ensaio e 4º Ensaio (posição 3)

De acordo com o gráfico da Figura 7.19 pode-se verificar que, no intervalo de frequências e acelerações estudado, a diferença dos erros entre os dois procedimentos tem um comportamento muito idêntico nas primeiras quatro frequências (40 Hz, 80 Hz, 160 Hz e 320Hz). A partir de 800 Hz há um aumento da diferença de erros entre os dois procedimentos, no entanto, estes valores encontram-se dentro da média dos valores que até agora foram apresentados. O valor máximo ocorre na frequência de excitação igual a 1000 Hz e é de 1,63 %.

A Tabela 7.17 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 8º Ensaio (procedimento multicanal) e o 2º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.17 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 8º Ensaio e 2º Ensaio

Diferença dos erros médios, $Erro_{final}$ (%)							
8º Ensaio e 2º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	2,07	0,96	0,57	-0,10	0,35	-0,24	-1,52
20	1,99	0,93	0,71	-0,36	0,27	-0,30	-1,67
50	1,42	1,11	0,87	-0,32	0,22	-0,20	-1,88
100	0,93	1,19	0,94	0,06	0,35	-0,19	-1,82

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.20) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.17.

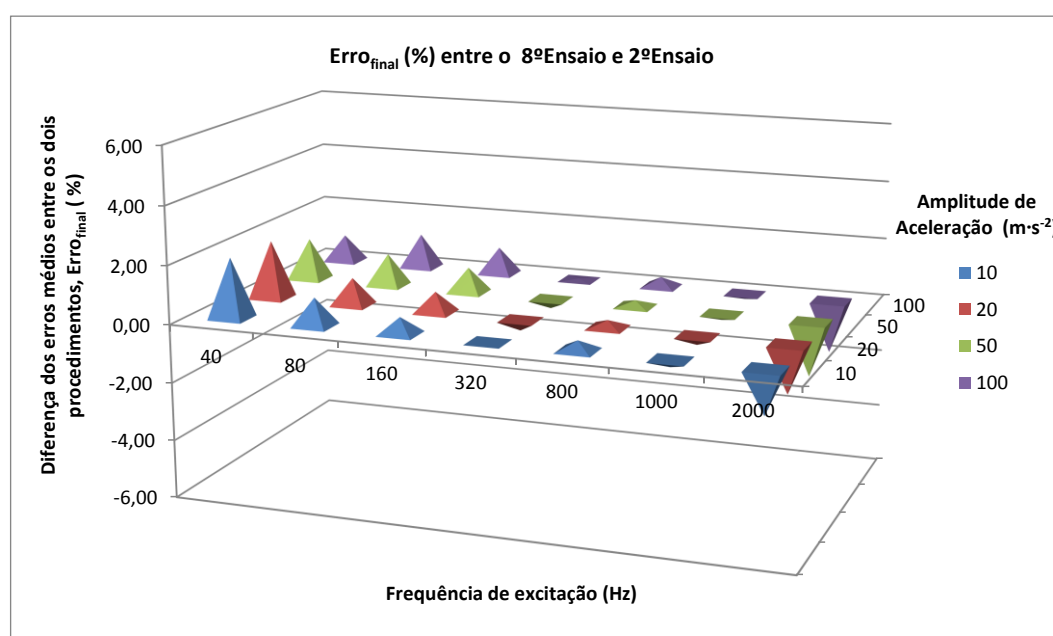


Figura 7.20 Resultados da diferença dos erros médios entre o 8º Ensaio e 2º Ensaio (posição 1)

Analisando o gráfico da figura acima (Figura 7.20), verifica-se um comportamento que tende para uma diminuição da diferença de erros até à frequência de 1000 Hz. À semelhança da análise gráfica anterior é notório o aumento dos valores de $Erro_{final}$ (%) na resposta em frequência a 2000 Hz. Contudo, também se pode verificar uma maior diferença de erros na resposta em frequência a 40 Hz. O valor máximo do $Erro_{final}$ (%) é de 2,07 %.

Na próxima comparação, relativamente ao 9º Ensaio efetuado, a diferença para o 8º Ensaio reside apenas na adição de um acelerómetro auxiliar usado como *dummy mass*. A Tabela 7.18 apresenta os

valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 9º Ensaio (procedimento multicanal) e o 2º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.18 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 9º Ensaio e 2º Ensaio

Diferença dos erros médios, $Erro_{final}$ (%)							
9º Ensaio e 2º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	1,84	1,01	1,05	0,32	0,22	0,04	-1,39
20	1,71	1,02	0,78	0,27	0,28	-0,27	-1,56
50	1,17	1,11	1,02	0,27	0,20	-0,20	-1,59
100	0,93	1,18	1,24	0,58	0,24	-0,25	-1,52

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.21) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.18.

