

## AVALIAÇÃO DE INCOMODIDADE DEVIDO A VIBRAÇÕES VELOCIDADE OU ACELERAÇÃO

PACS: 43.40.-r

Carlos Aroeira<sup>(1)</sup>; Carlos César Rodrigues<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> dBwave.i; <sup>(2)</sup> Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

<sup>(1)</sup> Av. Prof. Dr. Cavaco Silva, 33; 2780-920 Porto Salvo; Portugal; Tel: (+351) 214228197; Fax: (+351) 214228120; e-mail: [dbwave@dbwave.pt](mailto:dbwave@dbwave.pt)

<sup>(2)</sup> Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1; 1959-007 Lisboa; Portugal; Tel:(+351) 218317000; Fax: (+351) 218317162; e-mail: [crodrigues@adf.isel.pt](mailto:crodrigues@adf.isel.pt)

**Palavras chave:** Vibrações, Incomodidade, Velocidade, Aceleração

### ABSTRACT

The evaluation of discomfort due to vibrations is generally addressed in national standards of several countries.

However, it is far from unanimous which measurement vibration parameter should be used for this purpose: velocity or acceleration?

In Portugal, this situation often leads the vibration assessment technicians to a huge challenge, as they have to decide on the existence of possible vibration discomfort, without defined legal limits and without international consensus on the best evaluation practices.

In this paper, the authors present a review of several evaluation vibrations discomfort criteria, being presented and discussed the vibration parameters used in such measurements.

### RESUMO

A avaliação de incomodidade devido a vibrações é globalmente abordada na normalização nacional de diversos países.

Contudo, está longe de existir unanimidade sobre qual o parâmetro de medição de vibrações a utilizar para este fim: velocidade ou aceleração?

Em Portugal, esta situação coloca, com regularidade, um desafio aos técnicos de avaliação de vibrações, já que terão de se pronunciar sobre a existência de eventual incomodidade, sem que se encontrem definidos limites legais e sem que exista consenso internacional sobre as melhores práticas de avaliação.

Neste artigo, os autores apresentam a revisão de diversos critérios de avaliação de incomodidade devido a vibrações, sendo apresentados e discutidos os parâmetros de medição de vibrações utilizados.

## 1. INTRODUÇÃO

A melhoria do ambiente acústico no interior das habitações tem tido, designadamente em Portugal, uma evolução manifestamente crescente ao longo dos últimos anos.

Não só por este facto, mas profundamente influenciado pelo mesmo, as populações passaram a evidenciar um muito maior grau de exigência relativamente às condições de isolamento do edificado, designadamente no que às vibrações produzidas por infra-estruturas de transporte e outras fontes geradoras, diz respeito.

Em consequência, observa-se um contínuo aumento do número de reclamações devido à incomodidade sentida pelas populações no interior das suas habitações, como resultado das vibrações geradas no respectivo exterior.

É, portanto, imperioso que sejam definidas metodologias de medição e análise de vibrações que, de modo tão objectivo quanto possível, permitam responder às situações existentes e às que futuramente certamente surgirão.

## 2. RESPOSTA HUMANA A VIBRAÇÕES EM EDIFÍCIOS

A resposta humana às vibrações, em particular as que são sentidas no interior dos edifícios, está dependente de factores objectivos e de factores subjectivos, designadamente dos seguintes:

### Factores objectivos

#### I. O Ser Humano como receptor da vibração

- Limiar de percepção individual
- Frequência da vibração
- Direcção da vibração
- Tempo de exposição à vibração
- Amplitude da vibração recebida

#### II. A vibração no receptor

- Estacionariedade
- Impulsividade
- Conteúdo espectral
- Amplitude
- Frequência de ocorrência
- Período do dia

#### III. Outros fenómenos (efeitos paralelos)

- Outros efeitos vibratórios
- Ruído

### Factores subjectivos

#### I. Variáveis de atitude

- Sensibilidade pessoal para o fenómeno que origina a vibração
- Medo das consequências para a integridade estrutural do edifício
- Expectativa da ocorrência do fenómeno
- Duração do fenómeno

#### II. Variáveis sociodemográficas

- Idade
- Sexo
- Educação

#### III. Variáveis situacionais

- Tempo de permanência no edifício
- Actividade desenvolvida
- Hora do dia

### 3. INFLUÊNCIA DA HISTÓRIA DA TECNOLOGIA NA CARACTERIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES

Os meios tecnológicos utilizados pelos investigadores que ao longo dos anos se dedicaram à caracterização das vibrações, influenciaram decisivamente os resultados dos estudos efectuados bem como a normalização actualmente existente.

