

Metodologia para minoração da ocorrência de potenciais situações de incomodidade ao ruído e vibração no interior de residências decorrentes da circulação do Metro

SÓNIA ANTUNES
JORGE PATRÍCIO

Laboratório Nacional de Engenharia Civil | Portugal
Autor correspondente: santunes@lnec.pt

Palavras-chave

Acústica, Vibrações, Incomodidade

Resumo

A presente comunicação apresenta um guia de actuação metodológica para a minoração da ocorrência de potenciais situações de incomodidade ao ruído e vibração no interior de residências decorrentes da circulação do metropolitano. Este guia resulta de um estudo que o Metro de Lisboa promoveu, com o intuito de harmonizar os procedimentos de actuação nos projectos de execução das suas obras, tendo em conta o estado de arte neste domínio, bem como a normalização e regulamentação internacional. O referido documento foi estruturado nas seguintes seções: Estado de arte sobre a temática; Metodologia e documentação base de apoio ao EIA; Definição das metodologias de caracterização para estudos de acondicionamento no âmbito das vibrações; Definição de critérios de admissibilidade; Soluções construtivas para a minimização de vibração; Critérios para a contratação de empresas de acústica e vibração; e Critérios para a avaliação da eficácia das medidas de mitigação, após a sua instalação. Nesta comunicação são detalhados os principais aspectos metodológicos de actuação, designadamente para a previsão dos níveis de vibração para vias túnel, com recurso à determinação experimental de funções de transferência, assim como, a para a estimativa do ruído estrutural derivado da exploração na rede. São também apresentados os critérios de admissibilidade, e linhas orientativas para a realização de medições de ruído estrutural e vibração.

1 | INTRODUÇÃO

Com a melhoria da qualidade da edificação, mais especificamente do respetivo isolamento sonoro, outros aspetos começaram a ter uma maior importância na definição do conforto dentro das habitações. Em zonas urbanas, os

efeitos das vibrações devido à circulação de tráfego ferroviário começaram, já há alguns anos, a ter especial importância. Efetivamente os ocupantes dos edifícios podem perceber diretamente as vibrações, entendidas como vibrações mecânicas (para frequências entre 1-80 Hz), ou indiretamente, como ruído re-radiado (na gama de frequências 16-250 Hz). Este último efeito pode ser particularmente sensível em residências com um bom isolamento sonoro, nomeadamente em relação ao exterior, e quando a via-férrea se localiza em túnel, como é o caso das linhas de Metro.

No que respeita à avaliação da influência de vibrações impulsivas nos edifícios próximos na fase de construção, são usualmente utilizados os critérios publicados da norma NP 2074 (em 2015 foi publicada uma nova versão, com algumas alterações), de modo a limitar o valor da velocidade de vibração admissível nas edificações, devido às várias atividades e equipamentos envolvidos.

Para além dos efeitos no edificado próximo, é também comum proceder-se a uma avaliação da afetação ambiental das vibrações, tendo em conta a perceção humana. Neste contexto, podem ser definidos dois descritores (DHVFBO, 2005): i) o Fator de Afetação, calculado através do quociente entre o valor da velocidade de vibração nas edificações como resultado de ações típicas de obra, e a correspondente velocidade de vibração admissível (valor constantes na norma NP 2074, em função da frequência dominante registada e do tipo de estrutura em causa), para avaliação dos efeitos das vibrações nos edifícios circundantes à obra; e ii) o Índice de Afetação Ambiental para Vibrações, que quantifica o acréscimo de vibrações sentidas nos edifícios, devido à vibração causada pelas solicitações originadas numa determinada obra. Depois de calculado este descritor, os resultados são interpretados tendo por base a norma ISO 2631 (ISO, 1978) para avaliar a incomodidade humana absoluta às vibrações (esta norma já foi substituída por uma versão de 2003, na qual já não constam valores limites para a velocidade de vibração).