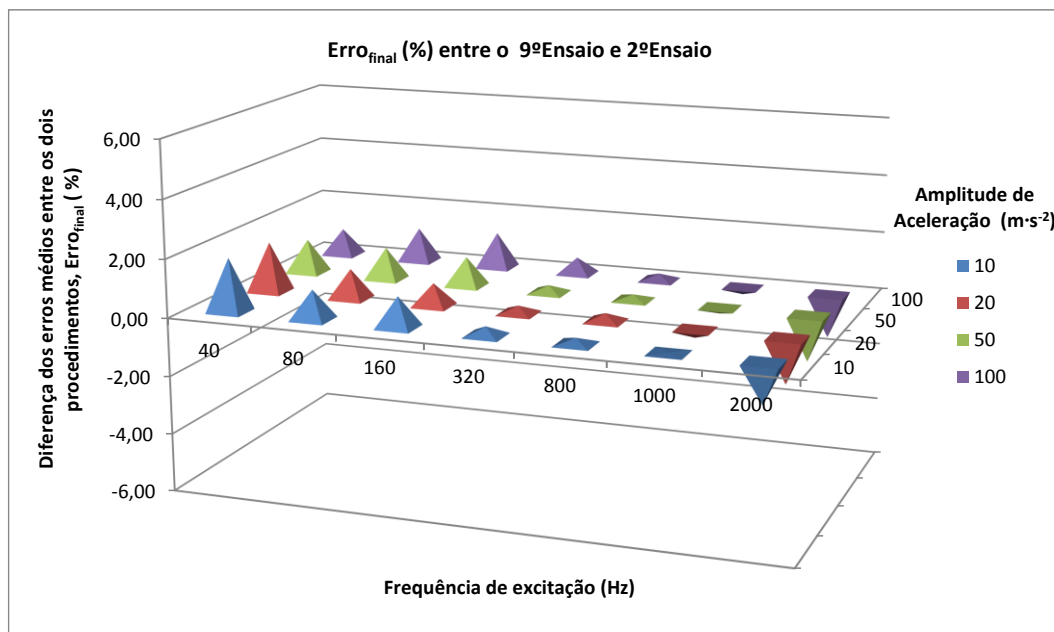


Figura 7.21 Resultados da diferença dos erros médios entre o 9º Ensaio e 2º Ensaio (posição 1)

Tal como no caso anterior, analisando o gráfico da figura acima (Figura 7.21), verifica-se igualmente um comportamento que tende para uma diminuição da diferença de erros na resposta em frequência até 1000 Hz. Verificam-se as maiores diferenças de erros nas frequências de excitação iguais a 40 Hz e 2000 Hz, correspondendo a um valor máximo do $Erro_{final}$ (%) de 1,84 %. A adição do acelerómetro auxiliar (*dummy mass*) não fez variar os resultados da diferença de erros entre os dois

procedimentos, sendo notória a semelhança de resultados em comparação com os apresentados na Figura 7.20.

Propositadamente foi deixado para último a análise relativa à comparação do 15º Ensaio e 14º Ensaio com o 3º Ensaio, nomeadamente em relação à posição interior 3 (15º Ensaio) e à posição exterior 4 (14º Ensaio) nas condições em que foram usados três acelerómetros auxiliares como *dummy masses* no procedimento de comparação multicanal. Nestes dois últimos casos analisados, verifica-se um comportamento com diferenças de erro significativamente maiores à média dos resultados apresentados. De notar que se utilizou o acelerómetro B&K 4367 ns 687035 nos três ensaios referidos.

A Tabela 7.19 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 15º Ensaio (procedimento multicanal) e o 3º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.19 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 15º Ensaio e 3º Ensaio

Diferença dos erros médios, Erro _{final} (%)							
15º Ensaio e 3º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. (m·s ⁻²)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	1,06	0,95	1,19	2,21	2,28	3,13	2,60
20	1,14	1,00	1,26	2,03	2,52	3,38	2,73
50	1,16	1,06	1,10	2,00	2,71	3,42	2,67
100	0,78	1,14	1,28	2,01	2,98	3,51	2,56

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.22) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.19.

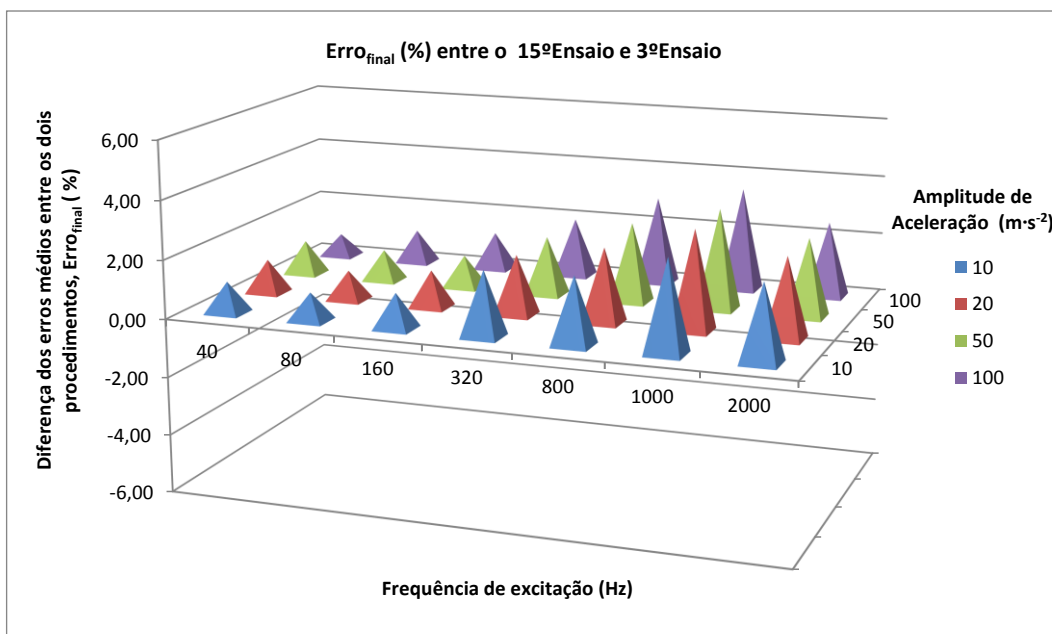


Figura 7.22 Resultados da diferença dos erros médios entre o 15º Ensaio e 3º Ensaio (posição 3)

Verifica-se no gráfico da Figura 7.22 que, no intervalo de frequências e acelerações, o $Erro_{final}$ (%) aumenta a partir da frequência de excitação de 320 Hz, tendo sido obtido um valor máximo de 3,51 % entre os dois procedimentos. Neste caso, os maiores valores de $Erro_{final}$ (%) situam-se nas frequências de excitação de 800 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

A Tabela 7.20 apresenta os valores da diferença dos erros médios obtidos entre o 14º Ensaio (procedimento multicanal) e o 3º Ensaio (procedimento de fixação *back-to-back*) para todos os pontos de aceleração e frequência em estudo.

