

METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO EM ESTRUTURAS DO PONTO DE VISTA DO CONFORTO HUMANO

DIOGO DOS REMÉDIOS MARGARIDO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Carlos Manuel Ramos Moutinho

Co-orientador: Professor Doutor Álvaro Alberto de Matos Ferreira da
Cunha

JUNHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Quero dedicar todo um trabalho de 5 anos, que culmina nesta dissertação, especialmente aos meus pais, que sempre me apoiaram dentro do possível e das suas capacidades, e à minha namorada, pelas imensas vezes que me incentivou a trabalhar arduamente e a nunca me descurar. À minha avó, por tudo o que já passou. Ao meu padrinho, que me mostrou o mundo da Engenharia Civil. À minha madrinha. À minha restante família. Aos meus amigos, pelos únicos e grandes momentos que passamos e pela entreaajuda nos estudos.

Não sigas por onde um caminho te pode conduzir. Em vez disso, vai por onde ainda não exista caminho e deixa a tua marca.

Ralph Waldo Emerson

AGRADECIMENTOS

Antes de mais, tal como dedico este trabalho aos meus pais, namorada, família e amigos, gostaria também de lhes agradecer, porque sem eles tudo teria sido mais complicado. Em especial, queria mesmo aqui deixar o meu profundo agradecimento aos meus pais e à minha namorada, pois sem a insistência deles, talvez não conseguisse obter os mesmos resultados.

Queria também agradecer vivamente a outra pessoa muito importante pela sua contribuição e pelo empenho demonstrado no desenvolvimento da presente dissertação, o meu professor/orientador de tese Carlos Moutinho. Não houve dúvida que o professor Moutinho deixasse por esclarecer. Aliás, devo dizer que a sua Dissertação de Doutoramento foi uma grande ajuda numa fase inicial de planeamento.

Não poderia terminar sem também agradecer ao meu co-orientador pela sua disponibilidade em facultar os elementos necessários à realização deste trabalho, o professor Álvaro Cunha.

RESUMO

A vibração em estruturas pode ser perceptível pelos seus ocupantes/utilizadores e, de algum modo, afectá-los em diferentes aspectos, resultando em diferentes consequências, como a redução dos níveis de qualidade de vida, de conforto e/ou da eficiência laboral. Perante tais situações, houve a necessidade de desenvolver métodos de avaliação da severidade das vibrações de forma a estabelecer valores de referência, a partir dos quais, na maioria dos casos, se está perante uma situação limite. Estes valores foram conseguidos graças a uma compilação de estudos empíricos levados a cabo por diversos autores, que permitiram o desenvolvimento de conclusões válidas e devidamente sustentadas.

A presente dissertação inicia-se com um capítulo introdutório, onde é esclarecido em que consiste a vibração e os vários parâmetros a ter em conta que a caracterizam. No seu seguimento são enunciadas e descritas as várias etapas do processo de análise de vibração a partir do momento em que se procede à mensuração da magnitude do movimento pelos equipamentos de medição próprios - geralmente em registos temporais de acelerações instantâneas igualmente espaçadas no tempo. Colhido o sinal digitalmente, é posteriormente realizada uma ponderação em frequência do mesmo, onde se pretende ter em conta a dependência da sensibilidade humana quanto à direção e ao conteúdo em frequência da vibração. Esta ponderação faz-se ou com o recurso a tabelas de gamas de frequências standardizadas - por exemplo, em bandas de terço de oitava, como se expõe na NP ISO 2631-1 e na BS 6841-, ou com a aplicação de filtros digitais, na forma de funções de transferência, no registo temporal das acelerações instantâneas. As orientações para a formulação das funções de transferência e respectivos parâmetros encontram-se nas duas primeiras normas referidas neste resumo. Dentro do âmbito desta dissertação foram desenvolvidos algoritmos em linguagem *MatLab*, com base nestas orientações, para proceder à aplicação destes filtros em registos de acelerações de medidas em circunstâncias reais.

Neste contexto, o objetivo primordial desta tese centra-se na descrição dos métodos de análise de vibrações presentes nas normas da especialidade. Os quatro principais regulamentos nos quais a presente dissertação se baseia podem ser divididos em dois grupos: a NP ISO 2631-1 (2007) e correspondente norma britânica BS 6841 (1987) debruçam-se na avaliação de exposições de corpo inteiro a vibrações sem especificação ambiental, sendo que a ISO 2631-2 (1989) e a BS 6472 (1992) abrangem as avaliações de exposições de corpo inteiro a vibrações particularmente em edifícios. Todas elas pretendem analisar, segundo as três direções ortogonais, os efeitos da vibração no homem. Nas duas primeiras os métodos de análise baseiam-se no tipo de afetação que a vibração produz - na saúde, no conforto, na capacidade de desenvolvimento de tarefas e na percepção - sem a apresentação de qualquer valor limite de vibração, oferecendo apenas orientações de aplicação dos métodos de avaliação. As outras duas normas apoiam-se na correlação entre magnitude de vibração e quantidade de queixas apresentadas pelos utilizadores/ocupantes dos edifícios para fundamentar valores limiares de vibração admissível para vários tipos de edifícios. A BS 6472, além de ter em conta o tipo de edifício, tal como a ISO 2631-2, também considera em que período do dia ocorrem as vibrações e se estas são contínuas ou impulsivas - com várias ocorrências diárias - para o estabelecimento de valores limite. Estes parâmetros são tidos em consideração através da aplicação de vários fatores multiplicativos às curvas de base apresentadas na norma.

Por fim, serão apresentados alguns exemplos de aplicação das normas de avaliação do conforto humano, em dois casos reais de estudo.

PALAVRAS-CHAVE: vibração, edifícios, conforto humano, resposta humana, métodos de análise.

ABSTRACT

The vibration in structures can be perceived by the occupants/users and somehow affect them in different ways bearing different consequences such as reduced levels of quality of life, comfort and/or work efficiency. Faced with such situations, it was necessary to develop methods for assessing the severity of vibration in order to establish reference values from which, in most cases, we are facing a situation of discomfort. These values were achieved thanks to a compilation of empirical studies carried out by several authors, which allowed the development of valid and properly supported conclusions.

This thesis begins with an introductory chapter, where it is clarified what is the vibration and the various parameters that characterize it. In its follow-up are listed and described the various stages of vibration analysis from the moment of magnitude measurement with the proper measurement equipment - generally in temporal records of instantaneous accelerations equally spaced in time. After digitally collecting the signal it is performed a frequency weighting, which is intended to take into account the dependence of human sensibilities on the direction and frequency content of the vibration. This weighting is done either with the use of tables of standardized frequency ranges - for example in the third octave band, as shown in NP ISO 2631-1 and BS 6841 - or with the application of digital filters, in the form of transfer functions, in the time registry of instantaneous accelerations. The guidelines for the formulation of transfer functions and their parameters are in the first two norms mentioned in this summary. Within the scope of this dissertation were developed *MatLab* algorithms based on these guidelines, for implementing these filters in records of accelerations in real circumstances.

In this context, the main objective of this thesis focuses on the description of methods of vibration analysis in standards of specialty. The four main regulations on which this thesis is based can be divided into two groups: NP ISO 2631-1 (2007) and the correspondent British standard BS 6841 (1987) will get it in the evaluation of whole-body exposure to vibration without environmental specification, and ISO 2631-2 (1989) and BS 6472 (1992) cover the reviews of whole-body exposures to vibration particularly in buildings. All of them intended to analyze, accordingly to the three orthogonal directions, the vibration effects on man. The first two methods of analysis are based on the type of affectation that the vibration produces - on health, comfort, capacity of developing tasks and perception - without presenting any vibration limit, providing only guidelines to apply assessment methods. The other two rely on the correlation between vibration magnitude and number of complaints from users/occupiers of buildings to support vibration permissible thresholds for various types of buildings. BS 6472, besides having into consideration the type of building, such as ISO 2631-2, also considers the time of day in which vibration occurs and if it is continuous or impulsive - with several daily occurrences - to set limit values. These parameters are taken into account by applying various multiplicative factors to the base curves presented in the norm.

Finally, some examples of the application of evaluation standards of human comfort in two real cases of study will be presented.

KEY-WORDS: vibration, buildings, human comfort, human response, analysis methods.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES	1
1.2. INTRODUÇÃO À VIBRAÇÃO EM ESTRUTURAS NO ÂMBITO DO CONFORTO HUMANO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2. CARACTERIZAÇÃO DA VIBRAÇÃO	5
2.1. TIPOS DE VIBRAÇÃO	5
2.2. MAGNITUDE DA VIBRAÇÃO	7
2.2.1. PARÂMETROS GERAIS DE MENSURAÇÃO: DESLOCAMENTO, VELOCIDADE E ACELERAÇÃO	7
2.2.2. BREVE INTRODUÇÃO À QUANTIFICAÇÃO NORMATIVA DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO	8
2.3. FREQUÊNCIA DA VIBRAÇÃO	9
2.3.1. SÉRIES E TRANSFORMADA DE FOURIER	11
2.3.2. EXEMPLO DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO <i>FFT</i> EM LINGUAGEM <i>MATLAB</i>	12
3. RESPOSTA HUMANA À VIBRAÇÃO	15
3.1. DIREÇÃO DA VIBRAÇÃO	16
3.1.1. SISTEMAS DE COORDENADAS DE VIBRAÇÃO	16
3.2. CONTEÚDO EM FREQUÊNCIA DA VIBRAÇÃO	19
3.2.1. FREQUÊNCIAS NATURAIS DO CORPO HUMANO	19
3.2.2. PONDERAÇÃO EM FREQUÊNCIA	20
3.2.2.1. Bandas de frequências normalizadas	20
3.2.2.2. Curvas de ponderação em frequência	21
3.2.2.3. Filtros digitais: limitação de banda de frequências	23
3.2.2.4. Definição matemática das ponderações em frequência	23
3.2.2.5. Métodos de aplicação da ponderação em frequência	25
3.3. DURAÇÃO DA VIBRAÇÃO	30
3.4. MAGNITUDE DA VIBRAÇÃO	31

3.5. A SUBJETIVIDADE DA RESPOSTA HUMANA	30
3.5.1. VARIABILIDADE INTER-SUBJETIVA	32
3.5.1. VARIABILIDADE INTRA-SUBJETIVA	32
4. MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES	33
4.1. APARELHOS DE MEDIÇÃO	33
4.2. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	35
4.2.1. REGISTOS DE MEDIÇÃO	35
4.2.1.1. Duração da medição	36
4.2.1.2. Frequência de aquisição	36
4.2.2. PONTOS DE MEDIÇÃO.....	37
5. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO	39
5.1. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO GENÉRICAS	39
5.1.1. ANÁLISE DA ISO 2631-1 (1997)	39
5.1.2. ANÁLISE DA BS 6841 (1987).....	45
5.2. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÃO EM ESTRUTURAS	48
5.2.1. NOTA INTRODUTÓRIA	48
5.2.2. NÍVEIS DE VIBRAÇÃO ADMISSÍVEIS EM EDIFÍCIOS	48
6. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO	59
6.1. APRESENTAÇÃO DAS SITUAÇÕES EM ANÁLISE	59
6.2. PRIMEIRO CASO: A.N.V. NUMA MORADIA	59
6.2.1. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	59
6.2.2. PARAMETRIZAÇÃO DA MEDIÇÃO	60
6.2.3. CARACTERIZAÇÃO DA VIBRAÇÃO.....	60
6.2.4. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO	62
6.2.5. RESULTADOS OBTIDOS / CONCLUSÕES	65
6.3. SEGUNDO CASO: A.N.V. NUMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL	66
6.3.1. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	66

6.3.2. PARAMETRIZAÇÃO DA MEDIÇÃO.....	67
6.3.3. CARACTERIZAÇÃO DA VIBRAÇÃO	67
6.3.4. RESULTADOS OBTIDOS / CONCLUSÕES.....	69

7. CONCLUSÃO

71

BIBLIOGRAFIA.....	73
--------------------------	-----------

A. ANEXOS

A.1

A.1. APLICAÇÃO ALGORÍTMICA DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER	A.2
---	------------

A.2. PONDERAÇÕES EM FREQUÊNCIA (NP ISO 2631-1).....	A.3
--	------------

A.3. FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE FILTROS DIGITAIS	A.5
---	------------

A.3.1. ALGORITMO: CURVA DE PONDERAÇÃO W_K (NP ISO 2631-1).....	A.5
--	-----

A.3.2. ALGORITMO: CURVA DE PONDERAÇÃO W_D (NP ISO 2631-1)	A.6
---	-----

A.3.3. FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DOS FILTROS DIGITAIS – BS 6841	A.7
--	-----

A.3.4. ALGORITMO: CURVA DE PONDERAÇÃO W_B (BS 6841)	A.8
---	-----

A.4. FATORES MULTIPLICATIVOS A APLICAR NAS CURVAS DE PONDERAÇÃO W_f.....	A.9
--	------------

A.4.1. BS 6841	A.9
----------------------	-----

A.4.1.1. Guia para avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos na saúde.....	A.9
---	-----

A.4.1.2. Guia para avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos no desenvolvimento de atividades	A.10
--	------

A.4.1.1. Guia para avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos no conforto	A.10
---	------

A.4.1.1. Guia para avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos na percepção.....	A.11
---	------

A.4.2. NP ISO 2631-1	A.12
----------------------------	------

A.4.2.1. Guia para avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos na saúde.....	A.12
---	------

A.4.2.1. Guia para avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos no conforto	A.12
---	------

A.4.2.1. Guia para avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos na percepção.....	A.13
---	------

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Categorização do tipo de movimento oscilatório	5
Fig. 2.2 – Exemplos de ondas de diferentes tipos de movimento oscilatório [6]	6
Fig. 2.3 – Relação entre deslocamento, velocidade e aceleração para uma vibração sinusoidal [6]	7
Fig. 2.4 – Representação gráfica da onda sinusoidal $u(t)=\text{sen}(2\times\pi\times 10\times t)$, onde facilmente se observa que o corpo efectua 10 oscilações num intervalo de tempo de um segundo (frequência de 10 Hz)	10
Fig. 2.5 – Espectro de frequências de $u(t)=\text{sen}(2\times\pi\times 10\times t)$ obtido através da aplicação computacional da Transformada discreta de Fourier	10
Fig. 2.6 – Representação gráfica da função $u(t)=\text{sen}(2\times\pi\times 20\times t)+\text{sen}(2\times\pi\times 80\times t)$ com adição de ruído, representando possíveis perturbações no progresso da hipotética medição.....	12
Fig. 2.7 – Espectro de frequências de $u(t)=\text{sen}(2\times\pi\times 20\times t)+\text{sen}(2\times\pi\times 80\times t)$, mais ruído, obtido através da aplicação do algoritmo da Transformada rápida de Fourier (em inglês <i>fast Fourier transform</i> , ou <i>FFT</i>)	13
Fig. 3.1 – Direções de vibração.....	16
Fig. 3.2 – Sistema de coordenadas anatómico (apenas eixos translacionais).....	17
Fig. 3.3 – Sistema de eixos basicêntrico, conforme apresentado na NP-ISO 2631-1 [4].....	18
Fig. 3.4 – Modelo biomecânico teórico das frequências naturais de partes distintas do corpo humano [1].....	19
Fig. 3.5 – Curvas de ponderação em frequência principais (NP ISO 2631-1).....	21
Fig. 3.6 – Curvas de ponderação em frequência adicionais (NP ISO 2631-1).....	21
Fig. 3.7 – Espectro de acelerações de largura de banda em terço de oitava	26
Fig. 3.8 – Espectro de acelerações de largura de banda em terço de oitava após aplicação da ponderação em frequência W_k	26
Fig. 3.9 – Exemplo de transformação de acelerações instantâneas em acelerações eficazes no intervalo de 1/3 de oitava para as frequências centrais de 4 Hz e 5 Hz.....	27
Fig. 3.10 – Representação da curva de ponderação W_k através da sua função ponderada total	28
Fig. 3.11 – Representação da curva de ponderação W_k através da sua função ponderada total, numa escala duplamente logarítmica – $[\text{dB}] = 20 * \log (H(p))$ – (representação idêntica à da Fig. 3.5 [4])	28
Fig. 3.12 – Registo temporal das acelerações instantâneas	29
Fig. 3.13 – Registo temporal das acelerações instantâneas ponderadas	29
Fig. 3.14 – Sobreposição dos registos das acelerações não ponderada (azul) e ponderada (vermelho)	30
Fig. 4.1 – Acelerómetro triaxial (Brüel & Kjær) [13].....	33
Fig. 4.3 – Registador de movimentos utilizado pelo Núcleo de Vibrações e Monitorização – ViBest -, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (GeoSIG) [14].....	34

Fig. 4.4 – Planta hipotética de uma estrutura.....	35
Fig. 4.5 – Exemplo gráfico de um registo de medição com f_s de 200 Hz	36
Fig. 5.1 – Orientação de exposições à vibração no que se refere à saúde [4]	44
Fig. 5.2 – Comparação entre as correspondentes curvas de ponderação W_k (ISO 2631-1) e W_b (BS 6841).....	46
Fig. 5.3 – Comparação entre as correspondentes curvas de ponderação W_k (ISO 2631-1) e W_b (BS 6841).....	46
Fig. 5.4 – Curva base para a aceleração eficaz segundo a direção z (ISO 2631-2 e BS 6472)	50
Fig. 5.5 – Curva base para a aceleração eficaz segundo as direções x e y (ISO 2631-2 e BS 6472)	50
Fig. 5.6 – Curva base para a velocidade de pico segundo a direção z (ISO 2631-2 e BS 6472).....	51
Fig. 5.7 – Curva base para a velocidade de pico segundo as direções x e y (ISO 2631-2 e BS 6472)	51
Fig. 5.8 – Curva base para a aceleração eficaz segundo uma combinação de direções – x, y e z (ISO 2631-2).....	52
Fig. 5.9 – Curva base para a velocidade eficaz segundo uma combinação de direções x, y e z (ISO 2631-2).....	52
Fig. 5.10 – Curvas para a aceleração eficaz segundo a direção z (ISO 2631-2 e BS 6472)	54
Fig. 5.11 – Curvas para a aceleração eficaz segundo as direções x e y (ISO 2631-2 e BS 6472).....	55
Fig. 5.12 – Curvas para a velocidade de pico segundo a direção z (ISO 2631-2 e BS 6472).....	56
Fig. 5.13 – Curvas para a velocidade de pico segundo as direções x e y (ISO 2631-2 e BS 6472)	57
Fig. 6.1 – Esquema dos pontos de medição nos três pisos da moradia em análise (cave – vermelho tinto; r/ chão – laranja; 1º piso – amarelo) e orientação dos transdutores de vibração	59
Fig. 6.2 – Amostra do registo do sinal medido na direção z – ponto de medição 1 (rés-do-chão).....	60
Fig. 6.3 – Espectro de Fourier do sinal colhido na direção z – ponto de medição 1 (rés-do-chão).....	61
Fig. 6.4 – Amostra do registo do sinal medido na direção z – ponto de medição 5 (1º piso).	61
Fig. 6.5 – Espectro de Fourier do sinal colhido na direção z – ponto de medição 5 (1º piso)	61
Fig. 6.6 – Amostra do registo do sinal medido na direção z – ponto de medição 9 (cave)	62
Fig. 6.7 – Amostra do registo do sinal medido na direção z – ponto de medição 9 (cave)	62
Fig. 6.8 – Registo temporal das acelerações ponderadas na direção x	63
Fig. 6.9 – Registo temporal das acelerações ponderadas na direção y	63
Fig. 6.10 – Registo temporal das acelerações ponderadas na direção z	63
Fig. 6.11 – Evolução dos valores máximos da aceleração eficaz nas direções vertical e horizontal consoante a altura do piso da habitação.....	66
Fig. 6.12 – Esquematisação dos pontos de medição na laje	67

Fig. 6.13 – Espectro de Fourier tipo dos registos de medições analisados67

Fig. 6.14 – Série temporal de acelerações registada no ponto de medição 4.....68

Fig. 6.15 – Série temporal de acelerações registada no ponto de medição 7.....68

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Conversões entre deslocamento de pico (X), velocidade de pico (V) e aceleração de pico (A) para ondas de frequência sinusoidal (f , em Hz) [6]	8
Quadro 2.2 – Relação entre pico (<i>peak</i>), pico-a-pico (<i>peak-to-peak</i>) e <i>root-mean-square</i> ; apenas aplicável a ondas sinusoidais [6]	9
Quadro 3.1 – Caracterização das bandas de terço de oitava internacionalmente normalizadas [11] ..	20
Quadro 3.2 – Guia para a aplicação das curvas de ponderação em frequência principais (NP ISO 2631-1)	22
Quadro 3.3 – Guia para a aplicação das curvas de ponderação em frequência adicionais (NP ISO 2631-1)	22
Quadro 3.4 – Parâmetros das funções de transferência das ponderações principais em frequência ..	23
Quadro 3.5 – Parâmetros das funções de transferência das ponderações adicionais em frequência ..	24
Quadro 3.6 – Exemplo de transformação de acelerações instantâneas em acelerações eficazes no intervalo de 1/3 de oitava para as frequências centrais de 4 Hz e 5 Hz.....	27
Quadro 5.1 – Reações prováveis mediante os valores de aceleração eficaz [4]	45
Quadro 5.2 – Fatores multiplicativos a aplicar nas curvas base apresentadas (BS 6472)	53
Quadro 5.3 – Valores de Dose de Vibração (m/s ^{1.75}) associados a diferentes níveis de queixas em edifícios	58
Quadro 5.4 – Valores de aceleração eficaz (m/s ²) estimados a partir de fórmula do eVDV para o limiar definido por “pouca probabilidade de queixas”	58
Quadro 6.1 – Resultados do nível de vibração obtidos	65
Quadro 6.2 – Resultados do nível de vibração obtidos	69

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – aceleração de pico [m/s^2]

A(p) – denominador da função de transferência H(p)

B(p) – numerador da função de transferência H(p)

D – deslocamento de pico [m]

F – fator multiplicativo na equação (5.21)

H(p) – função de transferência

L – comprimento do sinal [n° de pontos]

MTTV – valor máximo da vibração transiente [m/s^2]

N – número de ocorrências

Q_i – fator de qualidade da ressonância

T – período [s]

V – velocidade de pico [m/s]

VDV - valor de dose de vibração [$m/s^{1,75}$]

W_i – curva de ponderação i

a – aceleração [m/s^2]

a_{ef} – aceleração eficaz ou aceleração ponderada eficaz [m/s^2]

a_i – aceleração eficaz ponderada para a banda de terço de oitava i [m/s^2]

a_w – aceleração ponderada [m/s^2]

f – frequência [Hz]

f_0 – frequência central (terço de oitava) [Hz]

f_1 – frequência superior (terço de oitava) [Hz]

f_2 – frequência inferior (terço de oitava) [Hz]

f_s – frequência de aquisição [Hz]

k – fator multiplicativo das curvas de ponderação ou constante da equação (3.13)

n – expoente na equação (3.13)

p ou s – frequência angular imaginária

t – tempo [s]

Δt – desvio temporal [s]

Θ – diferença de fase [rad]

π – número pi

τ – constante de tempo [s]

φ – magnitude física

ψ – magnitude psicofísica

ω – frequência angular [rad/s]

ANV – avaliação dos níveis de vibração

BS – *British Standard*

Cap – capítulo

DFT – *discrete Fourier transform*

ELS – estado limite de serviço

ELU – estado limite último

Fig – figura

eVDV – valor de dose de vibração estimado

HTV – *hand-transmitted Vibration*

fft – *fast Fourier transfer* (transformada rápida de Fourier)

ISO – *International Organization of Standardization*

NP – norma portuguesa

rmq – *root-mean-quad*

rms – *root-mean-square*

SI – sistema internacional

Subcap - subcapítulo

VDV – valor de dose de vibração

WBV – *whole-body vibration*

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL - CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES

No âmbito da engenharia estrutural é frequente ter-se em consideração solicitações horizontais de carácter puramente dinâmico no processo de dimensionamento de diversas estruturas, caracterizados pela sua variação temporal. As ações exteriores particularmente severas, como é o caso da ação sísmica e em alguns casos da ação do vento, podem induzir danos estruturais significativos ou até mesmo conduzir ao colapso da estrutura.

No dimensionamento estrutural e perante este tipo de ações, o critério de avaliação das vibrações em causa é estabelecido de acordo com o Estado Limite Último de resistência das estruturas (ELU), condicionado pelas características dos materiais constituintes das mesmas. Neste processo de dimensionamento é corrente a adoção de diversas hipóteses simplificadoras devido às dificuldades existentes para a inclusão das cargas variáveis e consequente verificação da resposta estrutural. Portanto, segundo o critério de avaliação supra referido, estas ações exteriores a considerar devem ser determinadas recorrendo a regulamentos específicos, sendo assumidas como de natureza estática. Posteriormente deve proceder-se à verificação da segurança estrutural de acordo com as regras e normas aplicáveis, de acordo com os códigos de dimensionamento correspondentes ao tipo de estrutura em análise.

Além destas ações exteriores mais austeras, com maior importância no dimensionamento estrutural, existem outros tipos de solicitações exteriores que, embora de menor intensidade e relevância relativamente às anteriores, podem igualmente provocar danos estruturais. É, por exemplo, o caso de explosões devidas a explorações mineiras, de trabalhos de construção próximos, de tráfego intenso em vias próximas, ou de máquinas em funcionamento junto às estruturas em análise. Cada uma destas “fontes” de vibração produz uma excitação específica na estrutura, com amplitude, frequência e direção distintas. Consequentemente, os seus efeitos, tanto na estrutura como na resposta humana (1.2), variam consoante a sua origem e de acordo com as suas características.

Os movimentos induzidos nas edificações podem provocar diversos danos, tanto estruturais como não, normalmente relacionados com fenómenos de fendilhação, e ainda causar estados de tensão elevados nos materiais, bem como induzir fenómenos de fadiga derivados dos sucessivos ciclos de solicitação causados pelas vibrações. Para seu controlo, existem diversas normas técnicas que estabelecem limites máximos de vibração em construções de modo a salvaguardar os critérios estruturais apropriados. Tais normas, para além de terem em consideração o tipo de estrutura em causa e a sua idade, têm também em conta factores como a periodicidade, a duração e o conteúdo em frequência da vibração causada pela respectiva solicitação.

Como foi evidenciado, a avaliação dos níveis de vibração em estruturas é da maior importância no que respeita ao dimensionamento segundo os critérios estruturais do ELU. Porém, é de igual modo aconselhável salvaguardar o bom funcionamento da estrutura em serviço quando sujeita a vibração, garantindo a verificação ao Estado Limite de Serviço (ELS), quer a nível também estrutural, de forma a controlar os fenómenos de fendilhação, quer a **nível de conforto para os seus utilizadores**, matéria sobre a qual recairá a máxima atenção no desenrolar desta dissertação.

1.2. INTRODUÇÃO À VIBRAÇÃO EM ESTRUTURAS NO ÂMBITO DO CONFORTO HUMANO

Tal como o som pode ser música para o ouvido ou barulho irritante, o efeito da vibração no corpo humano tanto pode ser agradável como desagradável, dependendo das circunstâncias. No caso em concreto da percepção de oscilações em estruturas pelos seus ocupantes/utilizadores, estamos claramente perante uma situação de experiência desagradável. De facto, a vibração em estruturas quando perceptível pelo homem, pode afectá-lo em diferentes aspectos, como a redução do nível de qualidade de vida, de conforto e/ou de eficiência laboral.

O desenvolvimento de novas tecnologias de construção e o crescente uso de novos materiais na Engenharia Civil ao longo destes últimos anos têm vindo a acentuar os problemas causados pela vibração nos edifícios [1]. Existe um maior agravamento a nível de vibrações quando o material usado nos elementos estruturais é o aço. Este facto está diretamente relacionado com os baixos valores de amortecimento deste material, o que faz aumentar a transmissibilidade de vibrações neste tipo de estruturas.

O problema de vibrações excessivas em estruturas, tendo por base os critérios de conforto humano, está diretamente relacionado com a capacidade de percepção e sensibilidade que os utilizadores exibem a estes fenómenos. De tal modo, houve a necessidade de estabelecer níveis máximos de vibração, a partir dos quais se atinge um determinado nível de incomodidade, cujo propósito é garantir boas condições de serviço para os utilizadores dessas estruturas. Estes limites estão expressos, de acordo com as metodologias de avaliação adoptadas, em normas da especialidade, como por exemplo as *British Standard* – BS 6841 (1987) [2] e 6472 (1992) [3] ou as edições da *International Organization for Standardization* – ISO 2631 [4] [5], abordadas mais pormenorizadamente nos capítulos subsequentes. Apesar da utilização destas normas ser recomendada, elas apresentam algumas limitações que podem comprometer a sua ampla aplicação. Por exemplo, M. J. Griffin [6], um autor muito conceituado no campo da análise da exposição humana à vibração, denunciou algumas deficiências associadas com o uso da ISO 2631 na avaliação da exposição humana à vibração do ambiente circundante. Alguns dos aspectos mais relevantes são:

- o método de definição dos limites de vibração é independente do contexto específico ou das suas consequências;
- insuficiente orientação acerca do tipo de população abrangida e da variabilidade de sensibilidade interpessoal;
- insuficiente informação sobre os instrumentos de medição de vibração.

Existem essencialmente dois grupos de variáveis que afetam o modo de resposta humana à vibração: variáveis extrínsecas, diretamente relacionadas com as características físicas e temporais da vibração, e variáveis intrínsecas, dependentes da variabilidade física e psicológica de quem está exposto à vibração. Na possibilidade da severidade das vibrações atingir níveis superiores aos designados nos regulamentos como limites, além de reduzirem substancialmente o nível de conforto, podem afetar a capacidade de desenvolvimento de tarefas e, em casos mais graves, podem mesmo ter implicações ao nível da saúde dos ocupantes.

Por outro lado, é imperativo salientar que estes níveis “limite” de vibração foram determinados empiricamente. Sucede-se então que o estabelecimento destes como valores regulamentares não tem em conta a subjectividade de um sujeito único, devendo, nesse caso, ser encarados como valores de referência e não como valores fixos, a partir dos quais não se ultrapassa impreterivelmente o limiar entre o admissível e o inadmissível.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é constituída por 7 capítulos, sendo que o propósito deste primeiro capítulo assume-se apenas pela contextualização introdutória ao tema.

O **capítulo 2** incide meramente na conceptualização dos parâmetros mais relevantes na caracterização de uma vibração, como o seu tipo, a sua magnitude e a sua frequência. No que diz respeito a este último parâmetro, é aqui explicado o procedimento de determinação gráfica do conteúdo espectral em frequência de um qualquer sinal representativo de vibração.

O **capítulo 3** abrange os aspetos mais pertinentes da resposta humana à vibração, que é dependente de variáveis intrínsecas ao próprio fenómeno de vibração – direção, conteúdo em frequência, duração, magnitude – e de variáveis extrínsecas, ligadas ao conceito de variabilidade subjetiva.

O **capítulo 4**, referente ao processo prático da medição de vibrações, expõe, num momento inicial, os tipos de aparelhos de medição de vibrações mais usualmente utilizados. Em seguida, a atenção recai sobre a metodologia de medição a seguir.

O **capítulo 5** descreve as várias metodologias de avaliação do nível de vibração tal como estão expostas nas normas da especialidade. Numa primeira fase, dá-se principal ênfase aos métodos de análise de vibração propriamente ditos, sem fazer nenhuma alusão a valores limite. Posteriormente, são expostas as metodologias de avaliação de vibrações em estruturas, onde são referidos os valores de nível de vibração admissíveis consoante o tipo de estrutura, o tipo de vibração e em que período do dia se está exposto a esta.

O **capítulo 6** resume-se como a aplicação a duas situações reais das metodologias de análise e avaliação do nível de vibração enunciadas e descritas no **capítulo 5**.

Por fim, no **capítulo 7** são retiradas as ilações e/ou deduções decorrentes do desenvolvimento da presente dissertação.

2

CARACTERIZAÇÃO DA VIBRAÇÃO

2.1. TIPOS DE VIBRAÇÃO

Vibração resume-se a movimento oscilatório. Caracteriza-se como sendo um fenómeno mecânico através do qual existe oscilação alternada em torno de uma posição de referência. A amplitude do movimento determina a **magnitude** da vibração e a sua taxa de repetição determina a sua **frequência** [6].

A natureza de uma hipotética vindoura oscilação pode ser conjecturável a partir do conhecimento existente de oscilações prévias ou pode ser caracterizada apenas pelas suas propriedades estatísticas. No primeiro caso estamos perante movimento do tipo determinístico e no segundo perante movimento do tipo estocástico ou, mais usualmente denominado, aleatório. Ambos os tipos podem ser posteriormente subdivididos conforme o indicado na **Fig. 1.1**.



Fig. 2.1 – Categorização do tipo de movimento oscilatório.

Na **Fig. 2.2** estão representadas ondas referentes a diferentes tipos de vibração.