Na fase de exploração, para a prospeção dos níveis de vibração resultantes da exploração do empreendimento, recorre-se usualmente ao método geral descrito no documento da Administração Federal de Transito dos EUA. Este documento utiliza dados generalizados para o desenvolvimento de uma curva da variação do nível de vibração (resultantes de um número alargado de medições efetuadas nos EUA), em função da distância à via. Os níveis de vibração são estimados pela leitura dos valores da curva e da aplicação de correções, de modo a contabilizarem-se diferentes fatores, como por exemplo: o tipo de sistema de suporte de via, o tipo de composições ferroviárias e correspondente velocidade de circulação, o tipo de condições geológicas dos solos, o tipo de fundações e o número de pisos dos edifícios. Este método geral, não considera o espectro de vibração, tendo somente em conta o nível de vibração global e o nível sonoro com ponderação A.

A utilização deste método de análise geral (DHVFBO, 2005) tem como objetivo fornecer uma solução simples para a previsão dos níveis globais decorrentes da vibração e do ruído estrutural induzidos pela passagem de composições ferroviárias, para que depois estes valores possam ser comparados com os valores admissíveis. Em estudos de impacto ambiental, este nível de detalhe pode ser suficiente na fase de comparação de alternativas. No entanto, no caso de projetos onde são previsíveis potenciais problemas, o referido documento recomenda a utilização do método detalhado, especialmente na fase do projeto de execução e para definição de medidas de mitigação.

Nesta fase, refira-se a importância de se considerar que a estimulação mecânica transmitida aos edifícios, normalmente através das fundações, poderá dar lugar ao estabelecimento de campos sonoros, determinando alterações da componente acústica do ambiente. Este fenómeno assume maior relevância, no interior dos edifícios, e em especial nos edifícios com maiores características de isolamento sonoro a sons aéreos (ruído ambiente mais

baixo), desde que os estímulos em causa, apresentem componentes no domínio do audível e com intensidades suscetíveis de darem lugar a incomodidade auditiva. Assim, a avaliação deverá incidir sobre as construções, na perspetiva da perceção da vibração, assim como da sua correspondente perceção como ruído.

Após a identificação dos recetores potencialmente expostos, a fase seguinte consiste na descrição qualitativa dos impactes esperados, quer positivos quer negativos, para as fases de construção, exploração e (eventualmente) desativação, com indicação da sua natureza (positivo, negativo ou nulo), ordem (direto ou indireto), duração (temporário e permanente), magnitude (pouco significativo, significativo, muito significativo) extensão (geográfica e população afetada). Caso haja receptores sensíveis dentro da área de influência do projeto, e a ultrapassagem das disposições legais ou normativas, considera-se que há impacte negativo significativo. Para estas situações, assim como para aquelas em que os valores dos níveis de vibração estejam próximos dos valores admissíveis, deverão ser adotadas medidas de minimização de vibração, privilegiando-se soluções de correção na fonte ou no meio de transmissão.

Posteriormente à estimação do impacte ambiental e à definição de eventuais medidas de minimização, devem ser estabelecidos programas de monitorização. Estes programas assentam em campanhas de observação e de recolha sistemática de dados sobre o estado do ambiente ou sobre os efeitos ambientais de determinado projeto. Neste caso, o programa de monitorização deverá permitir obter informação de forma a caracterizar, entender e detetar a tendência da variável “velocidade eficaz global de vibração”, no espaço e no tempo, quer para a fase crítica da construção, atendendo ao caráter das obras de construção envolvidas, que normalmente se desenvolvem em meio urbano, assim como para as fases subsequentes. Em síntese, o programa de monitorização deverá permitir obter:

- ◆ Informação sobre a situação real;
- ◆ Avaliação do grau de incerteza inerente às técnicas de predição;
- ◆ Verificação da eficácia das medidas de minimização adotadas;
- ◆ Identificação de tendências, com o objetivo de prevenção, caso sejam identificadas como nocivas;
- ◆ Informação sobre a necessidade de medidas de minimização complementares

2 | METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO PARA ESTUDOS NA COMPONENTE VIBRAÇÕES

2.1 | Introdução

A metodologia simplificada, baseada no método detalhado publicado pela Administração Federal dos EUA (FTA, 2006), pode dar resposta às preocupações do Metroo relativamente à geração e propagação de vibrações que possa originar desconforto e incómodo em residências, tanto no que respeita à vibração de elementos estruturais ou de compartimentação, assim como do respetivo ruído radiado, considerado neste contexto como ruído estrutural.

