



# 2.º ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

QIC2016

Lisboa • LNEC • 21 a 23 de novembro de 2016

## METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO DA INCOMODIDADE INDUZIDA POR VIBRAÇÕES

**Sónia Monteiro Antunes**

*Física Tecnológica, LNEC, santunes@lnec.pt*

**Jorge Patrício**

*Engº Civil, LNEC, jpatricio@lnec.pt*

### Resumo

Atualmente não existe consenso para a avaliação da resposta humana às vibrações no interior de edifícios, na medida em que a metodologia utilizada por vários países é variada, como se pode verificar pela publicação e utilização de diferentes documentos normativos. Do mesmo modo, também não existe um consenso sobre o descritor único mais apropriado para a caracterização da exposição à vibração, podendo ser utilizados valores eficazes da velocidade de vibração, valores máximos e/ou os valores de dose de vibração. Recentemente, num projeto financiado pela União Europeia (Cargo Vibres) foram definidas curvas de exposição-resposta, relativas à incomodidade induzida pela circulação de tráfego ferroviário, tendo por base três distintos descritores. No entanto, a avaliação da incomodidade induzida por eventos vibratórios no interior de edifícios é de difícil quantificação, pois verifica-se que não depende somente da vibração, como fenómeno físico, mas também de outros fatores, como por exemplo, a disponibilidade de informação sobre o fenómeno vibratório, designadamente tipo e duração (expectativas), a aceitação sobre a construção da potencial fonte de vibração, ou até mesmo a preocupação relativa à depreciação do valor do imóvel.

Nesta comunicação apresentam-se os critérios utilizados pelos autores para a avaliação da incomodidade induzida pelas vibrações em edifícios, devidas à circulação de tráfego ferroviário, e a sua correspondente associação no contexto das curvas exposição-resposta.

Por último, é também realizada uma análise crítica sobre as diferentes metodologias existentes.

*Palavras-chave: Vibrações / Incomodidade / Critérios de avaliação*

## Introdução

As vibrações nos edifícios podem ter origem em fontes internas derivadas do funcionamento de equipamentos vários (ventoinhas, elevadores, compressores, bombas de água), ou até mesmo da atividade humana (andar, correr ou atividades domésticas, por exemplo). As fontes de vibração externas estão usualmente associadas ao tráfego ferroviário e rodoviário, à passagem do metropolitano, e a atividades de construção (cravação de estacas, detonação, escavação e compactação de solo), ventos fortes e sismos. O resultado destas vibrações pode-se estender desde a incomodidade induzida nos ocupantes do edifício, aos danos em equipamentos sensíveis, ou até mesmo, a danos estruturais no próprio edifício. Refira-se, contudo, que correntemente a ordem de grandeza das vibrações com origem dentro das habitações, pode ser muito superior à magnitude da vibração gerada por fontes externas de vibração, ou até mesmo à gerada em outras partes do edifício.

A fonte de vibrações ambientes que mais frequentemente dá origem a reclamações é a correspondente ao tráfego ferroviário. No interior dos edifícios as vibrações daí derivadas podem manifestar-se segundo dois modos distintos:

- vibração perceptível, como por exemplo, a vibração de pisos, paredes, etc. que podem ser apercebidas pelos seres humanos através da sensação tátil, pelo contato de partes do corpo com as superfícies em vibração, ou por meio de um movimento vibratório audível, como o abanar de vidros, nas janelas. Este tipo de percepção vibratória é geralmente caracterizado na gama de frequência compreendida entre 1 e 80 Hz.
- ruído de baixa frequência (usualmente definido na gama de frequências compreendidas entre 10/20 Hz e os 200/250 Hz), o qual resulta frequentemente da vibração que se propaga pelas fundações de edifícios e estruturas, e que excitam os elementos de compartimentação interiores, como paredes, pavimentos e tetos. Este movimento vibratório origina ondas sonoras que são apercebidas pelo ouvido humano como ruído (usualmente designado por ruído estrutural). Também é possível que as ondas sonoras de baixa frequência, possam interagir com outras partes do corpo humano e, assim, serem apercebidas como um desconforto.

A receção da energia vibratória proveniente de fontes externas ao edifício dá-se prioritariamente pelas fundações das edificações. A propagação de vibrações pelo solo induz vibrações na fundação, os quais, por sua vez, se propagam para a estrutura, piso e paredes. A resposta da edificação a essa excitação depende das frequências naturais da estrutura como um todo, e dos seus pisos e paredes, modos próprios de vibração e amortecimento interno.