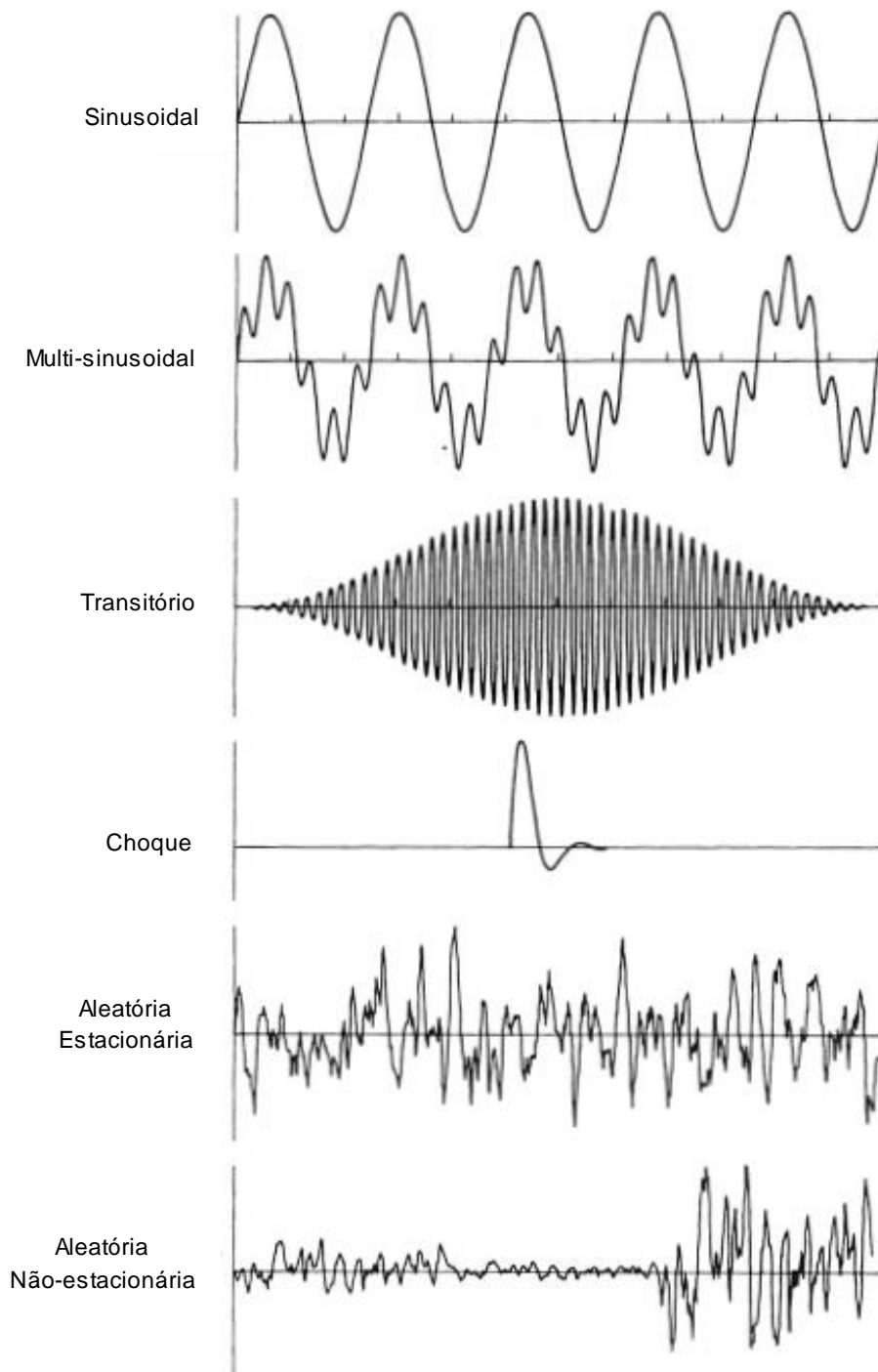


Fig. 2.2 – Exemplos de ondas de diferentes tipos de movimento oscilatório [6].

Na análise do ponto de vista do conforto humano, são considerados dois tipos de transmissão: **whole-body vibration (WBV)** – vibração de corpo inteiro – transmitida através da superfície de apoio, e **hand-transmitted vibration (HTV)**, vibração transmitida pela mão através de um objeto. **Para o presente tema da dissertação, apenas será abordado o primeiro tipo de transmissão.**

2.2. MAGNITUDE DA VIBRAÇÃO

2.2.1 PARÂMETROS GERAIS DE MENSURAÇÃO: DESLOCAMENTO, VELOCIDADE E ACELERAÇÃO

Existem muitos meios possíveis pelos quais a magnitude de um movimento oscilatório pode ser quantificada, dependendo do tipo de sinais em questão. No caso de um movimento de grande amplitude e baixa frequência, é possível observar facilmente o deslocamento entre o pico de movimento máximo numa direção e o da oposta (correntemente designados como máximo positivo e máximo negativo), ou seja, o denominado **deslocamento peak-to-peak**. O **deslocamento de pico** será o maior desses dois máximos comparados em valor absoluto. Porém, na prática, o uso desta grandeza para a medição da magnitude da vibração pode conduzir a conclusões falaciosas, especialmente na análise de oscilações de alta frequência, em que a vibração poderá ser severa mesmo sendo o deslocamento demasiado pequeno para ser detetado pelo olho humano [6].

Alternativamente, a magnitude da vibração pode ser definida pela **velocidade**, particularmente quando se pretende uma análise relacionada de uma forma mais directa com a energia envolvida no movimento, ou seja, no caso de movimentos impulsivos ou em análises do ponto de vista da possibilidade de ocorrência de danos estruturais. A **velocidade peak-to-peak**, ou de **pico-a-pico**, observa-se do mesmo modo que o deslocamento *peak-to-peak*, assim como a **velocidade de pico**. Apesar de haverem várias boas razões para quantificar a magnitude da vibração em termos de velocidade, a instrumentação para a medição da **aceleração** da oscilação é, neste momento, geralmente aceite como a mais conveniente, no âmbito do tema abordado. É por esse motivo que a maior parte dos regulamentos, como as normas BS e as ISO por exemplo, defendem que a severidade da exposição humana à vibração deve ser expressa em termos de aceleração, em vez de velocidade ou de deslocamento. De acordo com o S.I., a unidade preferível para quantificar a magnitude da aceleração é o metro por segundo por segundo, vulgarmente abreviada para m/s^2 ou ms^{-2} .

Conforme o demonstrado na **Fig. 2.3**, a escolha de qualquer um dos três parâmetros apenas irá influenciar a respectiva representação gráfica em termos de fase, sendo que a forma e o período do sinal não sofrem alterações.

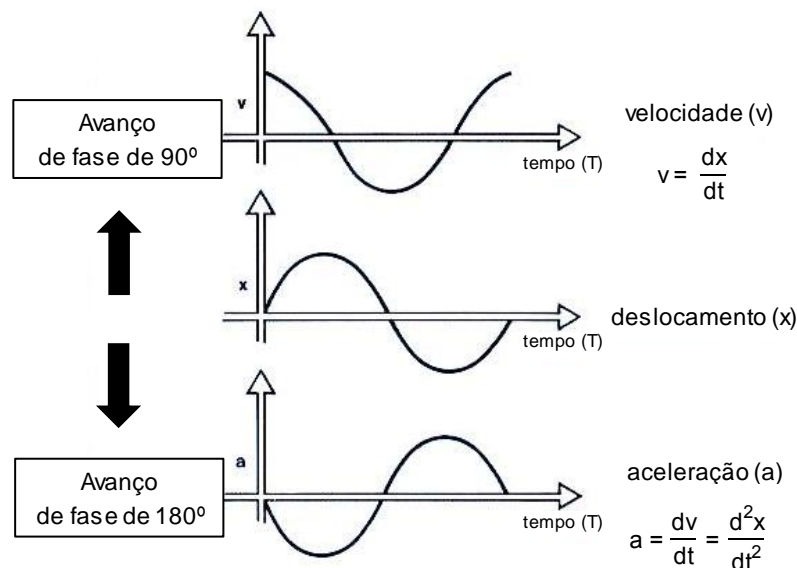


Fig. 2.3 – Relação entre deslocamento, velocidade e aceleração para uma vibração sinusoidal [6].

As relações/conversões entre deslocamento, velocidade e aceleração de pico, para ondas de frequência sinusoidal, podem ser observadas no seguinte quadro:

Quadro 2.1 – Conversões entre deslocamento de pico (X), velocidade de pico (V) e aceleração de pico (A) para ondas de frequência sinusoidal (f, em Hz) [6].

	Deslocamento, X	Velocidade, V	Aceleração, A
Deslocamento de pico, X	$X = X$	$X = \frac{V}{2\pi f}$	$X = \frac{A}{(2\pi f)^2}$
Velocidade de pico, V	$V = 2\pi f X$	$V = V$	$V = \frac{A}{2\pi f}$
Aceleração de pico, A	$A = (2\pi f)^2 X$	$A = 2\pi f V$	$A = A$

2.2.2 BREVE INTRODUÇÃO DA QUANTIFICAÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO

Conforme o explicado no subtítulo anterior, no âmbito da avaliação dos níveis de vibração em estruturas segundo critérios alusivos ao conforto humano, a severidade da exposição humana à vibração é geralmente expressa em termos de aceleração. Dentro destes termos, a magnitude de uma vibração pode ser representada através de uma **aceleração peak-to-peak (pico-a-pico)**, de uma **aceleração de pico** ou de uma **aceleração eficaz** (ou **equivalente**) [6].

A aceleração de pico, máximo valor de aceleração instantânea que ocorre durante o tempo de medição habitualmente designado por T , trata-se de um indicador de magnitude muito útil nos casos de choques de curta duração. No caso de uma análise a um movimento oscilatório mais complexo, recorrendo a este mesmo indicador, pode estar-se a determinar a severidade da vibração através de um pico de aceleração não representativo da mesma. Por isso, opta-se frequentemente por se exprimir a severidade das vibrações através de uma medida ponderada de aceleração. A raiz quadrada do valor quadrático médio, geralmente representada pela abreviação *r.m.s.* (*root-mean-square*), permite a determinação da aceleração eficaz ou equivalente a_{ef} , ($ms^{-2} r.m.s$) que é o método de quantificar a severidade da exposição humana à vibração preferido e vulgarmente mais adoptado, assumindo até a distinção de “método básico de avaliação” nas normas da especialidade.

O valor da aceleração eficaz do sinal, calculado para um dado período de tempo T , determina-se do seguinte modo:

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (2.1)$$

Suponha-se agora um simples exemplo da aplicação dos três parâmetros de medida relacionados com a aceleração: no caso de um movimento harmónico simples que evidencie uma aceleração de pico A , a magnitude pico-a-pico será de $2A$ e a magnitude r.m.s. de $A/\sqrt{2}$, do mesmo modo que o exposto no quadro seguinte (**Quadro 2.2**).

Quadro 2.2 – Relação entre pico (*peak*), pico-a-pico (*peak-to-peak*) e *root-mean-square*; apenas aplicável a ondas sinusoidais [6].

	Pico	Pico-a-pico	r.m.s.
Pico	Pico = pico	$\text{Pico} = \frac{\text{pico-a-pico}}{2}$	$\text{Pico} = \sqrt{2} \text{ r.m.s.}$
Pico-a-pico	$\text{Pico-a-pico} = 2 \text{ pico}$	$\text{Pico-a-pico} = \text{pico-a-pico}$	$\text{Pico-a-pico} = 2\sqrt{2} \text{ r.m.s.}$
r.m.s.	$\text{r.m.s.} = \frac{\text{pico}}{\sqrt{2}}$	$\text{r.m.s.} = \frac{\text{pico-a-pico}}{2\sqrt{2}}$	$\text{r.m.s.} = \text{r.m.s.}$

Esta preferência não é baseada em qualquer razão específica que possa justificar que o método *r.m.s.* de quantificação da aceleração seja o mais fiável, ou o mais preciso, numa avaliação conjecturável da resposta humana à vibração, tendo como comparação os métodos baseados nas acelerações pico-a-pico, de pico ou de qualquer outro parâmetro de medida. Até porque é fácil de demonstrar que existem sinais que, mesmo apresentando magnitudes *r.m.s.* similares, conduzem a respostas diferentes, independentemente das variáveis subjectivas inerentes à natureza humana. A principal justificação da adoção do método *r.m.s.* deve-se, sucintamente, à conveniência na sua mensuração e análise, bem como à harmonização com outras áreas da engenharia na standardização dos métodos de medição.

Para além da magnitude, uma condição muito relevante na análise de um episódio de vibração é a sua duração. Nem as medições de pico, nem as de ponderação reflectem essa importância: o valor de pico é determinado pela magnitude num instante, enquanto a magnitude *r.m.s.* pode tanto aumentar ou diminuir consoante se aumenta (ou diminui) o intervalo de tempo em consideração. Este aspecto não teria qualquer relevância se todas as vibrações apresentassem um comportamento periódico e de fácil caracterização. Neste caso, seria possível resumir a resposta humana à vibração a uma simples curva, cuja magnitude de aceleração *r.m.s.* considerada como “aceitável” dependeria do período da exposição.

No mundo real, as características das vibrações podem variar drasticamente de um momento para o outro, o que torna o intervalo de tempo sobre o qual deverá ser determinada a magnitude *r.m.s.* difícil de estabelecer, podendo obter-se valores *r.m.s.* inapropriados e enganadores acerca da severidade da vibração. Assim sendo, para movimentos deste tipo, a opção pela aplicação de métodos de medição acumulativos, igualmente designados por métodos de dose, é mais segura e consistente. No que respeita à *whole-body vibration*, o parâmetro de medida **VDV** (**Vibration Dose Value**, correspondente a **Valor de Dose de Vibração** em português) providencia a obtenção de resultados creditados na avaliação da severidade total da vibração e pode ser aplicado tanto para choques, mistura de choques com vibração, ou para análise da exposição diária a vibrações de diferentes tipos (**Cap. 5**).

2.3. FREQUÊNCIA DA VIBRAÇÃO

O número de vezes que um corpo executa uma oscilação completa, durante um intervalo de tempo de um segundo, determina a frequência do seu movimento, *f*, em *Hertz* (*Hz*). O seu inverso resulta no período do movimento, geralmente designado por *T* e expresso em segundos (*s*):

$$T = \frac{1}{f} \tag{2.2}$$

No estudo de vibrações sinusoidais é sabido que o sinal registado irá apenas conter uma só frequência, que em princípio será possível de se determinar sem recorrer a métodos de cálculo computacionais (Fig. 2.4). Contudo, na análise em frequência de vibrações mais complexas, o procedimento já não é assim tão expedito, sendo mesmo necessário valer-se desses recursos computacionais (Fig. 2.5).

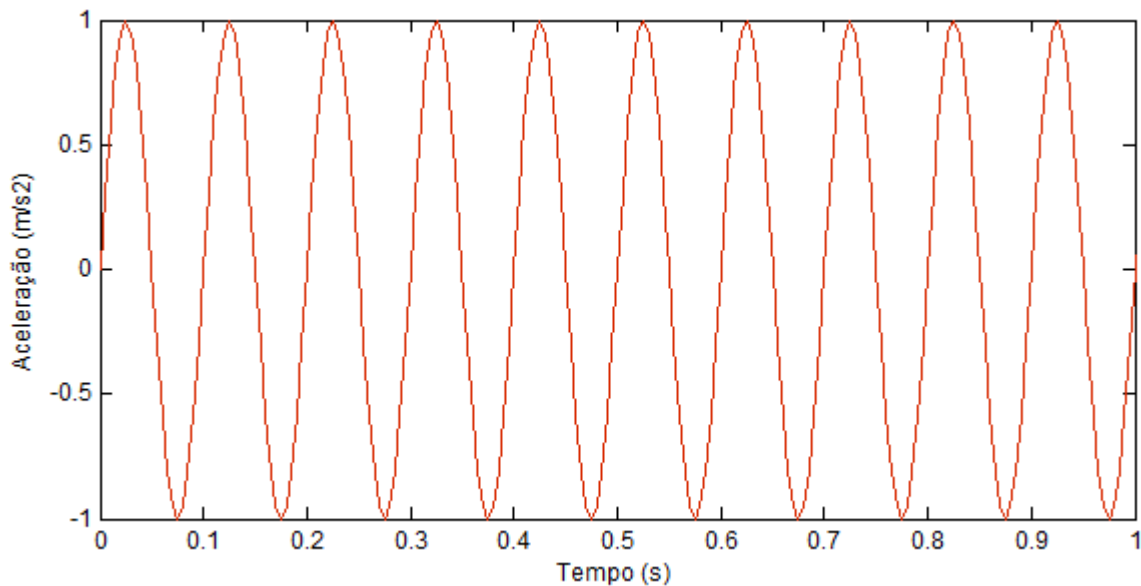


Fig. 2.4 – Representação gráfica da onda sinusoidal $u(t)=\text{sen}(2\times\pi\times 10\times t)$, onde facilmente se observa que o corpo efectua 10 oscilações num intervalo de tempo de um segundo (frequência de 10 Hz).

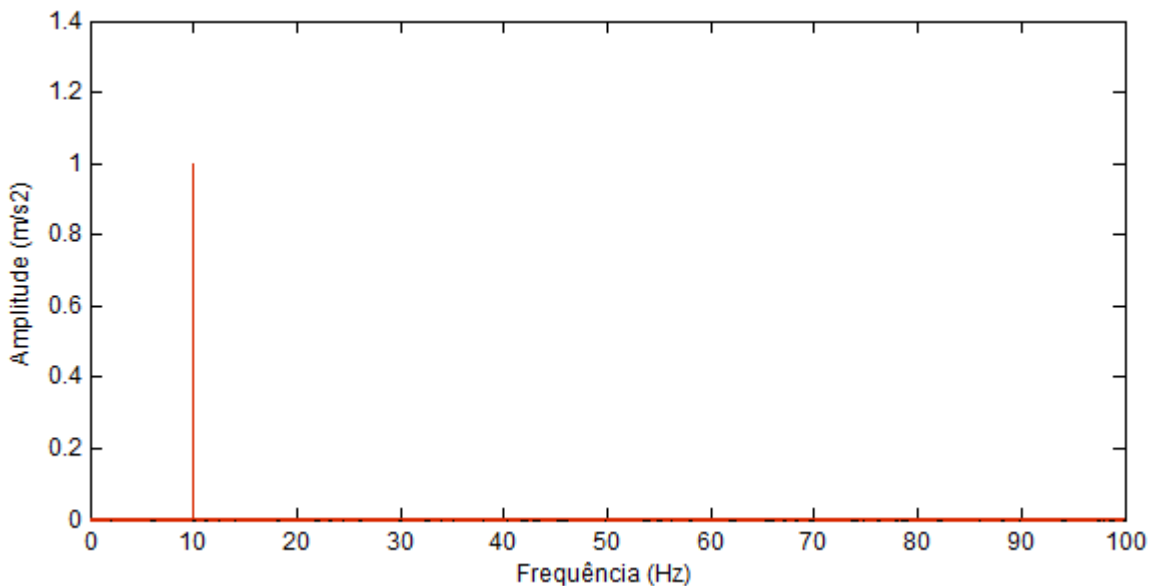


Fig. 2.5 – Espectro de frequências de $u(t)=\text{sen}(2\times\pi\times 10\times t)$ obtido através da aplicação computacional da Transformada discreta de Fourier.

2.3.1. SÉRIES E TRANSFORMADA DE FOURIER

As Séries de Fourier, epónimo a Jean-Baptiste Joseph Fourier, permitem definir uma função $f(t)$ nos termos de uma infinita soma de funções de base exponencial ou sinusoidal (i.e., de senos e co-senos, fazendo-se valer das relações de ortogonalidade existentes entre eles). A sua forma complexa, para uma função periódica no intervalo $[-L, L]$, com período de $T=2L$, define-se do seguinte modo [7]:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{\frac{i\pi n t}{L}} \quad (2.3)$$

com:

$$A_n = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f(t) e^{-\frac{i\pi n t}{L}} dt. \quad (2.4)$$

Por sua vez, a Transformada de Fourier permite transformar uma função no domínio do tempo, numa nova função, desta feita no domínio da frequência (Hz ou rad/s), dando origem ao espectro das frequências que compõem a função original. Também se poderá utilizar esta transformada no processo inverso, ou seja, na conversão do domínio da frequência em tempo. O termo “Transformada de Fourier” pode igualmente referir-se ao processo de transformação em si ou à nova função que este gera.

Para o objectivo em questão, ou seja, para o processamento digital de sinais, importa apenas dar ênfase à transformada discreta de Fourier (*DFT, discrete Fourier transform*), embora a denominação “Transformada de Fourier” geralmente se refira à transformada contínua, que não é relevante para o desenvolvimento da presente dissertação. Isto porque o registo de dados (**Subcap. 4.2**) por parte dos aparelhos de medição não é contínuo mas sim discretizado. O que a *DFT* faz é converter esse finito número de amostras de acelerações instantâneas, igualmente espaçadas entre si no tempo, numa “lista” de sucessivos coeficientes (amplitudes), correspondentes aos coeficientes que multiplicam as funções sinusoidais complexas geradas, ordenados de forma crescente pelas frequências destas. Matematicamente, a *DFT* de um vetor x de comprimento n será outro vetor y de tamanho n :

$$y_{p+1} = \sum_{j=0}^{n-1} \omega^{jp} x_{j+1} \quad (2.5)$$

onde

$$\omega = e^{-2\pi i/n} \quad (2.6)$$

é a n -ésima raiz de unidade.

Nesta anotação retirada da base de dados do programa de computação numérica *MatLab*, i refere-se à unidade imaginária, p e j índices que correm de 0 até $n-1$. Os índices $p+1$ e $j+1$ vão de 1 até n , correspondendo ao alcance associado aos vetores *MatLab*. O intervalo de tempo que separa dois valores consecutivos de X define-se como $1/f_s$, onde f_s é a frequência de aquisição (**Subcap. 4.2.1.2**)

Com a utilização desta ferramenta computacional por exemplo, é então possível analisar em frequência vibrações que à partida seriam impossíveis de analisar humanamente através do algoritmo *fft* (*fast Fourier transform*, em português transformada rápida de Fourier), a partir do qual se pode computar a *DFT* tal como a sua inversa, respectivamente definidas por:

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (2.7)$$

$$x(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (2.8)$$

com $\omega_N = \omega$ (2.6), onde se substitui n por N .

2.3.2. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ALGORITMO *FFT* EM LINGUAGEM *MATLAB*

Como exemplo demonstrativo, apresenta-se no **anexo A.1** um “script” em linguagem *MatLab*, onde inicialmente se gera um sinal multi-sinusoidal com frequências preponderantes de 20 e 80 Hz, ao qual se adicionou ruído para uma melhor aproximação aos sinais habitualmente obtidos durante a captação de registos de vibrações:

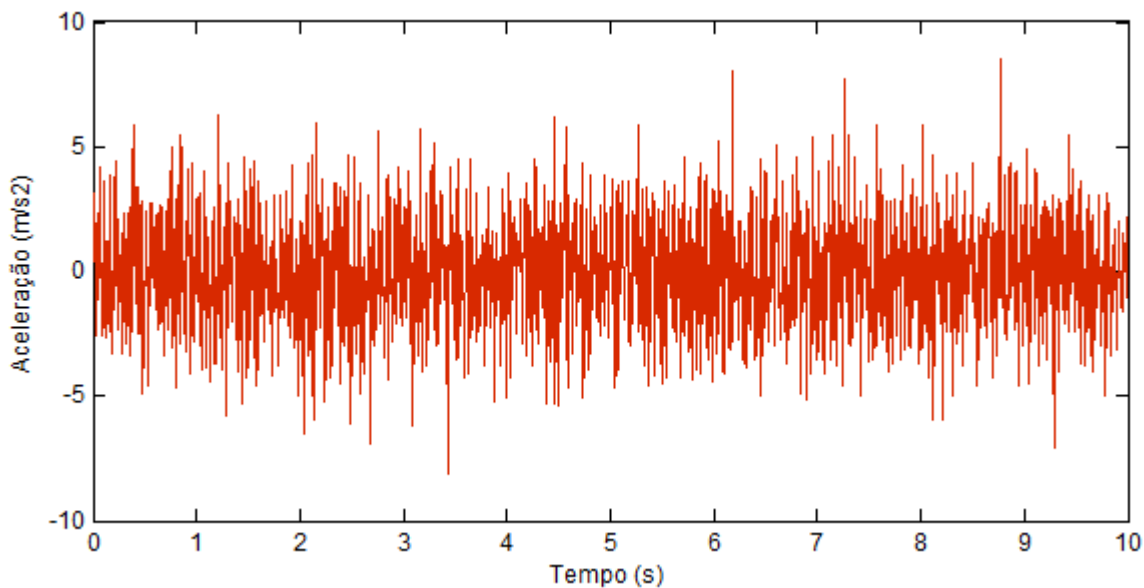


Fig. 2.6 – Representação gráfica da função $u(t)=\text{sen}(2\times\pi\times 20\times t)+\text{sen}(2\times\pi\times 80\times t)$ com adição de ruído, representando possíveis perturbações no progresso da hipotética medição.

De seguida, este “script” desenvolve a *FFT* deste sinal. De forma a otimizar os resultados da *FFT*, é preferível determinar o menor valor de X que faça com que 2^X seja maior ou igual ao valor L , comprimento ou número de pontos que constituem o sinal, e “correr” o algoritmo de forma a retornar 2^X número de pontos em vez de L , uma vez que o algoritmo desenvolve-se de forma mais eficiente quando se define o comprimento do “output” directamente a partir de uma potência de dois exacta.

Portanto, correndo o “script”, será fornecido o espectro das frequências que constituem o “input” inicial, ou seja, o sinal gerado, que assumirá o seguinte aspecto:

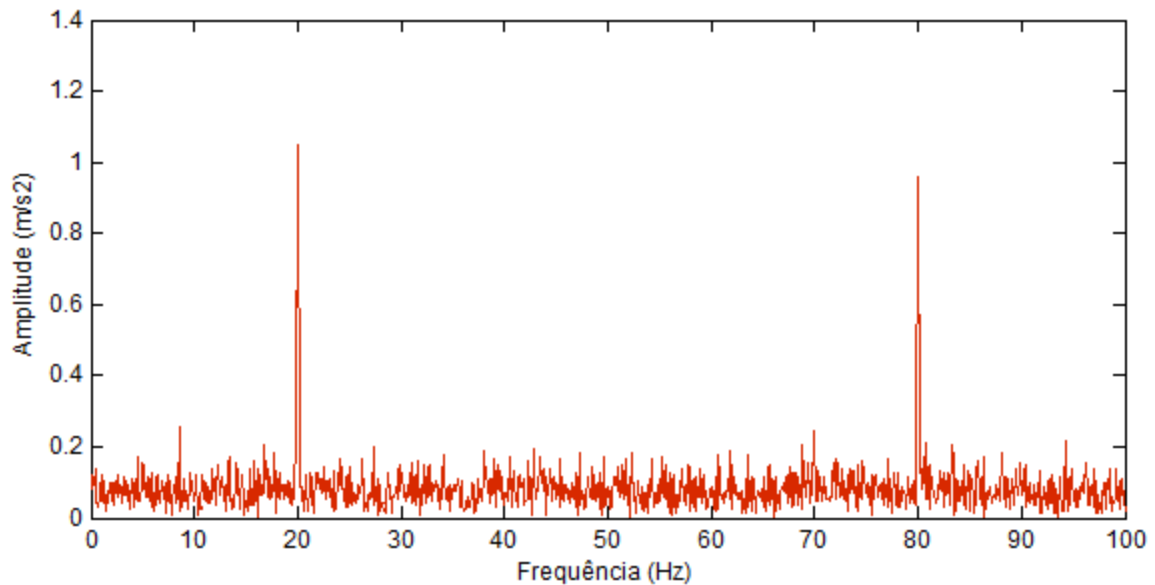


Fig. 2.7 – Espectro de frequências de $u(t)=\text{sen}(2\times\pi\times 20\times t)+\text{sen}(2\times\pi\times 80\times t)$, mais ruído, obtido através da aplicação do algoritmo da Transformada rápida de Fourier (em inglês *fast Fourier transform*, ou *FFT*).

Como é visível, as amplitudes das duas sinusóides não são exactamente iguais à unidade, como era presumível, sobretudo devido à existência de ruído no sinal. Outra razão para estas “aproximações” é o facto de o sinal ter um comprimento finito de L , neste caso de $L=2000$. Quanto maior for este valor, em princípio, melhores serão as “aproximações” das amplitudes.

3

RESPOSTA HUMANA À VIBRAÇÃO

A partir deste ponto, quando se falar de ou sobre *vibração*, a intenção será fazer alusão às vibrações de corpo inteiro a que os seres humanos estão expostos – *whole-body vibration*.

No âmbito do tema em estudo, ou seja, na análise de vibrações em estruturas, considera-se que todo o corpo humano está sujeito à vibração de relativa baixa frequência, que lhe é transmitida através da superfície de apoio que o suporta, sendo que todo o ambiente está caracterizado do mesmo movimento. A vibração experimentada nestas situações é frequentemente de natureza complexa, podendo conter muitas frequências, ocorrer em várias direções e modificar-se ao longo do tempo. Segundo a norma portuguesa NP ISO-2631-1 (2007) [4], na análise dos efeitos na saúde e no conforto e da probabilidade de percepção da vibração, a gama de frequências a considerar será de 0,5 Hz a 80 Hz. Por sua vez, a incidência do enjoo ao movimento abrange uma série de frequências entre 0,1 Hz e 0,5 Hz.

São vários os factores que influenciam a resposta humana à vibração, uns intrínsecos ao próprio movimento, outros mais relacionados com as características congénitas de cada indivíduo. Na primeira categoria existem quatro importantes variáveis físicas a considerar: a severidade, a direção, a duração e o conteúdo em frequência da vibração. Na segunda, tem-se em conta o conceito de subjetividade na sensibilidade que cada um apresenta quando exposto à vibração. No seu livro [6], Griffin editou a seguinte lista na qual denominou estas duas categorias como “variáveis extrínsecas” e variáveis intrínsecas”, respectivamente:

- VARIÁVEIS EXTRÍNSECAS:
 - Variáveis da Vibração:
 - direção e/ou combinações de direções;
 - frequência e/ou combinações de frequências;
 - magnitude e/ou combinações de magnitudes;
 - duração e/ou combinações de durações;
 - posição de entrada da vibração e/ou combinações de posições.
 - Outras Variáveis:
 - outros factores adversos (ruído, temperatura, etc.);
 - dinâmica do assento (no caso de posição sentada).
- VARIÁVEIS INTRÍNSECAS:
 - Variabilidade Intra-subjectiva:
 - postura corporal;
 - posição corporal;
 - orientação corporal (sentado, em pé, deitado).
 - Variabilidade Inter-subjectiva:
 - tamanho e peso corporais;

- resposta dinâmica corporal;
- idade;
- género;
- experiência, expectativa e atitude; personalidade;
- estado físico (*fitness*).

3.1. DIREÇÃO DA VIBRAÇÃO

As vibrações devem ser medidas isoladamente de acordo com as direções de um sistema de coordenadas ortogonal (**Subcap. 3.1.1**). A razão deste procedimento prende-se com o facto de a vibração vertical originar respostas biodinâmicas diferentes relativamente às componentes horizontais, ou vice-versa. Na direção vertical (**Fig. 3.1** – eixo Z), o corpo humano é mais sensível a vibrações com uma gama de frequências entre 4 Hz e 10 Hz . No que concerne às direções horizontais (**Fig. 3.1** – eixos X e Y), a resposta humana é mais acentuada no intervalo de frequências entre $0,5\text{ Hz}$ e 2 Hz . Devido a esta variabilidade de sensibilidade humana ao conteúdo em frequência das vibrações, são requeridas ponderações em frequência, não de igual modo consoante os diferentes eixos de vibração, para melhor analisar a severidade que dada vibração poderá ter no que respeita ao conforto humano (**3.2**)

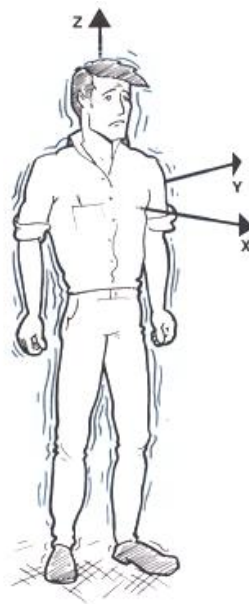


Fig. 3.1 – Direções de vibração.

3.1.1. SISTEMAS DE COORDENADAS DE VIBRAÇÃO

Uma vez que o espaço em análise é tridimensional, há a necessidade primária de assumir sistemas de coordenadas para descaracterizar a vibração nas três direções que o definem.

A definição de sistemas de coordenadas para representar espacialmente o movimento é de substancial importância porque permite a descaracterização da vibração em componentes (eixos) vertical e horizontais, uma vez que produzem reações distintas, e de diferente relevância, no corpo humano. Análises experimentais provaram ainda que, independentemente da direção da vibração, a magnitude desta difere consoante a parte do corpo em contacto com a superfície excitada. Portanto, a resposta humana à vibração depende tanto da direção da vibração como da posição corporal aquando da excitação. Es-

tas duas variáveis podem ser quantificadas recorrendo a sistemas de coordenadas onde as direções e a origem são separadamente definidas por eixos ortogonais e consoante o modelo de coordenadas adoptado, respetivamente.

O sistema de coordenadas de vibração é composto por três eixos translacionais – x , y , z - mais três rotacionais – r_x , r_y , r_z . Ambos os tipos de sistemas de coordenadas apresentados são à partida regidos pela regra da mão direita: as direções positivas dos eixos x , y e z são definidas pelo primeiro dedo, segundo e polegar, respetivamente. Portanto, tomando como exemplo uma pessoa em pé, as direções positivas seriam a frente (x), a esquerda (y) e para cima (z). A mesma regra se aplica para definir os eixos rotacionais de cada eixo.

Os sistemas de coordenadas biodinâmicos podem ser divididos em dois tipos: anatómicos ou basicêntricos. O que os distingue é, sobretudo, a definição da origem do sistema de eixos, uma vez que os métodos de determinação das direções do movimento são similares. Os **sistemas de coordenadas anatómicos** são definidos em relação a pontos anatómicos específicos e são correntemente mais utilizados em laboratórios de pesquisa que incidem principalmente sobre o estudo dos efeitos da vibração no corpo humano. Por sua vez, os **sistemas de coordenadas basicêntricos** (pelos quais as normas em vigor se orientam) são definidos em relação às superfícies, que estão em contacto com o corpo e, como a sua própria designação indica, centram-se nas bases dos apoios em questão [6].

Em ambos, são essencialmente consideradas três principais situações ou, mais especificamente, posições corporais iniciais: sujeito sentado, sujeito deitado e sujeito em pé.

As versões mais antigas da ISO 2631 (ex.: 1974, 1978, 1985a) utilizavam um sistema de coordenadas ortogonais anatómico, idêntico ao apresentado na **Fig. 3.2**.