As previsões detalhadas de vibração são geralmente realizadas durante a fase de projeto final de um empreendimento, e quando há motivos suficientes para suspeitar de impacto adverso relativo ao descritor vibração. Efetivamente, é consideravelmente complexo desenvolver previsões detalhadas de propagação de vibrações, com recurso a métodos numéricos, constituindo-se atualmente como um campo de investigação em desenvolvimento. Neste contexto, a Organização Internacional de Normalização publicou a norma ISO 14837-1 (2015), onde é estabelecido um guião geral para o desenvolvimento de modelos de previsão para as vibrações e ruído estrutural induzidos pelo tráfego ferroviário, designadamente nas etapas de calibração, validação e verificação da sua implementação.

Na norma referida consta uma listagem dos parâmetros que devem ser considerados para cada etapa, assim como uma lista de verificações para os distintos métodos de previsão que possam ser utilizados. No caso da avaliação do impacto ambiental, a norma prevê a utilização de modelos paramétricos assentes em métodos de análise numérica (FEM, FDM, BEM ou híbridos), de métodos empíricos, com recurso a extrapolação de dados de medição, ou então a utilização de métodos semiempíricos, que constituem uma combinação dos modelos anteriormente referenciados. Um exemplo desta atuação seria, por exemplo, a utilização de um modelo numérico para a caracterização da fonte de emissão e correspondente solicitação na parede do túnel do Metro, e a caracterização por métodos empíricos da propagação das vibrações do túnel até aos edifícios mais próximos, a partir da obtenção das funções de transferência.

Atendendo à dificuldade de modelação teórica da fenomenologia associada à propagação de vibrações desde a fonte até ao recetor, e à incerteza e variabilidade das características dos materiais e das soluções construtivas, a proposta metodológica de atuação que se apresenta é baseada na utilização de uma determinação experimental de funções de transferência

2.2 | Metodologia para a previsão dos níveis de vibração: via em túnel

2.2.1 Determinação das funções de transferência

Com base no mapa da malha urbana atravessada e do túnel ferroviário, planta e cortes, deve fazer-se uma inspeção visual para escolha dos edifícios próximos e localizados sobre o túnel, e os pontos junto às respectivas fundações, onde se farão as medições ao nível do solo/superfície. Estes pontos ficarão, tanto quanto possível, na vertical de outros correspondentes, localizados na parede do túnel, ao nível da via férrea, e anotam-se as características dos edifícios (vd. ilustração da figura 1).

Edifícios localizados a distâncias inferiores a 10 m do eixo da futura via devem ser necessariamente escolhidos. Quando o tipo de solo tem características de um solo médio, este valor limite pode ser inferior, caso se esteja na presença de solos soltos, e alargado caso os solos sejam rijos. Distâncias ao eixo da via entre 10 e 30 m aconselham a escolha do edifício; particularmente se tiver estrutura de betão armado, o valor limite de 30 m pode alargar-se para 50 m no caso de solos rijos. Para distâncias superiores a 50 m, normalmente não há problemas de vibrações.

Os pontos seleccionados no túnel (ao nível da via), à superfície, e nos pisos superiores do edifício formarão um conjunto, no qual o índice J se refere ao edifício, u ao túnel, s à superfície, e kj aos pisos seleccionados.

$$P_j = [P_{su}, P_{su}, P_{su}] \quad (1)$$

Nesta fase o túnel deverá estar já escavado, e de preferência com a superestrutura já betonada.

Para o cálculo da transmissão da vibração do túnel para os edifícios, deve Instrumentar-se a linha de pontos PJ (em cada seção considerada relativamente a cada edifício escolhido) colocando acelerómetros nos pontos escolhidos na parede do túnel (ao nível da via), à superfície (em piso solidamente ligado à estrutura ao nível da cota da soleira, exteriormente ou no átrio do edifício, junto a um pilar), e nos pisos superiores (de preferência a meio vão das divisões seleccionadas). Para a realização da medição, aplicam-se as considerações indicadas para o caso da via à superfície.

Seguidamente, recorrendo a um martelo hidráulico perfurador (vd. figura 1), induzem-se vibrações verticais no piso do túnel (interpondo entre o martelo e o solo, ou piso do túnel uma pequena laje que resista à excitação introduzida), e medem-se as vibrações, ou seja, adquirem-se e memorizam-se os sinais dos sensores nos pontos Pj.