## Resposta humana às vibrações

A resposta humana às vibrações, em edifícios, varia desde a simples percepção até uma reação de desconforto experimentada pelo indivíduo perante a presença do estímulo vibratório (incomodidade). A partir de uma determinada amplitude de vibração, e antes de se tornar incomodativo, o evento vibratório é percebido pela pessoa. Efetivamente, ao conceito de percepção estão usualmente associadas amplitudes de vibração mais baixas do que ao conceito de incomodidade, embora a repetição de eventos perceptíveis possa conduzir a incomodidade. No Quadro 1 apresenta-se uma relação genérica entre a vibração e a percepção.

A incomodidade é considerada como um efeito adverso à saúde e ao bem-estar, definida como “um estado físico, mental, social e de bem-estar” e não simplesmente a ausência de doença ou enfermidade (TROLLÉ *et al.*, 2015). Analogamente com o que acontece com o ruído, os indivíduos que se sentem incomodados com a vibração podem experimentar uma grande variedade de respostas e emoções, nas quais se incluem raiva, desapontamento, depressão, ansiedade agitação, afetando diretamente o bem-estar e a qualidade de vida da população exposta.

A resposta humana às vibrações em edifícios é muito complexa e, em muitas circunstâncias, a incomodidade induzida não é explicada diretamente pela intensidade e conteúdo espectral das vibrações medidas (ISO 2631-2). Muitas vezes, outros parâmetros relacionados com a fonte de vibração (como, por exemplo, o horário de funcionamento), ou os fenómenos produzidos pela vibração na estrutura do edifício (ruído estrutural de baixa frequência), podem contribuir para a explicação da incomodidade induzida pela vibração. De fato, verifica-se que, para um mesmo valor de exposição, valores de incomodidade superiores durante o período da noite (23h-07h), e depois durante o período do entardecer (19h-23h), e finalmente durante o período diurno (07h-19h) (ELIAS e VILLOT, 2011). Um outro fator importante na resposta humana à vibração está relacionado com a posição em que o indivíduo se encontra quando percebe o movimento vibratório, apresentando-se na norma ISO 2631-1, alguns critérios para a avaliação da vibração tendo em conta a localização do indivíduo.

Quadro 1 - Perceção e amplitudes de vibrações sinusoidais (adaptado de ELIAS e VILLOT, 2011)

Valor eficaz (RMS) da aceleração ponderada (m/s <sup>2</sup> )	Perceção
menor que 0,01	Não perceptível
0,015	Limiar da perceção
0,02	Raramente perceptível
0,08	Facilmente perceptível
0,315	Fortemente perceptível
maior que 0,315	Extremamente perceptível

Outros factores que contribuem para a incomodidade induzida por vibração, incluem a sensibilidade a vibrações, o medo que a fonte de vibração provoque danos na habitação, o entendimento relativamente à utilidade da fonte, as expectativas futuras em relação aos níveis de vibração (fatores associados a atitudes). Do mesmo modo, fatores associados à localização (zona urbana ou rural), visibilidade da fonte, número de horas passadas no interior da habitação, e fatores socio demográficos, como, por exemplo, a idade (ELIAS e VILLOT, 2011), também contribuem para essa explicação.

Analogamente ao que sucede com a incomodidade induzida pelo ruído, a incomodidade associada as vibrações é quantificada com recurso à utilização de questionários submetidos aos residentes expostos à vibração durante a realização de inquéritos sócio-vibracionais. O objectivo destes estudos é perspetivar a incomodidade de longa duração, integrando as recomendações e escalas constantes na norma NP ISO 4476 (escala numérica de onze pontos, e escala semântica de 5 pontos), com recurso a questões sobre a exposição à vibração, reportando-se a um período de 12 meses.

No que respeita ao ruído de baixa frequência, verifica-se que a deteção/perceção de ruído com estas características, provoca muitas vezes angústia para as pessoas que são sensíveis aos seus efeitos (LEVENTHALL, 2004). Esta sensibilidade pode ser resultado de uma resposta sensitiva elevada nesta parte do espectro, ou então adquirida. Na realidade a audição das pessoas tende a deteriorar-se com a idade, mas não da mesma maneira ao longo do espectro de frequências, verificando-se uma deterioração mais rápida na gama de frequências médias e mais elevadas do que nas frequências mais baixas. Este facto implica que as pessoas mais idosas possam apresentar uma maior sensibilidade às baixas frequências (CASELA, 2001). O aparecimento de incomodidade gerada por ruído de baixa frequência é mais frequente em indivíduos de meia-idade, e para níveis de ruído frequentemente baixos, ou até mesmo próximos do limiar de audição de um sujeito, existindo grandes diferenças de sensibilidade entre indivíduos (LEVENTHALL, 2004). Igualmente, na avaliação do ruído de baixa frequência no interior dos edifícios, é necessário ter em conta a presença de modos de ressonância (modos próprios) no interior dos compartimentos, o que provoca variações espaciais significativas dos níveis sonoros, o que pode provocar a existência de amplificações do ruído de baixa

frequência em determinados pontos do compartimento. Assim, a utilização de uma metodologia adequada para a sua medição também se reveste de particular importância.