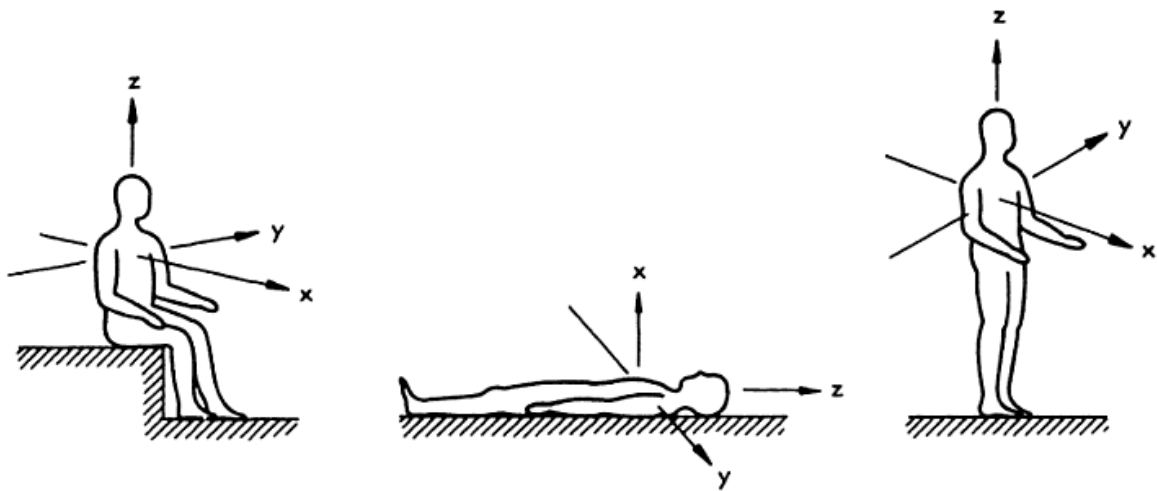


Fig. 3.2 – Sistema de coordenadas anatómico (apenas eixos translacionais).

O que se conclui ao observar a anterior imagem é que a origem deste sistema de eixos está algures na zona do coração do homem. Ora, como é imaginável, esta origem de eixos não é a mais conveniente para a avaliação de vibrações, muito devido à sua localização e à sua não completa definição. Esta dificuldade é mais notória no caso da pessoa em pé: só se o indivíduo colasse um aparelho de medida ao peito é que seria possível mensurar as vibrações de acordo com esta origem sistémica.

Nas relativas mais recentes normas ISO 2631 (ex.: 1989, NP-2007) [4] [5], ou nas BS 6841 (1987) [2] e BS 6472 (1992) [3], já se adoptou pela utilização de sistemas de coordenadas basicêntricos, muito mais expeditos para a prática de medições e consequente avaliação dos níveis de vibração do meio envolvente (ou particularizando, da estrutura), uma vez que as origens dos sistemas, i.e. os pontos de medição, são definidas em relação às superfícies de contacto que transmitem a vibração ao corpo (Fig. 3.3). Mais detalhes acerca de pontos de medição e medições de vibrações serão explanados no capítulo 4.

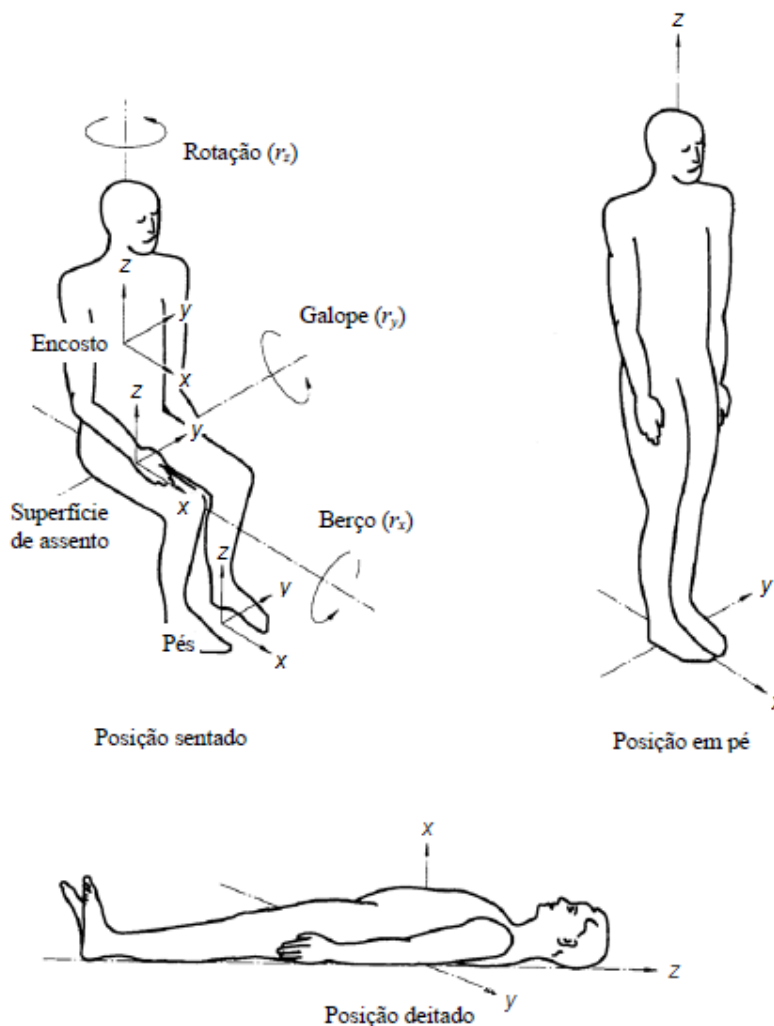


Fig. 3.3 – Sistema de eixos basicêntrico, conforme apresentado na NP-ISO 2631-1 [4].

Os eixos de vibração são definidos relativamente ao corpo do indivíduo e, portanto, acompanham o movimento do corpo nas suas diferentes posições, tal como está representado nas duas imagens anteriores. Por exemplo, o eixo x é horizontal na “posição em pé”, enquanto na “posição deitado” o mesmo eixo pode ser vertical se o indivíduo estiver virado para cima (como na figura), ou horizontal se estiver deitado lateralmente. Pese embora a conveniência dos eixos em serem definidos de forma a acompanhar o movimento do corpo, isto não significa de todo que a sensibilidade do corpo nas várias direcções também se “mova” de acordo com o movimento do próprio corpo. Para precaver uma adequada avali-

ação e/ou análise do impacto da vibração no conforto humano, as orientações do sistema de coordenadas devem ser anotadas, quer em relação à orientação gravítica, quer em relação ao sistema de eixos escolhido para representar o ambiente (estrutura) em si.

3.2. CONTEÚDO EM FREQUÊNCIA DA VIBRAÇÃO

3.2.1. FREQUÊNCIAS NATURAIS DO CORPO HUMANO

Foi já referido no ponto anterior que o corpo humano não é igualmente sensível a todas as frequências de vibração. De forma a melhor se compreender este fenómeno, é mais vantajoso considerar o corpo humano como um sistema biomecânico. Estas experiências, embora bastante proveitosas, estão sujeitas a alguma incerteza nas suas conclusões, derivada dos condicionalismos naturais do corpo humano:

- cada parte do corpo apresenta maior sensibilidade a diferentes gamas de frequências;
- o corpo humano não é simétrico;
- a resposta à vibração varia de indivíduo para indivíduo.

Contudo, foram desenvolvidos modelos biomecânicos adequados com o intuito de simular a resposta humana à vibração, como é exemplo o trabalho de H. E. von Gierke [8]. De acordo com o artigo da co-autoria de M. L. M. Duarte, M. R. Misael e L. E. de Assis Freitas Filho [1], a partir deste modelo biomecânico e dos trabalhos realizados por von Gierke e Brammer [9] e F. Chang [10], foi possível determinar as frequências naturais de várias partes do corpo humano, exibidas na **Fig 3.4**.

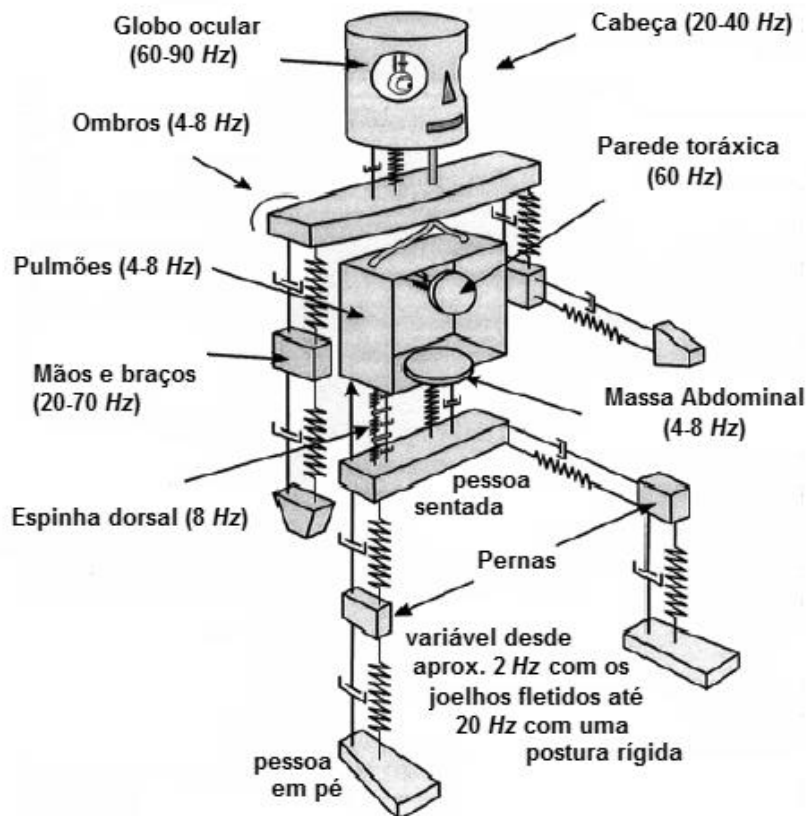


Fig. 3.4 – Modelo biomecânico teórico das frequências naturais de partes distintas do corpo humano [1].

3.2.2. PONDERAÇÃO EM FREQUÊNCIA

Quando uma vibração é mensurada numa particular direção, a sua magnitude é medida para todas as frequências dentro do intervalo às quais o homem é sensível. Contudo, pelo que já se viu neste subcapítulo, é correto concluir que as frequências de vibração não possuem todas a mesma importância na análise da resposta humana.

De forma a ter em conta a dependência da sensibilidade humana quanto à direção e ao conteúdo em frequência da vibração, as normas técnicas pressupõem a aplicação de filtros de ponderação às vibrações medidas que, como o termo inglês *frequency weighting* transparece, atribuem maior peso às frequências às quais o corpo humano se mostra sensível.

3.2.2.1. Bandas de frequências normalizadas

De acordo com os regulamentos, excluindo os casos em que as vibrações apresentam carácter harmónico, a análise ao conteúdo espectral das mesmas deve ser feito segundo bandas normalizadas de terço de oitava. As bandas de terço de oitava (**Quadro 3.1**) estão internacionalmente normalizadas e definem-se pelos seus limites superiores (f_1) e inferiores (f_2) e respectivas frequências centrais (f_0), podendo estabelecer-se as seguintes relações entre elas [11]:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (3.1)$$

$$f_1 = 2^{-\frac{1}{6}} f_0 \quad (3.2)$$

$$f_2 = 2^{\frac{1}{6}} f_0 \quad (3.3)$$

Quadro 3.1 – Caracterização das bandas de terço de oitava internacionalmente normalizadas [11].

Banda nº	Frequência central (Hz)	1/3 oitava (Hz)		Banda nº	Frequência central (Hz)	1/3 oitava (Hz)	
		de	a			de	a
1	1,25	1,12	1,41	11	12,5	11,2	14,1
2	1,6	1,41	1,78	12	16	14,1	17,8
3	2	1,78	2,24	13	20	17,8	22,4
4	2,5	2,24	2,82	14	25	22,4	28,2
5	3,15	2,82	3,55	15	31,5	28,2	35,5
6	4	3,55	4,47	16	40	35,5	44,7
7	5	4,47	5,62	17	50	44,7	56,2
8	6,3	5,62	7,08	18	62	56,2	70,8
9	8	7,08	8,91	19	80	70,8	89,1
10	10	8,91	11,2	20	100	89,1	112

3.2.2.2. Curvas de ponderação em frequência

Nas figuras seguintes (**Fig. 3.5** e **Fig 3.6**), dão a conhecer-se as curvas de ponderação em frequência - Ponderação em frequência (*dB*) vs. Frequência (*Hz*) - utilizadas na NP ISO 2631-1 [4]:

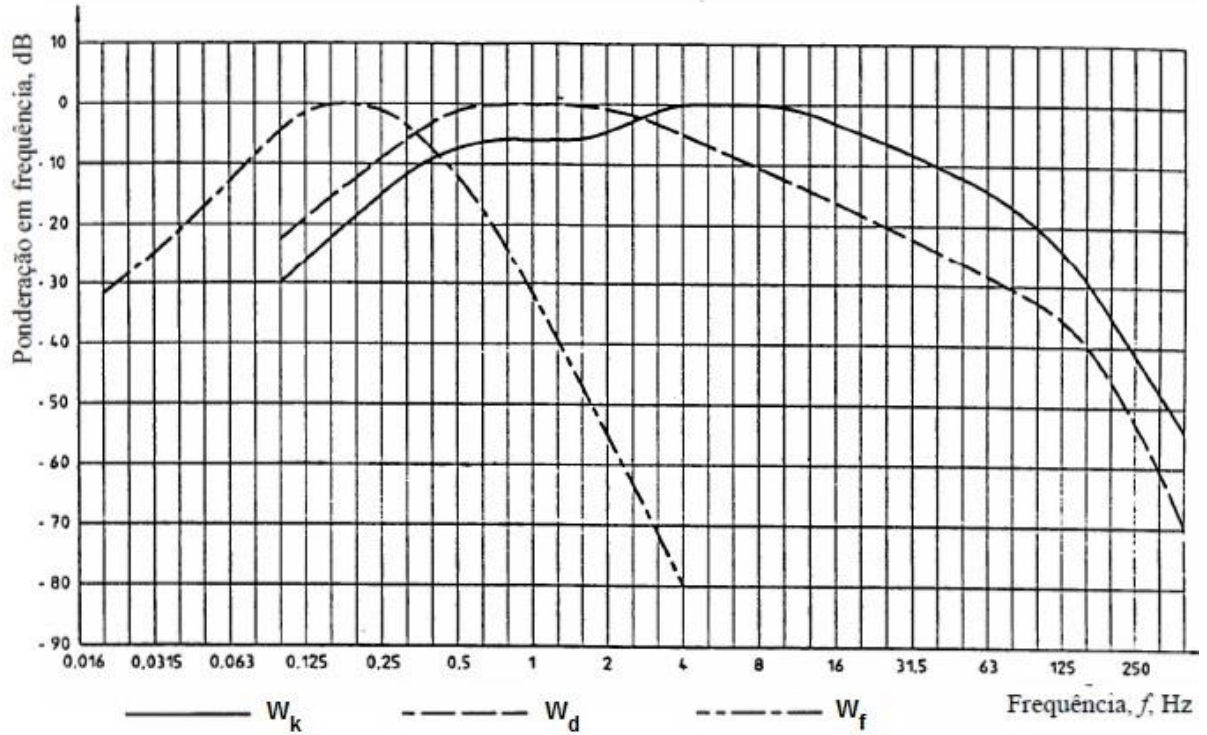


Fig. 3.5 – Curvas de ponderação em frequência principais (NP ISO 2631-1).

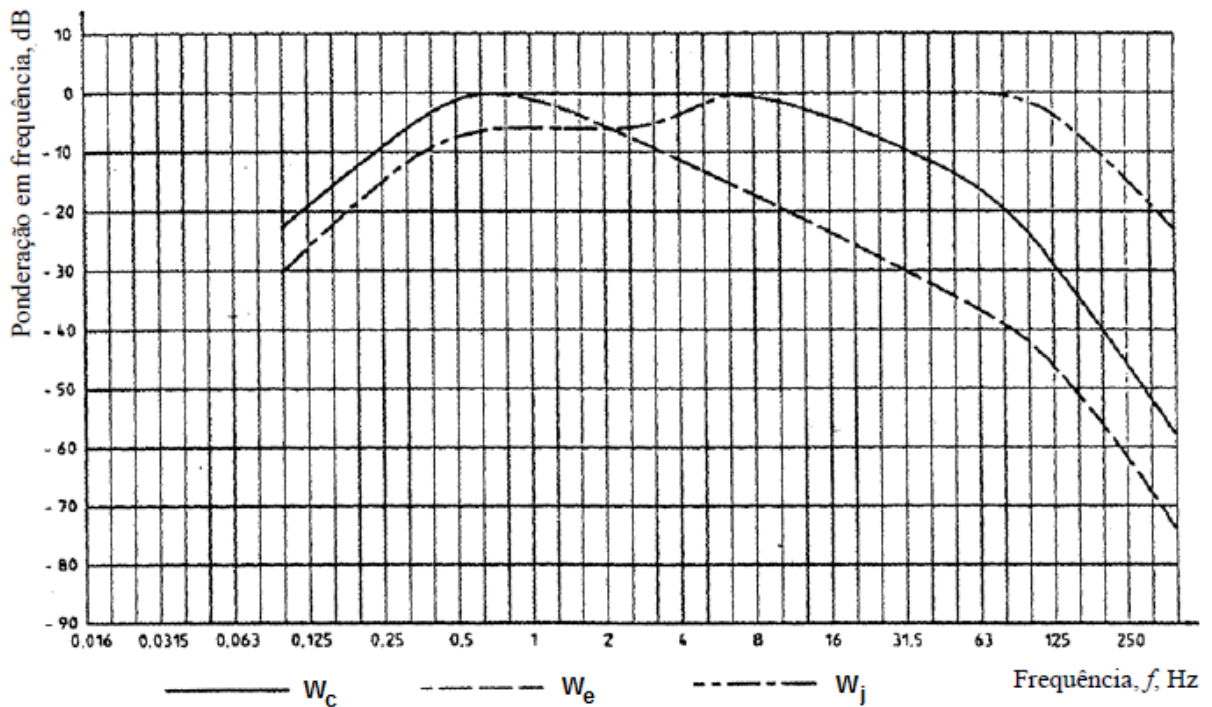


Fig. 3.6 – Curvas de ponderação em frequência adicionais (NP ISO 2631-1).

As várias curvas de ponderação, designadas como W seguido do respectivo índice, referem-se a análises de diferentes situações. Inicialmente, são diferenciadas as consideradas ponderações principais - W_k , W_d e W_f - das ponderações adicionais - W_c , W_e e W_j . As orientações de aplicação de cada curva estão assim expostas, consoante o tipo de afetação [4] (**Subcap. 5.1.1**) ao homem em análise:

Quadro 3.2 – Guia para a aplicação das curvas de ponderação em frequência principais (NP ISO 2631-1).

Ponderação em frequência	Saúde	Conforto	Perceção	Enjoo ao movimento
W_k	eixo -z, superfície do assento	eixo -z, superfície do assento eixo -z, em pé vertical, deitado (exceto cabeça) eixo -x, -y, -z, pés (sentado)	eixo -z, superfície do assento eixo -z, em pé vertical, deitado (exceto cabeça)	----
W_d	eixo -x, superfície do assento eixo -y, superfície do assento	eixo -x, superfície do assento eixo -y, superfície do assento eixo -x, -y, em pé horizontal, deitado eixo -y, -z, assento-costas	eixo -x, superfície do assento eixo -y, superfície do assento eixo -x, -y, em pé horizontal, deitado	----
W_f	----	----	----	vertical

Quadro 3.3 – Guia para a aplicação das curvas de ponderação em frequência adicionais (NP ISO 2631-1).

Ponderação em frequência	Saúde	Conforto	Perceção	Enjoo ao movimento
W_c	eixo -x, assento-costas	eixo -x, assento-costas	eixo -x, assento-costas	----
W_e	----	eixo - r_x , - r_y , - r_z , superfície do assento	eixo - r_x , - r_y , - r_z , superfície do assento	----
W_j	----	vertical, deitado (cabeça)	vertical, deitado (cabeça)	----

No **Quadro 3.2** estão indicadas duas ponderações principais em frequência W_k e W_d - relacionadas com a saúde, o conforto e a percepção – e uma ponderação W_f relacionada com o enjoo ao movimento:

- W_k para a direção z e para a direção vertical na posição deitado (exceto cabeça);
- W_d para as direções x e y e para as direções horizontais deitado;
- W_f para a direção vertical.

No **Quadro 3.3** são dadas indicações sobre as ponderações adicionais, em frequência, para os casos especiais de:

- medições nas costas do assento – W_c ;
- medições de vibrações de rotação – W_e ;
- medições de vibração sob a cabeça de uma pessoa deitada – W_j ;

Estas curvas de ponderação em frequência são matematicamente definidas de forma similar a outros filtros, usados no estudo do som por exemplo, e podem ser implementadas tanto por métodos analógicos ou digitais. Para tal, é necessário definir filtros de limitação de banda [2] [4].

3.2.2.3. Filtros digitais: limitação de banda de frequências

Usando a norma NP ISO 2631-1 [4] como orientação, apreende-se que os limites inferior e superior da banda de frequências são definidos por filtros de dois pólos - passa-alto e passa-baixo, respetivamente – com características *Butterworth*, tendo uma inclinação assintótica de -12 dB por oitava. As suas frequências de vértice, “*corner*”, estão afastadas de $1/3$ de oitava da gama de frequências nominal da banda relevante.

Nas ponderações W_c , W_d , W_e , W_j e W_k os filtros de limitação de banda passa-alto e passa-baixo aplicados são, respetivamente, a $0,4\text{ Hz}$ e 100 Hz , enquanto na ponderação em frequência W_f eles são a $0,08\text{ Hz}$ e $0,63\text{ Hz}$.

3.2.2.4. Definição matemática das ponderações em frequência

As curvas das várias ponderações em frequências são determinadas através de funções de transferência em frequência. Para o desenvolvimento da presente dissertação optou-se pelo uso daquelas expressas na NP ISO 2631-1 [4], uma vez que se trata duma norma nacional. Os parâmetros que definem estas funções são as frequências designadas por f_1 a f_6 e os fatores de qualidade das ressonâncias Q_4 a Q_6 , apresentados nos **Quadros 3.4** e **3.5** para as ponderações principais e adicionais, respetivamente.

Quadro 3.4 – Parâmetros das funções de transferência das ponderações principais em frequência.

Ponderação	Limites de Banda		Transição aceleração-velocidade			Passo ascendente			
	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	Q_4	f_5 (Hz)	Q_5	f_6 (Hz)	Q_6
W_k	0,4	100	12,5	12,5	0,63	2,37	0,91	3,35	0,91
W_d	0,4	100	2,0	2,0	0,63	∞	--	∞	--
W_f	0,08	0,63	∞	0,25	0,86	0,0625	0,8	0,1	0,8

Quadro 3.5 – Parâmetros das funções de transferência das ponderações adicionais em frequência.

Ponderação	Limites de Banda		Transição aceleração-velocidade			Passo ascendente			
	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	Q_4	f_5 (Hz)	Q_5	f_6 (Hz)	Q_6
W_c	0,4	100	8,0	8,0	0,63	∞	--	∞	--
W_e	0,4	100	1,0	1,0	0,63	∞	--	∞	--
W_j	0,4	100	∞	∞	--	3,75	0,91	5,32	0,91

As funções de transferência em frequência são expressas pelas seguintes equações:

- **Limite de banda** (dois pólos com características de *Butterworth*, $Q_1 = Q_2 = 1/\sqrt{2}$):

Passa-alto:

$$|H_h(p)| = \left| \frac{1}{1 + \sqrt{2}\omega_1/p + (\omega_1/p)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + f_1^4}} \quad (3.4)$$

em que:

$$\omega_1 = 2\pi f_1;$$

f_1 = frequência de vértice (interceção de assíptotas).

Passa-baixo:

$$|H_l(p)| = \left| \frac{1}{1 + \sqrt{2}p/\omega_2 + (p/\omega_2)^2} \right| = \sqrt{\frac{f_2^4}{f^4 + f_2^4}} \quad (3.5)$$

onde:

$$\omega_2 = 2\pi f_2;$$

f_2 = frequência de vértice (interceção de assíptotas).

- **Transição da aceleração-velocidade** (proporcional à aceleração para baixas frequências; proporcional à velocidade para altas frequências):

$$|H_t(p)| = \left| \frac{1 + p/\omega_3}{1 + p/Q_4\omega_4 + (p/\omega_4)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^2 + f_3^2}{f_3^2}} \sqrt{\frac{f_4^4 Q_4^2}{f^4 Q_4^2 + f^2 f_4^2 (1 - 2Q_4^2) + f_4^4 Q_4^2}} \quad (3.6)$$

onde:

$$\omega_3 = 2\pi f_3;$$

$$\omega_4 = 2\pi f_4.$$

- **Passo ascendente** (inclinação aproximadamente igual a 6dB por oitava, proporcional ao impulso):

$$|H_s(p)| = \left| \frac{1 + p/Q_5\omega_5 + (p/\omega_5)^2}{1 + p/Q_6\omega_6 + (p/\omega_6)^2} \cdot \left(\frac{\omega_5}{\omega_6}\right)^2 \right| = \frac{Q_6}{Q_5} \sqrt{\frac{f^4 Q_5^2 + f^2 f_5^2 (1 - 2Q_5^2) + f_5^4 Q_5^2}{f^4 Q_6^2 + f^2 f_6^2 (1 - 2Q_6^2) + f_6^4 Q_6^2}} \quad (3.7)$$

em que:

$$\omega_5 = 2\pi f_5;$$

$$\omega_6 = 2\pi f_6.$$

A função ponderada total é dada por:

$$H(p) = H_h(p) \cdot H_l(p) \cdot H_t(p) \cdot H_s(p) \quad (3.8)$$

onde $p = j2\pi f$ é a frequência angular imaginária, sendo j a componente imaginária. A interpretação mais comum desta equação – no domínio da frequência – é que ela descreve o módulo (amplitude) e fase na forma de um número complexo em função de p .

Dentro da equação (3.8), produto $H_h(p) \cdot H_l(p)$ representa o limite da banda da função de transferência, assumindo o mesmo valor para todas as ponderações, exceto para W_j . Por sua vez, o produto $H_t(p) \cdot H_s(p)$ representa a função de transferência ponderada para uma dada aplicação, onde $H_t(p) = 1$ para a ponderação W_j e $H_s(p) = 1$ para as ponderações W_c , W_d e W_e .

Os quadros A.1 e A.2, expostos no anexo A.2, apresentam os valores das ponderações em frequência principais e adicionais, respectivamente, para as bandas de terço de oitava consideradas.

3.2.2.5. Métodos de aplicação da ponderação em frequência

A ponderação em frequência de um sinal pode ser realizada de dois modos: pela análise e aplicação das ponderações em frequência nos espectros de aceleração (Subcap. 2.3.1), ou pela aplicação dos filtros digitais $|H(p)|$ diretamente no registro da aceleração no domínio do tempo, através de ferramentas informáticas.

No primeiro procedimento, começa-se por determinar o espectro de Aceleração vs. Frequência (Fourier) discretizado a larguras de banda de frequência constantes, ou proporcionais – como é o caso considerado das bandas de terço de oitava (Fig. 3.7). Em seguida, aplicam-se as ponderações em frequência expressas nos quadros do anexo A.2, de forma a obter as acelerações ponderadas em frequência para cada banda i (Fig. 3.8). De modo a se obter a aceleração ponderada em frequência total, a_w :

$$a_w = \left[\sum_i (W_i a_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

onde:

W_i é o fator de ponderação para a banda de terço de oitava i , indicada nos quadros A.1 e A.2;
 a_i é o valor eficaz da aceleração para a banda de terço de oitava i (Fig. 3.7).

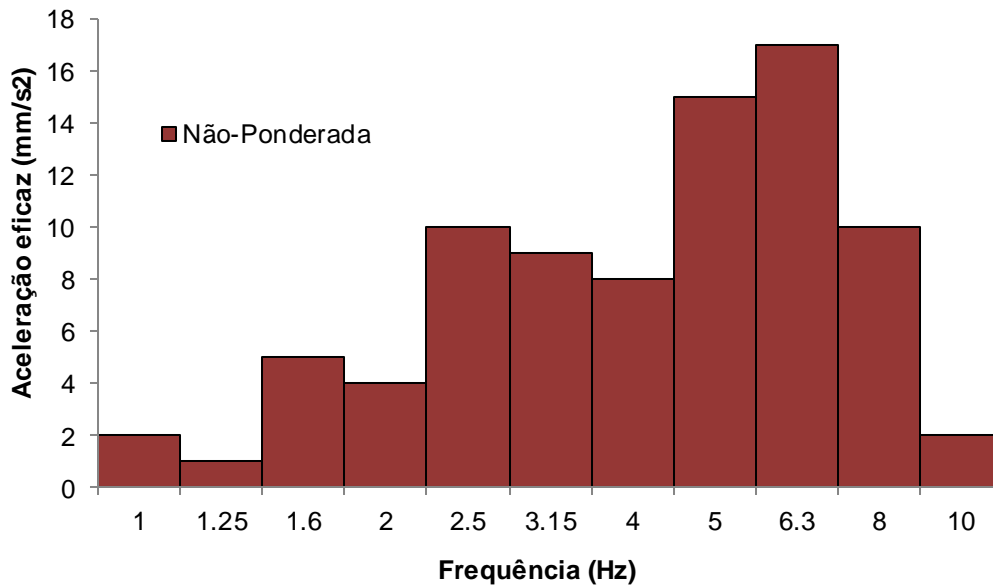


Fig. 3.7 – Espectro de acelerações de largura de banda em terço de oitava.

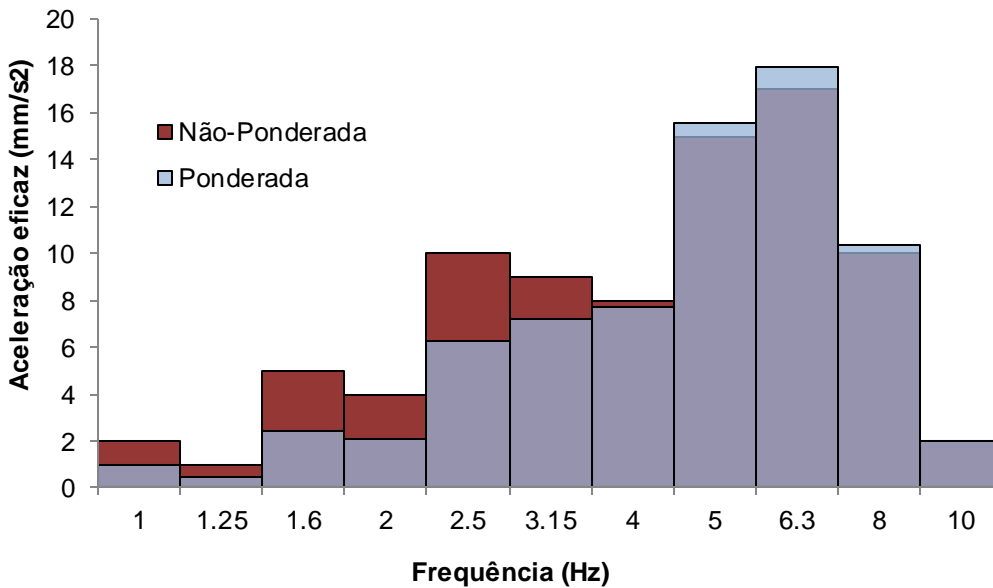


Fig. 3.8 – Espectro de acelerações de largura de banda em terço de oitava após aplicação da ponderação em frequência W_k .

O valor eficaz da aceleração de uma dada banda de terço de oitava, a_i , determina-se aplicando a equação (2.1) a todas as acelerações instantâneas que corresponderem às frequências abrangidas por esse intervalo de largura de banda. No **Quadro 3.6** apresenta-se um exemplo da sua aplicação para as frequências centrais de 4 Hz e 5 Hz, graficamente apoiado pela **Fig. 3.9**.

Quadro 3.6 – Exemplo de transformação de acelerações instantâneas em acelerações eficazes no intervalo de 1/3 de oitava para as frequências centrais de 4 Hz e 5 Hz.

Banda nº	Frequência central (Hz)	Banda de 1/3 de oitava	Frequências (Hz)	Aceleração instantânea (mm/s ²)	Frequências (Hz)	Aceleração instantânea (mm/s ²)	Aceleração eficaz (mm/s ²)	
6	4	de:	3,6	4,5	4,0	3,6	5.7	
			3,55	3,7	5,6	4,1		3,8
		a:	3,8	7,8	4,2	4,2		
			3,9	6,2	4,3	8,9		
			4,47	4,0	3,5	4,4		3,6
7	5	de:	4,5	10,1	5,1	11,4	13.3	
			4,47	4,6	12,5	5,2		13,9
			4,7	14,2	5,3	14,0		
		a:	4,8	13,6	5,4	14,2		
			4,9	12,8	5,5	15,0		
			5,62	5,0	12,9	5,6		14,7

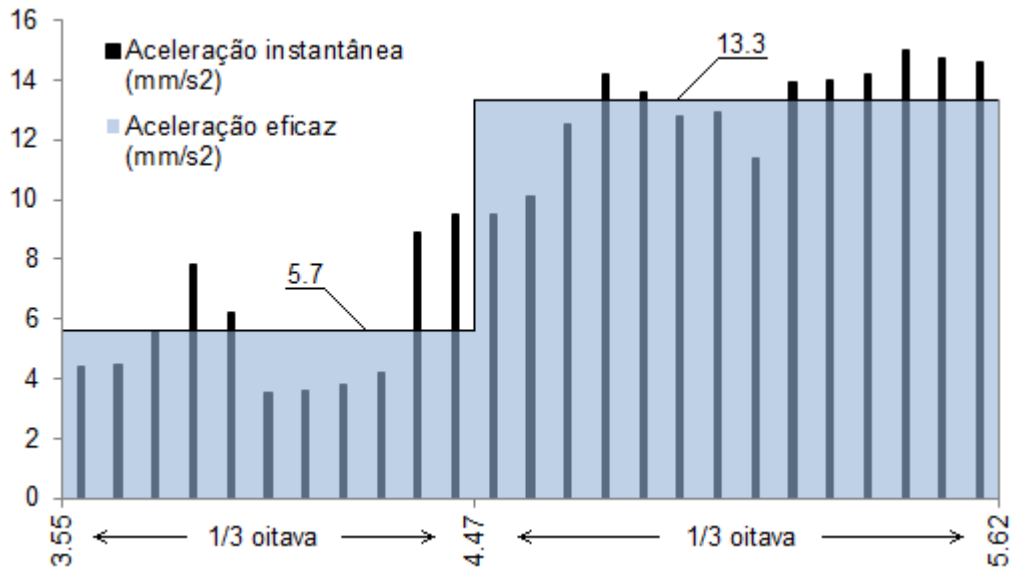


Fig. 3.9 – Exemplo de transformação de acelerações instantâneas em acelerações eficazes no intervalo de 1/3 de oitava para as frequências centrais de 4 Hz e 5 Hz.