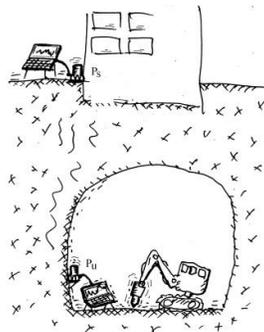


Figura 1 – Determinação esquemática da função de transferência de vibrações do túnel para a superfície

Para cada conjunto de pontos, no túnel e à superfície, e nos pisos superiores ao longo do desenvolvimento da via, e nos edifícios escolhidos, calculam-se os espectros eficazes da velocidade vertical de vibração, $v_{s(f)}$, $v_{u(f)}$ e $v_{pk(f)}$ (s, na superfície; u, no túnel, e p_k nos pisos mais elevados), e determina-se para cada conjunto de pontos P_j as funções de transferência, H entre o túnel e a superfície, e entre a superfície e os pisos mais elevados :

$$H_{u \rightarrow s(f)} = v_{s(f)} / v_{u(f)} \quad (2)$$

e

$$H_{s \rightarrow pk(f)} = v_{pk(f)} / v_{s(f)} \dots \dots \dots H = 1, \dots \quad (3)$$

ou

$$H_{u \rightarrow s(f)} = v_{s(f)} - v_{u(f)} \quad \text{em dBv} \quad (2a)$$

e

$$H_{s \rightarrow pk(f)} = v_{pk(f)} - v_{s(f)} \dots \dots \dots H = 1, \dots \quad \text{em dB v} \quad (3a)$$

De seguida, estima-se ou mede-se (de preferência), a vibração gerada por comboios semelhantes em vias semelhantes, na parede do túnel ou na estação, ao nível da via, $vuc(t)$, e calcula-se o respectivo espetro, $Vuc(f_i)$. A estimativa deve ser baseada em medições credíveis realizadas em linhas com composições semelhantes, e correctamente transpostas para a parede do túnel ao nível da via.

A vibração previsível à superfície (edifícios, cota da soleira), $V_{sc_{(f_i)}}$ e nos diversos pisos $V_{v_{(f_i)}}$ é:

$$V_{sc_{(f_i)}} = T_{v \rightarrow s_{(f_i)}} \cdot V_{v_{(f_i)}} \quad (4)$$

$$e$$

$$V_{v_{(f_i)}} = T_{v \rightarrow v_{(f_i)}} \cdot V_{v_{(f_i)}} \dots j = 1, \dots \text{ em mm/s} \quad (5)$$

$$\text{ou}$$

$$V_{sc_{(f_i)}} = T_{v \rightarrow s_{(f_i)}} + V_{v_{(f_i)}} \quad (4a)$$

$$e$$

$$V_{v_{(f_i)}} = T_{v \rightarrow v_{(f_i)}} + V_{v_{(f_i)}} \dots j = 1, \dots \text{ em dB v} \quad (5a)$$

Se as medições no interior dos edifícios tiverem sido realizadas nas partes comuns (pisos dos átrios), aplica-se o acréscimo de +6 dBv (tal como no caso da via à superfície). Deve também ser utilizado procedimento análogo para a contabilização do futuro desgaste e degradação das superfícies de rodas e carris (acrécimo de +10 dBv em todas as bandas de frequência).

Os espectros finais $V_{v_{(f_i)}}$ e $V_{sc_{(f_i)}}$ e os valores globais finais obtidos para a velocidade v , são comparados com os limites admissíveis. Os valores globais são estimados a partir dos espectros, de acordo com a expressão (6).

$$V_{v_{(f_i)}} = \left(\sum V_{v_{(f_i)}}^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

2.2.2 Estimativa do ruído estrutural $Leq_{kjc}(t)$

Os níveis sonoros no interior dos edifícios próximos de vias férreas é muitas vezes uma combinação de ruído aéreo e ruído induzido pela vibração transmitida pelas fundações do edifício (ruído estrutural), e muitas vezes proveniente da mesma fonte. As vibrações induzidas pela passagem de composições ferroviárias são normalmente aferidas a partir de acelerómetros colocados no centro dos pavimentos dos compartimentos, medindo-se principalmente a componente vertical, enquanto a aferição do ruído estrutural é realizada por microfones também localizados no centro do compartimento, na gama de frequências audíveis, neste caso entre os 16-250 Hz (ISO 14837-1, 2006).