Tabela 7.20 Comparação entre os dois procedimentos. Resultados da diferença dos erros médios entre o 14º Ensaio e 3º Ensaio

Diferença dos erros médios, $Erro_{final}$ (%)							
14º Ensaio e 3º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	1,14	1,21	1,12	1,85	3,22	4,81	5,37
20	1,38	1,35	1,53	1,97	3,35	5,05	5,53
50	0,93	1,38	1,50	1,85	3,32	5,04	5,04
100	0,74	1,54	1,43	1,63	3,37	5,04	4,82

De seguida apresenta-se graficamente (Figura 7.23) os resultados da comparação entre os dois procedimentos de acordo com a Tabela 7.20.

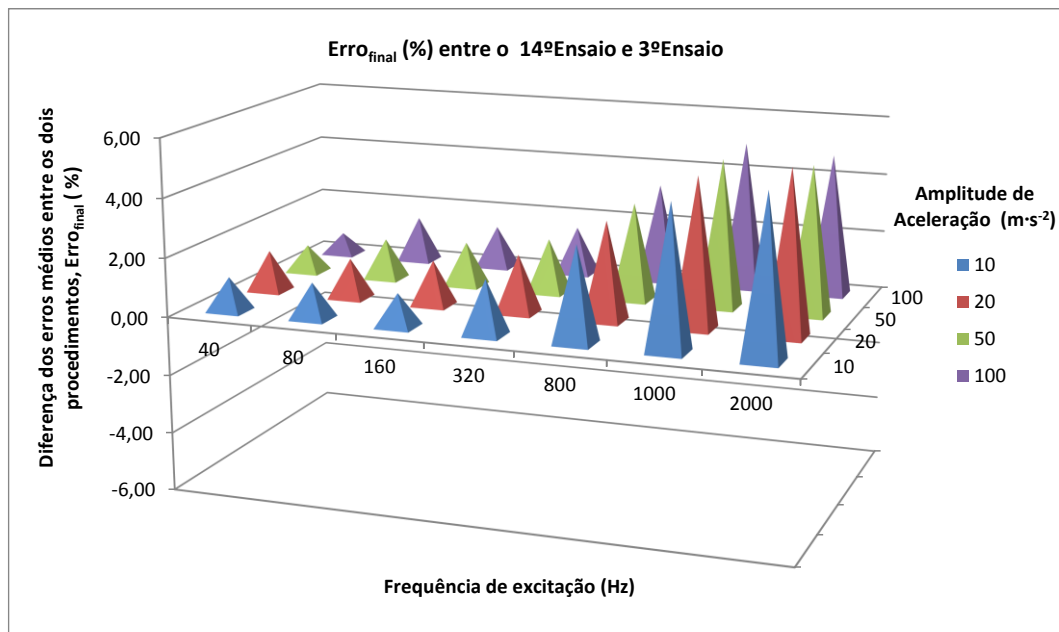


Figura 7.23 Resultados da diferença dos erros médios entre o 14º Ensaio e 3º Ensaio (posição 4)

Por último, analisando o gráfico da Figura 7.23 verifica-se um aumento significativo dos valores de erro a partir da frequência de 800 Hz. À frequência de 2000 Hz verifica-se o maior valor de $Erro_{final}$ (%), correspondente a 5,53 %. Tal como no caso anteriormente analisado verificam-se, no intervalo de frequências e acelerações estudado, as maiores diferenças de erro entre os dois procedimentos.

8. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Este capítulo pretende apresentar uma síntese das principais conclusões que foram deduzidas de acordo com os resultados apresentados no sétimo capítulo, principalmente no que diz respeito à validação da implementação da mesa desenvolvida no processo de calibração pelo método de comparação.

A metrologia desempenha um papel essencial no funcionamento e organização de qualquer setor industrial. A exigência e o rigor é cada vez maior nos processos de medição, com o objetivo principal de se evitar preventivamente os erros e assim contribuir para o desenvolvimento tecnológico.

No âmbito desta dissertação foi realizado um estágio curricular no Laboratório de Aceleração e Vibrações do Departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade.

A presente dissertação procurou contribuir para o desenvolvimento e aumento de capacidade de resposta das metodologias de calibração de acelerómetros usadas no LAV.

De acordo com os objetivos, foi desenvolvida uma nova solução, que passou pela construção e caracterização de uma mesa de vibração, de modo a possibilitar a calibração simultânea de até oito acelerómetros pelo método de comparação, visto que o laboratório utiliza um método normalizado que efetua a calibração de apenas um acelerómetro de cada vez. De forma a validar a utilização da mesa de vibração, realizou-se a comparação dos resultados obtidos entre a aplicação desta nova solução, designada como procedimento de comparação multicanal, com o procedimento normalizado conhecido como *back-to-back*.

Na generalidade, todas as medições apresentaram um comportamento semelhante, nomeadamente, na resposta em frequência até 1000 Hz. Acima deste valor verificou-se uma degradação notória nos resultados, observando-se um incremento das diferenças dos erros obtidos entre os dois procedimentos em comparação.

