

# AValiação da Componente Vibração em Estudos de Impacte Ambiental para Projetos de Vias-Férreas em Zonas Urbanas: Atualização de Aspectos Metodológicos e Práticas Correntes em Portugal

Sónia Monteiro Antunes<sup>1\*</sup>  
Jorge Viçoso Patrício<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal

## RESUMEN

A presente comunicação apresenta uma atualização do guia de atuação metodológica para a minoração da ocorrência de potenciais situações de incomodidade à vibração e ao uído estrutural no interior de residências, proposto pelos autores, em 2019. Esta atualização, decorrente da experiência no acompanhamento dos diversos estudos de impacte ambiental realizados desde 2019, especialmente em zonas densamente urbanizadas, preconiza a utilização de indicadores adicionais, especialmente durante a fase de construção. Foram realizados pequenos ajustes aos indicadores já utilizados, assim como a atualização de procedimentos, decorrentes da publicação de novos documentos normativos. Neste contexto, é apresentado um resumo do referido guia, enfatizando-se os seguintes aspetos: Metodologia de caracterização para estudos de vibrações; Caracterização da vibração e do ruído estrutural durante as fases de construção e exploração; Critérios de admissibilidade, e Monitorização de vibrações.

## ABSTRACT

This communication presents an update to the methodological guide for reducing the occurrence of potential nuisance situations due to vibration and ground-borne noise inside homes, proposed by the authors in 2019. This update, results from experience in following various environmental impact studies carried out since 2019, especially in densely urbanized areas. Additional indicators were introduced, especially during the construction phase. As a result of the publication of new normative documents, small adjustments were made to the indicators already used, and updated procedures were introduced. In this context, a summary of the updated guide is presented, emphasizing the following aspects: Characterization methodology for vibration studies; Characterization of vibration during the

construction phase and vibration and ground borne noise structural during the project exploration phase; Admissibility criteria, and Vibration monitoring.

**Palabras Clave**—. *Acustica, Vibracoes, Incomodidade*

## 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, desde alguns anos começaram a ter especial relevância. Efetivamente os ocupantes dos edifícios podem perceber diretamente as vibrações, entendidas como vibrações mecânicas (para frequências entre 1-80 Hz), ou indiretamente, como ruído estrutural 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.

Em projetos ferroviários, as previsões detalhadas de vibração (discriminação dos valores de velocidade de vibração no interior dos edifícios, em bandas de terço de oitava) são geralmente realizadas durante a fase de projeto final de um empreendimento, e em situações particulares, quando há motivos suficientes para suspeitar de impacto adverso relativo ao descritor vibração. Por exemplo, no caso de edifícios sobrejacentes ao traçado da via, ou na envolvente próxima. 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 [1], onde foi estabelecido um guia geral para o desenvolvimento de

\* **Autor de contacto:** santunes@miemail.com

**Copyright:** ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

modelos de previsão para as vibrações e ruído estrutural induzido pelo tráfego ferroviário, designadamente nas etapas de calibração, validação e verificação da sua implementação. Este documento prevê a possibilidade de 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 o recurso a métodos empíricos para a caracterização da propagação das vibrações do túnel até aos edifícios mais próximos, a partir da obtenção das funções de transferência. Para situações menos complexas (por exemplo, uma via a superfície), ou então na fase de estudo prévio, para a avaliação das diferentes opções, usualmente considera-se adequada a previsão dos valores de velocidade de vibração resultantes da exploração do empreendimento, com recurso a modelações mais simplificadas, como por exemplo, o método geral descrito no documento da Administração Federal de Transito dos EUA [2] (FTA, 2018). Este documento utiliza dados tabelados para 3 tipos de composição ferroviária, 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. Refira-se, contudo, a necessidade de conversão das unidades referenciadas neste guia (designadamente a utilização de metro em vez de polegada, devendo-se utilizar níveis de referência para a velocidade de vibração distintos:  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s, em vez  $10^{-6}$  in/s). Os níveis de vibração no interior do edifício 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. Saliente-se a importância de validação das previsões realizadas, por meio de medições experimentais, a partir da determinação de funções de transferência, quer fazendo uso de modelos numéricos avançados, quer utilizando-se métodos de previsão da velocidade de vibração mais simplificados. Esta validação deverá ocorrer, e numa fase anterior à execução da solução de via-férrea selecionada.