O segundo procedimento consiste na aplicação do filtro digital diretamente no registo da aceleração no domínio do tempo através da aplicação algoritmos. Neste processo, optou-se pela utilização do *software MatLab* (exemplos da computação das curvas de ponderação em frequência W_k e W_d demonstrados no **anexo A.3**). No desenvolvimento dos *scripts*, em primeiro lugar, foi necessário definir todas as respetivas funções de transferência H_i de modo a obter a curva característica da função ponderada total em questão – equação (3.8). Neste momento, a função de transferência $H(p)$ (**Fig. 3.10** e **Fig. 3.11**) assume-se como uma resposta complexa no domínio da frequência.

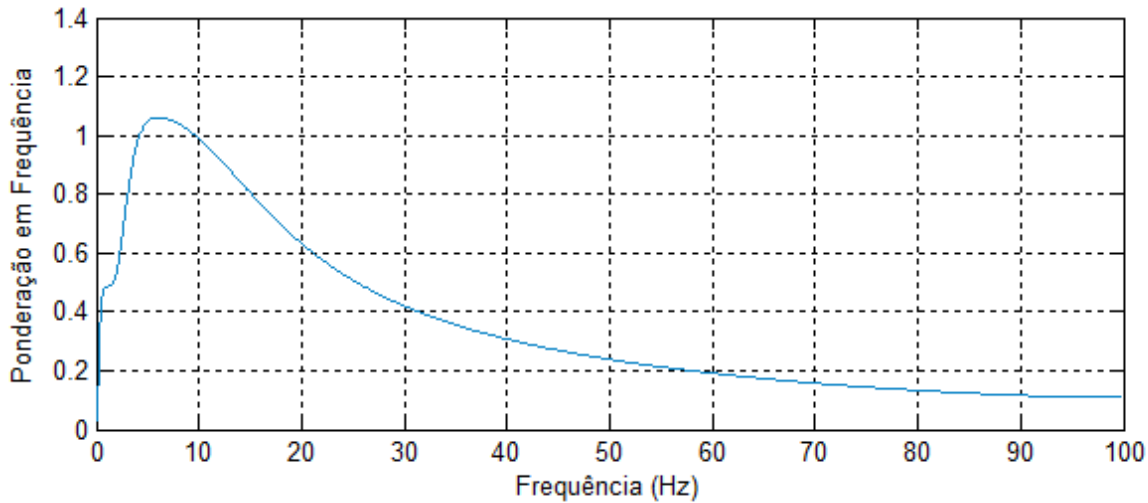


Fig. 3.10 – Representação da curva de ponderação W_k através da sua função ponderada total.

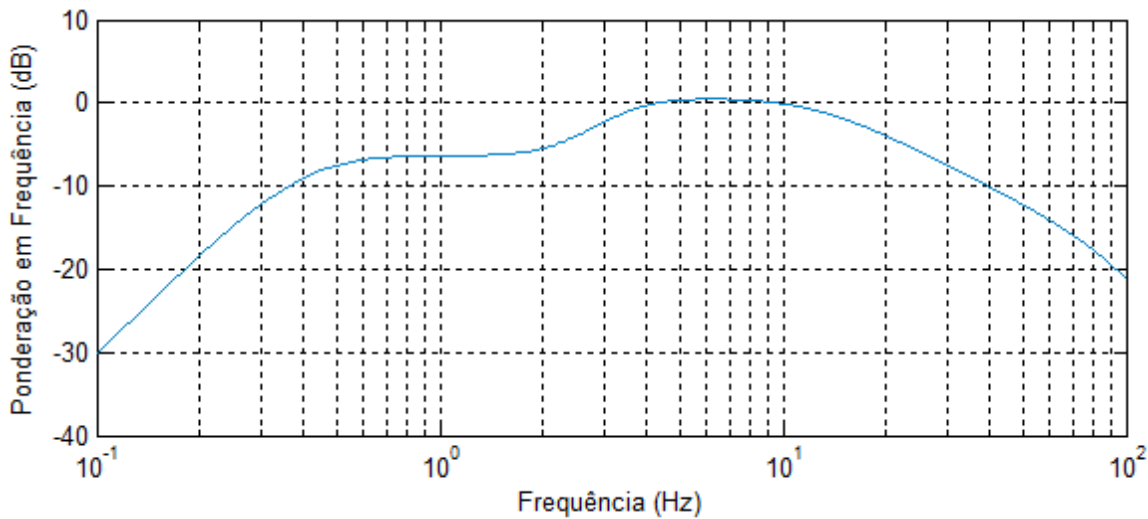


Fig. 3.11 – Representação da curva de ponderação W_k através da sua função ponderada total, numa escala duplamente logarítmica – $[dB] = 20 * \log (H(p))$ – (representação idêntica à da **Fig. 3.5** [4]).

Para permitir a aplicação do algoritmo *filter* – função que filtra uma dada sequência de dados usando um filtro digital definido – é preciso achar uma função de transferência de tempo discreto que corresponda à anterior função complexa.

Tal é possível a partir do algoritmo *invfreqz*, donde se obtêm os polinómios $B(p)$ e $A(p)$, que definem a função $H(p)$ do seguinte modo:

$$H(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{b(1) + b(2)p^{-1} + \dots + b(n+1)p^{-n}}{a(1) + a(2)p^{-1} + \dots + b(m+1)p^{-m}} \quad (3.10)$$

sendo n e m escalares que especificam as ordens desejadas no numerador e denominador, respetivamente.

Finalmente, com base em $B(p)$, $A(p)$ e no registo das acelerações designado, aleatoriamente, por a , é possível “correr” a função $filter(B,A,u)$ que devolve o registo temporal das acelerações ponderadas.

Como exemplo demonstrativo, considere-se uma harmónica definida por $a = 0.001 \cdot \text{sen}(2\pi t)$, de frequência 1 Hz:

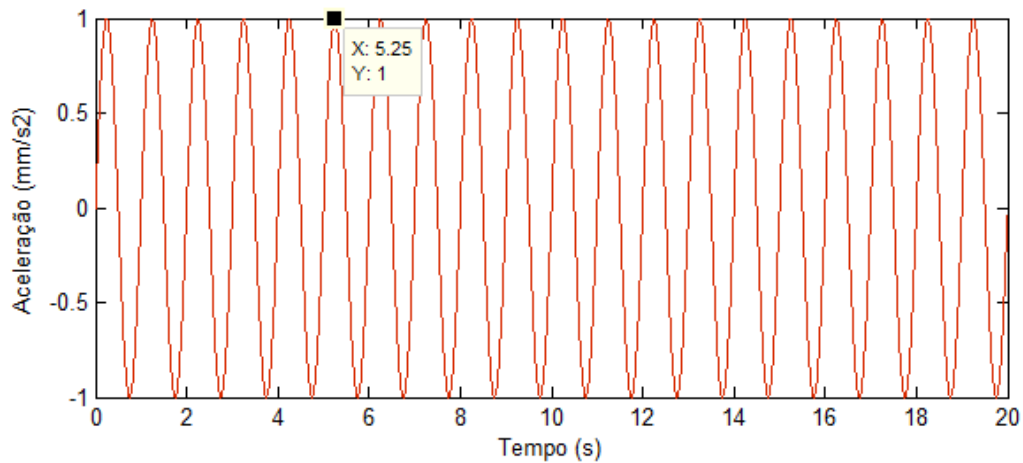


Fig. 3.12 – Registo temporal das acelerações instantâneas.

Aplicando algoritmicamente – $filter(B,A,u)$ - o filtro digital W_k , obtém-se a seguinte onda:

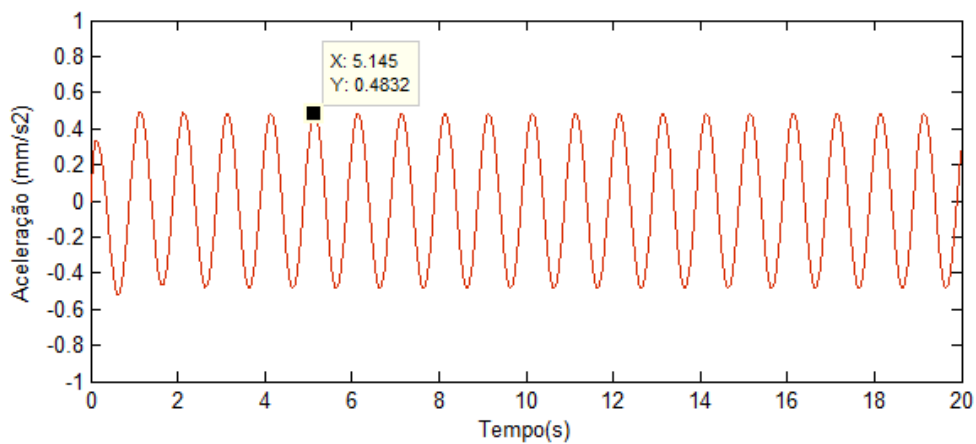


Fig. 3.13 – Registo temporal das acelerações instantâneas ponderadas.

Como se pode observar pelas duas figuras anteriores, a aceleração de pico passou de 1 mm/s^2 para 0.483 mm/s^2 após a aplicação do filtro. Se se atentar nos valores das ponderações de W_k presentes no **quadro A.1** do **anexo A.2**, repara-se que, para a frequência central de 1 Hz , o fator ponderação é de 0.482 , praticamente igual a 0.483 . Esta desprezável discrepância entre estes valores deve-se ao processo de encontrar uma nova ponderação $H(p)$ – equação (3.10) – em função de $B(p)$ e $A(p)$ que se ajuste (quase) perfeitamente à determinada pela equação (3.8).

Sobrepondo ambos os registos, além da esperada diferença entre amplitudes, existe também uma diferença de fase, proveniente da complexidade da função ponderada total:

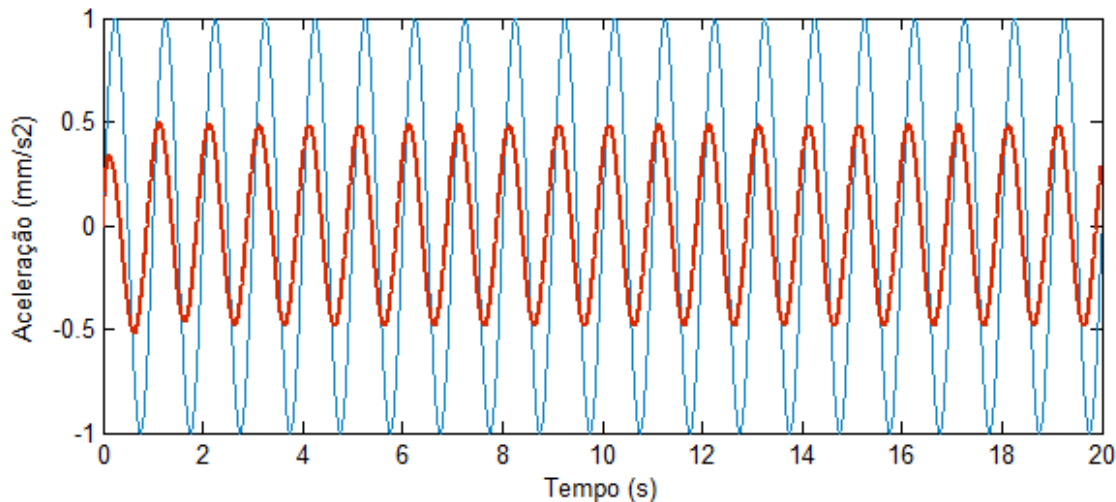


Fig. 3.14 – Sobreposição dos registos das acelerações não ponderada (azul) e ponderada (vermelho).

Recorrendo à função $angle()$ do *MatLab* é possível determinar a diferença de fase imposta pela aplicação do filtro para a frequência de 1 Hz , que é de $0,6658 \text{ rad}$. Analiticamente, ela poderia ser calculada através da equação:

$$\theta = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t \quad (3.11)$$

onde:

- θ = diferença de fase (*rad*);
- f = frequência da onda (*Hz*);
- Δt = desvio temporal (*s*).

3.3. DURAÇÃO DA VIBRAÇÃO

É intuitivamente evidente que a duração de uma vibração tem importância no nível da sua afetação ao homem. Uma ocorrência de 10 segundos irá com certeza ser mais desagradável que outra da mesma magnitude e frequência, mas com duração de apenas 1 segundo. O mesmo se aplica entre exposições de 10 horas em relação a de 10 minutos. Estes pressupostos foram sempre assumidos como óbvios, mas foi muito recentemente que se começou a tentar obter correlações satisfatoriamente sustentadas entre desconforto e tempo de exposição à vibração (meados da década de 60).

Foi a partir dos estudos desenvolvidos por Griffin e Whitham (1977a, 1980a) [12] que se começou verdadeiramente a provar que a relação entre desconforto e tempo de exposição pode variar dependendo também da frequência da vibração, além da magnitude da vibração. Contudo, eles chegaram à conclusão que a qualquer frequência, provocando estímulos de durações previamente definidas, que produziam níveis de desconforto equivalentes aos apresentados pelos vários estímulos que testaram experimentalmente, as respectivas magnitudes não seguiam a relação que seria expectável nas avaliações de magnitude de acordo com as ponderações *r.m.s.* – $a \times t^{0.5} = constante$. Além disso, estes autores repararam também que vibrações com a mesma frequência e magnitude *r.m.s.* provocavam maiores níveis de desconforto consoante maiores fossem os valores das acelerações de pico. Perante tais cenários, propuseram um método de ponderação alternativo simples ao *r.m.s.*, o *root-mean-quad* (*r.m.q.*), que possui uma maior dependência do fator tempo – correspondente a $a \times t^{0.25} = constante$ – e atribuí uma maior importância, relativamente ao *r.m.s.*, aos picos de aceleração.

$$r. m. q. = \frac{1}{T} \left[\int_0^T a(t)^4 dt \right]^{1/4} \quad (3.12)$$

Este método seria o que mais tarde seria usado como base do VDV, valor de dose de vibração (**Subcap. 5.1.1**).

3.4. MAGNITUDE DA VIBRAÇÃO

Quando a magnitude de vibração aumenta, normalmente implica um aumento no desconforto sentido pelo indivíduo exposto à oscilação. Porém, com todas as variáveis a ela implícitas, é difícil de precisar qual o tipo de relação desconforto-magnitude. O principal desenvolvimento neste campo foi conseguido através da determinação da lei de potência de S.S. Stevens (1975), em que a magnitude psicofísica, ψ , do estímulo está relacionada com a sua magnitude física, φ , pela expressão [6]:

$$\psi = k\varphi^n \quad (3.13)$$

A constante de proporcionalidade k depende do tipo de estimulação e das unidades de mensuração empregadas. Portanto, aplicando ao caso em análise, o aumento da sensação de desconforto é determinado pelo valor do expoente n , que é expectável que seja constante consoante cada tipo de estímulo. Existem dois métodos para determinar o valor deste expoente: **método de estimação de magnitude**, no qual os experimentados atribuem estimações numéricas da intensidade subjetiva com sentida na exposição a dois estímulos, e **método da produção de magnitude**, onde os investigadores vão ajustando a intensidade física dum estímulo até que ele seja sentido subjetivamente, por exemplo, pelo dobro dessa intensidade fixa. Todavia, em ambos os métodos, como é óbvio, existe sempre alguma certa incerteza na determinação dos resultados experimentais devido às condicionantes inerentes das próprias configurações experimentais, pelo que podem surgir valores do expoente distintos para o mesmo tipo de estímulo. Por exemplo, muitos autores tentaram através destes métodos, e doutros, determinar valores para o expoente da equação (3.13) de forma a relacionar a magnitude e sensação no caso de exposição a vibração de corpo inteiro vertical em indivíduos sentados [6]. A maioria dos resultados indicam um valor a rondar a unidade para um intervalo de frequências entre 2 Hz a 80 Hz.

O que se pode inferir do que foi dito neste subcapítulo é que, sim, a magnitude da vibração afeta o modo como cada sujeito reage e/ou experiencia a vibração, apenas não se sabe ao certo a proporcionalidade sua relação. Contudo, muitos foram os autores que a tentaram determinar [6]. O que importa aqui sublinhar é a enorme influência que a variabilidade subjetiva tem na forma como cada um responde à exposição. É, no entanto, intuitivo que a partir de uma determinada magnitude, não existe ninguém que consiga suportar o nível de vibração por muito tempo sem sentir desconforto severo ou sofrer algum tipo de injúria.

3.5. A SUBJETIVIDADE DA RESPOSTA HUMANA

É impossível separar a sensibilidade humana à vibração do conceito de *variabilidade* e/ou *subjectividade*. A forma como cada indivíduo é afectado pelas vibrações é, até certo ponto, subjetiva e inerente às características bio e fisiológicas do próprio (variabilidade *inter-subjetiva*). Reforçando ainda mais a afirmação inicial, o mesmo indivíduo pode experimentar diferentes níveis de desconforto ao longo da exposição se alterar a sua postura corporal, posição ou orientação (variabilidade *intra-subjetiva*). Por isso, a fixação de limites de aceitabilidade de níveis de vibração em determinados valores não pode ser vista como algo imperativamente estipulado ou imutável, impreterível de transpor. A postura corporal, a severidade, a direção, a duração e o conteúdo em frequência da vibração são os outros factores que influenciam a resposta à vibração. O “extravasamento” de variabilidade na resposta humana à vibração retira o valor às opiniões pessoais de indivíduos singulares e torna essencial recair o estudo sobre dados estatísticos que contenham respostas de uma ampla amostra de sujeitos e, a partir daí, retirar as devidas ilações e delinear procedimentos mais realistas de análise, que conduzam a conclusões com maior probabilidade de serem válidas. Isto requer, portanto, um modelo experimental que permita o uso da estatística no processo de validação de hipóteses [6].

3.5.1. VARIABILIDADE INTER-SUBJETIVA

Não existem duas pessoas iguais, quer fisicamente, quer mentalmente. As diferenças físicas entre indivíduos têm influência na resposta dinâmica dos seus corpos, e a variabilidade na transmissão da vibração daí resultante torna expectável o aparecimento de diferenças na forma como ela afeta o conforto, o desenvolvimento de atividades ou a saúde de cada sujeito. A idade e o género, uma vez que implicam diferentes respostas biodinâmicas e diferentes sensibilidades (decorrentes da formação de expectativas, de exposições passadas a vibrações, ou da própria personalidade), podem também ter influência na sensibilidade de cada indivíduo, bem como o seu estado de saúde e físico.

3.5.2. VARIABILIDADE INTRA-SUBJETIVA

Apesar de o tamanho do corpo e a sua massa influenciarem a sua resposta à vibração, são as alterações na postura corporal que têm a maior influência. Alterações da postura corporal, posição e orientação (principalmente relativamente ao eixo de vibração mais severo) são os principais factores capazes de influenciar o nível de desconforto sentidos pelo indivíduo quando exposto a vibrações. Por exemplo, estando o sujeito de pé, fletir as pernas pode aliviar substancialmente o desconforto sentido, isto porque tal postura diminui a transmissão da maioria das frequências da vibração vertical à cabeça. Outro exemplo da influência da posição das pernas é a estabilidade postural que se ganha quando se aumenta a separação lateral entre os pés ao longo do eixo de vibração dominante, quando se está exposto a vibração horizontal de baixa frequência.

4

MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES

É extraordinariamente essencial que a vibração seja mensurada de forma adequada e precisa para que a avaliação do seu nível de incomodidade ao homem seja realista, de forma a apurar eficazmente os perigos que advêm da sua exposição. A eficácia das medições está intimamente ligada com a qualidade dos transdutores de vibração e com as metodologias práticas adotadas.

4.1. APARELHOS DE MEDIÇÃO

O instrumento de medição universalmente mais usado no registo de vibrações é o acelerómetro piezoelétrico triaxial (**Fig. 4.1** e **Fig. 4.2**), aparelhos de elevada sensibilidade às vibrações. A frequente opção pela utilização de acelerómetros piezométricos prende-se com a razão de apresentarem, no global, melhores características e maior estabilidade nas medições, relativamente a outros tipos de transdutores. Outra vantagem é o facto de apresentar uma resposta linear ao longo da gama de frequências mais sensíveis ao homem. Para que as vibrações mensuradas pelos acelerómetros sejam registadas é necessário conectá-los a registadores de movimentos (**Fig. 4.3**).



Fig. 4.1 – Acelerómetro triaxial (Brüel & Kjær) [13].



Fig. 4.2 – Transdutor de assento que contém três acelerómetros independentes que medem simultaneamente o nível de vibração nos três eixos ortogonais – X, Y e Z (Brüel & Kjær) [13].



Fig. 4.3 – Registador de vibração utilizado pelo Núcleo de Vibrações e Monitorização – ViBest -, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (GeoSIG, modelo GSR-18, 18 bits de resolução) [14].

Estes registadores funcionam como sistemas de aquisição de dados, que poderão ser posteriormente acedidos para consulta, e requerem uma prévia programação (**Subcap. 4.2.1**), com recurso a um computador. Podem ser programados para funcionarem autonomamente em contínuo ou em intervalos pré-definidos.

Existem muitos acelerómetros disponíveis no mercado, de vários tamanhos e pesos. No entanto, é preferível tentar obter um cujas dimensões e peso sejam suficientemente pequenas para a sua presença não alterar/prejudicar o registo da vibração a ser medida. O rigor ou precisão da medição das vibrações é dependente quer da qualidade do acelerómetro, quer do equipamento de registo utilizado.

4.2. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

No caso da avaliação do nível de vibrações em estruturas, em condições normais, as medições das vibrações devem ser efetuadas nas superfícies estruturais que poderão sustentar o corpo humano. Em circunstâncias especiais, poderão ter que ser executadas algumas medições fora da estrutura ou nalgumas outras superfícies que não sejam propriamente pontos de transmissão direta de vibração ao homem. No entanto, segundo a BS 6472 (1992) [3] e a correspondente ISO 2631-2 (1989) [5], quando as medições são realizadas a partir de posições que não sejam de transmissão direta de vibração ao corpo, devem ser feitas modificações na função de transferência entre o ponto de mensuração e o ponto de transmissão da vibração ao corpo. É essencial que essas modificações sejam especificadas pelo investigador em questão. Quando as medições diretas não forem praticáveis, a vibração pode ser medida numa parte rígida da estrutura, como o seu centro de rotação ou de gravidade. No entanto, a posterior avaliação desses dados em termos de resposta humana irá requerer cálculos adicionais e conhecimento da dinâmica estrutural do sistema em avaliação [4]. Quando a situação assim o exige, é recomendado tentar abranger toda a área da planta da estrutura na análise, conforme está apresentado esquematicamente na figura seguinte, onde as cruzes vermelhas representam pontos de medição:

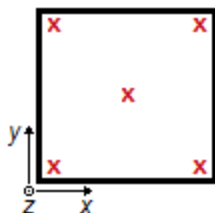


Fig. 4.4 – Planta hipotética de uma estrutura.

Se as estruturas em questão tiverem mais pisos (superiores ou inferiores) para além do térreo, é recomendado que se façam medidas nos vários pisos no sentido de avaliar a evolução da amplitude das vibrações em altura e, desse modo, determinar uma eventual amplificação das vibrações provocada pela estrutura em si.

As medições devem, preferencialmente, ser realizadas consoante as disposições dos três eixos ortogonais apresentadas no **subcapítulo 3.1** e, quando individualmente anotadas, deve de igual modo fazer-se referência a qual eixo e qual situação se referem para que a comparação entre os valores registados e os valores “limite” seja inequívoca (**Subcap. 5.2.1**). Durante as medições, é aconselhado colocar os aparelhos de mensuração sempre com a mesma orientação em relação ao referencial escolhido para representar a planta estrutural (**Fig. 4.4**), devendo esta ser previamente estipulada e anotada para futuramente não suscitar quaisquer dúvidas.

4.2.1. REGISTOS DE MEDIÇÃO

Como foi previamente mencionado no **capítulo 2**, em geral, a vibração em estruturas devem ser mensuradas em termos de aceleração. Contudo, nalguns casos como em eventos de natureza impulsiva, pode vir a ser mais conveniente medir em termos de velocidade ou deslocamento, de modo a melhor identificar os valores de pico [3].

De acordo com a ISO 2631-2 e a correspondente BS 6472, a técnica de mensuração mais adequada será a que o registo é efetuado sem qualquer filtração, a partir do qual os valores de análise desejados (**Cap. 5**) possam vir a ser futuramente determinados. Já a NP ISO 2631-1 recomenda que os sinais a registar para posterior análise deverão ser filtrados por um filtro passa-baixo com uma atenuação de -3 dB na frequência de corte, sendo esta aproximadamente 1,5 vezes a frequência de interesse mais alta, a fim de maximizar a relação sinal/ruído.

A resposta em frequência do transdutor de vibração, e do respetivo condicionador de sinal, deve ser adequada à gama de frequências especificada na análise de vibrações em estruturas no que respeita ao conforto humano. No delinear da programação das medições existem dois parâmetros relevantes a delimitar: a duração do registo e a frequência de aquisição.

4.2.1.1. Duração da medição

Normalmente, o tempo de medição é majorado de modo a obter um registo mais representativo e fiável da vibração a analisar. O ponto 5.5 da NP ISO 2631-1 declara que a duração da medição deverá ser a suficiente para assegurar uma precisão estatística razoável e que a vibração medida é típica relativamente à natureza da exposição que está a ser avaliada. Consta ainda neste ponto que quando a exposição completa consistir em vários períodos de diferentes características, o recomendado é fazer uma análise individualizada de cada um desses períodos.

4.2.1.2. Frequência de aquisição

A frequência de aquisição (f_s), ou de amostragem, define o número de amostras pretendido por unidade de tempo, geralmente por segundo (s), no processo de conversão do sinal contínuo da vibração num registo discreto. Para sinais no domínio do tempo, a unidade preferencial para quantificar a frequência de aquisição é o *Hertz* (Hz). Por exemplo, se se definir uma frequência de amostragem de 200 Hz (**Fig. 4.5**), o registo das magnitudes da vibração será registado de $0,005$ em $0,005$ segundos (período de aquisição - $T_s=1/f_s$).

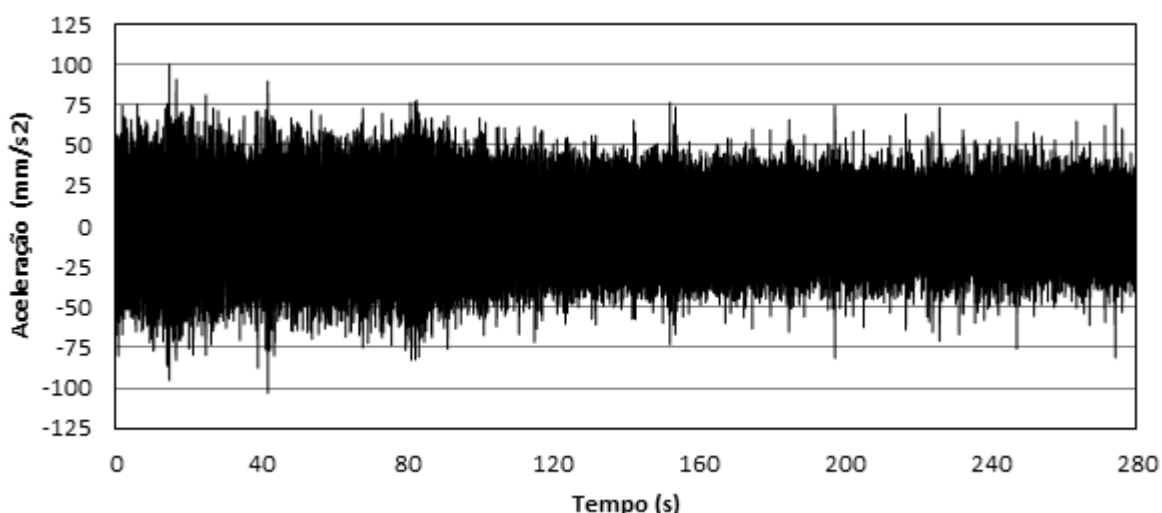


Fig. 4.5 – Exemplo gráfico de um registo de medição com f_s de 200 Hz .

Não foi ao acaso que o exemplo dado foi de 200 Hz. Como já se sabe, a gama de frequências de vibração em análise na presente dissertação vai de 0,1 Hz a 80 Hz. Tal como o explicado no **subcapítulo 2.3**, para um sinal poder ser analisado em termos de conteúdo em frequência, é necessário aplicar-lhe a transformada de *Fourier*. O que o teorema de Nyquist-Shannon afirma é que é viável uma perfeita reconstrução de um sinal após este ter sido “transformado” (com a aplicação da transformada inversa, cujo algoritmo em *MatLab* é *iffi*), se a frequência de aquisição for maior que o dobro da frequência máxima exibida por esse mesmo sinal, ou, por outras palavras, quando a frequência de *Nyquist* ($f_s/2$) supera a frequência máxima do sinal em questão [15]. Se tiverem sido usadas frequências de amostragem inferiores, a informação que define o sinal original pode não ser completamente recuperável através do sinal já “transformado”. Isto significa que, na medição de vibrações, os aparelhos têm que ser programados para captar oscilações com frequência máxima maior ou igual ao dobro de 80 Hz. O procedimento habitual é limitar o registo de vibrações a uma frequência de aquisição de 200 Hz para posteriormente permitir perfeitas reconstruções de sinais até uma frequência máxima de 100 Hz.

4.2.2. PONTOS DE MEDIÇÃO

No âmbito da análise dos efeitos da vibração no homem, esta deverá ser medida de acordo com um sistema de coordenadas cuja origem se situe num ponto considerado de entrada de vibração no corpo, salvo especiais exceções (**Subcap. 4.2**). Os principais sistemas de coordenadas, centrados na base de apoio ao corpo, estão definidos no **subcapítulo 3.1.1**.

De acordo com a NP ISO 2631-1, existem alguns aspetos a ter em conta acerca da localização dos transdutores nos pontos de medição, no que respeita à sua direção e colocação:

Direção:

- os transdutores localizados num ponto de medição devem ser posicionados ortogonalmente;
- os acelerómetros de translação, quando individuais, devem estar tão próximos quanto possível, orientados segundo eixos diferentes num único ponto de medição;
- se não for possível obter um alinhamento preciso entre os transdutores e os eixos basicêntricos preferidos, é permitido um desvio de 15° relativamente aos eixos escolhidos, quando necessário; para uma pessoa sentada num assento inclinado, a orientação relevante deverá ser a dos eixos do corpo, não sendo o eixo z necessariamente vertical; a orientação dos eixos baricêntricos relativamente ao campo gravitacional deverá ser anotada.

Colocação:

- os transdutores devem estar localizados de forma a indicar a vibração na interface entre o corpo e a fonte de vibração;
- posição sentado: as medições na superfície de suporte do assento deverão ser feitas por baixo das tuberosidades isquiais; as medições nas costas do assento deverão ser realizadas na área principais de apoio ao corpo, de preferência, na interface com o corpo (quando tal for de difícil execução, as medições poderão ser realizadas na estrutura por detrás das costas do assento, havendo depois a necessidade de corrigi-las de acordo com a transmissibilidade do material almofadado); as medições nos pés deverão ser feitas onde estes assentam na superfície de apoio;
- posição em pé: as medições nos pés deverão ser efetuadas nas superfícies onde estes assentam com mais frequência;
- posição deitada: normativamente considera-se como superfícies de suporte a área sob a pélvis, as costas e a cabeça.

As vibrações transmitidas ao corpo por superfícies rígidas podem ser medidas nesta superfície de suporte, em local imediatamente adjacente à área de contacto entre o corpo e a superfície (usualmente a menos de 10 centímetros do centro dessa área). A vibração que é transmitida ao corpo por um material não rígido ou resiliente – por exemplo, almofadas de assento – deverá ser medida com o transdutor interposto entre a pessoa e as principais áreas de contacto com a superfície. Tal deve ser conseguido fixando os transdutores com uma montagem adequada, que não deverá alterar significativamente a distribuição de pressão na superfície do material resiliente. Para medições em superfícies rígidas, o indivíduo deve adotar a sua posição habitual.

5

METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO

Neste capítulo dar-se-á principal foco às metodologias de avaliação dos níveis de vibração em estruturas, do ponto de vista do conforto humano. Os procedimentos aqui explanados, devidamente referenciados, serão fundamentados nos descritos nas normas BS 6472 (1992) [3], BS 6841 (1987) [2], NP ISO 2631-1 (2007) [4] e ISO 2631-2 (1989) [5]. Todavia, para a sua compreensão ser totalmente adquirida pelo leitor, descrever-se-á previamente quais os critérios de análise que regem os métodos de avaliação de cada uma das normas.

5.1. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO GENÉRICAS

5.1.1. ANÁLISE DA ISO 2631-1 (1997)

A versão portuguesa (2007) da norma ISO 2631-1 (1997) intitulada como *Vibrações mecânicas e choque – Avaliação da exposição de corpo inteiro a vibrações – Parte 1: Requisitos gerais*, aplica-se a fenómenos de vibração nas três direções ortogonais (**Fig. 3.1 e 3.3**) e tem como principal objetivo a definição de métodos de quantificação de vibração em regime de corpo inteiro relativamente à saúde, conforto, probabilidade de perceção da vibração e incidência ao enjoo ao movimento. No âmbito a que esta dissertação se propõe, os efeitos relativos ao enjoo ao movimento não serão considerados, uma vez que se trata de um tópico irrelevante na análise de vibrações de estruturas.

Da sua introdução cita-se que “esta parte da ISO 2631 não contém limites de exposição às vibrações. Contudo, os métodos de avaliação foram definidos de modo a que pudessem ser usados como base para limites que podem ser preparados individualmente”. Estas orientações para a fixação de valores “limite”, expostas em termos numéricos para evitar ambiguidades e incentivar avaliações exatas, estão descritas em dois anexos (B e C) – um dedicado a efeitos na saúde e outro a efeitos no conforto e perceção -, que apresentam recomendações/orientações simples e apropriadas para a sua aplicação geral, não isenta de algumas limitações. Também não é abrangido por esta parte da norma potenciais efeitos da vibração intensa no desempenho de tarefas, porque “tal orientação depende, de um modo fulcral, dos detalhes ergonómicos relacionados com o operador, com a situação e com a conceção da tarefa”. Dependendo do tipo de efeito e da direção em análise, são apresentados diferentes fatores multiplicativos a aplicar simultaneamente com a ponderação em frequência das acelerações (**Anexo A.4**).