Por último, deve-se ter em conta para a avaliação da incomodidade, o efeito combinado da presença simultânea de vibrações e ruído de baixa frequência. Alguns estudos relacionados com a avaliação da incomodidade relativa à passagem de tráfego ferroviário, indicam que a incomodidade induzida pela vibração é claramente influenciada pela presença de ruído, embora os resultados obtidos ainda difiram relativamente ao modo de tradução desta influência no julgamento da incomodidade induzida pela vibração (TROLLÉ *et al.*, 2015). Neste contexto, é importante não considerar separadamente a exposição ao ruído e a exposição à vibração, tendo em conta que ambos os aspectos contribuem para a incomodidade induzida pela fonte em avaliação, como por exemplo, o que ocorrer com o tráfego ferroviário.

## Parâmetros caracterizadores da vibração

A vibração estrutural nos edifícios, em função do seu comportamento ao longo do tempo, pode ser definida como:

- Transitória ou impulsiva: definida como a rápida formação de um pico seguido de um decréscimo, envolvendo ou não vários ciclos de vibração, dependendo da frequência e do amortecimento (por exemplo, vibração derivada de detonações);
- Intermitente: sequência de vibrações incidentes, cada qual de curta duração, separada por intervalos de tempo em que ocorrem vibrações de níveis muito menores. As amplitudes de cada evento podem variar ou permanecer constantes (por exemplo, vibrações derivadas da passagem de tráfego);
- Continuada: vibração que se mantém ininterrupta durante o período em consideração, e cuja intensidade pode variar ou permanecer constante no tempo (por exemplo, vibrações derivadas do funcionamento de equipamentos).

Para a caracterização do fenómeno vibratório como movimento oscilatório de uma partícula, corpo ou superfície, são, pelo menos, necessários dois parâmetros: o primeiro relacionado com a amplitude do movimento, e o segundo com o conteúdo em frequência da vibração. Quando o estímulo de vibração engloba um espectro distribuído ao longo de um intervalo de frequências, utiliza-se usualmente uma caracterização por bandas de terço de oitava. Estas bandas estão normalizadas internacionalmente, em termos de limites inferior e superior e de valor da sua frequência central. No que respeita à amplitude do movimento, esta pode ser descrita como um deslocamento, velocidade ou aceleração. As grandezas mais frequentemente utilizadas são a velocidade (em metros por segundo, ou em milímetros por segundo), e a aceleração (em metros por segundo quadrado). Em determinadas condições ambientais, é possível avaliar o efeito das vibrações no conforto no interior das habitações, com base no valor eficaz da aceleração durante um período representativo. No entanto, para situações em que o sinal de vibração pode ser significativamente influenciado por valores de pico, a utilização do valor eficaz pode subestimar o desconforto induzido.

Um descritor muito utilizado na medição da vibração é o valor eficaz (r.m.s), ponderado da aceleração ( $a_{w,RMS}$ ), e recomendado pela norma ISO 2631-1, quando o espectro da evolução temporal do sinal não possui alterações de amplitude bruscas, ou seja, para sinais vibratórios em que o valor do factor de crista é igual ou inferior a 9. Com base neste descritor é calculado o nível de vibração equivalente, ponderado, e o nível de exposição à vibração, ponderado (análogos ao nível sonoro contínuo equivalente e nível de exposição sonora, utilizados em acústica). Quando a evolução temporal do sinal apresenta picos de amplitude significativos, e portanto, com os valores associados ao factor de crista, superiores a 9, a norma ISO 2631-1 recomenda a utilização do valor máximo da vibração transiente (MTVV), ou então a utilização da dose vibratória (VDV). Para o cálculo do valor MTVV, é recomendado a utilização de uma constante temporal igual a 1 s, o que corresponde na acústica à utilização da resposta lenta de um sonómetro. Com base no valor de MTVV, é possível calcular o

nível de vibração máximo, ( $L_{w,max}$ ), análogo ao nível de pressão sonora máximo, ponderado, utilizado em acústica. A dose vibratória (VDV) é mais sensível a picos do que o valor eficaz, devido à utilização da quarta potência em vez da segunda potência do registo temporal da aceleração como base para a média. Este descritor caracteriza a exposição acumulada às vibrações durante o período de medição, tendo em conta o número e a duração dos eventos.

Saliente-se ainda a existência de um outro tipo de descritores para a caracterização da vibração, que é apresentada na Norma Norueguesa NS 8176, com a designação de aceleração máxima estatística ( $a_{w,95}$ ). O objectivo deste parâmetro é propor um índice que forneça uma descrição representativa das vibrações sentidas no interior de um edifício, com origem nas passagens de composições ferroviárias e veículos rodoviários. Para o efeito, devem ser registadas, pelo menos 15 passagens, medindo-se o valor da aceleração máxima, ponderada, sendo posteriormente calculado o valor médio.