Os níveis sonoros no interior dos edifícios próximos de vias-férreas são 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 (principalmente nas vias à superfície). Usualmente a previsão do ruído estrutural é realizada a partir das previsões da velocidade de vibração, nos pisos dos

edifícios. Para a sua determinação, são usualmente utilizados métodos simplificados, com recurso a fatores de conversão entre a velocidade de vibração e os níveis sonoros, em função da frequência, como indicado no documento da FTA (FTA, 2018). Também na norma ISO/TS 14837-31 [3] são apresentadas expressões simplificadas derivadas da aplicação do método de análise estatística de energia para a estimativa da previsão do nível de ruído estrutural (no centro do compartimento), a partir da previsão dos valores de velocidade de vibração no centro dos pisos dos edifícios. Neste caso, as simplificações utilizadas são válidas para compartimentos com pisos e tetos de maior massa (betão), admitindo-se estas duas superfícies como superfícies radiantes, e considerando que as paredes laterais são constituídas por materiais mais leves (e consequentemente radiam menos nas baixas frequências, desprezando-se o seu contributo). Admite-se também que os pisos têm uma dimensão corrente (área igual  $10\text{m}^2$ ), e que os revestimentos das superfícies interiores confere um tempo de reverberação igual a 0,5 s. Com a finalidade de ultrapassar as limitações relativas à validade das previsões apresentadas na norma anterior, refira-se o trabalho que está a ser realizado pela Comissão de Normalização Europeia, designadamente pelo comité técnico 126, que pretende desenvolver um método para a modelação dos níveis sonoros no interior de compartimentos dos edifícios, provenientes de fontes de vibração externas, e no qual o ruído estrutural no interior de edifícios derivado do funcionamento do tráfego ferroviário se inclui.

No que respeita a aspetos de incomodidade à vibrações e ruído estrutural devido ao tráfego ferroviário, embora não exista legislação portuguesa específica para o efeito, refere-se que Diretiva EU 2016/ 797, de 11 de maio de 2016, relativa à interoperabilidade do sistema ferroviário na União Europeia, indica no Anexo III, que nas zonas próximas de infraestruturas ferroviárias, a exploração do sistema ferroviário não deve provocar, no solo, um nível de vibrações inadmissível para as atividades que se desenrolem nas áreas próximas da infraestrutura, quando em condições normais de operação. Neste contexto, foi publicado pelos autores em 2019, um guia de atuação metodológica para a minoração da ocorrência de potenciais situações de incomodidade ao ruído e vibração no interior de residências, derivado do funcionamento do metropolitano de Lisboa. Tendo em conta a evolução natural dos estudos técnicos, atualizações normativas, e a própria experiência dos autores no acompanhamento dos diversos estudos de impacte ambiental realizados desde 2019, apresenta-se nesta comunicação uma atualização desse guia de 2019.

## 2. ESTUDOS DE IMPACTE AMBIENTAL

Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 152-B/2017, de 11 de dezembro, que se encontra em vigor desde o início de 2018,

estabelece o regime jurídico da Avaliação de Impacte Ambiental (RJAA) dos projetos públicos e privados suscetíveis de produzirem efeitos significativos no ambiente. Esta lei transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2014/52/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de abril de 2014, que altera a Diretiva n.º 2011/92/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de dezembro de 2011, relativa à avaliação dos efeitos de determinados projetos públicos e privados no ambiente. Nos descritores vibração e ruído, a metodologia geral num processo de avaliação de impacte ambiental para uma infraestrutura ferroviária, inicia-se com a identificação das ações geradoras de impacte, análise das consequências decorrentes das referidas ações e previsão dos impactes associados nos recetores potencialmente expostos. A avaliação dos impactes associados deve ser realizada 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 recetores sensíveis dentro da área de influência do projeto, e a ultrapassagem das disposições legais ou normativas, deverão ser adotadas medidas de minimização, 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, nos pontos recetores selecionados. 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. O referido programa, também deve contemplar procedimentos a seguir caso existam reclamações. Resumidamente, pode-se dizer que um estudo de impacte ambiental para o descritor vibração (e no qual se inclui o ruído estrutural) é constituído pelas seguintes etapas:

Em fase de estudo prévio:

- Caracterização da situação de referência e prospetiva para o ano inicial do projeto;
- P prospetiva dos níveis de vibração e ruído estrutural resultantes das diferentes alternativas para o empreendimento, para as fases de construção, exploração e desativação, e levantamento de todos os recetores potencialmente expostos;
- Avaliação dos impactes para todas as fases do projeto;
- Definição genérica das medidas de minimização, para as diferentes alternativas;
- Análise comparativa das diferentes alternativas, em termos da exposição às vibrações e medidas de minimização possíveis;

Em fase de projeto de execução:

- P prospetiva dos níveis de vibração associados ao projeto, para as fases de construção, exploração e desativação para os recetores anteriormente identificados;
- Avaliação dos impactes para todas as fases do projeto (construção, exploração e desativação);
- Definição das medidas de minimização, com indicação da respetiva eficácia, em função da frequência (no mínimo em bandas de oitava), características técnicas dos materiais utilizados e indicação das estimativas do nível de vibração e ruído estrutural, com e sem adoção dessas medidas
- Definição de um programa de monitorização.