Cada um dos métodos de avaliação especificados nesta norma requer a prévia ponderação em frequência do registo temporal de acelerações. Aqui, a ponderação em frequência é fornecida, quer através de tabelas (**Anexo A.2**) - apenas se a análise for em bandas de 1/3 de oitava -, quer através de funções de transferência – que podem ser aplicadas através de filtros digitais (**Subcap. 3.2.2**).

A ISO 2631-1 particulariza um **método básico de avaliação de vibração** usando o valor eficaz – *r.m.s.* – ponderado da aceleração, expresso em metros por segundo quadrado – m/s^2 – para a aceleração linear (i.e. de translação) e em radianos por segundo quadrado – rad/s^2 – para a aceleração angular (i.e. de rotação). A aceleração eficaz ponderada pode ser calculada do seguinte modo, no domínio do tempo, para registos contínuos:

$$a_{ef} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (5.1)$$

onde:

$a_w(t)$ é a aceleração ponderada como função contínua no domínio do tempo, em ms^{-2} ou $rads^{-2}$;
T é a duração da medição, em segundos (s).

Para registos discretos (como, por exemplo, os obtidos através de métodos de mensuração digitais – **Subcap. 4.2.1**) de N medições, o integral da equação anterior desaparece para dar lugar a um somatório de parcelas [4]:

$$a_{ef} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

onde:

$a_i(t)$ é o registo digitalizado da aceleração ponderada, em ms^{-2} ou $rads^{-2}$;
N é o número de pontos do registo temporal digital.

Como Griffin afirma no seu livro [6], este método é bastante apropriado na análise de vibrações “bem comportadas”, ou seja, de vibrações que permaneçam num estado periódico constante ou aleatoriamente estacionário durante longos períodos de tempo. Para decidir a adequabilidade deste método, a norma ISO 2631-1 baseia-se na definição de fator de crista. Este fator é definido como o módulo da relação entre o valor de pico do sinal da aceleração ponderado em frequência (máximo ou mínimo, determinado dentro do mesmo intervalo de tempo da medição usado para definir o valor eficaz) e o seu valor eficaz:

$$Factor\ de\ Crista = \left| \frac{aceleração\ de\ pico}{aceleração\ r.\ m.\ s.} \right| \quad (5.3)$$

Este fator não indica necessariamente a severidade da vibração, mas não existe dúvida de que, se o factor de crista for relativamente alto, a aceleração eficaz calculada através das equações (5.1) e (5.2) torna-se numa mensuração pouco ou nada útil na avaliação da severidade de vibração, havendo a necessidade de recorrer a métodos de avaliação adicionais. Foi assim definido que, para vibrações com fatores de crista iguais ou inferiores a 9, o método básico de avaliação seria, no geral, suficiente. Contudo, a irracional utilização deste método básico de avaliação pode conduzir à subestimação dos efeitos, relativamente ao desconforto, causados no homem perante determinados tipos de vibração, em especial para as que derivam de choques ocasionais ou constituem vibrações transientes, mesmo quando o seu fator de crista é inferior a 9. Nestes casos mais questionáveis, é de igual modo recomendado recorrer aos procedimentos de avaliação adicionais.

A presente norma apresenta dois métodos complementares ao básico: o **método do valor eficaz em contínuo** e o **método da dose de vibração de quarta potência (VDV)**.

O **método do valor eficaz – r.m.s. – em contínuo** tem em consideração os choques ocasionais e as vibrações transitórias ao utilizar no seu sistema um tempo de integração curto, $\tau = 1$ segundo, conforme recomendado na ISO 2631-1. Define-se, de forma linear, como:

$$a_{ef}(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{1/2} \quad (5.4)$$

onde:

$a_w(t)$ é a aceleração instantânea ponderada em frequência - ms^{-2} ;

τ é o tempo de integração para a média em contínuo - s ;

t é o tempo (variável de integração) - s ;

t_0 é o tempo de observação (tempo instantâneo) - s .

A equação anterior pode ser aproximada por outra integração, desta feita exponencial, como definido na ISO 8041:

$$a_{ef}(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{t_0} [a_w(t)]^2 \exp \left[\frac{t - t_0}{\tau} \right] dt \right\}^{1/2} \quad (5.5)$$

A diferença dos resultados obtidos entre as duas equações é muito pequena quando aplicadas a choques de curta duração, relativamente ao tempo τ , e algo maior (até 30%) quando aplicadas a choques e vibrações transientes de maior duração.

Este método é usado para definir a amplitude da vibração como sendo o valor máximo da vibração transiente – *MTVV* –, determinado como o máximo de $a_w(t_0)$ durante o período de medição T :

$$MTVV = \max [a_w(t_0)] \quad (5.6)$$

O segundo método adicional designa-se como **método da dose de vibração de quarta potência**. Caracteriza-se como sendo mais sensível aos picos (próprios das vibrações de natureza transiente ou impulsiva), comparativamente com o método básico, devido à aplicação da quarta potência no registo temporal da aceleração, em detrimento da segunda potência. Para alguns autores, um dos aspetos que contribui para o seu cepticismo acerca da validade da aplicação deste método, é o facto do valor da dose de vibração – *VDV* – dele resultante não ter qualquer interpretação física, ao contrário da aceleração *r.m.s.* No entanto, já foi provado existir uma relativamente boa correlação entre este método de análise e a sensibilidade humana à vibração, demonstrada por estudos experimentais de exposição a todos os tipos de vibração [16]. Resumindo, o *VDV* é a uma mensuração de carácter acumulativo que quantifica a vibração transmitida ao corpo humano durante um certo período. É expresso em metros por segundo elevado a 1,75 – $m/s^{1,75}$ – ou em radianos por segundo elevado a 1,75 – $rad/s^{1,75}$ –, é determinado do seguinte modo, para registos contínuos:

$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{1/4} \quad (5.7)$$

onde:

$a_w(t)$ é a aceleração ponderada em frequência como uma função continua no tempo - ms^{-2} ;
 T é a duração da medição - s .

Para registos temporais discretos de acelerações ponderadas, a fórmula de cálculo do VDV será:

$$VDV = \left[\frac{1}{f_s} \sum_{i=1}^N a_i^4 \right]^{1/4} \quad (5.8)$$

onde:

a_i assume os valores do sinal registado, ponderados em frequência - ms^{-2} ;
 f_s é a frequência de aquisição (**Subcap. 4.2.1.2**) - Hz ;
 N é o número de pontos do sinal medido.

Quando a exposição às vibrações consiste em dois ou mais períodos – i.e. diferentes amplitudes –, o valor da dose da vibração para a exposição total deverá ser calculado através de:

$$VDV_{total} = \left(\sum_i VDV_i^4 \right)^{0,25} \quad (5.9)$$

De forma empírica, foram desenvolvidos rácios de comparação entre o método básico e os adicionais para averiguar se, numa hipotética avaliação, será importante a inclusão (de pelo menos um) dos métodos adicionais na análise da vibração, respeitante à sua afetação à saúde ou conforto do homem. Deste modo, são sugeridas as seguintes relações, que, quando excedidas, implica-se forçosamente a utilização do método em questão, dependendo de qual deles estiver a ser utilizado:

$$\frac{MTVV}{a_w} = 1,5 \quad (5.10)$$

$$\frac{VDV}{a_w T^{0,25}} = 1,75 \quad (5.11)$$

Nenhuma destas duas relações é justificada na norma.

É de realçar veemente que o método básico deve ser sempre usado para a avaliação da vibração, nos termos propostos. Se, por ventura, existir a necessidade da utilização de um dos métodos adicionais, ambos os valores respeitantes, quer ao método básico, quer ao adicional, devem ser indicados no relatório a elaborar.

Na combinação de vibrações em mais que uma direção, em termos de aceleração eficaz, a presente norma indica que para cada ponto de medição, o valor total da vibração nesse ponto deve ser calculado através da raiz da soma dos quadrados (i.e. soma vetorial):

$$a_v = \left(k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2 \right)^{1/2} \quad (5.12)$$

em que:

a_{wx} , a_{wy} , a_{wz} são os valores eficazes das acelerações ponderadas relativas aos eixos ortogonais x, y e z, respetivamente - ms^{-2} ;

k_x , k_y , k_z são fatores multiplicativos (**Anexo A.4**).

Na norma é especificado que se recomenda a utilização do valor total de vibração a_v na análise referente ao conforto. Numa análise aos efeitos na saúde, este mesmo procedimento é válido se não existir um eixo dominante de vibração. Para valores em termos de *VDV*, não é feita qualquer especificação acerca de vibrações multiaxiais.

Como foi enunciado inicialmente na introdução à norma NP ISO 2631-1, são seus integrantes dois anexos que fornecem recomendações/orientações: um para os efeitos da vibração na **saúde** e outro para os efeitos da vibração no **conforto** e na **percepção**. Há que ressaltar o facto de a intenção primordial desta norma ter sido atender à análise de vibrações em veículos ou formas similares de transmissão mecânica de vibração. Logo, a referência aqui usada para “conforto” não é exatamente a mesma que se refere a conforto no contexto da exposição a vibrações em estruturas. Esta, por sua vez, refere-se à capacidade de continuar a desenvolver naturalmente atividades sem as distrações induzidas pela ocorrência de vibração e vai ser pormenorizadamente abordada nas análises das normas ISO 2631-2 e BS 6472 (**Subcap. 5.2**).

No anexo B, que respeita à avaliação das vibrações sobre os seus efeitos na **saúde**, é fornecido pela NP ISO 2631-1 um gráfico (**Fig. 5.1**) baseado em duas equações – (**5.13**) e (**5.14**) – que correlacionam magnitudes de acelerações ponderadas com durações de exposição, com diferentes dependências do parâmetro tempo.

Partindo do princípio de que a resposta vibratória se relaciona com a energia, duas exposições diárias de duração diferente podem considerar-se equivalentes quando:

$$a_{w1} \cdot T_1^{0,5} = a_{w2} \cdot T_2^{0,5} \quad (5.13)$$

em que:

a_{w1} e a_{w2} são os valores eficazes ponderados das acelerações para a primeira e segunda exposições, respetivamente - ms^{-2} ;

T_1 e T_2 são as correspondentes durações para a primeira e segunda exposições.

Ainda segundo esta norma e conforme o que foi explicado introdutoriamente no **subcapítulo 3.3**, existem outros estudos que apontam para uma dependência temporal de acordo com:

$$a_{w1} \cdot T_1^{0,25} = a_{w2} \cdot T_2^{0,25} \quad (5.14)$$

A recomendação presente na norma baseia-se fundamentalmente na análise de períodos de exposições de 4 a 8 horas - nos quais existe a maioria das observações ocupacionais e onde as zonas orientadoras de precaução com a saúde decorrentes das duas equações anteriores coincidem - referindo que exposições abaixo desta gama não foram ainda claramente documentadas no que respeita aos efeitos da vibração na saúde, pelo que a análise de exposições em períodos menos longos terá de ser tratada meticolosamente. A zona a tracejado na **figura 5.1** indica o campo de valores referência, a partir dos quais existe a necessidade de se tomarem precauções no que se refere a potenciais riscos para a saúde, sendo de prever uma probabilidade de ocorrência de lesões acima dessa zona.

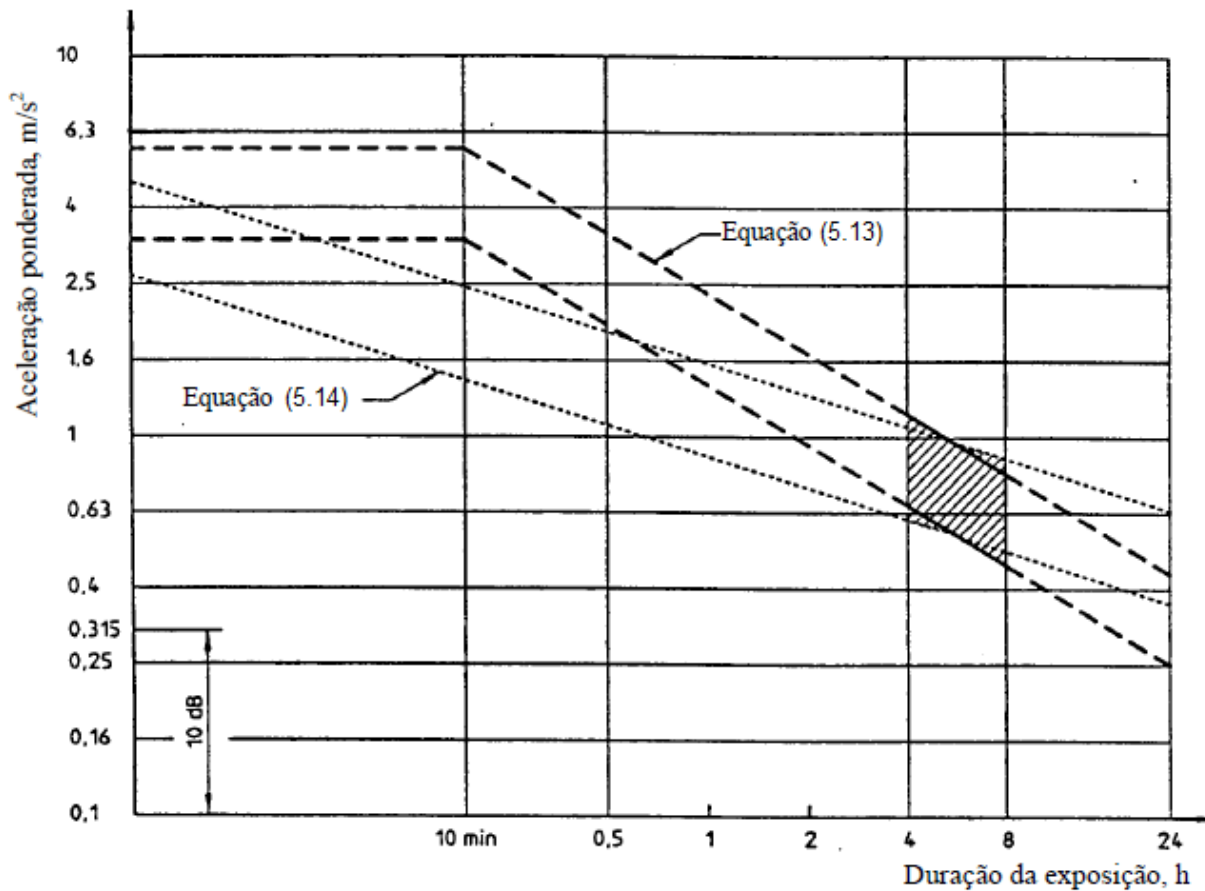


Fig. 5.1 – Orientação de exposições à vibração no que se refere à saúde [4].

As curvas correspondentes aos limites inferior e superior da zona definida pela equação (5.14) da figura anterior foram obtidas recorrendo a um método de estimativa do valor de dose de exposição a vibrações – $eVDV$ –, assim definido:

$$eVDV = 1,4 a_w T^{0,25} \quad (5.15)$$

onde:

a_w é o valor eficaz da aceleração, ponderado em frequência - ms^{-2} ;
 T é a duração da exposição – s.

Os valores $eVDV$ utilizados foram 8,5 e 17 para o limite inferior e superior, respetivamente, mas não é dada qualquer indicação de como estes valores foram escolhidos/determinados.

Na análise da vibração quanto à sua afetação à **saúde** ou ao **conforto**, quando a exposição a vibrações decorre durante dois ou mais períodos com diferentes amplitudes e durações, é necessário achar a amplitude (aceleração) de vibração equivalente, correspondente à duração total da exposição. Dependendo da metodologia escolhida, esse valor calcula-se num dos seguintes modos:

$$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{wi}^2 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{0,5} \quad (5.16)$$

ou:

$$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{wi}^4 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{0,25} \quad (5.17)$$

com:

$a_{w,e}$ o valor eficaz da aceleração de vibração equivalente - ms^{-2} ;

a_{wi} o valor eficaz da vibração para uma exposição de T_i - ms^{-2} .

Sobre os efeitos da vibração no **conforto**, são apresentados no anexo C valores que pretendem dar indicações aproximadas de reações prováveis consoante a amplitude das vibrações. Estes valores foram determinados mediante estudos de exposição a vibrações em transportes públicos:

Quadro 5.1 – Reações prováveis mediante os valores de aceleração eficaz [4].

Aceleração eficaz (m/s^2)	Reação provável
Inferior a 0,315	Não é desconfortável
Entre 0,315 a 0,63	Um pouco desconfortável
Entre 0,5 a 1	Razoavelmente desconfortável
Entre 0,8 a 1,6	Desconfortável
Entre 1,25 a 2,5	Muito desconfortável
Superior a 2	Extremamente desconfortável

Embora a situação em estudo na determinação destes valores não seja a mesma a que esta dissertação se propõe analisar, eles oferecem já uma boa indicação do que se pode esperar da análise da ISO 2631-2, referente à análise de desconforto causado por vibrações em estruturas.

Referente à **percepção**, é apenas indicado na ISO 2631-1 que o limiar de percepção mediano é aproximadamente igual a $0,015 m/s^2$, podendo a gama de respostas variar entre $0,01 m/s^2$ e $0,02 m/s^2$.

5.1.2. ANÁLISE DA BS 6841 (1987)

A BS 6841 [2], equivalente britânica da ISO 2631-1, intitula-se como *Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock* (1987). Trata-se duma norma muito similar à correspondente ISO, com apenas algumas pequenas diferenças, que igualmente se aplica à análise de vibração nas três direções ortogonais representadas na **figura 3.3**. Aqui, os principais efeitos relevantes (para a presente dissertação) da vibração são separados de acordo com a sua afetação à **saúde**, ao **desenvolvimento de atividades** e ao **conforto e percepção**, referindo quais as curvas de ponderação relevantes para as suas análises.

Similarmente com a ISO 2631-1, é requerida uma prévia ponderação em frequência do espectro das acelerações consoante as funções de transferência expostas no capítulo 3 da norma agora em observância (**Anexo A.3.3**), sendo estas ligeiramente diferentes das apresentadas na norma anteriormente analisada, como se pode provar pelo exemplo de comparação entre as correspondentes curvas W_k (**Anexo A.3.1**), da ISO 2631-1, e W_b (**Anexo A.3.4**), da BS 6841, presente nas figuras seguintes (**Fig.**

5.2 e 5.3). As diferenças patentes entre as diferentes funções de transferência usadas nestas duas normas não são explicadas.

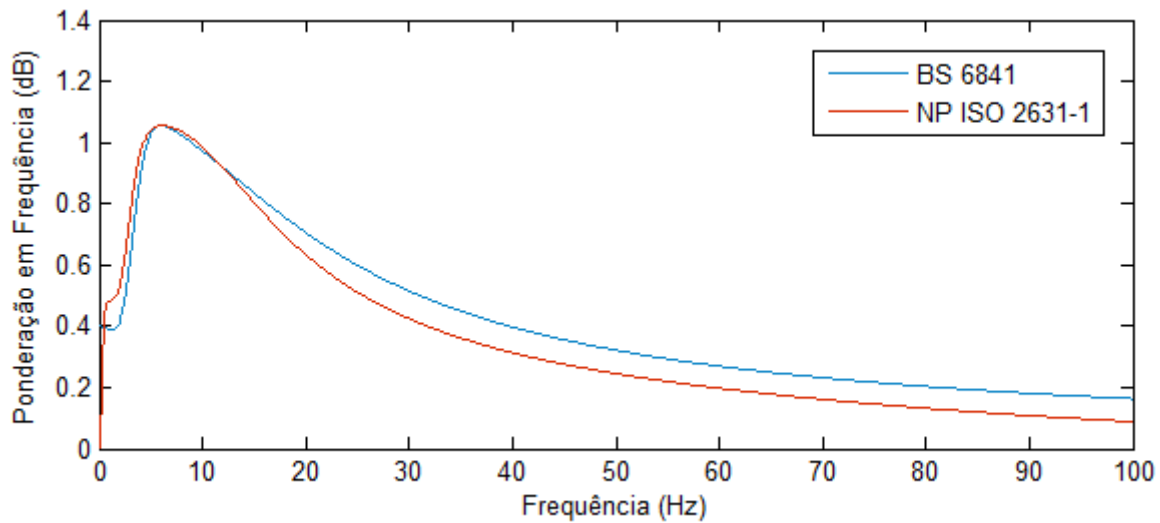


Fig. 5.2 – Comparação entre as correspondentes curvas de ponderação W_k (ISO 2631-1) e W_b (BS 6841).

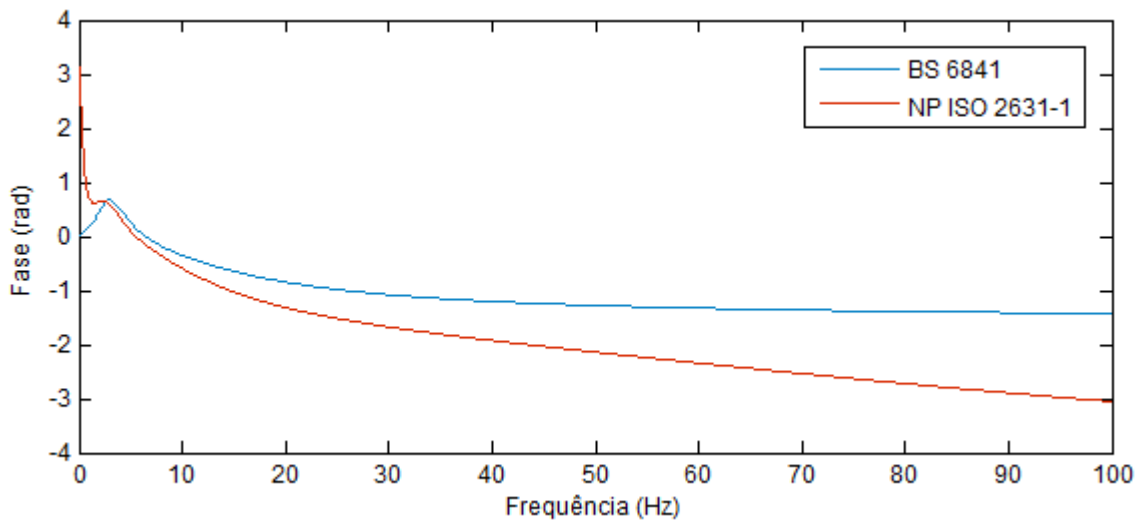


Fig. 5.3 – Comparação entre as correspondentes curvas de ponderação W_k (ISO 2631-1) e W_b (BS 6841).

Tal como a ISO 2631-1, esta norma está apenas interessada em apresentar métodos convenientes e apropriados para indicar a severidade subjetiva das vibrações, defendendo que avaliações precisas da aceitabilidade dos níveis de vibração - e consequentes formulações de limites de vibração- apenas podem ser feitas com o completo conhecimento de muitos outros fatores não discutidos no presente regulamento. Portanto, apenas são enunciados os métodos de análise e alguns valores aceitáveis referentes à aceitabilidade do nível de vibração.

Nesta BS 6841, similarmente à ISO 2631-1, o método de avaliação básico do nível de vibração consiste na determinação do valor eficaz – *r.m.s.* – da aceleração ponderada, conforme a equação (5.1) ou (5.2), requerendo um período de análise de pelo menos 60 segundos. Contudo, neste regulamento britânico, este método é apenas suficiente na análise de vibrações cujo fator de crista – equação (5.3) – é menor ou igual a 6, comparativamente a 9 como especificado na ISO. Se o fator de crista for superior a 6, em vez de métodos adicionais, a BS apresenta métodos alternativos nos anexos A e C. Todavia, também aqui não são indicados quaisquer limites de vibração.

No anexo A, os efeitos da vibração na **saúde** são analisados com maior detalhe. Uma vez que as vibrações com maior potencial de risco para a saúde caracterizam-se por um alto fator de crista, é aqui recomendado a utilização do método do valor de dose de vibração como o preferido – equações (5.7) e (5.8). Como justificação lê-se que este método é mais vantajoso por não estar limitado a baixos fatores de crista e que pode ser aplicado tanto a exposições de vibrações intermitentes, de choques ocasionais ou de exposições que consistem em períodos de vibração a diferentes magnitudes. Para casos de vibração multiaxial, a BS 6841 indica que o valor de VDV a usar é o dado por:

$$VDV = (k_x^4 VDV_x^4 + k_y^4 VDV_y^4 + k_z^4 VDV_z^4)^{1/4} \quad (5.18)$$

em que:

VDV_x , VDV_y , VDV_z são os valores de dose de vibração relativas aos eixos ortogonais x, y e z, respetivamente – $ms^{-1.75}$;

k_x , k_y , k_z são fatores multiplicativos (**Anexo A.4**).

Quando as características da vibração permanecem sensivelmente constantes ao longo do dia, apenas um período representativo precisa de ser mensurado. Consequentemente, a dose de vibração total diária será dada por:

$$VDV = \left(\frac{t_0}{t_1} \cdot VDV_1^4 \right)^{0,25} \quad (5.19)$$

com:

t_0 igual ao período total de exposição a ser analisado – s ;

t_1 igual ao período representativo de medição – s ;

VDV_1 igual ao valor de dose de vibração representativo do período t_1 – $ms^{-1.75}$.

Como método alternativo, é dado neste anexo um procedimento de estimativa do valor de dose de vibração (aproximado) a partir do valor da aceleração eficaz duma determinada vibração e do tempo de exposição – equação (5.15). Este procedimento tenderá a subestimar o valor de dose de vibração se o fator de crista das vibrações for superior a 6, como já foi justificado, havendo uma relação proporcional entre o erro do método e o fator de crista quando mais este último se afasta de 6. Seria mais razoável utilizar esta equação de modo a determinar uma estimativa da aceleração eficaz através do valor de VDV, para que o valor *r.m.s.* tivesse em maior conta as acelerações de pico (**Quadro 5.4**). Ainda neste anexo, pode ler-se que vibrações cujas magnitude e duração produzam um valor de dose de vibração a rondar os $15 ms^{-1.75}$ irão, em condições normais, causar desconforto severo.

No anexo B, referente a efeitos da vibração no **desenvolvimento de atividades** humanas, apenas refere que para se permanecer com uma capacidade de controlo e manipulação das mãos ou uma capacidade de visualmente compreender detalhes razoável, a aceleração eficaz ponderada não deve exceder os $0,5 ms^{-2}$.

Por último, no anexo C, respeitante à afetação do **conforto** e da **percepção**, para ocorrências que excedam o fator de crista igual a 6, recomenda-se a utilização do método *r.m.q.* com a justificação de melhor prever o desconforto relativo causado por vibrações, comparativamente com o valor obtido numa análise *r.m.s.*

$$r.m.q. = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a^4(t) dt \right)^{1/4} \quad (5.20)$$

Porém, se a exposição consistir em períodos de magnitudes de vibração altas e baixas durante períodos de tempo variáveis, a severidade da vibração deve ser analisada através do valor de dose de vibração – equação (5.7). Para o conforto, a BS 6841 expõe a mesma relação entre os intervalos de acelerações eficazes e as prováveis reações por parte dos indivíduos expostos (**Quadro 5.1**). Por sua vez, para a percepção da vibração, o mesmo valor de $0,015 \text{ ms}^{-2}$ é fornecido.

5.2. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÃO EM ESTRUTURAS

5.2.1. NOTA INTRODUTÓRIA

As normas ISO 2631-1 e BS 6841 até aqui descritas não apresentam, como já foi várias vezes referido, quaisquer valores limite de exposição às vibrações, pois apenas definem os métodos disponíveis para as avaliar. No entanto, através das magnitudes de vibração obtidas por esses métodos, é possível compará-los com os valores limiares de vibração admissível em edifícios expostos na ISO 2631-2 [5], ou na BS 6472 [3]. O estabelecimento destes valores fixos relaciona-se com a probabilidade de queixas apresentadas pelos utilizadores/ocupantes das estruturas quanto à ocorrência de vibração. As queixas devido a vibrações em edifícios ou estruturas começam a suceder-se quando os níveis de vibração ultrapassam sensivelmente o **limiar da percepção** por parte dos seus utilizadores/ocupantes. No entanto, existem situações em que magnitudes de vibração acima desse nível mínimo de probabilidade de queixas podem ser toleradas, particularmente em casos de distúrbios temporários de pouca duração provenientes de obras de construção próximas, por exemplo. Em casos de vibrações de muito longa duração, o nível de comentários adversos pode ser modificado devido à familiarização com a vibração.

5.2.2 NÍVEIS DE VIBRAÇÃO ADMISSÍVEIS EM EDIFÍCIOS

Geralmente, as magnitudes de vibração consideradas satisfatórias estão relacionadas com a probabilidade de queixas mínima, não dependendo de qualquer outro fator, tal como o grau de afetação à saúde ou à eficiência laboral. Na ISO 2631-2 e na BS 6472 são apresentados vários ábacos que estipulam os níveis de vibração admissíveis das vibrações em edifícios, correspondendo a possibilidades de ocorrência de queixas raras. É requerida uma prévia determinação da aceleração eficaz ponderada, conforme a equação (5.1) ou (5.2) para a utilização das curvas da aceleração eficaz e da velocidade eficaz - conforme o tipo de vibração em análise - nas diversas direções, as quais são utilizadas para a fixação de valores limiares de vibração mediante a correta aplicação de fatores multiplicativos (**Quadro 5.2**). O facto de a análise nas três direções ortogonais ser realizada independentemente não é de todo o ideal, uma vez que desse modo a sobreposição de efeitos referente à vibração multiaxial não é aqui considerada. As curvas base de aceleração para as vibrações na direção *z* e direções *x* e *y* apresentadas na ISO 2631-2 e BS 6472 estão aqui representadas nas figuras 5.4 e 5.5, respetivamente. Enquanto a primeira norma expõe também estas mesmas curvas em termos de velocidade eficaz, na segunda há a preferência de as expor em termos de velocidade de pico. Este facto não é assim tão relevante, uma vez que as curvas relativas à velocidade de pico foram calculadas assumindo apenas movimento sinu-

soidal. Logo, a velocidade eficaz e a velocidade de pico estão completamente relacionadas por um fator de $\sqrt{2}$, sendo fácil converter uma na outra. Contudo, a opção pela representação da magnitude da vibração em velocidade de pico parece ser a mais adequada, dado que na generalidade das normas em que o parâmetro de avaliação das vibrações é a velocidade, é habitualmente dada preferência à velocidade de pico. É possível atentar nas curvas de velocidade de pico para a direção z e direções x e y na nas figuras 5.6 e 5.7, respetivamente.

Nos casos de medições de vibrações em compartimentos onde os seus ocupantes possam assumir várias posições e orientações, relativamente ao referencial de vibração, devem ser determinados os valores ponderados para todos os eixos e utilizar o mais desfavorável. A ISO 2631-2 oferece também ábacos para essas situações (Fig. 5.8 e Fig. 5.9). Estas curvas são formuladas através da combinação dos casos mais desfavoráveis das três direções. Foram então construídos a partir das respetivas curvas referentes à direção $-z$ com os valores assinalados entre as frequências 8 Hz e 80 Hz e das curvas referentes às direções $-x$ e $-y$ entre as frequências 1 Hz e 2 Hz. Para o intervalo de frequência limitado por 2 Hz e 8 Hz, houve a necessidade de realizar uma interpolação entre as duas curvas.

Os níveis máximos de vibração admissíveis em diferentes tipos de edifícios são obtidos através da aplicação de diversos fatores multiplicativos nas curvas base. Estes valores podem ser consultados em ambos os regulamentos ISO 2631-2 e BS 6472, na forma de tabelas. Todavia, a informação presente na BS 6472 é mais abrangente: além do tipo do edifício, tem igualmente em conta o período do dia em que ocorrem as vibrações ou se são contínuas ou impulsivas (Quadro 5.2). Consoante o tipo de vibração – contínua ou impulsiva -, relativamente aos ábacos, devem comparar-se os níveis de vibração em aceleração ou em velocidade, respetivamente. Pode consultar-se diretamente os ábacos referentes aos fatores multiplicativos do Quadro 5.2, nas figuras de 5.10 a 5.13.

A BS 6472 (1992) foi preparada de forma a atualizar a ISO 2631-2 de 1989, defendendo que esta contém informação insuficiente para permitir uma avaliação apropriada da resposta humana à vibração em estruturas, nomeadamente edifícios. Esta norma constitui então, relativamente à ISO, um guia mais completo, com a adição de informação proveniente de desenvolvimentos mais recentes no campo de análise em questão. E embora a norma internacional possibilite a avaliação da exposição às vibrações através do método do valor eficaz em contínuo ou do método da dose de vibração da quarta potência (Subcap. 5.1.1), esta não apresenta qualquer valor limite relativo aos parâmetros nesses métodos envolvidos, contrariamente à BS 6472. Nesta é sugerido que no caso de vibrações intermitentes ou impulsivas, se deva recorrer ao valor de dose de vibração. Sempre que se adotar este método, devem ser respeitados os valores indicados no Quadro 5.3, que exprimem a correlação entre a magnitude VDV da vibração e a probabilidade de ocorrência de queixas.

Seguindo também a orientação da norma britânica, foram determinados os valores do Quadro 5.4 respeitantes à relação entre o nível de aceleração eficaz admissível e a duração da exposição à vibração, consoante o nível de probabilidade de ocorrência de queixas. Neste processo, deve ter-se em conta a direção mais desfavorável, combinando as diferentes componentes vetoriais da aceleração.