De realçar que após as medições efetuadas em cada procedimento, os dados provenientes dessas medições foram comparados entre si. Essa comparação teve como objetivo mostrar em que condições os dados adquiridos no procedimento de comparação multicanal seguiram a tendência dos resultados obtidos pelo procedimento de comparação com fixação *back-to-back*.

Das condições experimentais estabelecidas resumem-se cinco análises:

- 1) Varrimento em aceleração;
- 2) Varrimento em frequência;
- 3) Estudo das oito fixações em que se utilizaram três acelerómetros auxiliares funcionado como *dummy masses*;
- 4) Estudo em três fixações em que não houve contribuição de massas (sem *dummy masses*);

5) Estudo numa fixação em que se utilizou um acelerómetro auxiliar como *dummy mass*;

Relativamente ao varrimento em aceleração, verificou-se que nas comparações efetuadas não existiram grandes variações dos valores da diferença dos erros obtidos entre os dois procedimentos, concluindo-se assim, que a imposição de cada uma das amplitudes de aceleração em estudo ($a = [10, 20, 50 \text{ e } 100] \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), em qualquer uma das frequências ($f = [40, 80, 160, 320, 800, 1000 \text{ e } 2000] \text{ Hz}$), não contribuiu para a variação desses valores ($Erro_{\text{final}} (\%)$).

Em relação ao varrimento em frequência, verificaram-se flutuações nos valores da diferença dos erros entre os dois procedimentos, particularmente na imposição da frequência mais elevada (2000 Hz), onde se verificou a maior diferença de resultados. Pode-se concluir que a imposição de diferentes frequências de excitação influenciou os resultados da comparação entre os dois procedimentos, ao contrário das diferentes amplitudes de aceleração impostas.

Em relação ao estudo de cada uma das oito fixações da mesa de vibração nas condições em que se utilizaram três acelerómetros auxiliares funcionando como *dummy masses* (de modo a simular a aquisição dos sinais de 4 acelerómetros simultaneamente), pode-se concluir que houve semelhança de resultados entre os dois procedimentos, tanto no estudo das posições interiores (1, 5 e 7) como das posições exteriores (2, 6 e 8) da mesa de vibração. Observou-se esse comportamento semelhante de resultados, nomeadamente, na resposta em frequência entre 80 Hz e 800 Hz, como se pode verificar, por exemplo, pela comparação entre a Figura 7.11 (posição 7) e a Figura 7.16 (posição 8). Ainda assim, houve situações, tal como apresentado na Figura 7.10 (posição 5) e na Figura 7.14 (posição 2), em que a maior diferença de erros não é obtida na maior frequência de excitação (2000 Hz) como expectável, mas à frequência de 40 Hz e 1000 Hz respetivamente. Nesses dois casos observou-se que, em todo o intervalo de frequência e aceleração, houve um comportamento idêntico com resultados de $Erro_{\text{final}} (\%)$ próximos de 1 %. Sobressaem ainda os resultados obtidos por um dos dispositivos utilizado como auxiliar, correspondente à utilização de um acelerómetro em particular, cujos resultados apresentam um comportamento para o qual não foi possível determinar a origem de diferenças significativamente maiores à média dos resultados obtidos. A análise dos dois casos, nomeadamente, da Figura 7.22 (posição 3) e da Figura 7.23 (posição 4), mostra que os valores obtidos, a partir da resposta em frequência de 320 Hz até 2000 Hz, aumentam consideravelmente em comparação com os restantes casos apresentados. Suspeita-se que as degradações referidas poderão ter como origem um comportamento anormal mais significativo relativamente à variação de fase, ou eventualmente, pela degradação do próprio acelerómetro, por ser relativamente antigo, havendo uma forte possibilidade de ter sido sujeito a ambientes agressivos ao longo da sua utilização.

Relativamente ao estudo de comparação entre os dois procedimentos nas condições em que não houve contribuição de massas (*dummy masses*) no procedimento de comparação multicanal (Figura 7.17 (posição 1), Figura 7.18 (posição 2), Figura 7.19 (posição 3) e Figura 7.20 (posição 1)), os resultados

obtidos apresentam um comportamento também muito semelhante, com resultados de $Erro_{final}$ (%) na generalidade entre 0 % de 1 % na resposta em frequência até 800 Hz.

Em relação ao estudo em que se utilizou um acelerómetro auxiliar como *dummy mass* no procedimento de comparação multicanal (Figura 7.21 (posição 1)), verificou-se que as diferenças dos erros entre os dois procedimentos, nesta condição, apresentaram um comportamento semelhante na resposta em frequência entre 80 Hz e 1000 Hz com resultados de $Erro_{final}$ (%) entre 0 % de 1 %.

Em suma, pode-se concluir que cada uma das oito fixações designadas para os acelerómetros auxiliares, a comparar com o acelerómetro de referência, apresentaram na generalidade resultados semelhantes na resposta em frequência até 1000 Hz, sendo notório a degradação dos resultados a 2000 Hz. Conclui-se também que o incremento de massa na mesa de vibração não teve influencia para o aumento das diferenças dos erros entre os dois procedimentos e, portanto, de acordo com o estudo realizado, a fixação de um, dois ou quatro acelerómetros não comprometerá os resultados de calibrações futuras usando esta nova solução.

Devido à semelhança de resultados entre as diferentes comparações, houve a necessidade de apresentar um resumo da análise efetuada no sétimo capítulo que permitirá tirar conclusões finais acerca da validação da mesa de vibração.

Na figura abaixo (Figura 8.1) é apresentado a totalidade dos resultados obtidos, da comparação entre o procedimento de comparação multicanal com o procedimento de comparação com fixação *back-to-back*, em todo o intervalo de amplitude de aceleração e frequência estudado. De notar que não foram introduzidos nas representações gráficas seguintes os resultados obtidos dos dois casos em que foram manifestados um comportamento anormal.