Apresentam-se de seguida as principais revisões (e ou atualizações) do guia de 2019 [3], associados às diferentes etapas do projeto.

## **2.1. Caracterização da situação de referência**

Nesta etapa do projeto é necessário caracterizar a situação de referência a partir de um levantamento do local que englobe a identificação dos principais recetores sensíveis (habitações, escolas, hospitais, espaços de recreio e lazer utilizados pelas populações como locais de recolhimento, assim como edifícios com requisitos específicos relativamente à vibração) e a identificação de fontes de vibração relevantes. Para o efeito, deve ser apresentado um relatório de medições que inclua toda a informação solicitada, e eventual replicação da mesma.

Adicionalmente, também deverá ser realizado um levantamento detalhado do edificado sobrejacente na envolvente do traçado, no que respeita ao comportamento às vibrações atendendo ao tipo de ocupação e utilização, e ao tipo de estrutura.

## **2.2. Fase de construção**

### *2.2.1. Identificação de impactes*

A identificação dos impactes esperados durante a fase de construção em termos de dano, deve assentar numa avaliação quantitativa dos valores de pico da velocidade de vibração induzidos nos edifícios mais próximos (residenciais, históricos, igrejas, instalações laboratoriais, e edifícios que demonstrem um maior potencial de dano), devido ao funcionamento da obra. Tipicamente são utilizados valores tabelados de velocidade de vibração das ações características das obras, em função da distância, publicados na norma inglesa BS 5528-2 [5], que, em alguns casos, podem ser complementados com valores resultantes de medições efetuadas em obras similares anteriores. Para esta previsão também poderão ser utilizados outros documentos, como por exemplo o documento orientativo para vibrações derivadas de obras de construção publicado pelo Departamento de Transportes da Califórnia [6].

Nesta fase será necessário enumerar todos os equipamentos e atividades associadas à obra, fazendo-se uma estimativa dos valores de velocidade de vibração nos edifícios próximos de acordo com o planeamento temporal de funcionamento na obra e tendo em conta a localização dinâmica das fontes de vibração e emissão vibrátil em cada momento da obra. Os valores obtidos devem ser confrontados com a classificação dos edifícios de acordo com a sua provável reação à excitação mecânica transmitida pelo solo. Para este efeito é recomendada a utilização da metodologia descrita no Anexo B da norma NP ISO 4866 de 2021 [7] .

No caso de utilização de explosivos, é necessário a definição das cargas máximas admissíveis, por determinação experimental, *in situ*, previamente em local sem afetação de estruturas. A carga explosiva máxima será definida, tendo em conta a posição relativa entre o local previsto para o desmonte a fogo e as estruturas/edifícios que se pretende proteger, e a não ultrapassagem dos limites de danos cosméticos em estruturas.

Adicionalmente em zonas urbanas, onde as obras de construção decorrem nas proximidades de edifícios, será necessário avaliar a incomodidade às vibrações dos respetivos habitantes, a partir de medições, e estabelecer níveis de alerta, com a consequente informação das populações. No que respeita ao ruído estrutural e em particular para obras em profundidade, poderá ser realizado um levantamento dos valores obtidos durante a monitorização de obras similares já realizadas, de modo a estabelecerem-se distâncias indicativas relativamente à frente de obra, para as quais podem começar a existir reclamações (devidas a obras em profundidade). Caso esta informação seja inexistente, poderão ser utilizados os valores limites de  $L_A = 34$  dB [16-250 Hz], para o período diurno, e de  $L_A = 26$  dB [16-250 Hz], para o período de entardecer. A obtenção do valor global é realizada pela afetação dos pesos da malha A, em cada banda de frequência de oitava, ou terço de oitava. Efetivamente, o valor indicado para o período diurno, corresponde ao valor do limiar de perceção da norma ISO 226, considerando-se a ponderação A, para as bandas de terço de oitava referidas. Será necessário estabelecer-se, por via experimental, as distâncias relativamente à frente de obra, a partir das quais estes valores não são ultrapassados, ou então utilizar informação decorrente de obras similares. Os recetores (ou conjunto de recetores representativos nessa zona assim determinada) devem ser objeto de monitorização contínua de vibração, e em caso de reclamação, realização e medições de vibração no interior de edifício (para aferir os valores limites de ruído estrutural). Admite-se que durante o período noturno, não existe atividade de construção, caso esta condição não possa ser ultrapassada, por questões de segurança, recomenda-se a monitorização contínua de vibração junto aos recetores sensíveis, de modo a possibilitar uma adequada gestão das operações indutoras de vibração e controlo da eficácia das medidas implementadas