Os primeiros transdutores com geração de sinal eléctrico utilizados em medições de vibrações, foram sensores de velocidade de vibração que permitiram, no início do século XX, o estudo de fenómenos sísmológicos.

A utilização de sensores de aceleração, designadamente de acelerómetros piezoeléctricos, surge pela primeira vez, na Dinamarca, nos anos 40.

Ocorreram, assim, algumas dezenas de anos de investigação de fenómenos vibratórios com recurso a sensores de velocidade, levando a que, por exemplo, na normalização alemã de vibrações em estruturas, nomeadamente na DIN 4150-1<sup>1</sup>, o parâmetro de medição e análise de vibrações sistematicamente referido é a velocidade de vibração.

Actualmente, enquanto em engenharia civil os sismógrafos com sensores de velocidade continuam a ser frequentemente utilizados, a maior versatilidade dos acelerómetros piezoeléctricos agora existentes determina que a sua utilização seja cada vez mais universal.

Assim, o estudo dos efeitos das vibrações recebidas pelo Ser Humano, nomeadamente no que respeita à influência das mesmas na saúde, vem sendo realizado através de medições que recorrem à utilização de acelerómetros piezoeléctricos.

Deste modo se compreende que a normalização internacional aplicável à avaliação dos efeitos das vibrações no corpo humano, designadamente no sistema mão-braço e/ou no corpo inteiro, apresente resultados em aceleração.

### 4. PERCEPÇÃO DAS VIBRAÇÕES

As primeiras tabelas que permitiam avaliar a reacção humana às vibrações apresentam valores em velocidade, sem ter em conta a respectiva resposta em frequência, isto é, sem ter em conta o conteúdo espectral da vibração.

Em Portugal, ainda é muito utilizado um critério daquele tipo, vulgarmente designado por “Critério do LNEC”<sup>2</sup> (ver Tabela 1).

$v_{ef}$ (mm/s)	Sensação
$v_{ef} < 0,11$	Nula
$0,11 < v_{ef} < 0,28$	Perceptível. Suportável para pequena duração
$0,28 < v_{ef} < 1,10$	Nítida. Incómoda, podendo afectar as condições de trabalho
$1,10 < v_{ef}$	Muito nítida. Muito incómoda, reduzindo as condições de trabalho

Tabela 1 - “Critério do LNEC”

Os estudos efectuados sobre os efeitos das vibrações transmitidas ao Ser Humano mostram, inequivocamente, que o limiar de sensibilidade humana à vibração é dependente do espectro em frequência da mesma.

Este facto é evidenciado na Figura 1, onde é possível observar o modo como varia, na direcção vertical, o limiar de sensibilidade humana à vibração em edifícios, em função da frequência e com diferentes ponderações em frequência<sup>3</sup>.