As medições simultâneas de ruído e vibração têm mostrado que a expressão teórica (p , pressão sonora, ρ massa específica do ar, c velocidade de propagação das ondas sonoras no ar, v velocidade de vibração de uma placa infinita que gerará ondas sonoras), conduz a valores aproximados aos medidos (os efeitos das reflexões e da absorção numa divisão parecem compensarem-se).

$$p = \rho \cdot c \cdot v \quad (13)$$

Considerando $\rho = 1,205 \text{ kg/m}^3$ e $c = 343 \text{ m/s}$, a expressão anterior toma a seguinte forma:

$$L_p = 20 \log_{10} v + 146 \text{ dB} \quad v \text{ em mm/s} \quad (14)$$

A expressão anterior permite ter uma aproximação à estimativa do nível de ruído estrutural, a partir da medição (ou previsão) dos valores de velocidade de vibração no centro dos pavimentos dos edifícios. Caso tenha interesse, o valor do nível sonoro, ponderado A, pode ser obtido a partir dos valores do nível de pressão sonora, para as bandas de terço de oitava compreendidas entre 16 Hz e os 250 Hz, com recurso à expressão:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_j 10^{\frac{L_{p_j} - 146}{20}} \right) \quad (15)$$

Em que os coeficientes C_j se referem às ponderações da malha A.

No projecto europeu Rivas foi obtida uma expressão simplificada, baseada na aplicação do método de análise estatística de energia, para a previsão os níveis de ruído estrutural no centro de um compartimento, a partir da medição do nível de velocidade de vibração nesse mesmo local, e que para lajes de betão, toma a forma:

$$L_{p_{eq}} \approx L_{v_{eq}} + 4 \quad v \text{ em m/s re. } 2 \times 10^{-8} \quad (16)$$

Esta expressão é válida para frequências iguais ou superiores a 40-50 Hz, sendo indicada na versão provisória da norma ISO/TS 14837-31, a qual se espera seja publicada a curto prazo.

2.2.3 Estimativa do isolamento à propagação de vibrações

Sempre que os valores previstos forem superiores aos admissíveis, deve colocar-se isolamento adequado para reduzir a propagação as vibrações, por exemplo, dimensionando uma laje de betão e uma manta elástica, a dispor sob a via, com a característica suficiente $\Delta V_{isol}(f_i)$ que permite reduzir o valor dos espectros $V_{kjc}(f_i)$ e $V_{sc}(f_i)$ para valores inferiores aos admissíveis.

No caso de vias balastradas, a massa e elasticidades do balastro e materiais subjacentes devem proporcionar o isolamento necessário.

Note-se que o isolamento, ou corte de propagação de vibrações, depende da frequência. O seu cálculo deve ser feito modelando todo o sistema gerador das vibrações que se irão propagar tanto no caso de via à superfície como em túnel, tendo em conta as massas das composições (carruagens e “bogies” com as rodas), com e sem passageiros, da via (rails e travessas), e da laje subjacente, bem como as características elásticas e de amortecimento das suspensões das carruagens, “pantufas” das travessas, e da manta subjacente.

De forma simplificada, poderá modelar-se o sistema gerador como um sistema massa-mola, ou massa-mola-amortecedor, linear e com um grau de liberdade, considerando-se a massa como a soma das massas referidas anteriormente, e a rigidez como essencialmente a devida aos sistemas de apoio (fundação, no caso de via em superfície, e, no caso de em túnel, à eventual manta subjacente à laje sob as travessas e sobrejacente ao piso do túnel). As indicações sobre o processo de desenvolvimento, calibração e validação dos modelos utilizados para o estabelecimento de medidas de mitigação estão publicadas no anexo C na norma ISO 14837-1 (2015).

Assim a previsão final, para o sistema isolado, terão a forma ($x = s$ ou kj):

$$V_{\text{total}} = T_{\text{total}} + \Delta V_{\text{total}} \quad (17)$$

2.2.2 Verificação dos valores de vibração e ruído gerados pela exploração.

Deverá ser feita a medição final, após o início da exploração, dos valores da vibração e ruído estrutural (se aplicável), nos pontos antes seleccionados, para comparação dos valores reais com os previstos e verificação da eficácia da solução implementada, em particular da eficiência do sistema de redução da transmissão de vibrações (isolamento). O documento guia detalha dois protocolos de medição, que poderão ser utilizados para esta determinação.