#### 2.2.2. Medidas de minimização

Considerando o cumprimento de regras de boa-prática, como por exemplo o ajustamento dos equipamentos e da potência mecânica associada, e/ou frequência de vibração, em função da proximidade, tipo de recetor e período do dia, de modo a que sejam cumpridos os limites estabelecidos para a velocidade de vibração nos pontos recetores. Nesta fase a definição das medidas de minimização, passam essencialmente pela interrupção da progressão da obra, e/ou modificação do processo de obra no sentido de reduzir os valores de vibração. As modificações poderão passar pela escolha de equipamento diferente, redução da “velocidade” de cada equipamento/processo, ou qualquer outra alteração que reduza a velocidade de vibração no solo. Outra possibilidade é a deslocação da população para novos edifícios não sujeitos a tais estímulos, em função dos resultados obtidos na monitorização e da sensibilidade das pessoas em causa. Refira-se, também a importância do esclarecimento dos residentes afetados sobre as atividades que irão decorrer, a sua correspondente duração, e também que as amplitudes de vibração serão monitorizadas por meio de medições, garantindo que os valores estão aquém das amplitudes de vibração que podem causar danos, antes da realização da obra.

#### 2.2.3. Programa de monitorização: fase de construção

Este programa, usualmente inclui a realização de medição de vibrações (valor de pico, para avaliação de danos, e valores eficazes e/ou pico, para avaliação de incomodidade) em modo contínuo nos recetores expostos, previamente identificados, e durante o período em que os trabalhos a realizar se encontrem na sua proximidade. Simultaneamente com a realização de medições, deve existir um sistema de tratamento automático de dados e de envio de alertas no caso de as vibrações ultrapassarem os limites de alerta e/ou de alarme definidos. Sempre que se detetarem níveis de vibração que ultrapassem os limites definidos deve ser elaborado um relatório com a análise dessas situações e com a identificação das medidas já tomadas, e a tomar, para se garantir o cumprimento dos mesmos

### 2.3. Fase de exploração

#### 2.3.1. Identificação de impactes

Para a identificação dos impactes associados à fase de exploração é necessário obter estimativas do nível de vibração e de ruído estrutural no recetor, e em toda a extensão da linha, não devendo ser negligenciados eventuais efeitos de amplificação derivados de fenómenos de ressonância das lajes dos pisos dos edifícios. No que respeita à previsão da vibração e ruído estrutural, considera-se a possibilidade de

recurso de 2 métodos distintos, um método avançado de simulação numérica, para a via em túnel, e um método de modelação mais simplificado, para o caso de vias em superfície. A única exceção a este procedimento, é o caso associado a edifícios com um substancial isolamento sonoro de fachada, como estudo de gravação, ou de instalações com equipamentos sensíveis, em que deverá ser utilizado o método avançado de simulação numérica, verificando-se:

#### Via à superfície:

Possibilidade de utilização de um método de previsão simplificado, designadamente a versão de 2018 do método da *Federal Transit Administration* [2], com ajustes relativamente à velocidade dos veículos, parâmetros e características dos veículos e via, ajustes associados à propagação, e recetor (atenuação piso a piso, ressonância dos pisos). Os resultados obtidos deveram ser validados por meio de medições experimentais, tendo em conta composições ferroviárias e vias-férreas semelhantes.

#### Via em túnel:

Neste caso é recomendável, a utilização de um modelo de simulação numérica avançado, incluindo também eventuais efeitos de amplificação advindos de fenómenos de ressonância das lajes dos pisos dos edifícios. Tendo em conta a incerteza das previsões será necessário a determinação das funções de transferência experimentais, (nos trechos em túnel), com o túnel praticamente finalizado, mas imediatamente antes da execução da solução de via-férrea, de modo viabilizar qualquer ajuste que se revele necessário no dimensionamento das medidas de minimização a implementar. A validação dos resultados para o ruído estrutural deverá ser realizada a partir de medições da velocidade de vibração, utilizando fatores de conversão entre a velocidade e os níveis sonoros derivados de abordagens simplificadas. Neste caso, recomenda-se a utilização, sempre que aplicável da metodologia indicada na norma ISO/TS 14837-31 [3], cujo domínio de validade já foi referenciado na introdução, e aplicando-se ao valor (valores por banda de oitava/terço de oitava) os valores de ponderação da malha A. Alias, sempre que possível, é recomendado a discretização dos valores por bandas de frequência, e aplicação dos pesos na malha A, para cálculo do nível sonoro.