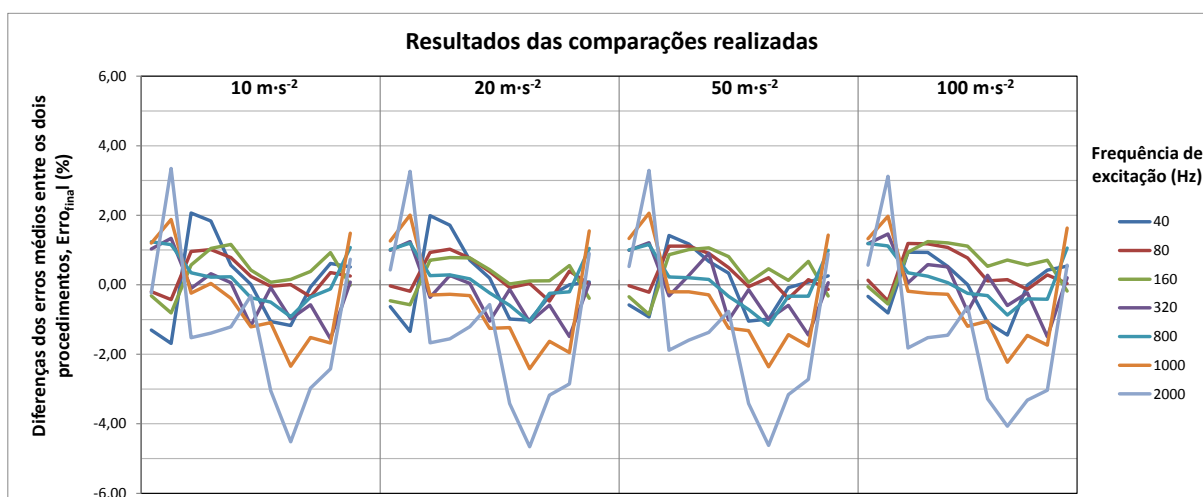


Figura 8.1 Resultados das comparações realizadas no intervalo de frequências compreendido entre 40 Hz e 2000 Hz

De acordo com o gráfico apresentado, é de realçar a grande semelhança de resultados nas diferentes amplitudes de aceleração e as visíveis variações de resultados no intervalo de frequência apresentado, tal como concluído anteriormente. De notar que, com esta análise final das frequências de excitação, sobressaem as frequências de 40 Hz, 1000 Hz e sobretudo a de 2000 Hz, onde se verificaram as maiores diferenças de erros entre os dois procedimentos.

A partir da Figura 8.1, a figura seguinte (Figura 8.2) mostra a totalidade dos resultados obtidos da comparação entre o procedimento de comparação multicanal com o procedimento de comparação com fixação *back-to-back*, nas frequências de excitação que apresentaram uma maior consistência e estabilidade de resultados, com as diferenças de erros entre os dois procedimentos tipicamente na ordem de 1 %.

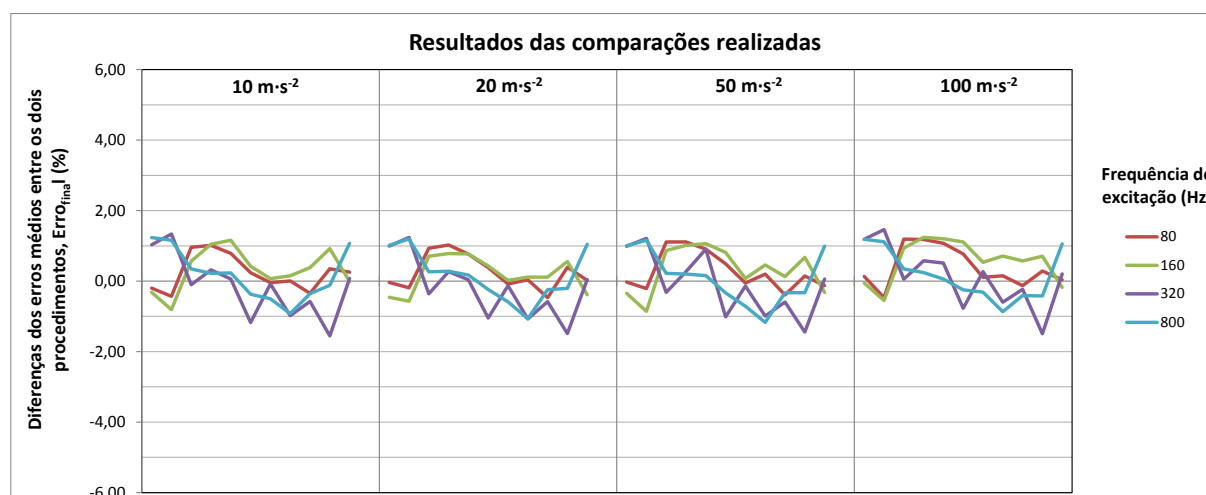


Figura 8.2 Resultados das comparações realizadas nas frequências de 80 Hz, 160 Hz e 320 Hz e 800 Hz

A partir dos resultados obtidos é possível desde já concluir que a utilização da mesa de vibração fica validada para frequências compreendidas entre 80 Hz a 800 Hz, com um custo associado ao aumento da produtividade permitido pela utilização da mesa desenvolvida, correspondente a uma contribuição típica de 1 % a considerar no cálculo final de incertezas no método de calibração de acelerómetros por comparação, usando esta nova solução.