No que respeita à ponderação em frequência, cujo objectivo é caracterizar o conteúdo em frequência de acordo com capacidade humana de perceber a vibração nas diferentes frequências, segundo a norma ISO 2631-2, e quando a posição do ocupante, no interior do edifício, não é especificada, deve utilizar-se a ponderação  $W_m$ , descrita em bandas de frequências de terços de oitava, compreendidas entre 1 e 80 Hz. Esta ponderação em frequência é aplicada simultaneamente aos três eixos ortogonais, sendo largamente aplicada em muitos países, com excepção do Reino Unido e do Japão, onde são utilizadas ponderações específicas para as direções vertical e horizontal

## Medição da vibração

A caracterização da vibração é actualmente realizada a partir de medições de aceleração. De acordo com a norma ISO 2631-2 de 2003, as amplitudes de vibração devem ser obtidas a partir de medições de aceleração, simultaneamente em três eixos ortogonais, orientados segundo os eixos do edifício e utilizando-se uma única ponderação em frequência para todos os eixos. As medições devem ter em conta a ocupação esperada dos residentes no edifício, e também o tipo de tarefa desenvolvida em cada compartimento. Nos casos em que as posições dos ocupantes são conhecidas, podem ser utilizadas as ponderações em frequência apresentadas na NP ISO 2631-1. Esta norma também recomenda a avaliação e o registo dos efeitos associados à propagação das vibrações nos edifícios, tais como o ruído de baixa frequência e os efeitos visuais associados à vibração de janelas e pequenos objetos.

Muitas vezes, e especialmente em estudos de impacto ambiental associados ao tráfego ferroviário, não é possível a realização de medições no interior de edifícios, optando-se pela sua realização no exterior, com os transdutores localizados nas proximidades das fundações. A grande limitação no recurso a medições no exterior, deriva do facto de não ser possível ter em conta a resposta da estrutura do edifício, o que muitas vezes leva a uma subestimação da exposição às vibrações a que os ocupantes dos edifícios estão sujeitos. Para além disso, a avaliação das vibrações no interior de edifícios, e a consequente determinação da exposição dos ocupantes, não é tarefa fácil, devido às variações causadas pelos diferentes tipos de composições (de passageiros e de carga), velocidades de circulação, ao qual acresce a ocorrência de perturbações induzidas por vibrações “parasitas” originadas por outras fontes, diferentes das que se pretendem avaliar, como por exemplo as originadas pela actividades dos ocupantes dos edifícios, cuja identificação pode nem sempre ser fácil de realizar.

Uma metodologia para a caracterização das vibrações no interior de edifícios, cujo objectivo é ultrapassar algumas das dificuldades enunciadas, é a utilizada nos documentos orientativos holandeses (LEEUWEN e ZWIENEN, 2016). Neste caso as medições ocorrem durante, pelo menos, uma semana, de modo a obterem-se valores estatísticos relativos às passagens das diferentes composições ferroviárias (com registo de composições de passageiros e carga). Os principais problemas na realização deste tipo de medições são as perturbações induzidas pelas actividades dos ocupantes dos edifícios, ou as induzidas pelas vibrações originadas por outro tipo de tráfego diferente do que se pretende analisar. Um procedimento alternativo, consiste na realização de medições durante uma semana na fundação dos edifícios, medições essas que são complementadas com medições simultâneas nos diversos pisos dos edifícios, durante um período mais curto de tempo (mas pelo menos 24 horas). A partir das diferenças entre as medições simultâneas na fundação do edifício e nos diversos pontos de medição é possível calcular o fator de transmissão de vibrações  $H_{edifício}$ , que permite estimar a vibração nos diversos locais de medição a partir das medições de longa

duração efectuada na fundação do edifício Para cada local os níveis de vibração estimados são comparados com os limites máximos permitidos.

## Curvas de exposição

No projecto europeu CargoVibes o grau expectável de incomodidade devido às vibrações induzidas pelo tráfego ferroviário foi quantificado, para a direcção vertical, em termos de curvas de exposição-resposta, para três diferentes métricas: velocidade de vibração máxima, ( $V_{dir,max}$ , em que dir se refere à ponderação em frequência da norma ISO 2631-1); velocidade de vibração eficaz ( $V_{rms}$ ) e dose vibratória (VDV). As curvas assim obtidas, permitem a previsão da incomodidade induzida, resultante de um período de exposição à vibração de 24 horas. A sua utilização numa população permite estimar a percentagem de pessoas extremamente incomodadas, incomodadas, e ligeiramente incomodadas para vários níveis de exposição à vibração induzida pelo tráfego ferroviário. Refira-se, contudo, que é espectável a existência de desvios significativos, a esta resposta média, quando se avaliar a incomodidade de indivíduos.