Para o cálculo das funções de transferência entre a via e o edifício, poderá ser utilizado um martelo hidráulico perfurador para excitação/indução de vibrações verticais no ponto de impacto (interpondo entre o martelo e o solo uma pequena laje resistente a estes impactos), desde que se garanta a medição sincronizada de todos os acelerómetros utilizados [9]. As medições referenciadas deveram ser realizadas por um laboratório experiente na área (medições de vibração devido à circulação de tráfego ferroviário), com recurso a

acelerómetros de grande sensibilidade, tendo em conta as amplitudes do fenómeno a caracterizar, e utilizando os procedimentos de medição constantes na ISO/TS 14837-31 [3].

#### *2.3.2. Medidas de minimização*

Para o sistema de minimização de vibração adotado deve ser indicada a eficácia esperada, preferencialmente em bandas de terço de oitava, e as estimativas do nível de vibração e do ruído estrutural (caso de vias em profundidade), com e sem a adoção da medida, em função da frequência. A eficácia do sistema modelado, poderá ser validada experimentalmente segundo os métodos descritos na norma EN 17682:2022 [8]. Uma súmula das medidas de minimização implementadas em Portugal pode ser encontrada na publicação [9].

#### *2.3.3. Programa de monitorização: fase de exploração*

Durante a fase de exploração, deveram ser realizadas ações de monitorização para o descritor vibração, devendo ser seguido o procedimento de medição estabelecido na norma ISO /TS 14837-31 [3]. O conteúdo dos relatórios de monitorização devem cumprir o estabelecido na versão atualizada e em vigor da Portaria n.º 395/2015 de 4 de novembro. Este programa, usualmente inclui a realização de medição de vibrações, espaçadas temporalmente, usualmente no ano de entrada em serviço, e depois com periodicidade quinzenal, e posteriormente de dez em dez anos, em recetores previamente identificados, ou então alvo de reclamação. Antes da entrada em funcionamento do empreendimento, deverá ser realizado um teste com as futuras composições e para os diferentes regimes de velocidade de circulação previstos, para se determinar as funções de transferência finais (incluindo a ação das medidas de minimização implementadas) e a avaliação da eficácia das medidas de minimização adotadas.

### **3 . MEDIÇÕES DE RUÍDO E VIBRAÇÃO**

As vibrações induzidas pela passagem de composições ferroviárias são normalmente aferidas pela medição de aceleração. Para o efeito recorre-se a acelerómetros colocados no centro dos pavimentos dos compartimentos, medindo-se principalmente a componente vertical, e integrando os valores obtidos para o cálculo da velocidade de vibração. 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 [3]. No entanto, devido as pequenas amplitudes associadas ao ruído estrutural, a sua medição é dificultada pelos efeitos de mascaramento de outros tipos de ruído aéreo, usualmente presentes no interior de um edifício (por exemplo, ruído de equipamentos coletivos do próprio

edifício, ruído exterior devido a outras fontes de tráfego). Muitas vezes, a avaliação do ruído estrutural, só poderá ser efetuada pelo cálculo, a partir da velocidade de vibração dos pisos e paredes do compartimento em avaliação, como indicado na ISO/TS 14837-31 [3]. Neste documento é realçado o facto de campo sonoro no interior dos compartimentos ser fortemente modal, e portanto, os valores medidos serem muito dependentes da posição do microfone. Outro aspeto a ter em consideração, é a minimização da propagação do ruído por via aérea devida à fonte, devendo-se optar por colocar os transdutores de medição nos compartimentos cujas fachadas não estejam diretamente expostas ao tráfego ferroviário, bem como cessar todas as fontes de ruído no interior do edifício que contribuam para o ruído residual. Nesta situação, a realização de medições simultâneas de ruído e vibração, apresenta-se como uma das possibilidades para a identificação do ruído específico decorrente da circulação ferroviária, principalmente em vias subterrâneas. A medição do ruído deve ser realizada na gama de medição em frequência compreendida entre 16 e 250 Hz, devendo-se registar o valor eficaz, valor máximo e o valor mínimo, de pelo menos, 5 passagens, para cada categoria de composições ferroviárias a uma velocidade que seja representativa do seu funcionamento, bem como o valor do ruído de fundo (neste caso, valor máximo), com ponderação no tempo “Slow”. Para cada passagem individual, o tempo de medição deve corresponder, pelo menos, a um decréscimo de 10 dB em relação ao nível máximo (seção 9.3.2.3 da NP ISO 1996-2:2021) [10].