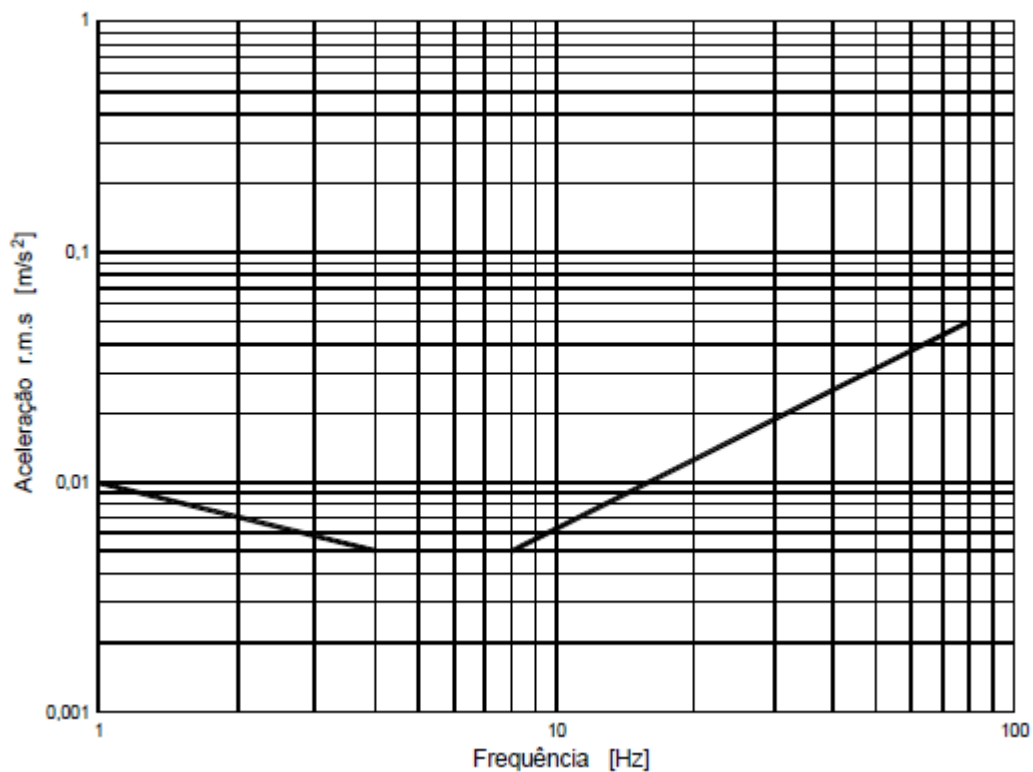


Fig. 5.4 – Curva base para a aceleração eficaz segundo a direção z (ISO 2631-2 e BS 6472).

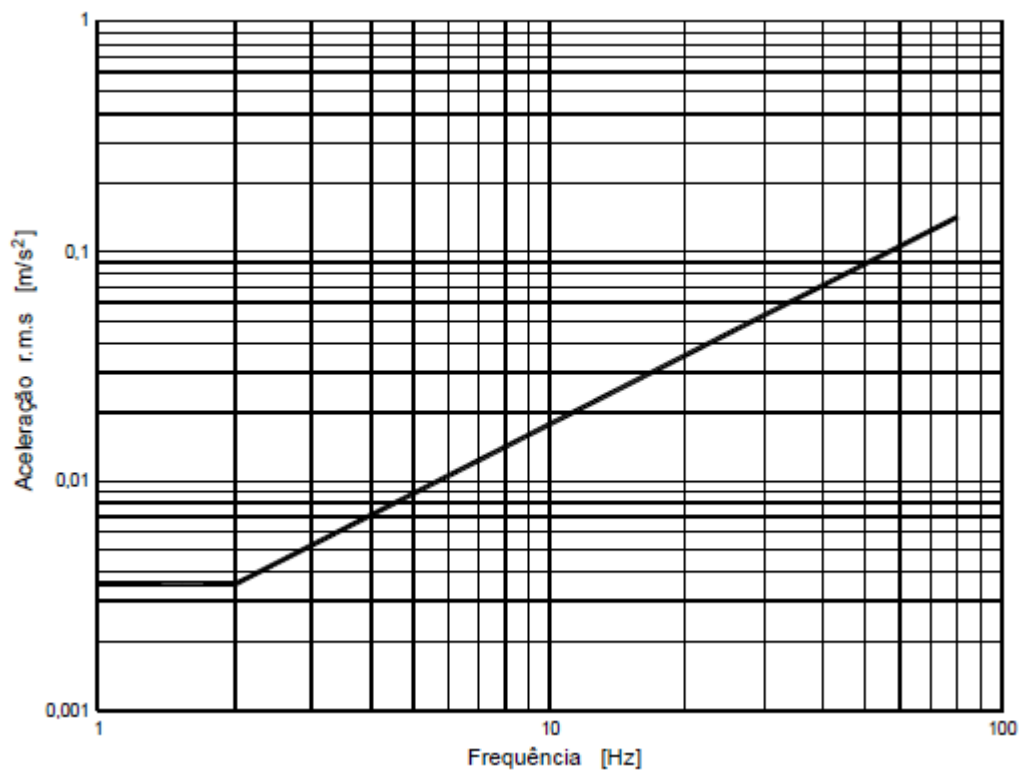


Fig. 5.5 – Curva base para a aceleração eficaz segundo as direções x e y (ISO 2631-2 e BS 6472).

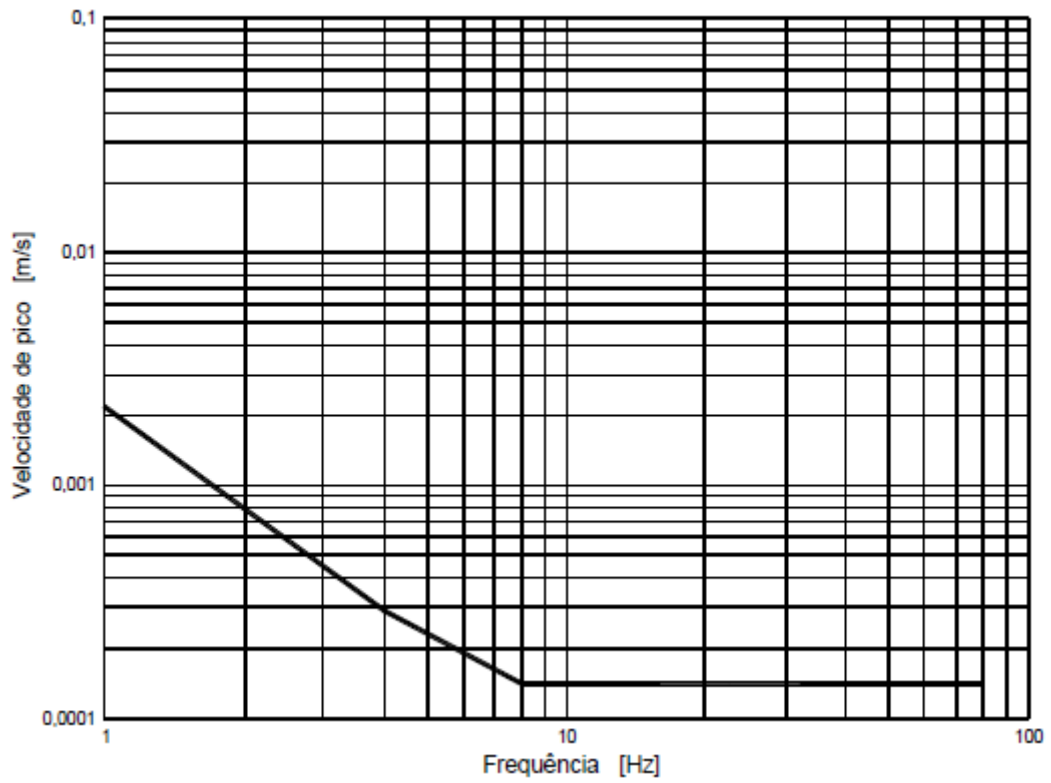


Fig. 5.6 – Curva base para a velocidade de pico segundo a direção z (ISO 2631-2 e BS 6472).

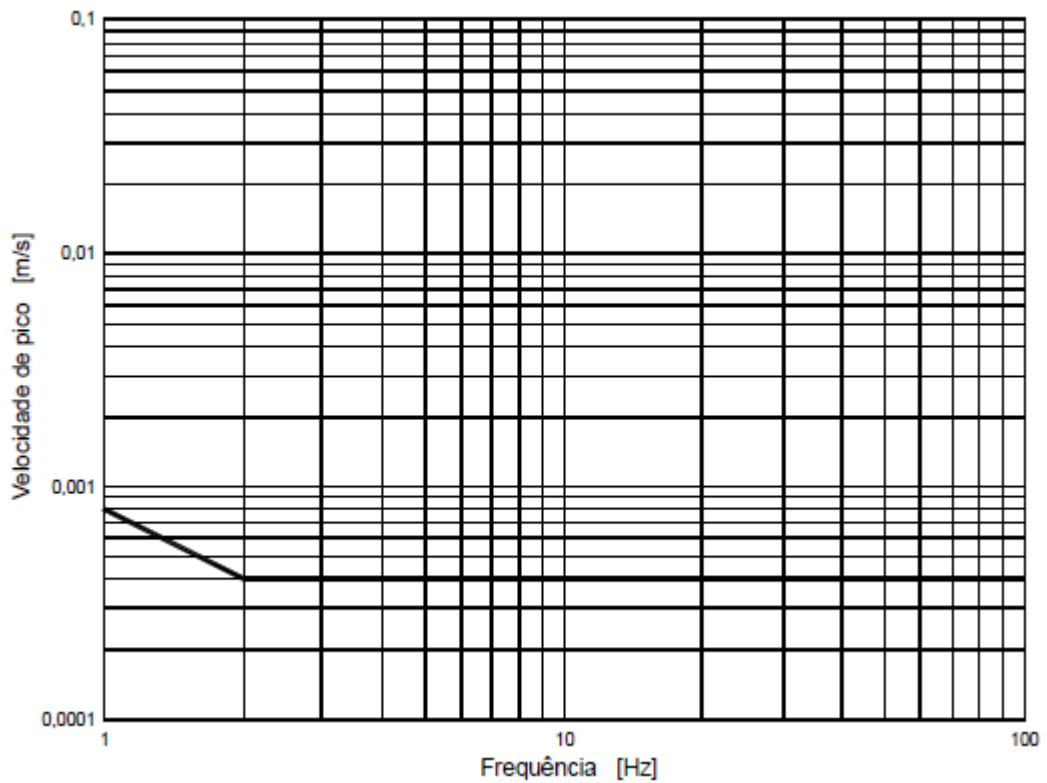


Fig. 5.7 – Curva base para a velocidade de pico segundo as direções x e y (ISO 2631-2 e BS 6472).

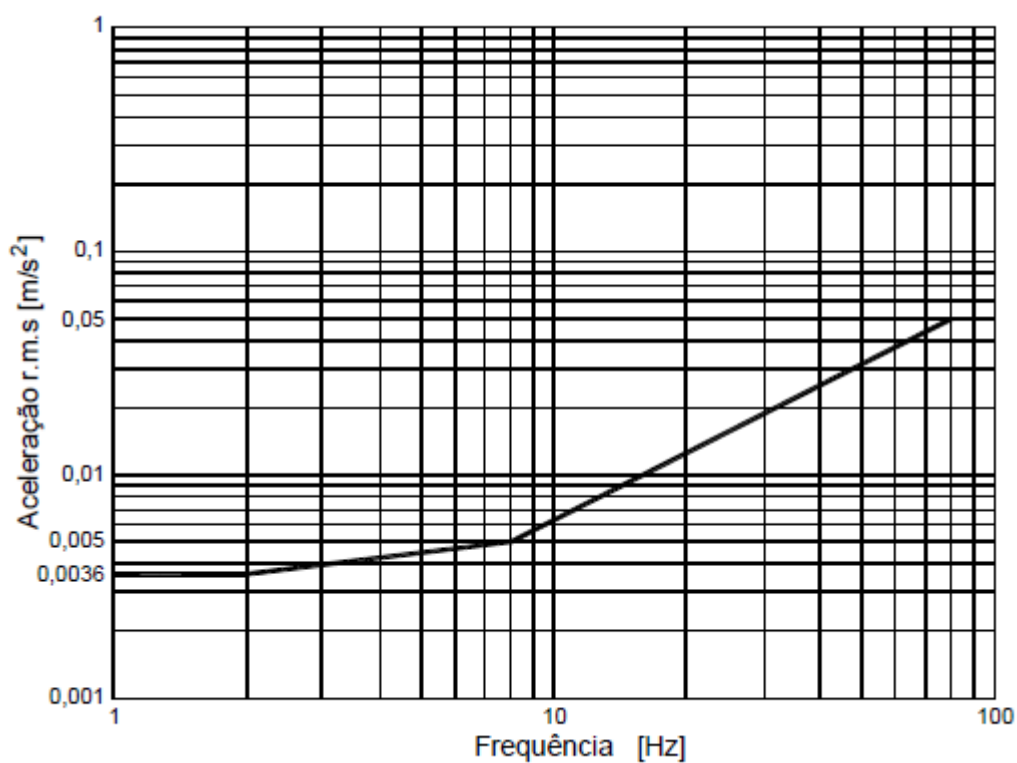


Fig. 5.8 – Curva base para a aceleração eficaz segundo uma combinação de direções x, y e z (ISO 2631-2).

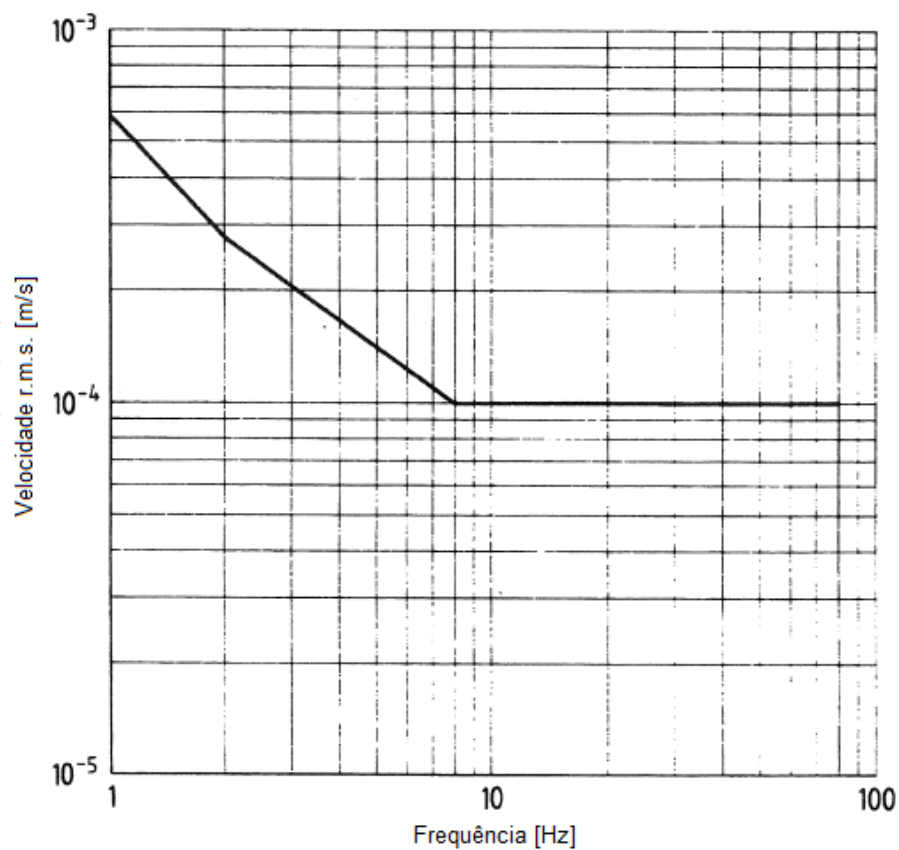


Fig. 5.9 – Curva base para a velocidade eficaz segundo uma combinação de direções x, y e z (ISO 2631-2).

Quadro 5.2 – Fatores multiplicativos a aplicar nas curvas base apresentadas (BS 6472).

Localização	Período	Fatores multiplicativos	
		Exposições a vibrações contínuas [16h dia, 8h noite]	Exposições a vibrações impulsivas até 3 ocorrências
Áreas críticas de trabalho (ex: salas de operações em hospitais, laboratórios de precisão)	Dia	1	1
	Noite	1	1
Zonas residenciais	Dia	2 a 4	60 a 90
	Noite	1,4	20
Zonas de escritórios	Dia	4	128
	Noite	4	128
Zonas de comércio/ industriais	Dia	8	128
	Noite	8	128

Segundo a BS 6472, as vibrações podem ser classificadas em contínuas e impulsivas, do seguinte modo:

- **vibração contínua:** vibração que continua interrompida durante um período diurno de 16 hora ou um período noturno de 8 horas, por exemplo das 23h até às 7h.
- **vibração impulsiva:** constitui uma oscilação de rápido desenvolvimento até ao seu pico, seguido por uma decadência amortecida que pode ou não envolver vários ciclos de vibração, dependendo da frequência de vibração e grau de amortecimento estrutural; também pode consistir numa aplicação repentina de vários ciclos a uma amplitude aproximadamente equivalente, garantindo que a duração é pequena (menos de 2 segundos).

A vibração pode também ser de natureza intermitente. Quando tal, deve ser analisada recorrendo ao método do *VDV*, tal como as de carácter impulsivo.

Quando as exposições a vibrações impulsivas ultrapassam as 3 ocorrências no período das 16 horas referentes ao período “dia”, o fator multiplicativo é dado por:

$$F = 1,7 \cdot N^{-0,5} \cdot T^{-d} \quad (5.21)$$

onde:

N é o número de ocorrências de impulsos;

T é a duração do evento – s;

d é zero quando $T < 1$ s; para $T > 1$ s, $d = 0,32$ para pavimentos em madeira;
1,22 para pavimentos em betão.

É ainda referido na norma que as vibrações impulsivas não são permitidas durante o período noturno. Contudo, se por algum motivo se sucederem, o fator multiplicativo é fixado em 20.

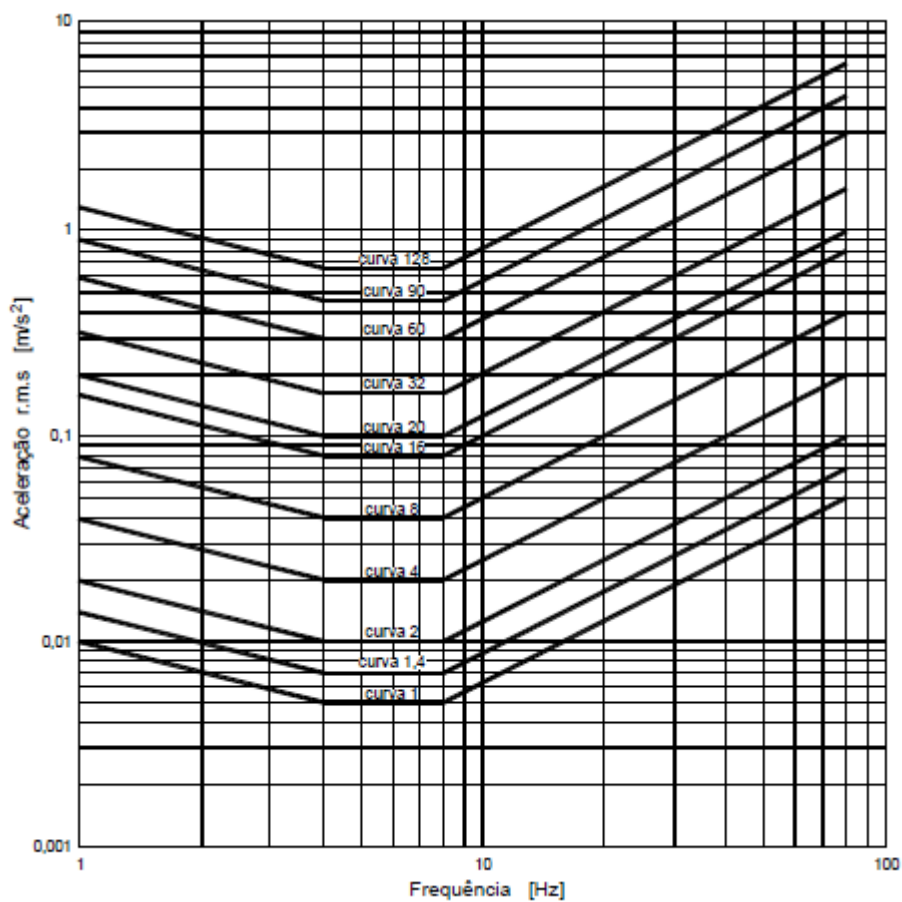


Fig. 5.10 – Curvas para a aceleração eficaz segundo a direção z (ISO 2631-2 e BS 6472).

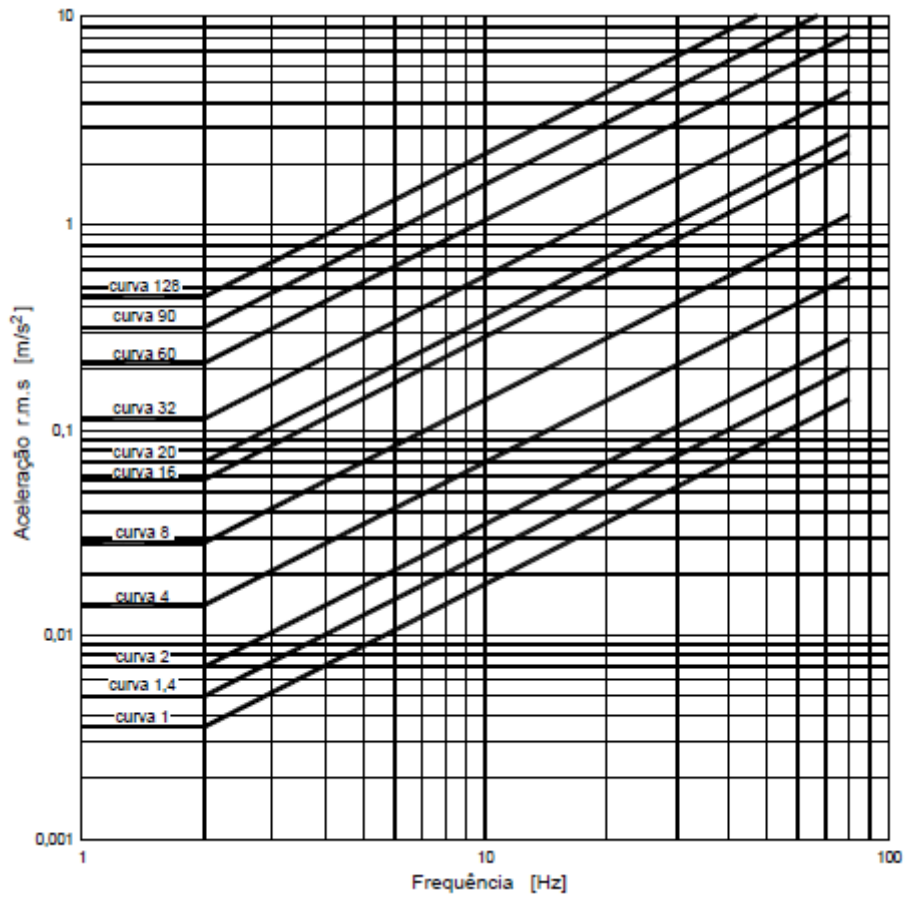


Fig. 5.11 – Curvas para a aceleração eficaz segundo as direções x e y (ISO 2631-2 e BS 6472).

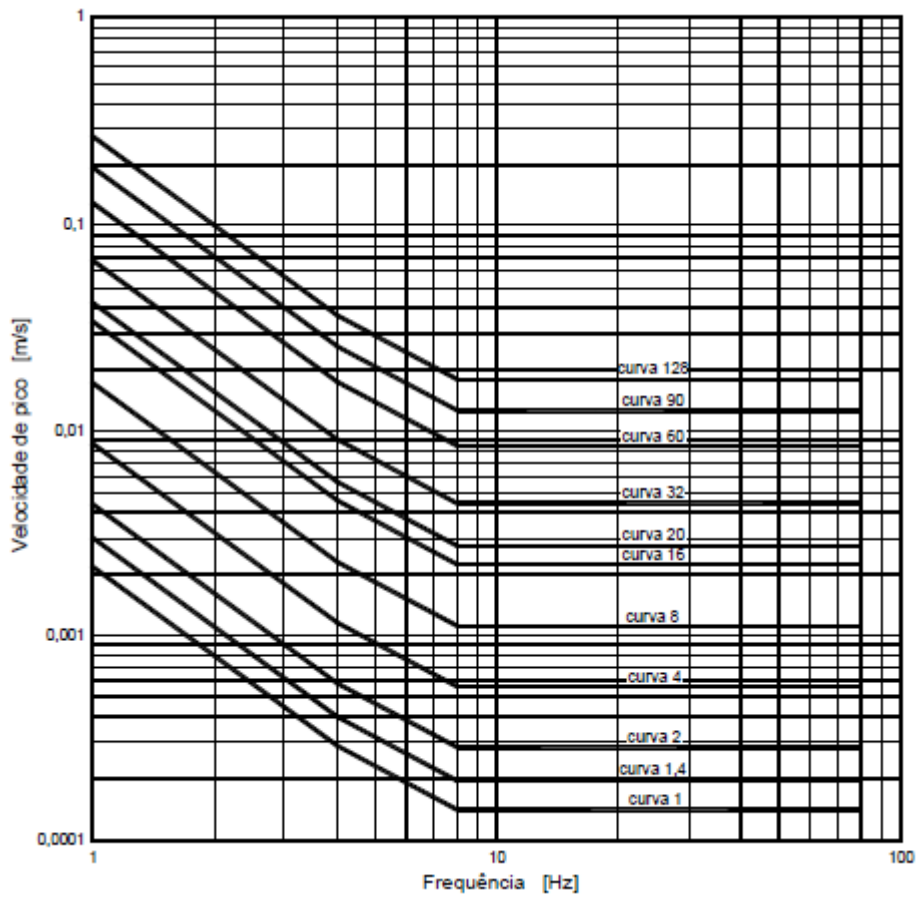


Fig. 5.12 – Curvas para a velocidade de pico segundo a direção z (ISO 2631-2 e BS 6472).

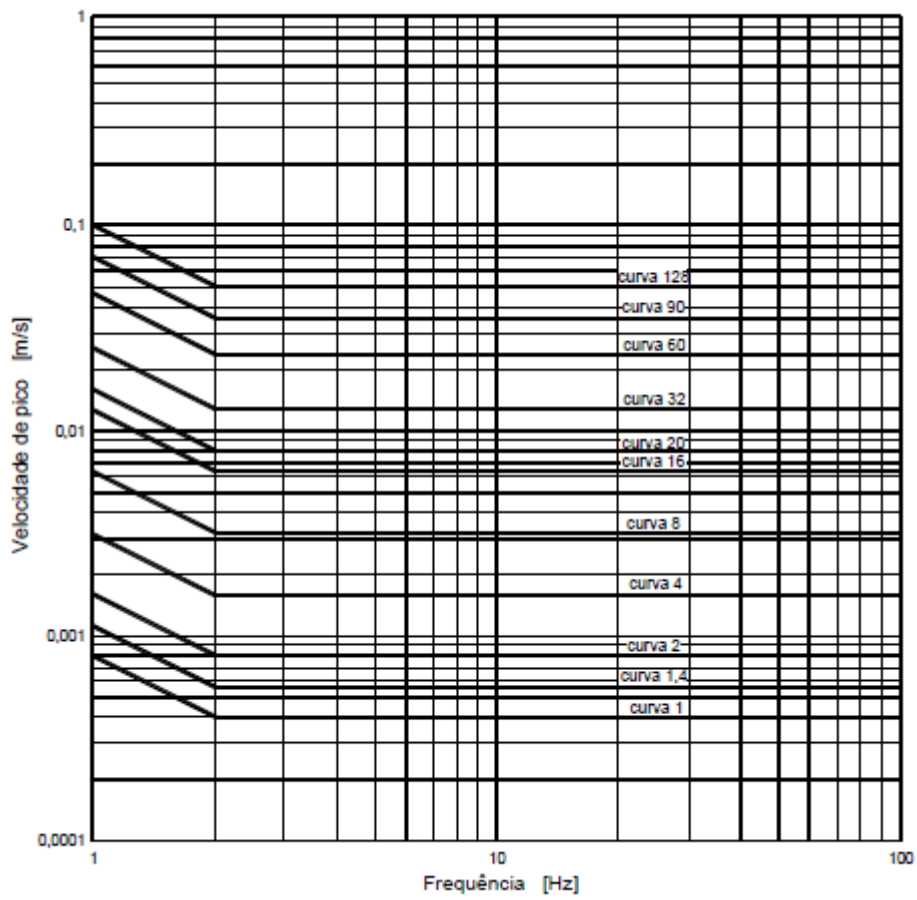


Fig. 5.13 – Curvas para a velocidade de pico segundo as direções x e y (ISO 2631-2 e BS 6472).

Quadro 5.3 – Valores de Dose de Vibração ($m/s^{1.75}$) associados a diferentes níveis de queixas em edifícios.

		Pouca probabilidade de queixas		Queixas possíveis		Queixas prováveis	
Edifícios Residenciais	dia (16 h)	0.217	0.434	0.434	0.868	0.868	1.735
	noite (8 h)	0.128		0.255		0.511	
Escritórios	dia (16 h)	0.434		0.868		1.735	
	noite (8 h)	0.365		0.730		1.459	
Fábricas/Oficinas	dia (16 h)	0.868		1.735		3.470	
	noite (8 h)	0.730		1.459		2.918	

Quadro 5.4 – Valores de aceleração eficaz (m/s^2) estimados a partir de fórmula do eVDV para o limiar definido por “pouca probabilidade de queixas”.

Pouca probabilidade de queixas		$a \text{ (r.m.s.)} = eVDV / (1.4 * t^{0.25})$									
		16h (8h, Noite)		1h	225s	14s	0.9s				
Edifícios Residenciais	Dia	0.010	0.020	0.020	0.040	0.040	0.080	0.080	0.160	0.159	0.318
	Noite	0.007		0.012	0.024		0.047		0.094		
Escritórios	Dia	0.020		0.040	0.080		0.160		0.318		
	Noite	0.020		0.034	0.067		0.135		0.267		
Fábricas/Oficinas	Dia	0.040		0.080	0.160		0.320		0.636		
	Noite	0.040		0.067	0.135		0.269		0.535		

Os valores destes quadros foram determinados numa página *Excel*, a partir dos dados fornecidos pela BS 6742, para vibrações contínuas atuantes na direção z . Inicialmente, a partir da equação da estimativa do valor de dose de vibração (5.15), recorrendo ao ábaco apresentado na Fig. 5.4 para examinar qual a menor aceleração eficaz que constitui o limiar de admissibilidade - $a_w = 0,005 m/s^2$, para a gama de frequências entre 4 Hz e 8 Hz –, foi possível determinar os valores de eVDV admissíveis para uma vibração contínua de 16h (dia) e 8h (noite), respetivamente, $0,108 m/s^{1.75}$ e $0,091 m/s^{1.75}$. Aplicando os correspondentes fatores multiplicativos do Quadro 5.2, chegou-se aos valores da terceira coluna do Quadro 5.3, relativos à baixa probabilidade de ocorrência de queixas. As seguintes colunas referentes a “queixas possíveis” e “queixas prováveis” foram obtidas através da anterior, multiplicando por fatores de 2 e 4 respetivamente.

O Quadro 5.4 tem o objetivo de provar que a relação entre o eVDV e a aceleração eficaz é dependente da duração da exposição à vibração. Através dos valores de eVDV presentes no Quadro 5.3 alusivos a “pouca probabilidade de queixas”, para diferentes durações de exposição, foram determinados os respetivos valores das acelerações eficazes. Daqui retira-se que, por exemplo, uma exposição de 1 hora a uma vibração caracterizada por uma aceleração eficaz de $0,02 m/s^2$ numa zona residencial equivale, em termos de incómodo, a uma exposição de 16 horas a uma vibração com $0,01 m/s^2$.

6

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

6.1. APRESENTAÇÃO DAS SITUAÇÕES EM ANÁLISE

Após a exposição dos métodos de avaliação no capítulo antecedente, o presente capítulo destina-se a descrever uma metodologia prática de avaliação dos níveis de vibração (ANV), aplicada a duas situações de circunstâncias distintas. Numa primeira aplicação, o objetivo será averiguar os níveis de vibração sentidos numa moradia na localidade de Vila da Feira – concelho de Santa Maria da Feira, distrito de Aveiro – que se situa perto de uma unidade industrial. A outra, por sua vez, terá o objetivo de avaliar os níveis de vibração na laje duma edificação do tipo industrial, na localidade de Esmoriz – concelho de Ovar, distrito de Aveiro –, na qual se pretende instalar um conjunto de máquinas destinadas ao processo fabril lá desenvolvido. Embora, neste último caso, o objetivo principal fosse avaliar a integridade estrutural da laje sujeita a essas solicitações, no âmbito da atual dissertação, a avaliação aqui descrita incidirá apenas sobre aspetos relacionados com o conforto humano.

6.2. PRIMEIRO CASO: A.N.V. NUMA MORADIA

6.2.1. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

Devido aos motivos enunciados no **subcapítulo 4.2**, definiram-se os pontos de medição nos vários pisos segundo o ilustrado na **Fig. 6.1**.

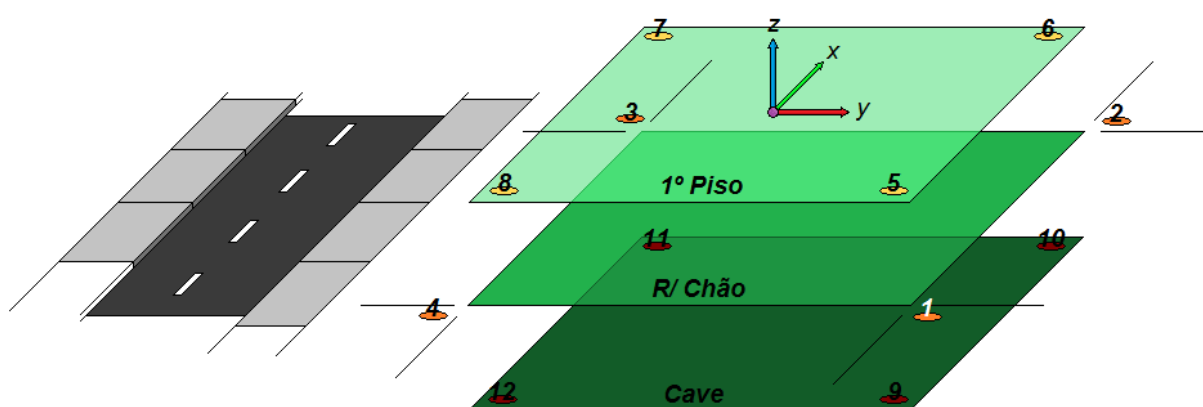


Fig. 6.1 – Esquema dos pontos de medição nos três pisos da moradia em análise (cave – vermelho tinto; r/ chão – laranja; 1º piso – amarelo) e orientação dos transdutores de vibração.