Para a obtenção destas curvas foram tratados os dados referentes a aplicação de questionários a larga escala (N = 4129), aos residentes próximos de vias ferroviárias, em sete países europeus e nos EUA Os resultados obtidos foram combinados com dados de estudos anteriores relativos à incomodidade induzida pela vibração, após a conversão entre os diferentes métricas utilizadas para caracterizar a vibração. Para a obtenção das associações entre a exposição às vibrações e a incomodidade foram desenvolvidos modelos estatísticos, com recurso ao método de regressão. Na figura 1 apresentam-se as curvas de exposição-respostas obtidas (WADDINGTON *et al.*, 2015). Refira-se que nestas curvas, os valores de aceleração estão afetos da ponderação em frequência  $W_k$  (ponderação para a direcção vertical, segundo a norma ISO 2631-1).

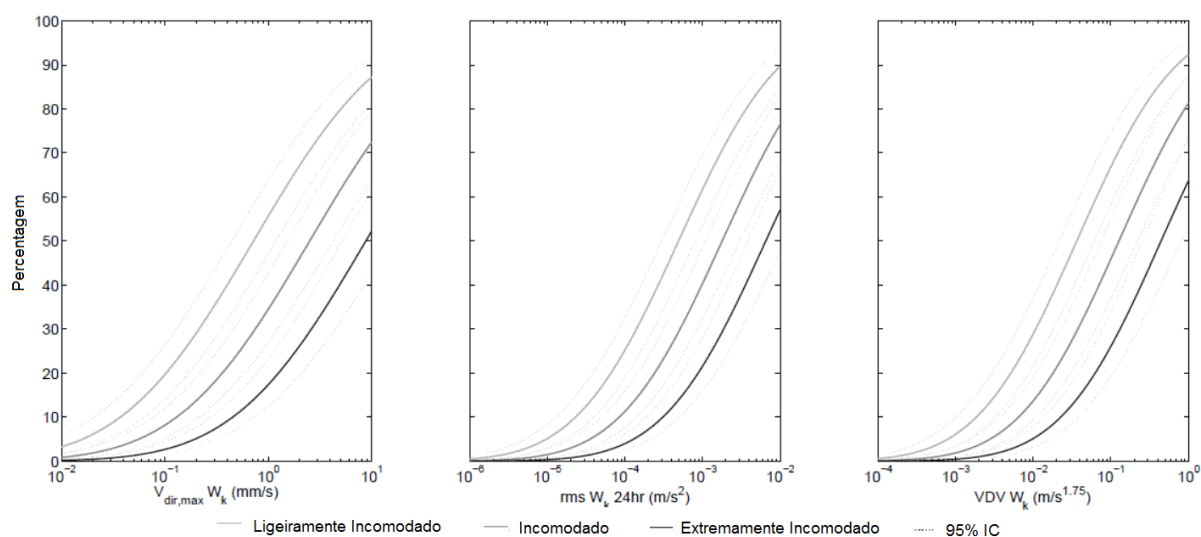


Figura 1 - Curvas exposição-resposta para a incomodidade induzida pela passagem de tráfego ferroviário (N = 4129) (adaptado de WADDINGTON *et al.*, 2015)

Saliente-se que estas curvas de exposição-resposta representam a primeira tentativa de harmonização dos dados de campo, recolhidos internacionalmente em questionários sócio-vibracionais. A sua principal aplicação está directamente relacionada com planeamento estratégico, análises custo-benefício e avaliações de impacte ambiental.

## Crítérios de admissibilidade

Tradicionalmente utilizava-se a velocidade da vibração para o estabelecimento de valores limites, tendo em conta que a sensibilidade humana à vibração é constante entre 8 e 80 Hz. De facto, a nor-

ma ISO 2631-2 (versão de 1989) estabelecia valores limites de exposição às vibrações em edifícios, a partir da determinação dos valores da aceleração eficaz ponderada em frequência. A referida norma apresentava as curvas base do valor eficaz da aceleração e velocidade nas diversas direções, as quais são utilizadas para a fixação dos valores limite de vibração, a partir da aplicação adequada de fatores multiplicativos. No entanto, na versão actual desta norma, já não existe a indicação de valores limite. Assim sendo, e no que respeita à regulamentação nacional e a critérios de conforto humano relativo a vibrações no interior das edificações, não existem quaisquer valores limite para a avaliação da incomodidade induzida por vibração continuada. Para a perceção de vibrações no interior dos edifícios, em termos de valor eficaz de velocidade de vibração, o LNEC utiliza os valores de referência indicados no Quadro 3. Estes valores são válidos para a componente vertical ou horizontal da velocidade, caso esta última seja a mais significativa. No que respeita à perceção de vibrações, o valor inferior apresentado (0,11 mm/s) é considerado como o limiar de perceção, sendo, no entanto, ainda admissíveis valores de velocidade eficaz inferiores a 0,28 mm/s, de dia, para as vibrações de pequena duração. Esta abordagem simplificada, deve ser, no entanto, aplicada em termos de ordem de grandeza, constituindo a duração da vibração um parâmetro importante.