Confrontado a Tabela 5.1, nomeadamente os dados referentes às especificações próprias dos acelerómetros utilizados e, as dos resultados obtidos de acordo com o modelo matemático estabelecido e associando os valores para a incerteza calculada, é possível concluir que a caracterização da mesa desenvolvida obteve resultados que se encontram dentro da mesma ordem de grandeza que a da resposta em amplitude e linearidade dos acelerómetros em estudo.

Sem descurar futuros trabalhos de análise, a utilização da mesa corresponde ao expectável e torna-se um elemento potenciador para a introdução de um procedimento alternativo para a calibração de acelerómetros utilizando o método *back-to-back*, quer em situações em que se exija maior capacidade

de resposta do laboratório, quer em situações onde a fixação dos dispositivos a calibrar fique comprometida pelas características construtivas dos acelerómetros, como é o caso de acelerómetros de forma paralelepípedica cuja fixação é suportada por uma superfície de dimensões não comportáveis pela fixação definida pela Norma ISO 16063-21.

Com a utilização de um sistema de aquisição de dados que possibilitaria a aquisição simultânea dos sinais de vários acelerómetros, a implementação da mesa de vibração para a calibração de acelerómetros pelo método de comparação poderá permitir o aumento de produtividade do processo de calibração em oito vezes, minimizando assim o tempo de calibração pelo método *back-to-back*, no LAV.

Um estudo desta natureza só ficará completo com uma análise exaustiva à resposta em fase entre o acelerómetro de referência e os acelerómetros a comparar. Essa análise poderá explicar as causas das variações encontradas nos resultados obtidos, com o objetivo da eliminação ou da redução das mesmas.

Para atingir a capacidade pretendida do sistema de medição, no futuro próximo, será necessário desenvolver um novo sistema de aquisição de dados que seja capaz de adquirir simultaneamente os sinais de vários acelerómetros.

Futuramente, seria pertinente incluir a utilização deste procedimento alternativo no procedimento técnico interno do LAV.

Bibliografia

- [1] Methods for the calibration of vibration and shock transducers — Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer, ISO 16063-21, 2003.
- [2] Instituto Português da Qualidade, *Metrologia - em Síntese*, 1ª Edição. Caparica, 2001.
- [3] BIPM, “The Metre Convention.” [Online]. Disponível: <http://www.bipm.org/en/worldwide-metrology/metre-convention/>. [Acedido em: 2014-10-08].
- [4] IPQ, “Principais atribuições do Departamento de Metrologia.” [Online]. Disponível: <http://www1.ipq.pt/pt/metrologia/apresentacao/atribuicoes/Paginas/Atribuicoes.aspx>. [Acedido em: 2014-10-08].
- [5] “Decreto-Lei n.º71/2012.” Diário da República, 1.ª série - Nº 58, 21 de março de 2012.
- [6] Instituto Português da Qualidade, “IPQ.” [Online]. Disponível: <http://www1.ipq.pt/PT/Pages/Homepage.aspx>. [Acedido em: 2014-10-14].
- [7] IPQ, “Laboratório Nacional de Metrologia.” [Online]. Disponível: <http://www1.ipq.pt/PT/Metrologia/Pages/UMCA.aspx>. [Acedido em: 2014-10-08]
- [8] IPQ, “Domínios de intervenção.” [Online]. Disponível: <http://www1.ipq.pt/pt/metrologia/apresentacao/dominios/Paginas/Dominios.aspx>. [Acedido em: 2014-10-08]
- [9] IPQ, “Laboratório de Aceleração e Vibrações.” [Online]. Disponível: <http://www1.ipq.pt/pt/metrologia/saceleracaovibracoes/Pages/AcelVib.aspx>. [Acedido em: 2014-10-08]
- [10] IPQ, “Laboratório de Vibrações.” [Online]. Available: <http://www1.ipq.pt/pt/metrologia/saceleracaovibracoes/svibracoes/Pages/LABVIB.aspx>. [Acedido em: 2014-10-14]
- [11] BIPM, “Calibration and Measurement Capabilities: Acoustics, Ultrasound, Vibration.” [Online]. Disponível: http://kcdb.bipm.org/appendixC/AUV/PT/AUV_PT.pdf. [Acedido em: 2014-10-26].
- [12] A. A. Correia, “Dinâmica - Vibrações de sistemas com 1 grau de liberdade,” Instituto Superior Técnico, 2007.
- [13] R. Baker, *Introduction to Vibration*, LDS Ling D. 1995.
- [14] Bruel & Kjaer, *Measuring Vibration*. 1982.
- [15] CBM Apps, “Conversion Between Displacement, Velocity and Acceleration.” [Online]. Disponível: <http://www.cbmapps.com/docs/28>. [Acedido em: 2014-12-14].
- [16] Bruel & Kjaer, *Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers Theory and Application*. 1986.
- [17] L. J. Figueiredo, A. R. Gafaniz, G. S. Lopes, e R. Pereira, “Aplicações de Acelerómetros,” Instituto Superior Técnico, pp. 1–12, 2007.