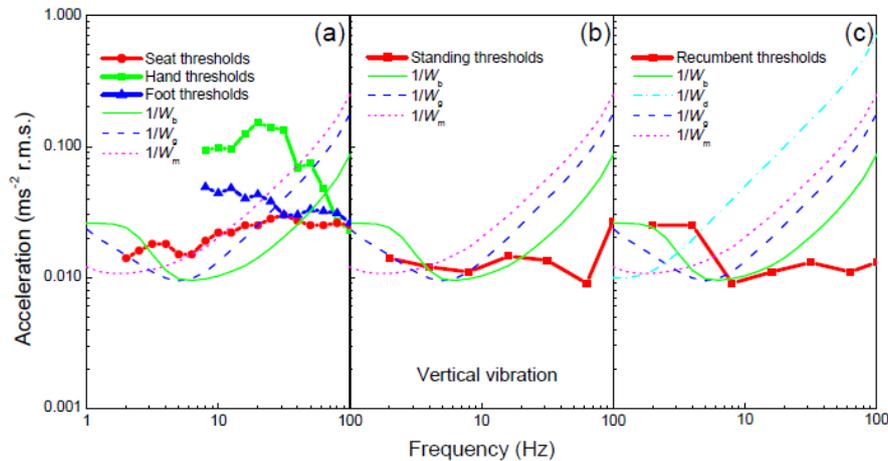


Figura 1 - Variação, na direcção vertical, do limiar de sensibilidade humana à vibração

Os estudos experimentais efectuados sobre os efeitos da transmissão de vibrações ao Ser Humano também permitiram a obtenção das denominadas curvas de igual percepção<sup>4</sup>, tendo sido possível constatar que a amplitude de vibração é o parâmetro que melhor identifica a reacção humana à incomodidade percebida pela exposição às vibrações.

Verificou-se, igualmente, que o tempo de exposição à vibração influencia a resposta humana à respectiva incomodidade, embora este parâmetro tenha menor peso quando comparado com o relativo à amplitude de vibração.

Por exemplo, no parâmetro VDV (Valor da Dose de Vibração) referido na norma portuguesa NP ISO 2631-1<sup>5</sup> e na norma britânica BS 6472-1<sup>6</sup>, o valor da amplitude de vibração é elevado à quarta potência enquanto o tempo de exposição não é afectado por qualquer expoente. Deste modo, o VDV apenas dá relevância às vibrações caracterizadas por maiores níveis de amplitude, independentemente do respectivo tempo de exposição.

Os seres humanos também apresentam um tempo de resposta na sua reacção às vibrações. A NP ISO 2631-1 refere que a percepção humana é crescente durante o primeiro segundo de ocorrência, mantendo-se posteriormente inalterada.

## 5. VIBRAÇÕES NO RECEPTOR

No que respeita à reacção humana às vibrações, reveste-se, também, da maior importância, a distribuição temporal dos fenómenos vibratórios.

De facto, para além dos parâmetros anteriormente referidos, também a hora do dia em que ocorrem as vibrações, a frequência destas e o respectivo grau de estacionariedade, provaram ser relevantes quando se pretende estudar os efeitos da transmissão de vibrações ao Ser Humano.

Durante o período da noite, devido à habitual inexistência de outras fontes perturbadoras, aliada ao facto de, normalmente, o Ser Humano se encontrar com menor actividade, observa-se a detecção de fenómenos, designadamente vibratórios, que durante o período do dia passam despercebidos, até porque, frequentemente, as habitações se encontram desabitadas.

Por fim, deve também ter-se em linha de conta que a avaliação dos efeitos da transmissão de vibrações, designadamente no que à incomodidade sentida pelo Ser Humano diz respeito, depende do carácter impulsivo das mesmas, bem como da respectiva frequência de ocorrência.

## 6. MEDIÇÃO DAS VIBRAÇÕES

### Estacionariedade e Impulsividade

De acordo com a NP ISO 2631-1, nos casos em que:

- O factor crista da vibração é superior a 9
- A ocorrência do fenómeno vibratório é de carácter transitório
- A vibração é originada por choques ocasionais

a amplitude de vibração medida durante o período de tempo em que se avalia a eventual incomodidade não é o parâmetro adequado para a respectiva caracterização, devendo ser utilizados os parâmetros VDV ou MTTV (Método do Valor Eficaz em Contínuo).

Nos casos acima referidos a BS 6472-1 recomenda a utilização do parâmetro VDV.

Pelo contrário, a DIN 4150-2<sup>7</sup> recomenda que para a caracterização da vibração seja obtido o valor da amplitude da velocidade de vibração com um tempo de resposta de 125 ms, bem como o valor eficaz da mesma em intervalos de trinta segundos.