Quadro 3 – Valores LNEC para a perceção da vibração continuada no interior de edifícios

V <sub>ef</sub> (mm/s)	Sensação
V <sub>ef</sub> < 0,11	Nula
0,11 < V <sub>ef</sub> < 0,28	Perceptível, suportável para pequena duração
0,28 < V <sub>ef</sub> < 1,10	Nítida, incómoda, podendo afetar as condições de trabalho
V <sub>ef</sub> > 1,10	Muito nítida, muito incómoda, reduzindo as condições de trabalho

Para a avaliação da incomodidade induzida por vibrações continuadas ou de natureza intermitente no interior das edificações, o LNEC tem utilizado os seguintes critérios:

1. Valor eficaz da velocidade de vibração menor que 0,28 mm/s;
2. Aplicação da curva base da ISO 2831-2 (versão de 1989), com os fatores multiplicativos correspondentes às vibrações intermitentes para edifícios residenciais. Neste caso o espectro de valores eficazes da velocidade de vibração, por bandas de terços de oitava, deve ser inferior a 0,14 mm/s, para frequências centrais entre os 8 e 80 Hz (período noturno), limite este que aumenta para 0,4 mm/s a 2 Hz, e 0,8 mm/s a 1 Hz. Para o período diurno, o valor de v<sub>ef</sub> < 3 mm/s, para bandas de frequência central entre 8 e 80 Hz, aumenta para os 8,8 mm/s para 2 Hz, e 17,2 mm/s para 1 Hz.

No entanto, e tendo em consideração a especificidade da situação em análise (ruído e vibrações induzidas pela circulação de tráfego ferroviário), foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre critérios de conforto no interior dos edifícios associados, à circulação de tráfego ferroviário. Por exemplo, nos EUA, os critérios aplicáveis são expressos em nível de vibração e dependem da quantificação do número de eventos diários relacionados com a mesma fonte de vibração (FTA, 2008). Caso o número de eventos esteja compreendido entre 30 e 70, considera-se um estímulo de vibração frequente. Para um número de eventos diários inferior a 30, o estímulo de vibração é considerado pouco frequente. Estes limites estão também relacionados com o tipo de edifícios em avaliação (edifícios residenciais, edifícios com sensibilidade à vibração, edifícios especiais, auditórios ou teatros).

No Quadro 4 apresentam-se os limites para a vibração no interior de edifícios residenciais, indicados como critérios da Administração Federal dos EUA (em termos de valor eficaz de velocidade de vibração), originada essencialmente pelo tráfego ferroviário. Estes valores, são apresentados em VdB (nível de referência igual a  $1 \times 10^{-6}$  polegadas/s), conforme o documento original, e respetiva conversão para valores de velocidade em mm/s.

Existem em alguns países valores limites para a exposição às vibrações, como por exemplo na Noruega, EUA e Reino Unido. Destes três países, somente no caso da Noruega é que a escolha do valor limite se apoia exclusivamente nos resultados de questionários sobre a exposição às vibrações, traduzindo esse valor um determinado número de pessoas muito incomodadas. No estudo norueguês foi avaliada a incomodidade induzida por vibrações devidas ao tráfego rodoviário e ferroviário, com base num conjunto de 700 respostas aos questionários exposição-resposta, com recurso a uma escala em categorias.

Os resultados obtidos permitiram estimar uma única curva de exposição à vibração, independentemente da origem das vibrações, uma vez que não foram obtidas diferenças significativas entre os resultados derivados da exposição ao tráfego rodoviário e ferroviário. Este estudo permitiu concluir que 5% dos respondentes se consideravam muito incomodados para um nível de velocidade de vibração igual a 0,1 mm/s, e que esta proporção aumentava para 30% para um nível de velocidade de vibração de 4 mm/s.

Por analogia com o limite de exposição ao ruído que corresponde a um resultado entre 7-8% de população extremamente incomodada, foi estabelecido o limite de velocidade de vibração (neste caso, o descritor utilizado na noruega é o  $v_{W,95}$ ) de 0,3 mm/s para os edifícios residenciais novos (ELIAS e VILLOT, 2011).