Para a fase de exploração, as empresas (ou laboratórios) que realizem medições de vibração devem cumprir o disposto nas normas ISO 14837-31 [3], ISO 2631-2 [11] e ISO 5348 [12], fazendo uso de transdutores de medição (preferencialmente acelerómetros, tendo em conta as pequenas amplitudes de vibração) com sensibilidade adequada, associados a uma cadeia de medição que indique os resultados obtidos em bandas de terços de oitava (preferencialmente), valores eficazes globais, e histórico da evolução do sinal em função do tempo. As cadeias de medição e transdutores utilizados devem ser calibrados, nas gamas de medição adequadas ao ensaio a realizar. A acreditação dos ensaios segundo estas normas é um fator preferencial, caso contrário, deverá demonstrar experiência na área. Os resultados obtidos deverão ser consubstanciados num relatório de ensaio com indicação do nome do laboratório, resultados, indicação das fontes vibráteis presentes, tempo de medição (data, início e final da medição), georreferenciação das medições efetuadas, e fotografias da localização dos transdutores de medição.

Para a fase de construção, as empresas (ou laboratórios) que realizem medições de vibração devem cumprir o disposto nas normas NP 2074 [12], ISO 4866 [7] e ISO 5348 [13] e preferencialmente serem acreditadas para a realização de ensaios segundo estas normas. A cadeia de medição e os

transdutores utilizados devem ser calibrados, nas gamas de medição adequadas ao ensaio a realizar.

## 4. CRITÉRIOS DE ADMISSIBILIDADE

No que respeita à resposta humana as vibrações, as reclamações devidas à exposição a vibrações em edifícios, possam ser despoletadas pelos ocupantes dos edifícios quando a amplitude das vibrações é ligeiramente superior aos níveis de perceção. Existem muitos outros fatores (sociais, ambientais, pessoais), que podem moderar esta resposta. Para perturbações temporárias, ou de eventos transitórios, como por exemplo, as que ocorrem durante a fase de construção, a amplitude das vibrações pode ser significativamente superior ao limite da perceção, sendo bem tolerada pela população. Igualmente a norma NP ISO 2631-2: 2022 [14], indica na seção 5, sobre a resposta à vibração humana em edifícios, que “existem situações em que amplitudes significativamente elevadas podem ser toleradas, particularmente para perturbações temporárias e acontecimentos transientes. Exemplo são os projetos de construção”. Contudo, devido à necessidade de valores limites para a condução dos EIA (Estudos de Impacto Ambiental), apresentam-se de seguida, uma recomendação para os valores limite de vibrações e ruído estrutural, tendo em conta a cronologia dos eventos, ou seja, Fase de Construção e Fase de Exploração, e nesta última subdividindo-se as recomendações para Via em túnel e Via à superfície. Sempre que possível recorreu-se a valores normativos (mesmo que a referida norma apresente uma edição mais recente, por exemplo a versão de 1989 da ISO 2631-2 [15]).

### 4.1 Fase de construção

#### 4.1.2 Critério de danos

Devem ser observados os critérios de dano recomendados pela NP 2074:2015 [12], para a velocidade de vibração (valores de pico), definidos em função das frequências dominantes registadas,  $f$ , e do tipo de estrutura, de acordo com o disposto na Figura 1: A classificação das estruturas deve ser efetuada de modo conservador, devendo ser reportada à classificação previamente realizada na Fase de Construção (tendo como base a NP ISO 4866) [7].

| Tipo de estruturas | Frequência dominante, $f$ |                                |             |
|--------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------|
|                    | $f \leq 10$ Hz            | $10 \text{ Hz} < f \leq 40$ Hz | $f > 40$ Hz |
| Sensíveis          | 1,5                       | 3,0                            | 6,0         |
| Correntes          | 3,0                       | 6,0                            | 12,0        |
| Reforçadas         | 6,0                       | 12,0                           | 40,0        |

**Figura 1.** Valores limite recomendados para a velocidade de vibração (de pico), em mm/s

Existem atividades e equipamentos que requerem condições com valores muito limitados de vibração, muitas vezes inferiores aos valores de velocidade de vibração que são diretamente percebidos pelo ser humano. Exemplos deste tipo de atividades são as salas onde decorrem microcirurgias, laboratórios científicos com atividades de investigação nos domínios da ótica e microbiologia, e uma variedade de processos industriais, como por exemplo as indústrias de componentes avançados para circuitos integrados. Quando não existem limites para a velocidade de vibração admissível por parte dos locais onde estes equipamentos estão instalados, é aconselhável investigar detalhadamente as condições reais e os requisitos exigíveis. Podem ser realizados ensaios preliminares e respetiva monitorização de modo a estabelecer-se um procedimento adequado para o trabalho. Alternativamente, os critérios de vibração podem ser estabelecidos por meio de discussão com o fabricante, fornecedor ou operador. Quando não existe informação específica, é possível fazer referência a informações de outras fontes, como experiência anterior ou informações publicadas, como por exemplo o Quadro B1 da BS 5228-2: 2009+ A1 2014.[5].