- [18] J. R. Rodrigues, A. N. Campos, C. F. R. Mateus, and R. Sutério, “Identificação das principais componentes de incertezas de calibração de acelerômetro piezoelétrico pelo método da comparação : Uma revisão atual,” pp. 1–6, 2010.
- [19] Preeti Jain, “Accelerometers,” 2012. [Online]. Disponível: <http://www.engineersgarage.com/articles/accelerometer?page=1>. [Acedido em: 2014-12-15].
- [20] National Instruments, “Types of Accelerometers,” 25 Set. 2013. [Online]. Disponível: www.ni.com/white-paper/14889/en/pdf. [Acedido em: 2014-10-10].
- [21] Endevco, “Model 2224C Piezoelectric accelerometer”. [Online]. Disponível: <https://www.endevco.com/2224c/>. [Acedido em: 2015-01-03]
- [22] National Instruments, “Understanding Acceleration and Choosing an Accelerometer,” 31 Jan. 2013.
- [23] J. Shieh, J. E. Huber, N. A. Fleck, and M. F. Ashby, “The selection of sensors,” Progress in Material Science, 2001.
- [24] Endevco, *Instruction Manual for Endevco Piezoelectric Accelerometers*. U.S.A., 1979.
- [25] Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 1: Basic concepts, ISO 16063-1, 1998.
- [26] I. Dytran Instruments, “Accelerometer Mounting Considerations.” [Online]. Disponível: www.dytran.com. [Acedido em: 2014-09-10]
- [27] Endevco, “Minimizing measurement uncertainty in calibration and use of accelerometers”. [Online]. Disponível: <https://www.endevco.com>. [Acedido em: 2014-10-08]
- [28] PCB Piezotronics, “Introduction to Piezoelectric Accelerometers.” [Online]. Disponível: http://www.pcb.com/techsupport/tech_accel.aspx. [Acedido em: 2014-10-09]
- [29] PCB Piezotronics, “Accelerometer Mounting Accessories.” [Online]. Disponível: <https://www.pcb.com/TestMeasurement/Accelerometers/Access/Bases.aspx>. [Acedido em: 2014-10-09]
- [30] IPQ, *Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)*, 1ª Edição Luso-Brasileira. Caparica, 2012.
- [31] F. Juliani, E. De Barros, and M. Hugo, “A tool for controlling accelerometers . Secondary calibration data,” *Comptes Rendus Mec.*, vol. 341, pp. 687–696, 2013.
- [32] K. Buckley and L. Chiang, “Design and Analysis of Vibration Test Fixtures For Payloads,” Worcester Polytechnic Institute, 2010.
- [33] Bruel & Kjaer, *Fixtures for B&K Exciters*. 1987.
- [34] G. P. Sowjanya, P. D. Rao, and D. C. U. Kiran, “Finite Element Analysis of Vibration Fixture Made of Aluminum and Magnesium Alloys,” *Int. J. Latest Trends Eng. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 84–89, 2013.
- [35] Bruel & Kjaer, *Instruction Manual Vibration Exciter System V*. 1974.

- [36] Extrusal, “Anodização.” [Online]. Disponível: <http://www.extrusal.pt/index.php?id=126>. [Acedido em: 2014-10-08]
- [37] Alcoa, “Ligas e Têmperas de Extrusão.” 2010. [Online]. Disponível: www.alcoa.com.br. [Acedido em: 2014-10-08]
- [38] Extrusal, “Alumínio.” [Online]. Disponível: <http://www.extrusal.pt/index.php?id=57>. [Acedido em: 2014-10-08]
- [39] J. M. R. S. Tavares and J. O. Fonseca, “Introdução ao SolidWorks,” FEUP/DEMEc, 2012.
- [40] IPAC, “Avaliação da Incerteza de Medição em Calibração”, OGC010, 2015.

Alguns equipamentos, instrumentos ou materiais são identificados neste documento por forma a especificar os procedimentos experimentais adotados. Tal identificação não implica que sejam os mais adequados ao propósito descrito, nem constitui qualquer recomendação ou aprovação por parte do autor ou do laboratório onde o trabalho foi desenvolvido.

Anexos

Anexos I – Resultados das Medições dos Ensaios Efetuados

Tabela I.1 Resultados obtidos no 1º Ensaio

Procedimento de fixação <i>back-to-back</i> , $Erro_{back-to-back}$ (%)							
1ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	4,73	3,40	2,47	1,21	0,14	0,21	-0,68
20	3,64	2,45	1,69	0,60	-0,49	-0,57	-1,19
50	3,51	2,19	1,65	0,56	-0,54	-0,70	-1,27
100	3,74	2,35	1,70	0,72	-0,38	-0,54	-1,14

Tabela I.2 Resultados obtidos no 2º Ensaio

Procedimento de fixação <i>back-to-back</i> , $Erro_{back-to-back}$ (%)							
2ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	2,91	2,70	1,98	0,76	-0,36	-0,56	-1,69
20	2,07	1,78	1,25	-0,06	-1,23	-1,39	-2,34
50	2,61	1,87	1,27	0,18	-0,98	-1,21	-2,04
100	3,06	1,97	1,33	0,28	-0,87	-1,18	-2,03

Tabela I.3 Resultados obtidos no 3º Ensaio

Procedimento de fixação <i>back-to-back</i> , $Erro_{back-to-back}$ (%)							
3ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	2,16	1,36	0,83	-1,25	-2,07	-2,09	-3,23
20	1,30	0,56	-0,27	-1,86	-2,87	-3,04	-3,98
50	1,47	0,44	-0,39	-1,91	-2,98	-3,18	-4,01
100	1,79	0,74	-0,15	-1,57	-2,79	-3,05	-3,92

Tabela I.4 Resultados obtidos no 4º Ensaio

Procedimento de fixação <i>back-to-back</i> , $Erro_{back-to-back}$ (%)							
4ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	0,30	0,27	-0,66	-1,13	-2,22	-2,27	-0,69
20	0,11	-0,49	-1,13	-1,86	-2,94	-2,89	-1,32
50	-0,30	-0,66	-1,29	-2,00	-2,97	-2,95	-1,52
100	-0,36	-0,72	-1,17	-1,96	-2,89	-2,98	-1,14