Quadro 4 – Critérios utilizados nos EUA para os valores limite de velocidade de vibração no interior de edifícios derivada do tráfego ferroviário (FTA, 2008)

Tipo de edifício	Número de eventos diários		
	> 70	70-30	< 30
Residencial	72 VdB (0,101 mm/s)	75 VdB (0,143 mm/s)	80 vdB (0,254 mm/s)

Em cinco cidades dos EUA, foram aplicados cerca de 1300 questionários sobre a exposição às vibrações induzidas pelo tráfego ferroviário, em residências expostas a um número superior a 70 passagens diárias. O tratamento dos resultados assim obtidos permitiu o desenvolvimento de curvas exposição-resposta, tendo sido estabelecido o limite de 72 dBV (equivalente a 0,101 mm/s, ver quadro 4), relativo a uma probabilidade entre 5 a 10% de pessoas muito incomodadas (ELIAS e VILLOT, 2011).

No Quadro 5 apresentam-se as percentagens de pessoas muito incomodadas, incomodadas e ligeiramente incomodadas, referentes aos limites existentes em vários países, tendo como base as curvas exposição-efeito estabelecidas no projeto CargoVibes (WADDINGTON *et al.*, 2015).

Para a obtenção de resultados comparativos, foram utilizados alguns fatores de ajustamento, uma vez que as curvas exposição-efeito se referem a um período de exposição às vibrações de 24 h, enquanto alguns dos limites fixados são especificamente para o período de dia ou de noite. O mesmo sucedeu para a conversão dos valores de referência expressos por diferentes descritores e curvas de ponderação.



Quadro 5 – Percentagem de pessoas muito incomodadas (MI%), incomodadas (I%) e ligeiramente incomodadas (LI%), para diferentes critérios de avaliação da exposição humana às vibrações (adaptado de (WADDINGTON *et al.*, 2015))

País (norma)	Descritor	Critério	Valor	% MI	% I	% LI
Reino Unido (BS 6472)	VDV	Probabilidade pequena de existência de incomodidade (dia)	0,2-0,4	36,6-48,2	57,7-68,9	76,8-84,9
		Probabilidade pequena de existência de incomodidade (noite)	0,1-0,2	26,0-36,6	45,9-57,7	66,8-76,8
Noruega (NS 8176)	$V_{w,95}$	Tipologia do edificado				
		Ed. Novos Ed. Antigos	0,3 0,6	9,6 15,8	22,3 32,2	41,2 53,1
EUA (FTA)	V ( dB)	>70 eventos/ dia	72 VdB (0,101 mm/s)	3	9,1	21,4

## Discussão e Conclusões

Atualmente existem vários descritores para a avaliação da exposição à vibração, distinguindo-se entre os descritores baseados em médias energéticas (valores eficazes e dose de vibração), e os baseados no valor máximo. Até ao momento, ainda não foi evidenciado qual o tipo de descritor preferencial. No entanto, os estudos efetuados sugerem que os descritores baseados em médias energéticas têm uma maior associação com a incomodidade induzida pela vibração, enquanto o segundo tipo de descritores se relaciona mais com os efeitos das vibrações durante o sono. Decorrente desta situação, alguns países baseiam os seus critérios para a caracterização dos valores limites admissíveis com recurso aos dois tipos de descritores (como por exemplo a Suécia). Inclusive as curvas exposição-resposta foram obtidas recorrendo-se a estes três descritores. Como foi referido, estas curvas representam a primeira tentativa de harmonização internacional de todos os questionários sócio-vibracionais efetuados até ao momento. Devem ser utilizadas à escala da população, e permitem avaliar o custo-eficácia de medidas de minimização de vibrações, assim como o estabelecimento de valores limites para a amplitude de vibração em edifícios. Analogamente ao que sucede com os estudos de ruído, a adoção de um valor limite, fazendo uso das curvas exposição-resposta, equivale muitas vezes a uma percentagem de 5% de pessoas muito incomodadas. No entanto, os valores assim obtidos, tendo em conta alguns critérios nacionais, podem ser considerados como muito restritivos, optando-se muitas vezes pela utilização de limites menos severos, correspondentes a uma percentagem de 10% de pessoas muito incomodadas. Em muitos países, os critérios de admissibilidade às vibrações em edifícios também são acompanhados de esquemas de classificação do próprio edificado, e da distinção entre o período de exposição diurno e noturno.

No que respeita à realização de medições para avaliação da exposição às vibrações, e embora cada país utilize o descritor identificado nas correspondentes normas nacionais, existe a concordância relativamente à colocação do transdutor de medição no centro do pavimento em avaliação. Este aspeto é relevante, uma vez que a colocação do transdutor no exterior do edifício pode não traduzir eficazmente a realidade. Tal é particularmente relevante no caso de estudos de impacto ambiental associados à monitorização das infra-estruturas. Relativamente ao tempo de medição, existem muitas diferenças entre os critérios de avaliação. Contudo, e tendo em conta os dados já disponíveis, como por exemplo as curvas de exposição, faz sentido a utilização de períodos de medição de 24 horas, quando se utilizam descritores baseados em médias energéticas. No caso de utilização de descritores baseados em valores máximos, terá sentido realizar a caracterização de um número de eventos, com expressão estatística, como, por exemplo, efetuar um determinado número de medições referentes à passagem de composições ferroviárias, ou de veículos, pertencentes à mesma categoria.