#### 4.1.3 Critério Incomodidade

##### Máquinas e Atividades sem componentes impulsivas.

No caso deste tipo de equipamentos, ou atividades, a percepção de vibrações no interior dos edifícios deve ser avaliada em termos de valor eficaz médio da velocidade de vibração. Para o efeito, recomendam-se os valores de referência indicados na Figura 2, em que a vibração possa ser considerada “Perceptível, suportável para pequena duração”, e apenas para período do dia (8h-20h). No período complementar, a geração de vibrações deve estar condicionada, salvo situações de força maior e de carácter excepcional, à implementação de medidas de proteção/gestão de ações e/ou de proteção de pessoas e bens, que minimizem a exposição às vibrações. Sabendo-se que nos edifícios residenciais os indivíduos apresentam uma grande variabilidade de tolerância à vibração, dependente de fatores não físicos, recomenda-se como valor limite, os valores de velocidade de vibração mais elevados (ou seja, 0,28 mm/s). Para a fase de construção, optou-se por selecionar valores de referência globais, e não em função da frequência, uma vez que a maior parte das estimativas de vibração associadas as fontes vibráteis usualmente utilizada, não apresentam valores discriminados em função da frequência.

| 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 |

**Figura 2.** Valores limite para a percepção da vibração continuada no interior de edifícios

##### Máquinas e Atividades com componentes impulsivas.

No caso deste tipo de equipamentos ou atividades, tendo em conta o carácter impulsivo das ações vibratórias presentes, preconiza-se que a análise a realizar esteja diretamente associada à avaliação da vibração em termos de valores de pico. Para o efeito, deverão ser observados os valores contantes no Quadro III (adaptado da tabela B1 da BS 5228-2:2009+A1:2014) [5], para a gama espectral situada entre 1Hz e 80 Hz, respetivamente:

| v <sub>pico</sub> (mm/s)        | Sensação                                                  |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| v <sub>pico</sub> ≤ 0,14        | Nula                                                      |
| 0,14 < v <sub>pico</sub> ≤ 0,30 | Perceptível, suportável para pequena duração              |
| 0,3 < v <sub>pico</sub> ≤ 1     | Nítida, incómoda, podendo afetar as condições de trabalho |
| 1 < v <sub>pico</sub> ≤ 10      | Suportável para pequena duração                           |
| 10 < v <sub>pico</sub>          | Não tolerável                                             |

**Figura 3.** Valores limite para a percepção da vibração no interior de edifícios

Considerando a grande variabilidade de tolerância à vibração em edifícios e analogamente ao caso das máquinas e atividades sem componentes impulsivas, recomenda-se como valor limite, os valores de velocidade de vibração mais elevados (ou seja, 0,3 mm/s).

Caso exista a necessidade de ultrapassagem destes valores (por motivos de segurança da obra, por exemplo), deverá esta situação ser complementada com a indicação do estabelecimento de um programa adequado de comunicação com os habitantes. Este programa poderá incluir anúncios e/ou sinais de alerta com informação sobre os períodos de ocorrência de valores mais elevados (mas sempre inferiores aos critérios de dano nas edificações)

No caso da existência de explosões durante a fase de construção, é recomendado a utilização dos valores limites contantes na norma ISO 2631-2 (edição de 1989) [14], onde são publicados os valores admissíveis no caso de explosões, em função da frequência, e para os distintos tipos de edifícios (residenciais, escritórios, industriais), tendo em conta o número de explosões a efetuar. A opção da utilização desta versão desatualizada (a versão mais recente não apresenta valores limites) está relacionada com o histórico da sua utilização no passado em Portugal, principalmente no sector das minas.

#### 4.1.4 - Ruído estrutural

Como foi referido em 2.2.1, e em particular para obras em profundidade, poderá ser realizado um levantamento dos valores obtidos durante a monitorização de obras similares já realizadas, de modo a estabelecer-se distâncias indicativas relativamente à frente de obra e para as quais começaram a existir reclamações. Caso esta informação seja inexistente, poderão ser utilizados os valores de referência  $L_A = 34$  dB [16-250 Hz], para o período diurno, e de  $L_A = 27$  dB [16-250 Hz], para o período de entardecer

## 4.2 Fase de exploração

### 4.2.1 Vibração

Para a avaliação da incomodidade induzida por vibrações continuadas ou de natureza intermitente no interior das edificações, recomendam-se, no período de exploração da infraestrutura, os seguintes critérios:

1. Valor eficaz médio 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, para o período diurno e noturno, utilizando a curva combinada (caso em que as posições dos ocupantes podem variar no edifício)

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 20h-08h), e entre 0,2 e 0,4 m/s, para frequências centrais entre os 8 e 80 Hz (08-20h).