2.3 | Critérios de admissibilidade

Tradicionalmente utilizava-se a velocidade da vibração para o estabelecimento de valores limite, tendo em conta que a sensibilidade humana à vibração é constante entre 8 e 80 Hz. De facto, a norma ISO 2631-2 (versão de 1989) estabelecia valores limite 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 atual desta norma, já não existe a indicação de valores limite.

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 1. 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.1 – Valores LNEC para a perceção da vibração continuada no interior de edifícios

vef (mm/s)	Sensação
vef < 0,11	Nula
0,11 <vef < 0,28	Perceptível, suportável para pequena duração
0,28 <vef < 1,10	Nítida, incómoda, podendo afetar as condições de trabalho
vef > 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 da velocidade eficaz $v_{ef} < 3$ mm/s, assumido 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.

Para efeitos da previsão do ruído estrutural que se possa estabelecer em compartimentos de habitações expostas, tendo em consideração a especificidade da situação em análise (ruído e vibrações induzidas pela circulação de tráfego ferroviário), propõe-se o a seguir descrito.

De acordo com o preconizado no Regulamento Geral do Ruído (Decreto-Lei nº 9/2007, de 17 de janeiro), considera-se aceitável que não haja realização de avaliações de incomodidade devida ao ruído, para cada período de referência, nas situações em que o nível sonoro contínuo equivalente, L_{Aeq} , seja menor ou igual a 27 dB(A). Esta consideração é feita por analogia tendo em conta o conforto no interior de compartimentos de estar ou dormir, na medida que, de acordo com a legislação referida, a avaliação de incomodidade não é aplicável ao ruído proveniente de meios de transporte, considerando que a fonte sonora perturbadora seria a correspondente à passagem das composições do metropolitano, e assumindo que a expectativa da emergência do ruído em cada passagem, corresponde a uma penalização de 5 dB(A), pode-se estabelecer como critério de avaliação que o ruído no interior dos compartimentos referidos, devido a cada passagem de composições de Metro, seja menor ou igual a 22 dB(A), calculado na gama de frequências relevante com início na banda de 16 Hz.

Assim sendo, e com o objetivo de definir as medidas corretivas a implementar na via, para que se obtenha, no máximo, o nível de ruído referido, nos compartimentos em causa, partindo do campo de vibrações estabelecido na laje de piso em contato com o terreno de fundação do edifício objeto de avaliação, e recorrendo à propagação de vibrações por transmissão marginal para os elementos planos rígidos que a essa laje estão ligados, assim como ao processo de radiação por placa infinita, o valor eficaz da velocidade de vibração, integrada nas bandas de frequência central situadas entre 16 Hz e 200 Hz, deve observar o seguinte (ALONSO et al., 2018):

- ser menor que 0,02 mm/s, nas situações mais desfavoráveis em que o índice de redução de propagação de vibrações da laje em causa para as paredes circundantes (K_{ij}) é muito baixo e a transmissão entre os elementos é elevada. Este caso ocorre quando as soluções construtivas são muito pesadas e a maioria das ligações consideradas são rígidas;
- estar compreendida entre 0,02 - 0,025 mm/s, nas situações intermédias em que o índice de redução de propagação de vibrações da laje em causa para as paredes circundantes, (K_{ij}), já tem alguma relevância, havendo assim menos transmissão de vibrações do que no caso anterior. Este caso corresponde às situações mais comuns;
- estar compreendida entre 0,025 - 0,03 mm/s, nas situações mais favoráveis em que o índice de redução de propagação de vibrações da laje em causa para as paredes circundantes (K_{ij}) é muito alto, e a transmissão entre os elementos é baixa. Este caso ocorre quando as soluções construtivas para as paredes são muito aligeiradas.

2.4 | Medição de 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 principais do edifício, utilizando-se uma única ponderação em frequência para todos os eixos. As medições devem ter em conta a ocupação esperada dos moradores no edifício, e também as funções a que se destina cada compartimento. No entanto, e como a sensibilidade humana às vibrações se relaciona essencialmente com a velocidade da vibração, deve ser este o parâmetro utilizado na comparação com os valores limite admissíveis, o qual pode ser facilmente obtido por meio de cálculo. Esta norma ISO 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 aspetos visuais associados à vibração de janelas e de pequenos objetos.