Outro aspecto a ter em consideração, diz respeito à importância que o ruído estrutural pode assumir em edifícios que possuem um isolamento sonoro elevado relativamente ao exterior. Em alguns casos, pode-se verificar a existência de uma situação de incómodo devido à audição de ruído de baixa frequência, que se sobrepõe claramente ao ambiente sonoro no interior das habitações, cujo valor é muito reduzido. Consequentemente a existência de uma metodologia harmonizada para a medição do ruído de baixa frequência, cuja avaliação no interior de compartimentos de habitação nem sempre é de fácil contabilização, assume-se também como um aspeto relevante. O efeito combinado da presença simultânea de vibrações e ruído de baixa frequência é muito importante, verificando-se que a incomodidade induzida pela vibração é claramente influenciada pela presença de ruído. Neste contexto, é importante não considerar separadamente a exposição ao ruído e a exposição à vibração. Tendo em conta a interligação entre estes dois aspectos (ruído de baixa frequência e vibrações), nas avaliações de incomodidade em residências, e, antes de qualquer medição, é usual os autores realizarem um pequeno questionário aos ocupantes. O seu objetivo é a caracterização do(s) período(s) de exposição às vibrações considerado(s) relevante(s), e no(s) qual(is) é avaliado o tempo de permanência na residência em análise, período do dia (ou noite) em que se sente mais incomodado e localização da zona onde esta perturbação é maior. O questionário também tenta caracterizar os hábitos de rotina diária dos residentes (hora de acordar e adormecer), e a respectiva caracterização da fonte a avaliar, na perspetiva das pessoas incomodadas.

Pelo que foi exposto, pode-se dizer que esta área de avaliação da incomodidade, induzida pelas vibrações no interior das habitações, ainda se encontra em fase de desenvolvimento, sendo necessários mais estudos para aumentar a fiabilidade dos dados estatísticos e a generalização das curvas exposição-efeito. Os futuros questionários sócio-vibracionais devem explorar os efeitos dos fatores não directamente relacionados com a exposição, uma vez que já existem evidências que sugerem que a sua influência pode ser significativa, chegando a ter a mesma ordem de grandeza que a amplitude da vibração. É também necessária uma maior compreensão da interação entre o ruído e vibração, tendo por base dados de campo e também experiências em laboratório. Outro dos aspectos para o qual o número de estudos ainda é escasso, refere-se aos efeitos da vibração na saúde, principalmente na obtenção de limiares e de curvas de exposição-efeito referentes aos efeitos da vibração durante o sono.

## Referências bibliográficas

CASELA **Report of low Frequency Noise**. Defra, 2001.

ELIAS, Patrick; VILLOT, Michael, 2011 - **Review of existing standards, regulations and guidelines, as well laboratory and filed studies concerning human exposure to vibration**. Deliverable D1.4. Project RIVAS. European Commission.

FTA, 2006 - **Transit Noise and Vibration Impact Assessment. FTA-VA-90-1003-06** 2006.

HOWARTH, H.; Griffin, M., 2008 - **A Social Survey Questionnaire of Human Response to Vibration in Residential Buildings**. Institute of Sound and Vibration Research, Report nº 323, 2008.

ISO 14837-1 - **Mechanical vibration-- Ground borne noise and vibration arising from rail systems. Part 1 : General guidance**. International Organization for Standardization, 2003.

ISO 2631-1 - **Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration**. International Organization for Standardization, 1997.

ISO 2631-2 - **Evaluation of human exposure to whole-body vibration: Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 Hz to 80 Hz)**. International Organization for Standardization, 1989.

LEEUWEN, H.; ZWIENEN, A. – **The determination of railway levels in practice**, In proceedings of Internoise 2016, Hamburg.

LEVENTHALL, H. - **Low frequency noise and annoyance**. Noise & Health, Volume 6 (24), (2004), pp.59-72.

NP ISO 2631-1 - **Vibrações mecânicas e choque. Avaliação da exposição do corpo inteiro a vibrações. Parte 1: Requisitos gerais.** Instituto Português da Qualidade, 2007.

NP 2074 - **Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares.** Instituto Português da Qualidade, 2015

TROLLÉ, A.; MARQUIS-FAVRE, C.; PARIZET, E. -**Perception and annoyance due to vibrations in dwellings generated from ground transportation.** A review. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and active control, volume 34 (4), (2015), pp. 414-457.

WADDINGTON, D.; WOODCOCK, J.; SMITH, M.; JANSSEN, S.; WAYE, K. – **CargoVibes: Human response to vibration due to freight rail traffic.** International Journal of Rail Transportation, Volume 3 (4), (2015), pp. 233-248