Tabela I.5 Resultados obtidos no 5º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{mesa}$ (%)							
5ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	0,23	-0,08	-0,27	-1,71	-2,58	-3,79	-3,66
20	-0,22	-0,96	-1,02	-2,45	-3,18	-4,52	-4,50
50	-0,38	-1,05	-1,16	-2,59	-3,30	-4,38	-4,67
100	-0,37	-0,84	-0,61	-2,19	-3,29	-4,44	-4,46

Tabela I.6 Resultados obtidos no 6º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{mesa}$ (%)							
6ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	0,91	0,62	0,27	-2,69	-2,34	-3,95	-3,11
20	0,11	-0,10	-0,58	-3,35	-3,14	-4,84	-4,18
50	-0,22	-0,51	-0,62	-3,44	-3,30	-4,71	-4,24
100	0,06	-0,43	-0,47	-3,45	-3,30	-4,72	-4,17

Tabela I.7 Resultados obtidos no 7º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{mesa}$ (%)							
7ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	0,81	0,52	-0,67	-1,06	-1,15	-0,79	0,05
20	0,19	-0,47	-1,52	-1,82	-1,89	-1,34	-0,43
50	-0,04	-0,79	-1,61	-1,94	-1,98	-1,52	-0,62
100	0,17	-0,67	-1,35	-1,75	-1,83	-1,35	-0,57

Tabela I.8 Resultados obtidos no 8º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{mesa}$ (%)							
8ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($m \cdot s^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	4,98	3,66	2,55	0,65	-0,02	-0,80	-3,21
20	4,05	2,71	1,96	-0,42	-0,96	-1,68	-4,01
50	4,03	2,98	2,14	-0,14	-0,76	-1,41	-3,93
100	4,00	3,16	2,27	0,34	-0,53	-1,36	-3,85

Tabela I.9 Resultados obtidos no 9º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{\text{mesa}}$ (%)							
9ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	4,75	3,71	3,03	1,08	-0,14	-0,52	-3,08
20	3,78	2,80	2,03	0,21	-0,94	-1,66	-3,90
50	3,78	2,98	2,29	0,45	-0,78	-1,41	-3,64
100	3,99	3,15	2,57	0,86	-0,63	-1,42	-3,55

Tabela I.10 Resultados obtidos no 10º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{\text{mesa}}$ (%)							
10ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	3,48	3,48	3,14	0,82	-0,13	-0,95	-2,90
20	2,77	2,54	2,02	-0,02	-1,05	-1,70	-3,55
50	3,28	2,77	2,33	1,09	-0,83	-1,50	-3,41
100	3,59	3,04	2,53	0,79	-0,81	-1,45	-3,48

Tabela I.11 Resultados obtidos no 11º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{\text{mesa}}$ (%)							
11ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	3,43	3,20	2,15	2,24	1,38	1,41	-0,92
20	3,01	2,42	1,23	1,59	0,52	0,70	-0,76
50	2,93	2,16	1,31	1,55	0,47	0,63	-0,75
100	3,41	2,48	1,65	1,91	0,80	0,79	-0,57

Tabela I.12 Resultados obtidos no 12º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{\text{mesa}}$ (%)							
12ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	3,05	2,97	1,66	2,55	1,30	2,09	2,66
20	2,30	2,27	1,11	1,84	0,70	1,44	2,08
50	2,59	1,98	0,80	1,77	0,62	1,35	2,02
100	2,94	1,88	1,15	2,19	0,73	1,43	1,99

Tabela I.13 Resultados obtidos no 13º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{\text{mesa}}$ (%)							
13ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	2,92	2,94	2,40	-0,41	-0,73	-1,77	-2,01
20	2,26	2,16	1,68	-1,10	-1,46	-2,64	-2,91
50	2,94	2,36	2,08	-0,83	-1,32	-2,46	-2,81
100	3,07	2,75	2,44	-0,49	-1,12	-2,37	-2,66

Tabela I.14 Resultados obtidos no 14º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{\text{mesa}}$ (%)							
14ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	3,30	2,58	1,95	0,60	1,15	2,72	2,14
20	2,68	1,91	1,26	0,11	0,48	2,01	1,54
50	2,40	1,82	1,11	-0,06	0,34	1,86	1,03
100	2,53	2,27	1,28	0,06	0,58	1,99	0,90

Tabela I.15 Resultados obtidos no 15º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{\text{mesa}}$ (%)							
15ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	3,21	2,31	2,03	0,97	0,21	1,03	-0,64
20	2,44	1,56	0,99	0,18	-0,35	0,33	-1,26
50	2,62	1,50	0,71	0,09	-0,27	0,25	-1,34
100	2,57	1,87	1,12	0,44	0,19	0,47	-1,35

Tabela I.16 Resultados obtidos no 16º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{\text{mesa}}$ (%)							
16ºEnsaio	Frequência (Hz)						
acel. ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	1,85	2,65	2,05	0,68	-0,86	-1,64	-4,73
20	1,08	1,69	1,27	-0,18	-1,82	-2,62	-5,76
50	1,56	1,81	1,35	0,04	-1,69	-2,53	-5,46
100	1,98	2,08	1,86	0,55	-1,19	-2,22	-5,31

Tabela I.17 Resultados obtidos no 17º Ensaio

Procedimento multicanal com mesa de vibração, $Erro_{\text{mesa}}$ (%)							
17º Ensaio	Frequência (Hz)						
acel. ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	40	80	160	320	800	1000	2000
10	1,74	2,71	2,13	-0,22	-1,28	-2,90	-6,21
20	1,05	1,81	1,36	-1,13	-2,29	-3,80	-7,00
50	1,62	2,07	1,73	-0,81	-2,15	-3,57	-6,66
100	1,61	2,12	2,04	-0,32	-1,74	-3,40	-6,10