Deste modo, e considerando as diferenças entre os critérios propostos pelas diferentes normas, surge como consensual que a amplitude de vibração medida durante o respectivo período de ocorrência, não é o parâmetro adequado para a caracterização de fenómenos vibratórios que não apresentem um nível constante.

Já no caso de vibrações geradas por explosões, quer a BS 6472-2<sup>8</sup> quer a DIN 4150-2, recomendam que seja medida a respectiva velocidade de vibração, sendo que os critérios de avaliação propostos são apresentados em função deste parâmetro.

Muito relevante também é o facto de, normalmente, se pretender utilizar um único equipamento de medição, tipicamente um sismógrafo, para avaliar, em simultâneo, a influência das vibrações na integridade das estruturas e na reacção humana à eventual geração de incomodidade

### Conteúdo Espectral e Ponderação em Frequência

A diversa normalização internacional aplicável ao estudo dos efeitos das vibrações transmitidas a estruturas e/ou ao Ser Humano, designadamente as normas acima referidas, recomendam uma gama de medição entre 0,5/1 Hz e 80 Hz.

Esta gama de frequências para a avaliação da transmissão de vibrações corresponde, por um lado à resposta em frequência do limiar de sensibilidade humana e, por outro, ao intervalo de frequências relevante para o estudo das possíveis nefastas consequências para a integridade estrutural dos edifícios.

As vibrações com um conteúdo espectral importante em frequências inferiores a 1 Hz apenas ocorrem em edifícios muito altos, sendo que nestes casos a incomodidade gerada é bastante significativa já que, vulgarmente, resulta em fenómenos de enjoo.

Comum a toda a normalização aplicável ao estudo dos efeitos dos fenómenos vibratórios, é o facto de todas as normas recomendarem que a caracterização das vibrações deve ser efectuada através de medições que recorram à utilização de ponderações em frequência.

Na Tabela 2 encontram-se indicadas as diferentes ponderações em frequência recomendadas pela normalização internacional.

Norma	Ponderação	Direcção
<b>ISO 2631-1</b>	Wk	Vertical
	Wd	Horizontal
<b>ISO 2631-2<sup>9</sup></b>	Wm	Todas
<b>BS 6472-1</b>	Wb	Vertical
	Wd	Horizontal
<b>DIN 4150-2</b>	KB	Todas

Tabela 2 - Ponderações em frequência

A Figura 2 apresenta o traçado das diferentes ponderações em frequência.

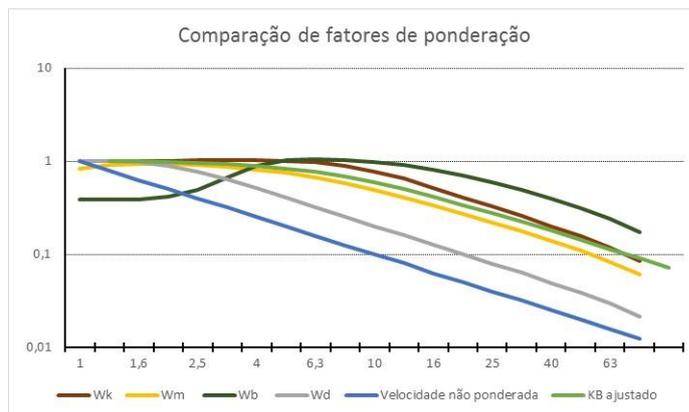


Figura 2 - Traçado de diferentes ponderações em frequência

Da análise dos traçados ilustrados na Figura 2 é possível retirar algumas conclusões, nomeadamente as seguintes:

- A aplicação da ponderação Wm (ISO 2631-2) ao sinal de aceleração é semelhante à aplicação da ponderação KB (DIN 4150-2) ao sinal de velocidade
- A aplicação da ponderação Wb (BS 6472-1) conduz a resultados diferentes relativamente à aplicação da ponderação Wm (ISO 2631-2)
- A utilização da velocidade de vibração não ponderada tem uma evolução paralela à aplicação da ponderação Wd (ISO 2631-1)

### Distribuição Temporal

As normas internacionais acima referidas apresentam critérios de avaliação que diferenciam o período do dia do período da noite.