Portanto, foram considerados pontos de medição em cada um dos 4 cantos dos vários pisos da habitação, totalizando 12 pontos de medição. Na cave e no 1º andar colocaram-se os aparelhos no interior da habitação, enquanto que no rés-do-chão estes ficaram no exterior, aproximadamente ao nível de cota deste piso. Durante as medições, os aparelhos de medição foram pousados sempre com a mesma orientação – a indicada pelo referencial presente na **figura 6.1**. A instalação industrial geradora de vibrações situa-se nas traseiras da moradia, considerando como a sua dianteira a fachada voltada para a rua – i.e. situa-se à direita da moradia segundo a perspetiva da **figura 6.1**.

6.2.2. PARAMETRIZAÇÃO DA MEDIÇÃO

Para esta situação, optou-se por colher amostras de sinais com uma periodicidade de 15 minutos: 12 minutos de registo e 3 minutos de intervalo (de forma a permitir o transporte do aparelho para o seguinte ponto de medição). A frequência, ou taxa, de aquisição foi fixada nos 200 Hz, de modo a permitir a identificação do conteúdo espectral dos sinais entre os 0,4 Hz aos 100 Hz, conforme é imposto pelas normas (**Subcap. 3.2.2.3**).

6.2.3. CARACTERIZAÇÃO DA VIBRAÇÃO

Após a obtenção dos dados, foi então possível calcular os espectros de frequências de *Fourier* (**Subcap. 2.3**) com recurso ao algoritmo apresentado no **anexo A.1**. Os sinais colhidos aproximam-se a ondas sinusoidais de frequência 7,98 Hz, afetadas localmente pelo “ruído” presente nos registos. Nas **figuras 6.2, 6.4 e 6.6** são apresentadas amostras representativas dos registos obtidos para os pontos de medição 1 (rés-do-chão), 5 (1º piso) e 9 (cave). Os respetivos espectros de frequências estão situados subsequentemente a cada um dos registos de medição enunciados (**Fig. 6.3, 6.5 e 6.7**).

Este procedimento é útil no sentido em que permite identificar o conteúdo espectral das vibrações, possibilitando o delinear do procedimento de análise mais apropriado a utilizar.

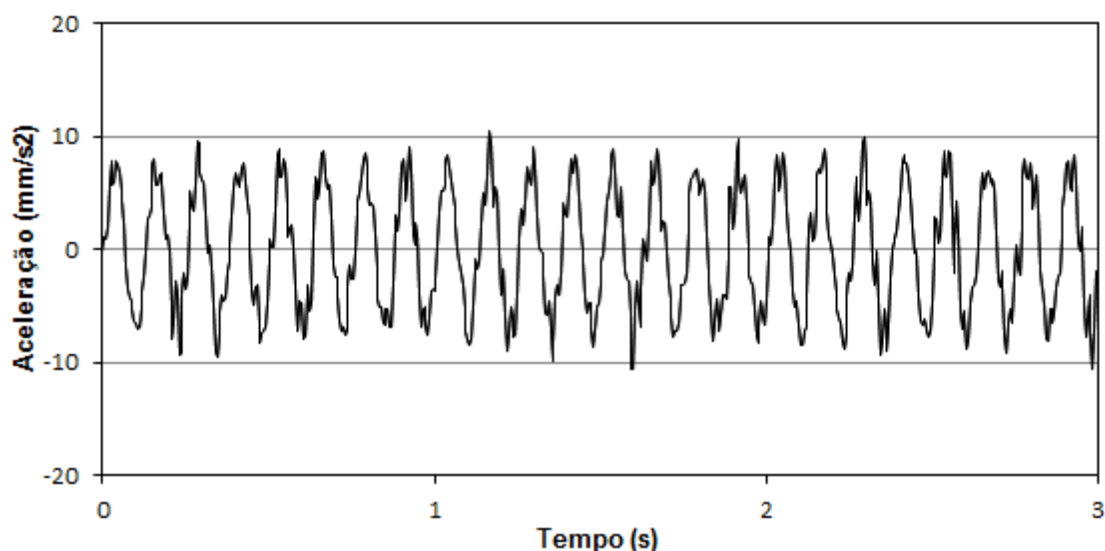


Fig. 6.2 – Amostra do registo do sinal medido na direção z – ponto de medição 1 (rés-do-chão).

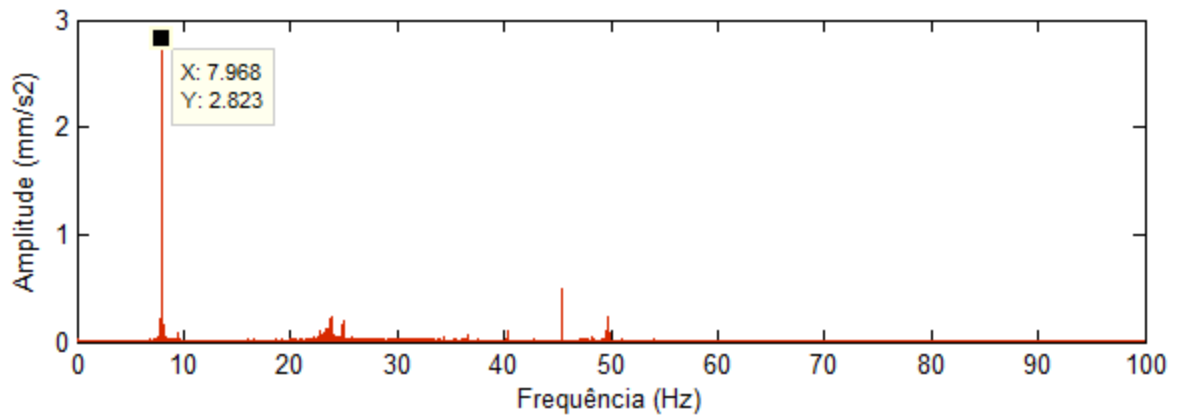


Fig. 6.3 – Espectro de Fourier do sinal colhido na direção z – ponto de medição 1 (rés-do-chão).

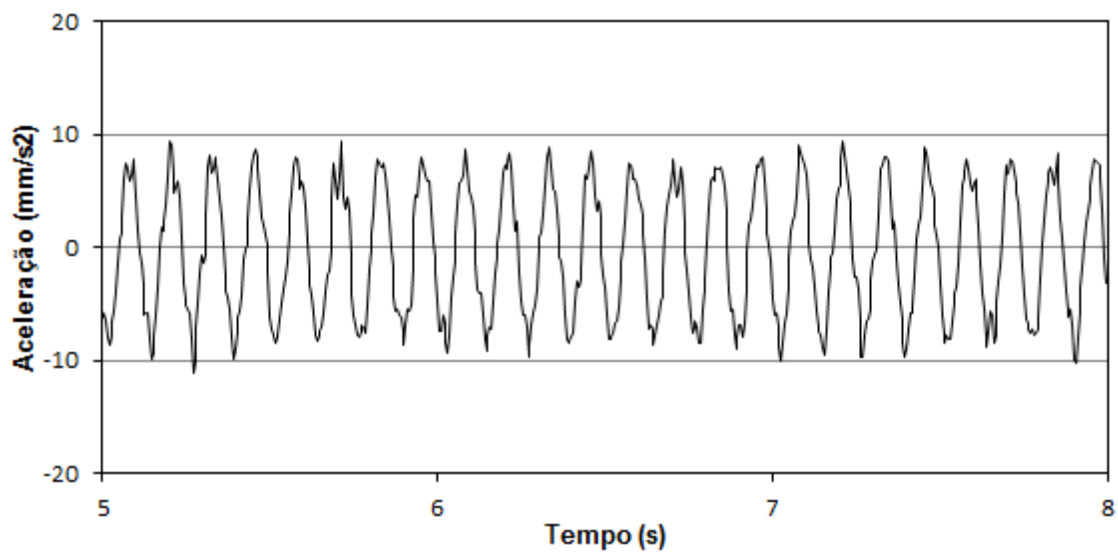


Fig. 6.4 – Amostra do registro do sinal medido na direção z – ponto de medição 5 (1º piso).

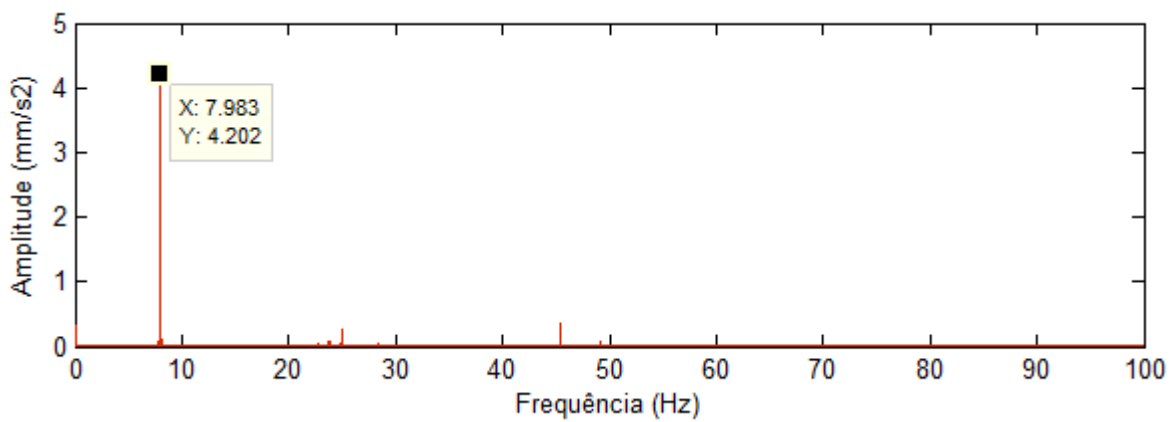


Fig. 6.5 – Espectro de Fourier do sinal colhido na direção z – ponto de medição 5 (1º piso).

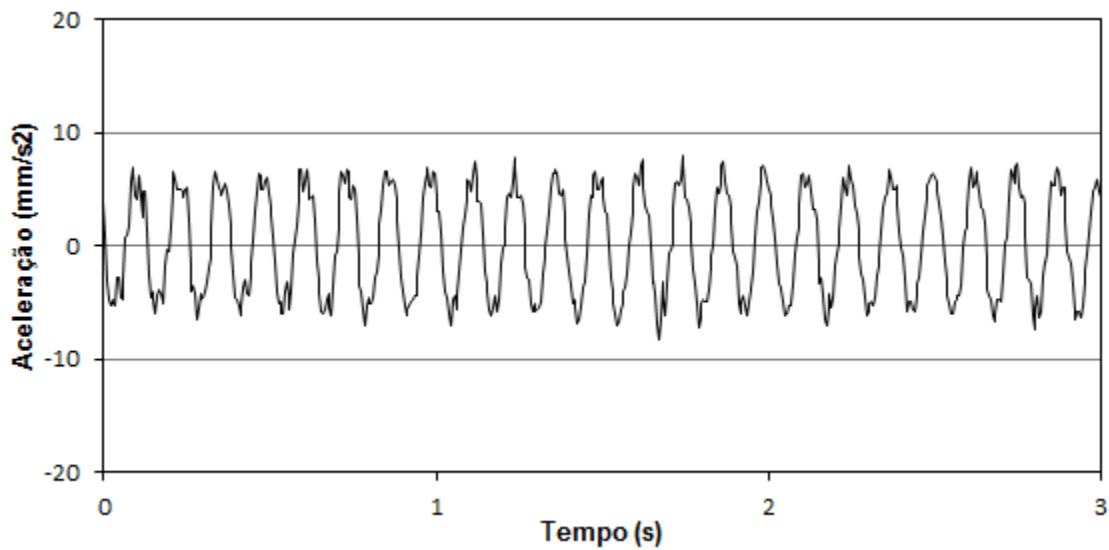


Fig. 6.6 – Amostra do registo do sinal medido na direção z – ponto de medição 9 (cave).

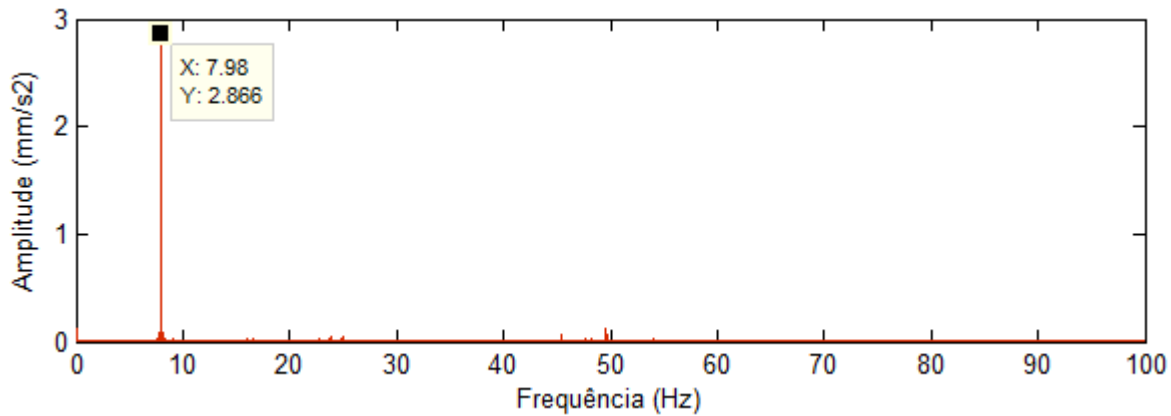


Fig. 6.7 – Amostra do registo do sinal medido na direção z – ponto de medição 9 (cave).

Relativamente ao tipo de vibração, pode considerar-se estar perante uma sinusóide de aproximadamente 7,98 Hz de carácter temporal contínuo (durante o período de funcionamento da unidade industrial, assumindo-se de 8 horas).

6.2.4. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO

O presente subcapítulo descreve a metodologia adotada na avaliação dos níveis de vibração de um sinal caracterizado pelas suas séries temporais de acelerações nas três principais direções de medição – x, y e z. Para efeitos de demonstração, seleccionou-se casualmente os dados relativos ao ponto de medição 1 (**Fig. 6.1**). As figuras seguintes ilustram os três registos, após já terem sido ponderados em frequência com recurso à aplicação computacional dos filtros digitais W_k e W_d ($k = 1,0$) – para a direção vertical e direções horizontais, respetivamente –, conforme definidos na NP ISO 2631-1.

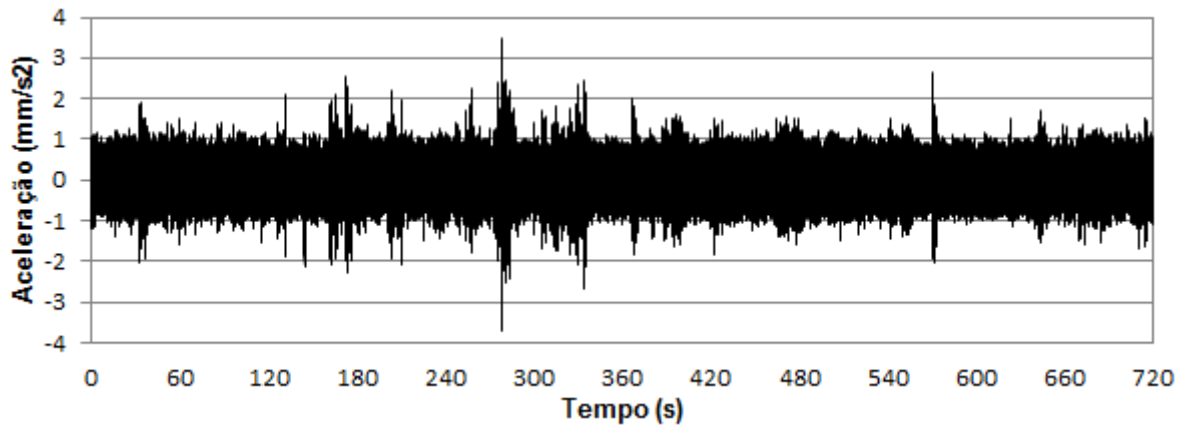


Fig. 6.8 – Registo temporal das acelerações ponderadas em frequência na direção x.

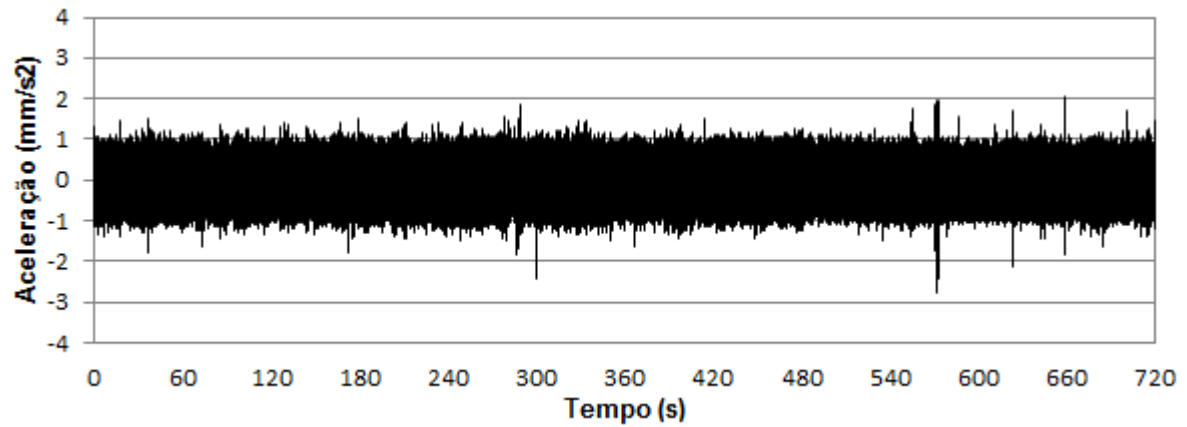


Fig. 6.9 – Registo temporal das acelerações ponderadas em frequência na direção y.

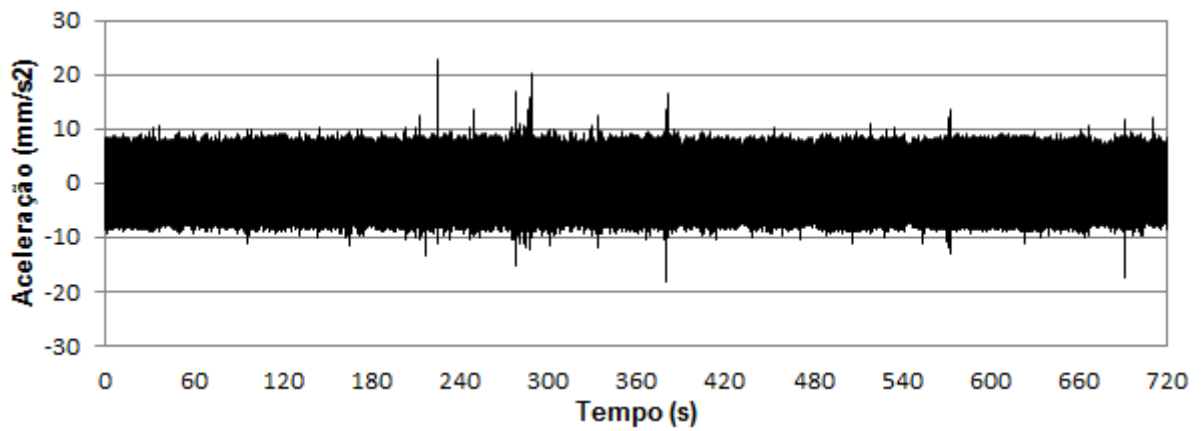


Fig. 6.10 – Registo temporal das acelerações ponderadas em frequência na direção z.

Recorrendo à equação (5.2), para cada direção, determina-se o valor da aceleração eficaz ponderada em frequência, correspondentes aos sinais com duração de 720 segundos:

$a_{ef,z} = 5,41 \text{ mm/s}^2$	$a_{ef,x} = 0,56 \text{ mm/s}^2$	$a_{ef,y} = 0,59 \text{ mm/s}^2$
----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

Dada a discrepância entre o valor da aceleração eficaz referente à direção vertical e os restantes, não estaria errado assumir uma análise de vibração do tipo uniaxial segundo a direção z . Contudo, serão considerados os três eixos de vibração. Ao empregar a equação (5.12), obteve-se como resultado para o valor total de vibração em termos de aceleração eficaz $a_{ef,xyz} = 5,47 \text{ mm/s}^2$. Observando os registos temporais de acelerações ponderadas em frequência, estes deixam transparecer que provavelmente estar-se-á perante uma vibração relativamente uniforme (**Subcap. 5.1.1**). No entanto, para averiguar se o **método básico de avaliação – r.m.s.** – definido nas normas ISO 2631-1 e BS 6841 é suficiente para a análise desta vibração, deve-se atentar no respetivo fator de crista – equação (5.3). O valor obtido para este valor foi de 4,25. Portanto, segundo as normas atrás referidas, não é necessário recorrer a métodos de avaliação adicionais e/ou alternativos. Contudo, para um exemplo de aplicação mais completo, será também calculado o valor de dose de vibração segundo o **método da dose de vibração de quarta potência – VDV**. Segundo este método, inicialmente utiliza-se a fórmula (5.8) de forma a calcular o valor de dose de vibração para os 720 segundos:

$VDV_{z,720} = 31,10 \text{ mm/s}^{1.75}$	$VDV_{x,720} = 3,75 \text{ mm/s}^{1.75}$	$VDV_{y,720} = 3,64 \text{ mm/s}^{1.75}$
---	--	--

Partindo do suposto que a exposição a esta vibração sucede-se continuamente durante as 8 horas diárias decorrentes do período normal de funcionamento da unidade industrial, há a necessidade de extrapolar o VDV de 720 segundos para o VDV de 8 horas, recorrendo à equação (5.19), com $t_0 = 720$ segundos, $t_1 = 8 \times 60 \times 60$ segundos.

$VDV_{z,total} = 78,21 \text{ mm/s}^{1.75}$	$VDV_{x,total} = 9,43 \text{ mm/s}^{1.75}$	$VDV_{y,total} = 9,15 \text{ mm/s}^{1.75}$
---	--	--

Aplicando a fórmula (5.18), obtém-se o seguinte resultado para o valor de dose de vibração multiaxial $VDV_{xyz,total} = 78,22 \text{ mm/s}^{1.75}$. Poderia ter-se optado pelo uso da equação (5.18) e só depois pela aplicação da equação (5.19), que o resultado seria o mesmo.

De acordo com as normas examinadas, em termos de aceleração eficaz, a avaliação dos níveis de vibração pode ser realizada analisando **separadamente** as vibrações nas direções horizontal e vertical, ou então considerando a **combinação** nas três direções x , y e z . O mesmo não faz sentido aplicar às análises em termos de valor de dose de vibração, sendo que este é sempre expresso como a combinação das magnitudes nas 3 direções. Neste caso, por se tratar de vibrações com cerca de 8 Hz de frequência, a segunda metodologia de análise em termos de aceleração eficaz fornece os valores mais conservadores para os limites admissíveis de vibração – $a_{ef,xyz,lim} = 5 \text{ mm/s}^2$ –, pelo que será a adotada (comparar Fig. 5.4, 5.5 e 5.8 para 8 Hz, aproximadamente).

Resta então agora comparar estes valores obtidos com os apresentados nos quadros 5.3 e 5.4. Uma vez que as medições foram efetuadas num edifício residencial – fatores multiplicativos de 2 a 4 –, os

valores admissíveis de vibração de referência para uma exposição contínua de 16 horas seriam, em termos de aceleração eficaz, $a_{ef,lim} = 0,010$ a $0,020 \text{ m/s}^2$ e, em termos de valor de dose de vibração, $VDV_{lim} = 0,217$ a $0,434 \text{ m/s}^{1,75}$. A razão do nível de vibração admissível, no caso de exposições a vibrações diárias em zonas habitacionais, ser representado por um intervalo, é devido à variabilidade subjetiva que cada indivíduo apresenta na sua resposta/reacção à exposição. Para as 8 horas de exposição diárias, a aceleração efectiva admissível altera-se para $a_{ef,lim} = 0,0119$ a $0,0238 \text{ m/s}^2$ (**Quadro 5.4**). Contrariamente, o valor de VDV_{lim} não se altera, dado que ele expressa o **valor de dose de vibração diária admissível**, que é independente do tempo efetivo de exposição à vibração. Concluindo, sem esquecer todos os condicionalismos já expostos nos capítulos antecedentes, pode então afirmar-se que, neste ponto de medição 1, a exposição a este nível de vibração é admissível.

6.2.5. RESULTADOS OBTIDOS / CONCLUSÕES

Na obtenção dos resultados apresentados neste capítulo não foi utilizada qualquer ponderação em frequência. Tratando-se de sinais marcados apenas por uma frequência, a aplicação de filtros de banda larga não faz sentido neste caso, sendo que a sua aplicação no subcapítulo anterior foi apenas por mera demonstração. Isto porque, neste caso em concreto, não se tem em conta a sobreposição de efeitos provenientes do contributo de um espectro mais alargado em frequência, princípio esse que está na origem das referidas ponderações.

Os resultados obtidos nos diversos pontos de medição estão apresentados no quadro seguinte. Os valores de VDV são os obtidos para uma duração de vibração de 8 horas diárias.

Quadro 6.1 – Resultados do nível de vibração obtidos.

Ponto de Medição	Piso	Aceleração eficaz (mm/s^2)				Valor de Dose de Vibração ($\text{mm/s}^{1,75}$)			
		$a_{ef,x}$	$a_{ef,y}$	$a_{ef,z}$	$a_{ef,xyz}$	VDV_x	VDV_y	VDV_z	VDV_{xyz}
1	R/ chão	2,94	2,66	5,55	6,82	57,74	43,16	85,60	90,90
2	R/ chão	1,06	1,01	2,90	3,25	18,81	18,57	45,79	46,41
3	R/ chão	2,42	2,22	2,72	4,26	38,89	60,39	108,63	111,55
4	R/ chão	2,38	4,69	1,64	5,51	40,07	135,25	120,42	152,97
5	1º Piso	1,89	10,31	5,77	11,96	35,27	149,03	85,74	153,06
6	1º Piso	1,91	8,21	3,88	9,28	29,06	118,98	57,76	120,70
7	1º Piso	4,75	8,03	2,08	9,33	69,56	116,21	33,39	119,95
8	1º Piso	4,57	9,42	1,12	10,53	66,87	136,11	21,17	138,07
9	Cave	1,14	1,99	4,46	5,01	18,20	29,81	64,66	65,48
10	Cave	0,93	1,15	3,44	3,75	15,44	18,79	50,54	50,89
11	Cave	0,77	1,04	2,69	2,98	13,12	16,75	40,58	40,98
12	Cave	0,74	2,16	3,64	4,30	12,70	31,98	53,47	55,14

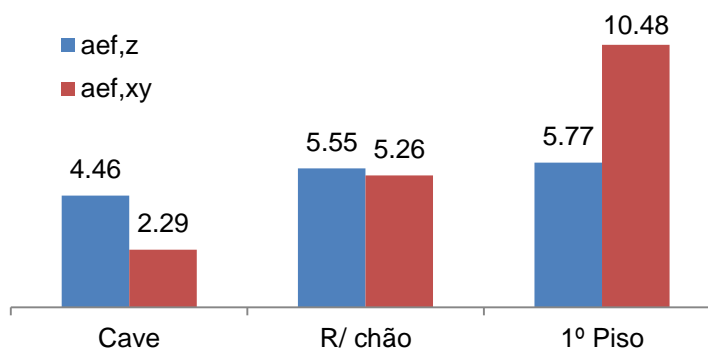


Fig. 6.11 – Evolução dos valores máximos da aceleração eficaz nas direções vertical e horizontal consoante a altura do piso da habitação.

Além do exposto no **subcapítulo 6.1.3**, de forma a averiguar como a aceleração eficaz máxima evolui com a altura do edifício, apresenta-se na **figura 6.11** as suas distribuições. Observa-se que na direção vertical, a ordem de grandeza das acelerações efectivas máximas é aproximadamente a mesma, enquanto na direção horizontal, denota-se o seu aumento conforme se vai subindo na altura do edifício. Isto sucede-se devido à grande rigidez que normalmente estas estruturas possuem na direção vertical, ao contrário do que acontece na direção horizontal, onde o piso superior é sempre mais afetado.

Segundo o **quadro 6.1**, o nível máximo de vibração mensurado assume o valor de $a_{ef} = 11,96 \text{ mm/s}^2$ e o correspondente $VDV_{diário} = 153,06 \text{ mm/s}^{1,75}$, alcançados no 1º piso da moradia. Comparando com os valores referidos no **subcapítulo 6.1.4** - $a_{ef,lim} = 0,0119$ a $0,0238 \text{ m/s}^2$; $VDV_{lim} = 0,217$ a $0,434 \text{ m/s}^{1,75}$ -, observa-se que o valor da aceleração eficaz é praticamente similar ao valor limite quando se assume como fator multiplicativo 2. Portanto, se a moradia for habitada por pessoas mais sensíveis, como idosos ou doentes, está-se perante o limiar de admissibilidade de vibração.

Não se pode deixar de evidenciar que, mesmo em situações em que os níveis de vibração obtidos possam não ser elevados, o desconforto ou incomodidade sentidos pelo ser humano aumentam significativamente quando se registam fenómenos de ressonância, capazes de despoletar ruídos e vibração de objetos no interior da estrutura. No caso de habitações, é exemplo disso o ruído proveniente da trepidação de vidros e/ou janelas e a oscilação de plantas e líquidos em recipientes. No entanto, apesar das normas salientarem este aspecto, não são incluídos estes efeitos nos seus métodos de avaliação, apenas incidindo sobre a ocorrência de transmissão vibratória pelas superfícies de apoio aos indivíduos.

6.3. SEGUNDO CASO: A.N.V. NUMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL

6.3.1. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

De forma a melhor conseguir captar os contributos de modos de vibração simétricos e não-simétricos da laje no registo das vibrações, optou-se por se dispor os pontos de medição segundo uma malha em redor da máquina em funcionamento – colocada na zona central do painel de laje –, conforme é ilustrado na **figura 6.12**. Nesta figura é também delineado o esquema estrutural da laje em betão armado, suportada por pilares e vigas do mesmo tipo.

Neste caso, dada a elevada rigidez horizontal da laje, a gama de amplitudes das medições colhidas nas direções x e y é muito inferior comparativamente à obtida para as oscilações verticais, pelo que a presente análise não irá ter em consideração estas componentes, dado que o fenómeno vibratório em questão apresenta somente particular relevância segundo a direção vertical.

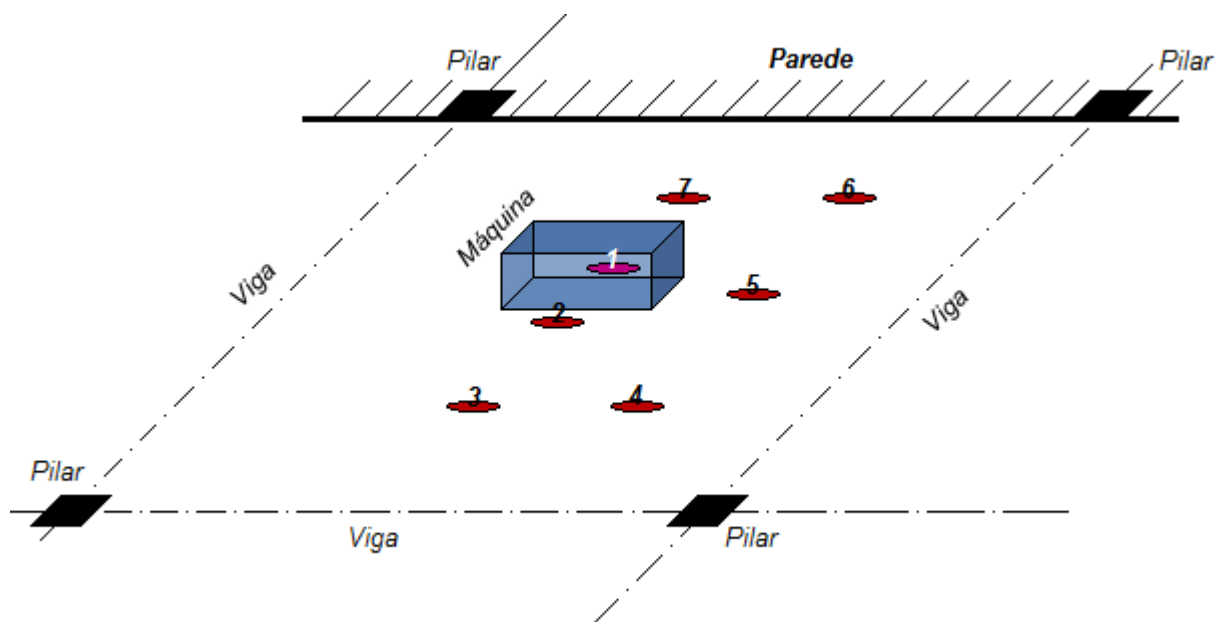


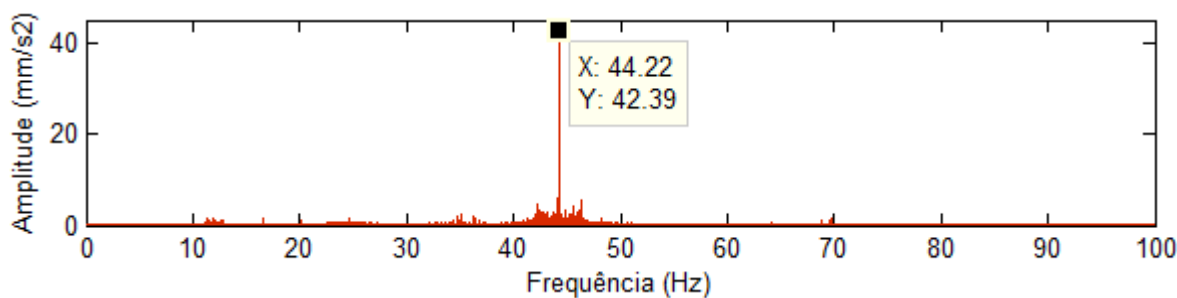
Fig. 6.12 – Esquemática dos pontos de medição na laje.