Muitas vezes, e especialmente em estudos de impacte ambiental associados ao tráfego ferroviário, não é possível realizar 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 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 na excitação causadas pelos diferentes tipos de composições (de passageiros e de carga) e às velocidades de circulação, a que acresce a ocorrência de perturbações induzidas por vibrações “parasitas” originadas por outras fontes, diferentes das que se pretendem avaliar, como sejam as atividades dos ocupantes dos edifícios, cuja identificação nem sempre pode ser fácil de efetuar.

No sentido de ultrapassar algumas das dificuldades enunciadas, podia ser utilizada uma metodologia para a caracterização das vibrações no interior de edifícios, constante nos documentos orientativos holandeses (LEEUWEN e ZWIENEN, 2016). Neste caso, as medições devem ocorrer durante, pelo menos, uma semana, de modo a se obterem 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 os derivados das vibrações originadas por outro tipo de tráfego diferente do que se pretende analisar.

Um procedimento alternativo pode consistir na realização de medições na base dos edifícios, durante uma semana, medições essas que devem ser complementadas com medições simultâneas nos diversos pisos dos edifícios, durante um período mais curto de tempo (no mínimo 24 horas). A partir das diferenças entre as medições na base do edifício e nos diversos pontos de medição (pisos) é possível calcular o fator de transmissão de vibrações do edifício, que permite estimar a vibração em diversos locais a partir das medições de longa duração efetuadas na base do edifício. Para cada local, os níveis de vibração estimados deverão comparados com os limites máximos permitidos.

Finalmente refira-se a existência de uma especificação técnica editada recentemente, ISO/TS 14837-31 de 2017, que apresenta os requisitos mínimos e um guia de boa prática par a realização de medições com a finalidade de avaliar a exposição humana à vibração, em edifícios residenciais.

2.5 | Medição do ruído estrutural

Os métodos mais simples especificam somente um ponto de medição e uma medição, pelo menos, com a duração de 1 hora. No entanto, este tipo de abordagem não permite considerar a influência dos modos próprios da sala, e, por conseguinte, não tem em conta a variação espacial dos níveis sonoros, podendo assim conduzir a conclusões pouco rigorosas. Alguns métodos mais avançados enfatizam a realização de medições nos cantos do compartimento, o que, por seu lado, pode conduzir à superestimação dos níveis sonoros relativamente aos valores usualmente associados à circulação interna dos ocupantes.

A norma ISO 16032 preconiza a realização de medições simultaneamente com as malhas de ponderação em frequência A e C, por bandas de oitava, entre 31,5 Hz e 8 kHz, sendo utilizados 3 pontos de medição. Duas posições estão localizadas a uma altura situada entre 1,0 e 1,5 m, e à distância das paredes do compartimento de, pelo menos, 0,5 m. No entanto, não são consideradas as posições dos ocupantes, mas somente as distâncias mínimas em relação a paredes e objetos, e à altura acima do piso. A terceira posição corresponde a uma posição de canto (distanciado de 0,5 m das paredes), para o qual o valor do nível sonoro ponderado C é máximo.

Neste contexto, pode-se verificar a existência de muitas especificidades na determinação dos níveis sonoros no interior de um compartimento, associados à avaliação da percepção do ruído de baixa frequência. Poder-se-á dizer que alguns métodos de medição foram estabelecidos para reduzir a incerteza e melhorar a reprodutibilidade na gama das baixas frequências, enquanto outros se focam mais nos níveis sonoros percebidos pelos ocupantes. Neste último caso, a reprodutibilidade pode ser baixa, pois técnicos diferentes podem ter critérios distintos para a escolha dos locais representativos das posições comuns dos ocupantes. Os métodos que sugerem a medição dos níveis sonoros próximos dos cantos do compartimento, e portanto associados a níveis sonoros mais elevados, embora apresentem uma maior reprodutibilidade, enformam do facto de não ser claro o modo como os valores assim obtidos podem ser comparados com valores “limite. Neste sentido, é importante o estabelecimento de regras para a medição do ruído de baixa frequência no interior de compartimentos. Por exemplo, no método estabelecido pelo instituto Finlandês de saúde ocupacional (OLIVA et al., 2012), quando o ruído a avaliar tem características estacionárias, são realizadas medições do nível sonoro contínuo equivalente, por bandas de terços de oitava entre os 20 Hz e 10 kHz, com ponderação linear, e durante, pelo menos 30 segundos. No caso de ruído com características intermitentes são realizadas medições durante um período temporal mais alargado, selecionado de acordo com as características de variação temporal da emissão da fonte, mas usualmente nunca inferior a 24 horas, sendo aconselhada a recolha áudio do sinal, de modo a ser possível o seu processamento posterior, com a identificação das fontes sonoras associadas aos níveis sonoros mais elevados. Neste método, as medições devem ser localizadas nas posições usualmente utilizadas pelos ocupantes, sendo efetuada uma comparação com os valores limites para cada uma das posições individuais.