A avaliação efectuada, quer seguindo o estabelecido na BS 6472-1 quer seguindo o estabelecido na DIN 4150-2, determina, ainda que de modo diferente, a realização de uma integração temporal da amplitude de vibração.

Em alguns países como, por exemplo, a Noruega<sup>10</sup>, a regulamentação aplicável determina que a caracterização das vibrações seja efectuada recorrendo à utilização de parâmetros estatísticos.

### **Pontos e Direcções de Medição**

A diversa normalização internacional é unânime no que respeita aos pontos e às direcções em que as medições de vibrações devem ser efectuadas.

De facto, as diferentes normas aplicáveis à avaliação dos efeitos das vibrações transmitidas a estruturas e/ou ao Ser Humano, indicam que as correspondentes medições devem ser realizadas no(s) ponto(s) onde se observa uma maior amplitude de vibração e segundo as direcções dos três eixos coordenados, em simultâneo.

## **7. IMPORTÂNCIA DA RESPOSTA SUBJECTIVA E DOS EFEITOS PARALELOS**

Os diversos ensaios efectuados no interior das habitações mostram que, em avaliações de incomodidade devida ao ruído, as populações aceitam com normalidade que algo possa (e até deva) ser audível.

Pelo contrário, nos mesmos ensaios, as avaliações de incomodidade devida à transmissão de vibrações revelam que as mesmas populações consideram que o normal é não sentirem a sua existência.

Assim, é comum que as queixas de incomodidade devido à transmissão de vibrações surjam não directamente pela sua existência, mas sim indirectamente pelos correspondentes efeitos paralelos, nomeadamente, ruído, móveis ou vidros a vibrar, etc..

Finalmente referir que, experimentalmente<sup>11</sup>, foi possível evidenciar que a presença de ruído e de vibrações em simultâneo potencia o crescimento das queixas, sendo que a incomodidade referida pelas populações corresponde, muito aproximadamente, à soma das queixas devidas a ambos os fenómenos avaliados individualmente.

## **8. CONCLUSÃO**

A experiência de vários anos em diferentes países evidencia, de modo claro, que a avaliação dos efeitos da transmissão de vibrações ao Ser Humano deve ter por base medições cujos resultados sejam ponderados por adequadas curvas de ponderação em frequência.

Garante-se assim que, quer sejam efectuadas medições em velocidade quer sejam efectuadas medições em aceleração, os valores obtidos podem ser, com segurança, utilizadas em avaliações de incomodidade devido às vibrações recebidas pelo Ser Humano, já que as mesmas foram corrigidas em função da diferenciada sensibilidade humana.

## **9. REFERÊNCIAS**

- [1] DIN 4150-1:2001 - Structural Vibration. Part 1: Prediction of vibration parameters
- [2] Vibrações Ambientais. Critérios de danos e de incomodidade. Actualidade e perspectivas futuras. Schiappa de Azevedo, Fernando; Patrício, Jorge; TECNIACUSTICA 2001
- [3] Predicting the feeling of vibration in buildings. MJ Griffin; Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 29, Pt. 4, 2007

- [4] Magnitude dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical whole-body vibration. Morioka, M.; Griffin, M. J.; Journal of Sound and Vibration, 298, 3, pp. 755-772, 2006
- [5] NP ISO 2631-1:2007 - Vibrações mecânicas e choque. Avaliação da exposição do corpo inteiro a vibrações - Parte 1: Requisitos gerais
- [6] BS 6472-1:2008 - Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Vibration sources other than blasting
- [7] DIN 4150-2:1999 - Structural Vibration. Part 2: Human exposure to vibration in buildings
- [8] BS 6472-2:2008 - Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Blast-induced vibration
- [9] ISO 2631-2:2003 - Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)
- [10] NS 8176E - Vibration and shock. Measurement of vibration in buildings from landbased transport and guidance to evaluation of its effect on human beings. Standarts Norway, 2005
- [11] Subjective response to combined noise and vibration: summation and interaction effects. H.V.C. Howart; M.J. Griffin; Journal of Sound and Vibration, Volume 143, Issue 3, Pages 443-454, 1990