6.3.2. PARAMETRIZAÇÃO DA MEDIÇÃO

Para a situação descrita, preferiu-se por colher amostras de 16 minutos de duração com intervalos de 4 minutos, perfazendo uma periodicidade de 20 minutos. Em cada medição foi possível registrar dois períodos de funcionamento da máquina de cerca de 5 minutos cada. Contudo, só serão considerados na análise os intervalos de tempo em que o funcionamento da máquina estava estabilizado – ou seja, após o período inicial de intermitência. Portanto, os registos analisados terão apenas duração de 4 minutos, correspondentes à fase estacionária das vibrações. A frequência de aquisição foi fixada nos 200 Hz, de modo a permitir a identificação do conteúdo espectral dos sinais entre os 0,4 Hz aos 100 Hz, conforme é imposto pelas normas (Subcap. 3.2.2.3).

6.3.3. CARACTERIZAÇÃO DA VIBRAÇÃO

Dado que a vibração tem origem devido ao funcionamento de uma máquina, é natural que a frequência da vibração medida estará associada à frequência de rotação do equipamento. Através da aplicação de uma transformada de *Fourier* aos sinais colhidos, obteve-se unissonantemente uma frequência de oscilação de 44 Hz (Fig. 6.13).

Fig. 6.13 – Espectro de *Fourier* tipo dos registos de medições analisados.

Durante o período em que as máquinas não estão em funcionamento é possível através do registo identificar as frequências naturais da laje (normalmente associadas aos picos mais pronunciados nos espectros). Neste caso, existe a possibilidade da frequência de funcionamento da máquina poder cair dentro da banda de frequências naturais mais relevantes da estrutura, dando aso a potenciais fenómenos de ressonância, agravando a análise segundo os critérios de conforto humano (i.e. maiores níveis de vibração).

São em seguida expostos os registos que graficamente apresentam menor e maior amplitude de vibração, respetivamente.

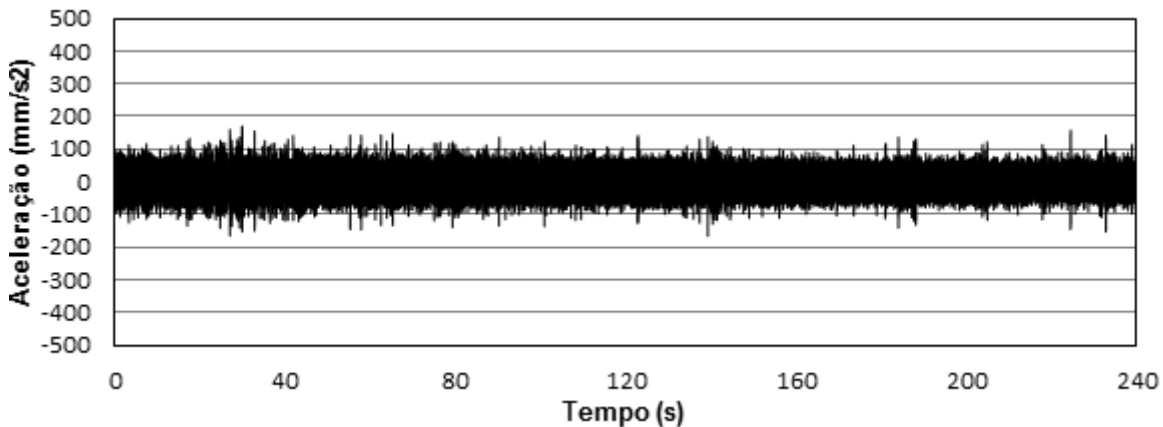


Fig. 6.14 – Série temporal de acelerações registada no ponto de medição 4.

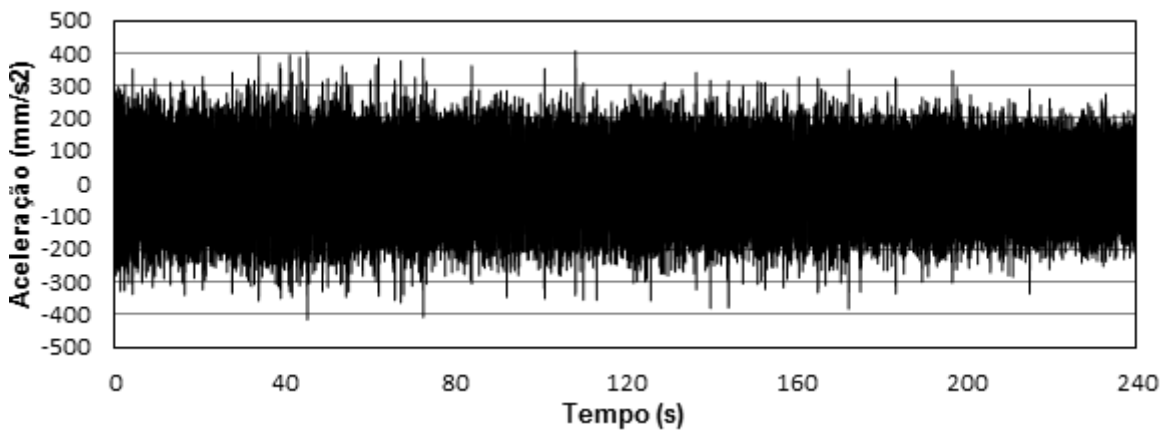


Fig. 6.15 – Série temporal de acelerações registada no ponto de medição 7.

Está-se evidentemente perante uma vibração de carácter uniforme. Para averiguar se a aplicabilidade do método básico de avaliação – r.m.s. – é válida, para o caso mais gravoso, é recomendado recorrer-se ao valor do fator de crista. Sendo o valor da aceleração eficaz de $121,25 \text{ mm/s}^2$ e o da aceleração de pico $416,15 \text{ mm/s}^2$, empregando ambos os valores na equação (5.3), o resultado alcançado é de 3,43, substancialmente inferior aos valores máximos admitidos pelas normas BS 6472 e ISO 2631-2 para tal verificação – 6 e 9, respectivamente. Portanto, a utilização do método básico é válida, não sendo requerido qualquer outro método adicional. Contudo, o nível de vibração será igualmente avaliado recorrendo ao método da dose de vibração da quarta potência.

6.3.4. RESULTADOS OBTIDOS / CONCLUSÕES

Seguindo o mesmo procedimento demonstrado no **subcapítulo 6.1.4** para a obtenção dos resultados, com a exceção da aplicação dos filtros digitais de ponderação em frequência – justificação análoga à exposta no **subcapítulo 6.1.5** – foi possível chegar aos valores expressos no **quadro 6.2**, quer em termos de aceleração eficaz, quer em termos de valor de dose de vibração. Considerou-se o período de funcionamento das máquinas de 8 horas por dia, correspondente ao período de exposição às vibrações na unidade industrial.

Quadro 6.2 – Resultados do nível de vibração obtidos.

Ponto de Medição	Aceleração efectiva (mm/s^2)	Valor de Dose de Vibração ($mm/s^{1,75}$)	
	a_{ef} – equação (5.2)	VDV_{240} – equação (5.8)	$VDV_{diário}$ – equação (5.19)
1	84,53	388,88	1287,11
2	85,43	400,57	1325,78
3	47,87	226,30	749,01
4	46,09	216,35	716,06
5	56,31	263,77	873,00
6	92,81	421,94	1396,52
7	121,25	574,54	1901,58

Interpretando o **quadro 6.2**, foi no ponto de medição 7 que se atingiram os resultados mais severos. Aqui, a aceleração eficaz mensurada foi de $a_{ef} = 121,25 \text{ mm/s}^2$ e o correspondente valor de dose de vibração diário de $VDV_{diário} = 1901,58 \text{ mm/s}^{1,75}$. Tratando-se de uma exposição a vibração contínua numa zona industrial durante o período diurno, o fator multiplicativo a aplicar aos limites admissíveis de vibração é de 8. Atentando no ábaco representado pela **figura 5.10**, para uma frequência de 44 Hz, o valor limite indicado pela curva 8 é de aproximadamente $0,23 \text{ m/s}^2$, praticamente o dobro do nível de vibração mensurado em termos de aceleração eficaz. O valor admissível de dose de vibração diária estimado é de $eVDV_{lim} = 4,988 \text{ m/s}^{1,75}$ – equação (5.15) –, também superior ao dobro do nível de vibração medido. Concluindo, os níveis de vibração a que os trabalhadores/ocupantes desta unidade industrial estão expostos, nestas circunstâncias, é admissível.

7

CONCLUSÕES

O nível de vibração que ocasionalmente se faz sentir durante a ocupação ou utilização de edifícios, ou mais genericamente estruturas, relaciona-se, normalmente, com o que se entende por **limiar de percepção** após as revisões da BS 6472 [2] e a segunda parte da ISO 2631 [5]. As estipulações dos níveis de admissibilidade de vibração por estes regulamentos baseiam-se na probabilidade de ocorrência de queixas adversas, sendo que são admissíveis níveis de vibração até ao limiar definido por “pouca probabilidade de queixas”.

Os efeitos nos seres humanos examinados pela BS 6841 [1] e ISO 2631-1 [4] relacionados com a **saúde** estão mais vocacionados para análises de vibração de corpo inteiro sentidas por manobreadores de maquinaria pesada ou condutores de veículos, onde os níveis de vibração sentidos são substancialmente superiores. No que respeita ao **conforto**, o seu conceito aqui empregue pode ser visto como se compreendesse a “região” de transição entre o nível de vibração notoriamente perceptível e o nível de vibração de alguma potencialidade de risco para a saúde humana. É neste “espaço” de transição que a variabilidade da subjetividade humana adquire a sua maior relevância.

A curva de ponderação a aplicar dependerá da direção da vibração, da posição corporal e do tipo de efeito em análise, podendo o guia de aplicação destas curvas ser observados no **capítulo 3.2.2.1** e no **anexo A.4**.

Relativamente aos métodos de avaliação dos níveis de vibração, no âmbito da análise em estruturas, destacam-se dois métodos: o método de avaliação denominado nas normas como básico, baseado em ponderações *r.m.s.*, i.e. raiz quadrada do valor quadrático médio, e método da dose de vibração da quarta potência, *VDV*. A lógica de adoção será a seguinte: se a vibração que se pretende analisar for de natureza (aproximadamente) periódica, sem grandes perturbações, o método do *r.m.s.* será, em princípio, o indicado, pela posterior simples facilidade de comparação com os valores limiares expostos na norma BS 6472, por exemplo; se a vibração em questão demonstrar um carácter impulsivo ou intermitente, sem um comportamento padrão, então o método do *VDV* será o adequado. Isto porque, como foi já exposto, este método tem uma maior sensibilidade aos picos de magnitude, característicos em vibrações destes tipos. Os valores de referência que não devem ser superados encontram-se nos **quadros 5.3**, referentes a valores *VDV*, e **5.4**, relativamente a valores *r.m.s.*

No último capítulo deste trabalho realizou-se, como já pôde ser observado, uma análise dos níveis de vibração envolvendo duas situações distintas, tendo-se concluindo que, em ambas as circunstâncias, o nível de vibração avaliado pode ser considerado aceitável em termos de conforto humano.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Duarte, M. L. M., Misael, M.R., de Assis Freitas Filho, L.E. *Experimental Evaluation of Vibration Comfort for a Residential Environment*. IMAC-XX: Conference & Exposition on Structural Dynamics, 4 a 7 de Fevereiro 2002, Los Angeles CA, 1376-1377, SPIE: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bellingham.
- [2] BSI – British Standards Institution. BS 6841:1987, *Guide to: Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock*, Londres, 1987.
- [3] BSI – British Standards Institution. BS 6472:1992, *Guide to: Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)*, Londres, 1992.
- [4] ISO – International Organization for Standardization. NP ISO 2631-1:2007, *Vibrações mecânicas e choque: avaliação da exposição do corpo inteiro a vibrações – Parte 1: Requisitos gerais*, versão portuguesa da ISO 2631-1:1997, segunda edição, Genebra, 2007.
- [5] ISO – International Organization for Standardization. ISO 2631-2:1989, *Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)*, primeira edição, Genebra, 1989.
- [6] Griffin, M. J. *Handbook of Human Vibration*. Elsevier Academic Press, Londres, 1990.
- [7] <http://mathworld.wolfram.com/FourierSeries.html>. 26 de Abril de 2013.
- [8] von Gierke, H. E. *Biodynamic Models and Their Applications*. Journal Acoustical Society of America 50, 1/6/1971, 1397-1413, Acoustical Society of America.
- [9] von Gierke, H. E., Brammer, A. J. Capítulo 44: Effects of shock and vibration on humans. In *Shock and Vibration Handbook*, quarta edição de Harris C. M. McGraw-Hill, Nova Iorque, 1996.
- [10] Chang, F. K. *Human Response to Motions in Tall Buildings*. Journal of the Structural Division vol. 99,1259-1272, 6/1973, American Society of Civil Engineers, Nova Iorque.
- [11] Moutinho, C. M. R. e Cunha, A. *Control of Vibrations in Civil Engineering Structures*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Departamento de Engenharia Civil, 2008.
- [12] Griffin, M. J., Whitham, E. M. Capítulo 3: Vibration discomfort. In *Handbook of Human Vibration*, 71-73, Elsevier Academic Press, Londres, 1990.
- [13] <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers.aspx>. 17 de Maio de 2013.
- [14] <http://www.geosig.com/GSR-18-id10363.html>. 17 de Maio de 2013.
- [15] Shannon, C. E. *Communication in the Presence of Noise*. Proceedings of the IEEE vol. 86 no. 2, 2/1998, 447-457, IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, Nova Jersey.
- [16] Pavic A., Reynolds, P., Waldron, P., Bennett, K.J. *Critical review of guidelines for checking vibration serviceability of post-tensioned concrete floors*, Cement and Concrete Composites, 2/2001, 21-31, Elsevier Science Ltd.
- [17] Salyards, K. A. *Analytical Prediction of the Dynamic Behavior of Stadium Structures for Vertical Vibration Serviceability Assessment*. Dissertação de Doutoramento, College of Engineering of Pennsylvania State University, 2007.

A

ANEXOS

A.1. APLICAÇÃO ALGORÍTMICA DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

MatLab

```
% Criação do sinal

Fa = 200;           % Frequência de amostragem
T = 1/Fa;          % Período da amostra
L = 2000;          % Comprimento do sinal
t = (0:L-1)*T;     % Vetor tempo

% Soma de duas sinusóides de 20 Hz e 80 Hz

x = sin(2*pi*20*t)+sin(2*pi*80*t);
u = x+2*randn(size(t)); % Adicionar "ruído" ao sinal

% Aplicação da transformada de Fourier

NFFT = 2^nextpow2(L); % Próxima potência de 2 do comprimento de y
U = fft(u,NFFT)/L;    % Transformada de y
freq = Fa/2*linspace(0,1,NFFT/2+1); % Frequência espectral
U1 = 2*abs(U(1:NFFT/2+1))

plot(freq,U1)
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Amplitude (m)')
```

A.2. PONDERAÇÕES EM FREQUÊNCIA (NP ISO 2631-1 [4])

Quadro A.1 – Ponderações principais em frequência, segundo bandas de terço de oitava.

Número da banda de frequências ¹⁾ <i>x</i>	Frequência <i>f</i> Hz	W_k		W_d		W_f	
		factor x 1000	dB	factor x 1000	dB	factor x 1000	dB
-17	0,02					24,2	-32,33
-16	0,025					37,7	-28,48
-15	0,0315					59,7	-24,27
-14	0,04					97,1	-20,25
-13	0,05					157	-16,10
-12	0,063					267	-11,49
-11	0,08					461	-6,73
-10	0,1	31,2	-30,11	62,4	-24,09	695	-3,16
-9	0,125	48,6	-26,26	97,3	-20,24	895	-0,96
-8	0,16	79,0	-22,05	158	-16,01	1006	0,05
-7	0,2	121	-18,33	243	-12,28	992	-0,07
-6	0,25	182	-14,81	365	-8,75	854	-1,37
-5	0,315	263	-11,60	530	-5,52	619	-4,17
-4	0,4	352	-9,07	713	-2,94	384	-8,31
-3	0,5	418	-7,57	853	-1,38	224	-13,00
-2	0,63	459	-6,77	944	-0,50	116	-18,69
-1	0,8	477	-6,43	992	-0,07	53,0	-25,51
0	1	482	-6,33	1011	0,10	23,5	-32,57
1	1,25	484	-6,29	1008	0,07	9,98	-40,02
2	1,6	494	-6,12	968	-0,28	3,77	-48,47
3	2	531	-5,49	890	-1,01	1,55	-56,19
4	2,5	631	-4,01	776	-2,20	0,64	-63,93
5	3,15	804	-1,90	642	-3,85	0,25	-71,96
6	4	967	-0,29	512	-5,82	0,097	-80,26
7	5	1039	0,33	409	-7,76		
8	6,3	1054	0,46	323	-9,81		
9	8	1036	0,31	253	-11,93		
10	10	988	-0,10	212	-13,91		
11	12,5	902	-0,89	161	-15,87		
12	16	768	-2,28	125	-18,03		
13	20	636	-3,93	100	-19,99		
14	25	513	-5,80	80,0	-21,94		
15	31,5	405	-7,86	63,2	-23,98		
16	40	314	-10,05	49,4	-26,13		
17	50	246	-12,19	38,8	-28,22		
18	63	186	-14,61	29,5	-30,60		
19	80	132	-17,56	21,1	-33,53		
20	100	88,7	-21,04	14,1	-36,99		
21	125	54,0	-25,35	8,63	-41,28		
22	160	28,5	-30,91	4,55	-46,84		
23	200	15,2	-36,38	2,43	-52,30		
24	250	7,90	-42,04	1,26	-57,97		
25	315	3,98	-48,00	0,64	-63,92		
26	400	1,95	-54,20	0,31	-70,12		

Quadro A.2 – Ponderações adicionais em frequência, segundo bandas de terço de oitava.

Número da banda de frequências ¹⁾ x	Frequência f Hz	W_c		W_o		W_j	
		factor x 1000	dB	factor x 1000	dB	factor x 1000	dB
-10	0,1	62,4	-24,11	62,5	-24,08	31,0	-30,18
-9	0,125	97,2	-20,25	97,5	-20,22	48,3	-26,32
-8	0,16	158	-16,03	159	-15,98	78,5	-22,11
-7	0,2	243	-12,30	245	-12,23	120	-18,38
-6	0,25	364	-8,78	368	-8,67	181	-14,86
-5	0,315	527	-5,56	536	-5,41	262	-11,65
-4	0,4	708	-3,01	723	-2,81	351	-9,10
-3	0,5	843	-1,48	862	-1,29	417	-7,60
-2	0,63	929	-0,64	939	-0,55	458	-6,78
-1	0,8	972	-0,24	941	-0,53	478	-6,42
0	1	991	-0,08	880	-1,11	484	-6,30
1	1,25	1000	0,00	772	-2,25	485	-6,28
2	1,6	1007	0,06	632	-3,99	483	-6,32
3	2	1012	0,10	512	-5,82	482	-6,34
4	2,5	1017	0,15	409	-7,77	489	-6,22
5	3,15	1022	0,19	323	-9,81	524	-5,62
6	4	1024	0,20	253	-11,93	628	-4,04
7	5	1013	0,11	202	-13,91	793	-2,01
8	6,3	974	-0,23	160	-15,94	946	-0,48
9	8	891	-1,00	125	-18,03	1017	0,15
10	10	776	-2,20	100	-19,98	1030	0,26
11	12,5	647	-3,79	80,1	-21,93	1026	0,22
12	16	512	-5,82	62,5	-24,08	1018	0,16
13	20	409	-7,77	50,0	-26,02	1012	0,10
14	25	325	-9,76	39,9	-27,97	1007	0,06
15	31,5	256	-11,84	31,6	-30,01	1001	0,00
16	40	199	-14,02	24,7	-32,15	991	-0,08
17	50	156	-16,13	19,4	-34,24	972	-0,24
18	63	118	-18,53	14,8	-36,62	931	-0,62
19	80	84,4	-21,47	10,5	-39,55	843	-1,48
20	100	56,7	-24,94	7,07	-43,01	708	-3,01
21	125	34,5	-29,24	4,31	-47,31	539	-5,36
22	160	18,2	-34,80	2,27	-52,86	364	-8,78
23	200	9,71	-40,26	1,21	-58,33	243	-12,30
24	250	5,06	-45,92	0,63	-63,99	158	-16,03
25	315	2,55	-51,88	0,32	-69,94	100	-19,98
26	400	1,25	-58,08	0,16	-76,14	62,4	-24,10

A.3. FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE FILTROS DIGITAIS

A.3.1. ALGORITMO: CURVA DE PONDERAÇÃO W_k [17] (NP ISO 2631-1 [4])

MatLab

```

df = 0.05;           % Resolução em frequência
np = 2000;          % Metade do número de pontos do sinal no domínio do tempo

for i=1:1:np;

    f(i)=i*df;
    f1=0.4;
    f2=100;
    f3=12.5;
    f4=12.5;
    f5=2.37;
    f6=3.35;
    Q4=0.63;
    Q5=0.91;
    Q6=0.91;
    w1=2*pi*f1;
    w2=2*pi*f2;
    w3=2*pi*f3;
    w4=2*pi*f4;
    w5=2*pi*f5;
    w6=2*pi*f6;
    p=2*pi*f(i)*1i;

    %limite de banda;
    Hh(1,i)=1/(1+sqrt(2)*w1/p+(w1/p)^2);
    %passa-baixo;
    Hl(1,i)=1/(1+sqrt(2)*p/w2+(p/w2)^2);
    %transição da aceleração-velocidade;
    Ht(1,i)=(1+p/w3)/(1+p/(Q4*w4)+(p/w4)^2);
    %passo ascendente;
    Hs(1,i)=((1+p/(Q5*w5)+(p/w5)^2)/(1+p/(Q6*w6)+(p/w6)^2))*(w5/w6)^2;
end

H=Hh.*Hl.*Ht.*Hs;
plot(f,abs(H),'-'),grid on, hold on;
%semilogx(f,20*log10(H);           % Representação conforme norma

% Procedimento através de A e B

dfw=pi/length(H);
w=((0:length(H)-1)*dfw);
NB=20;
NA=32;
[B,A]=invfreqz(H,w,NB,NA,[],'iter');
[nH,nf]=freqz(B,A,np,2*np*df);

plot(nf,abs(nH),'-');
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('Ponderação em Frequência');

```

A.3.2. ALGORITMO: CURVA DE PONDERAÇÃO W_b (NP ISO 2631-1 [4])

MatLab

```
df = 0.05;           % Resolução em frequência
np = 2000;          % Metade do número de pontos do sinal no domínio do tempo

for i=1:1:np

    f(i)=i*df;
    f1=0.4;
    f2=100;
    f3=2;
    f4=2;
    Q4=0.63;
    w1=2*pi*f1;
    w2=2*pi*f2;
    w3=2*pi*f3;
    w4=2*pi*f4;
    p=2*pi*f(i)*1i;

    %limite de banda;
    Hh(1,i)=abs(1/(1+sqrt(2)*w1/p+(w1/p)^2));
    %passa-baixo;
    Hl(1,i)=abs(1/(1+sqrt(2)*p/w2+(p/w2)^2));
    %transição da aceleração-velocidade;
    Ht(1,i)=abs((1+p/w3)/(1+p/(Q4*w4)+(p/w4)^2));
end

H=Hh.*Hl.*Ht;
plot(f,abs(H),'-'),grid on, hold on;
%semilogx(f,20*log10(H));           % Representação conforme norma

% Procedimento através de A e B

dfw=pi/length(H);
w=((0:length(H)-1)*dfw);
NB=10;
NA=16;
[B,A]=invfreqz(H,w,NB,NA,[],'iter');
[nH,nf]=freqz(B,A,np,2*df*np);

plot(nf,abs(nH),'-');
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('Ponderação em Frequência');
```

A.3.3. FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DOS FILTROS DIGITAIS – BS 6841 [2]

Quadro A.3 – Parâmetros das funções de transferência das ponderações adicionais em frequência.

Curva	Limitação de banda			Ponderação em frequência							
	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	Q_1	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_5 (Hz)	f_6 (Hz)	Q_2	Q_3	Q_4	K
W_b	0,4	100	0,71	16	16	2,5	4	0,55	0,90	0,95	0,4
W_c	0,4	100	0,71	8	8	--	--	0-63	--	--	1,0
W_d	0,4	100	0,71	2	2	--	--	0,63	--	--	1,0
W_e	0,4	100	0,71	1,0	1,0	--	--	0,63	--	--	1,0
W_f	0,08	0,63	0,71	∞	0,250	0,0625	0,10	0,86	0,8	0,8	0,4
W_g	0,8	100	0,71	1,5	5,3	--	--	0,68	--	--	0,42

Os filtros de limitação de banda são dados por:

$$H_b(s) = \frac{s^2 \cdot 4\pi^2 f_2^2}{(s^2 + \frac{2\pi f_1}{Q_1} \cdot s + 4\pi^2 f_1^2)(s^2 + \frac{2\pi f_2}{Q_1} \cdot s + 4\pi^2 f_2^2)}$$

As curvas de ponderação W_c , W_d , W_e e W_g , constituídas por dois filtros de pólo, são dadas por:

$$H_w(s) = \frac{(s + 2\pi f_3)}{(s^2 + \frac{2\pi f_4}{Q_2} \cdot s + 4\pi^2 f_4^2)} \cdot \frac{2\pi K \cdot f_4^2}{f_3}$$

As curvas de ponderação W_b e W_f são dadas por:

$$H_w(s) = \frac{(s + 2\pi f_3)(s^2 + \frac{2\pi f_5}{Q_3} \cdot s + 4\pi^2 f_5^2)}{(s^2 + \frac{2\pi f_4}{Q_2} \cdot s + 4\pi^2 f_4^2)(s^2 + \frac{2\pi f_6}{Q_4} \cdot s + 4\pi^2 f_6^2)} \cdot \frac{2\pi K f_4^2 \cdot f_6^2}{f_3 \cdot f_5^2}$$

Os parâmetros:

- f_i (i = 1 a 6) designam as frequências de ressonância;
- Q_j (j = 1 a 4) são os fatores da qualidade da ressonância - seletividade;
- K designa um ganho constante
- s (equivalente a p no **capítulo 3.2.2.4**) é o operador de Laplace.

A.3.4. ALGORITMO: CURVA DE PONDERAÇÃO W_b (BS 6841 [2])

MatLab

```

df = 0.05;           % Resolução em frequência
np = 2000;          % Metade do número de pontos do sinal no domínio do tempo

for i=1:1:np;

    f(i)=i*df;
    f1=0.4;
    f2=100;
    f3=16;
    f4=16;
    f5=2.50;
    f6=4;
    Q1=0.71;
    Q2=0.55;
    Q3=0.90;
    Q4=0.95;
    K=0.4;
    s=2*pi*f(i)*1i;

    H(1,i)=((s+2*pi()*f3)*(s^2+(2*pi()*f5/Q3)*s+4*pi()^2*f5^2)*(2*pi()*K*f4^2*f
6^2))/((s^2+(2*pi()*f4/Q2)*s+4*pi()^2*f4^2)*(s^2+(2*pi()*f6/Q4)*s+4*pi()^2*
f6^2)*(f3*f5^2));
end

plot(f,abs(H),'-'),grid on, hold on;

% Procedimento através de A e B

dfw=pi/length(O);
w=(0:length(O)-1)*dfw;
NB=2;
NA=4;
[B,A]=invfreqz(O,w,NB,NA,[],'iter');
[nH,nf]=freqz(B,A,np,2*np*df);

plot(nf,abs(nH),'-');
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Ponderação em Frequência')

```

NOTA: A ordem dos polinômios da função transferência, NB e NA, têm de ser modificados se o número de pontos do sinal no domínio do tempo e a resolução em frequência for diferente da apresentada. Quando o número de pontos aumenta – e a resolução em frequência diminui – a ordem dos polinômios tem de subir para manter a precisão da curva de ponderação em frequência e vice-versa.

A.4. FATORES MULTIPLICATIVOS A APLICAR NAS CURVAS DE PONDERAÇÃO W_i

A.4.1. BS 6841 [2]

Os eixos aqui enunciados correspondem aos representados na **figura 3.3**.

Quadro A.4 – Guia para a aplicação das curvas de ponderação em frequência.

Curva	Saúde	Perturbação de atividades		Conforto	Percepção	Enjoo ao movimento
		Controlo de mãos	Visão			
W_b	z-assento	--	--	z-assento	z-assento	--
	z-em pé			x-,y-,z-pés	--	
				z-em pé	z-em pé	
				vertical (deitado)	vertical (deitado)	
W_c	x-costas	--	--	x-costas	--	--
W_d	x-assento	x-assento	--	x-assento	x-assento	--
	y-assento	y-assento	--	y-assento	y-assento	
	x-,y-em pé			x-,y-em pé	x-,y-em pé	
				horizontal (deitado)	horizontal (deitado)	
			y-,z-costas	--		
W_e	--	--	--	r_x, r_y, r_z assento	--	--
W_f	--	--	--	--	--	z-vertical
W_g	--	z-assento	z-assento	--	--	--

A.4.1.1. Guia para a avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos na **saúde**

eixo $-x$ na superfície de suporte

curva de ponderação W_a ($k = 1$)

eixo $-y$ na superfície de suporte

curva de ponderação W_a ($k = 1$)

eixo $-z$ na superfície de suporte

curva de ponderação W_b ($k = 1$)

eixo $-x$ no encosto de costas

curva de ponderação W_c ($k = 1$)

NOTA: a superfície de suporte é o assento numa pessoa sentada e o chão numa pessoa em pé.

A.4.1.2. Guia para a avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos no **desenvolvimento de atividades**

eixo $-x$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-y$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-z$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_g (k = 1)$

A.4.1.3. Guia para a avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos no **conforto**

Indivíduo sentado:

eixo $-x$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-y$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-z$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_b (k = 1)$

Nalguns ambientes, o conforto de uma pessoa sentada é afetado pela vibração rotacional do assento, pela vibração do encosto das costas e pela vibração dos pés em contacto com o chão:

eixo $-r_x$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_e (k = 0,63)$
eixo $-r_y$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_e (k = 0,4)$
eixo $-r_z$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_e (k = 0,2)$
eixo $-x$ no encosto de costas	curva de ponderação $W_c (k = 0,8)$
eixo $-y$ no encosto de costas	curva de ponderação $W_d (k = 0,5)$
eixo $-z$ no encosto de costas	curva de ponderação $W_d (k = 0,4)$
eixo $-x$ no solo	curva de ponderação $W_b (k = 0,25)$
eixo $-y$ no solo	curva de ponderação $W_b (k = 0,25)$
eixo $-z$ no solo	curva de ponderação $W_b (k = 0,4)$

Indivíduo em pé:

eixo $-x$ no solo	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-y$ no solo	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-z$ no solo	curva de ponderação $W_b (k = 1)$

Indivíduo deitado:

vibração vertical da superfície de suporte	curva de ponderação $W_b (k = 1)$
vibração horizontal da superfície de suporte	curva de ponderação $W_d (k = 1)$

A.4.1.4. Guia para a avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos na **percepção**

Indivíduo sentado:

eixo $-x$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-y$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-z$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_b (k = 1)$

Indivíduo em pé:

eixo $-x$ no solo	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-y$ no solo	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-z$ no solo	curva de ponderação $W_b (k = 1)$

Indivíduo deitado:

vibração vertical da superfície de suporte	curva de ponderação $W_b (k = 1)$
vibração horizontal da superfície de suporte	curva de ponderação $W_d (k = 1)$

A.4.2. NP ISO 2631-1 [4]

O guia de aplicação das curvas de ponderação em frequência desta norma foi já exposto no **capítulo 3.2.2.1**. Apresentam-se aqui apenas os respetivos fatores multiplicativos a aplicar consoante o tipo de afetação em análise.

A.4.2.1. Guia para a avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos na **saúde**

Pessoas sentadas:

eixo $-x$ na superfície de suporte	curva de ponderação $W_d (k = 1,4)$
eixo $-y$ na superfície de suporte	curva de ponderação $W_d (k = 1,4)$
eixo $-z$ na superfície de suporte	curva de ponderação $W_k (k = 1)$
eixo $-x$ no encosto de costas	curva de ponderação $W_c (k = 0,8)$

A.4.2.2. Guia para a avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos no **conforto**

Indivíduo sentado:

eixo $-x$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-y$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-z$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_k (k = 1)$

Nalguns ambientes, o conforto de uma pessoa sentada é afetado pela vibração rotacional do assento, pela vibração do encosto das costas e pela vibração dos pés em contacto com o chão:

eixo $-r_x$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_e (k = 0,63)$
eixo $-r_y$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_e (k = 0,4)$
eixo $-r_z$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_e (k = 0,2)$
eixo $-x$ no encosto de costas	curva de ponderação $W_c (k = 0,8)$
eixo $-y$ no encosto de costas	curva de ponderação $W_d (k = 0,5)$
eixo $-z$ no encosto de costas	curva de ponderação $W_d (k = 0,4)$
eixo $-x$ no solo	curva de ponderação $W_k (k = 0,25)$
eixo $-y$ no solo	curva de ponderação $W_k (k = 0,25)$
eixo $-z$ no solo	curva de ponderação $W_k (k = 0,4)$

Indivíduo em pé:

eixo $-x$ no solo	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-y$ no solo	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-z$ no solo	curva de ponderação $W_k (k = 1)$

Indivíduo deitado, medição sob a pélvis:

vibração vertical da superfície de suporte	curva de ponderação $W_k (k = 1)$
vibração horizontal da superfície de suporte	curva de ponderação $W_d (k = 1)$

A.4.2.2. Guia para a avaliação dos níveis de vibração respeitante aos efeitos na percepção

Indivíduo sentado:

eixo $-x$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-y$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-z$ na superfície de assento	curva de ponderação $W_k (k = 1)$

Indivíduo em pé:

eixo $-x$ no solo	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-y$ no solo	curva de ponderação $W_d (k = 1)$
eixo $-z$ no solo	curva de ponderação $W_k (k = 1)$

Indivíduo deitado:

vibração vertical da superfície de suporte	curva de ponderação $W_b (k = 1)$
vibração horizontal da superfície de suporte	curva de ponderação $W_k (k = 1)$