Usualmente, considera-se como zonas de ocupação corrente as zonas de descanso ou lazer.

Como os níveis sonoros podem variar muito devidos às reflexões nas superfícies do compartimento, considera-se que os pontos de medição devem ter um afastamento mínimo de 0,3 m de qualquer superfície, e a uma altura de 0,6 m (pessoa deitada), 1,2 m (pessoa sentada) ou 1,55 m (pessoa em pé).

Para a caracterização de ruído estacionário, podem ser realizadas medições no centro do compartimento, mas neste caso utilizando-se o método de varrimento. Também podem ser realizadas medições adicionais próximas dos

cantos do compartimento, para identificação dos seus modos próprios, não sendo, no entanto, objetivo destas últimas medições a comparação com os valores limite.

3 | CONCLUSÕES

Nesta comunicação foram apresentadas metodologias para a previsão das vibrações no interior das habitações, com recurso a determinação experimental de funções de transferência, sendo também apresentadas metodologias para as medições de vibração e do ruído estrutural. Espera-se que a aplicação deste guia orientativo para a previsão e realização de medições de vibração e de ruído de baixa frequência, possa contribuir para uma harmonização de procedimentos de atuação, no âmbito dos estudos de impacte ambiental.

No âmbito de estudos de avaliação de incomodidade, na fase de exploração, consideram os autores também importante o estabelecimento de um questionário de referência, para apoio ao planeamento das medições, análise dos registos áudio, e recolha de informação sobre o ruído de fundo e fontes sonoras presentes.

Referências

- [1] ANTUNES,S.; PATRÍCIO, J., 2018. "Documento Guia para a minoração da ocorrência de potenciais situações de incomodidade ao ruído e vibração no interior de residências decorrentes da circulação do metropolitano. Zonas em projecto", Relatório 343/2018-DED/NAICI. LNEC, Lisboa, 2018.
- [2] ALONSO, A.; PATRICIO, J.; SCHIAPPA, F., 2018 "Criteria for vibration levels from Metro Lines to comply with acceptable noise inside residential buildings", in Ata Acustica united with Acustica, volume 105,Number 1, January/February 2019.
- [3] FTA, 2006 ."Transit Noise and Vibration Impact Assessment.", FTA-VA-90-1003-06,2006.
- [4] DHVFBO, 2005. "Estudo de impacte ambiental do prolongamento da linha vermelha entre o Oriente e o aeroporto", DHVFBO , Junho de 2005.
- [5] ISO, 2015. "Mechanical vibration: Ground-borne noise and vibration arising from rail systems Part 32: Measurement of dynamic properties of the ground", Geneva, Switzerland, ISO/TS 14837-32, 2015.
- [6] ISO, 2005 – Mechanical vibration— Ground-borne noise and vibration arising from rail systems: Part1: General guidance. Geneva, Switzerland, ISO/TS 14837-32, 2015
- [7] ISO, 2017. "Mechanical vibration -- Ground-borne noise and vibration arising from rail systems - Part 31: Guideline on field measurements for the evaluation of human exposure in buildings", Geneva, Switzerland ISO/TS 14837-31,2017
- [8] OLIVA, D; HONGISTO, V.; KERÄNEN, J.;KOSKINEN, V."Measurement of low frequency noise in rooms", Finnish Institute of Occupational Health, Finland, 2011.