Tendo em conta que a curva de exposição às vibrações utilizada, é a curva combinada apresentada na norma, e corresponde, para as frequências de interesse (8 – 80 Hz), a valores de velocidade de vibração na direção horizontal, como também na vertical, não se faz, para este descritor, a distinção entre vias à superfície e vias em túnel, até que um estudo sobre a incomodidade à vibração, específico tendo em conta o comportamento das construções típicas portuguesas, possa aligeirar, os valores de velocidade de vibração par as vias em superfície.

### 4.2.2 Ruído estrutural

Para efeitos da previsão do ruído estrutural que se possa estabelecer em compartimentos de edifícios expostos (nomeadamente habitações), tendo em consideração a especificidade da situação em análise (ruído e vibrações induzidas pela circulação de tráfego ferroviário), recomenda-se, para cada passagem, para o valor eficaz médio da velocidade de vibração, integrada nas bandas de frequência central situadas entre 16 Hz e 250 Hz, o seguinte:

#### Via em túnel

Tendo a conta que a área do ruído de baixa frequência, apresenta uma complexa diversidade humana, relativa ao valores limites, bem como a experiencia dos autores na análise de reclamações devido a ruído estrutural, com a realização simultânea de medições de ruído e velocidade de vibração, optou-se pela utilização dos valores de percepção, em função da frequência, correspondente a 10% dos indivíduos mais sensíveis [16]. Assim, em termos de nível sonoro  $L_A$  (com afetação dos pesos da malha A, em cada banda de frequência de terço de oitava compreendida entre os 16 Hz e 250 Hz), recomenda-se a utilização do valor  $L_A = 26$  dB [16-250 Hz] dB, correspondendo em média a um valor de velocidade de vibração de 0,03 mm/s.

#### Via a superfície

Tendo em conta que a diferença entre os valores limites para a velocidade de vibração entre as direções vertical e horizontal, corresponde sensivelmente, em termos de nível sonoro  $L_A$  (com afetação dos pesos da malha A, em cada banda de frequência de terço de oitava compreendida entre os 16 Hz e 250 Hz) a 10dB, o valor limite anterior, é acrescido do mesmo valor correspondente. Para esta situação, recomenda-se o valor  $L_A = 36$  dB [16-250 Hz] dB.

## 5. CONCLUSÕES

Espera-se que a aplicação desta atualização do guia de atuação metodológica para a minoração da ocorrência de potenciais situações de incomodidade à vibração e ruído estrutural no interior das residências, possa contribuir para uma harmonização de procedimentos de atuação, no âmbito dos estudos de impacte ambiental.

No âmbito de estudos de avaliação de incomodidade, consideram os autores importante o estabelecimento de questionários de referência, para aferição da incomodidade induzida pelas vibrações e ruído estrutural (quer para a fase de construção como exploração), categorizado por tipologia do edificado, principalmente nos casos em que existem reclamações. O tratamento destes dados, no âmbito nacional permitiria o reajuste dos critérios de admissibilidade.

## REFERENCIAS

- [1] ISO 14837-1:2015, “Mechanical vibration- Ground-borne noise and vibration arising from rail systems: Part 1: General guidance, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2015.
- [2] Vople, and al. “Transit Noise and Vibration Impact Assessment.”, FTA Report No. 0123, 2018.



- [3] ISO 14837-1:2017, “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”, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.
- [4] PORTUGAL, Leis, Decretos-lei, etc., Regime jurídico da Avaliação de Impacte Ambiental, Decreto-Lei n.º 152-B/2017, de 11 de dezembro.
- [5] BS 5228-2:2009+A1:2014, Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites – Part 2: Vibration, British Standards, 2014
- [6] Andrews J.; Buehle, D.; Harjodh, G., “Transportation and Construction Vibration Guidance Manual, Report CT-HWANP-RT13-069.25.3, California Department of Transportation, 2013.
- [7] NP ISO 4866:2021, “Vibrações mecânicas e choques. Montagem mecânica de acelerómetros, Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2021
- [8] EN 17682:2022, “Railway Applications - Infrastructure - Resilient Element For Floating Slab System, European Committee for Standardization, Brussels, 2022.
- [9] Antunes, Sónia, Patrício, J., “Metodologia para minoração da ocorrência de potenciais situações de incomodidade ao ruído e vibração no interior de residências decorrentes da circulação do Metro”, 2º Simpósio de Acústica e Vibrações, Coimbra, Portugal, 24 de maio, 2019.
- [10] NP ISO 1996-2:2021, “Acústica; Descrição, medição e avaliação do ruído ambiente Parte 2: Determinação dos níveis de pressão sonora, Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2021.
- [11] 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), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.
- [12] NP 2074:2015, “Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas”, Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2015.
- [13] ISO 5348:2021 Mechanical vibration and shock-mechanical mounting of accelerometers, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2021.
- [14] NP ISO 2631-2:2022, “Vibrações mecânicas e choque Avaliação da exposição do corpo inteiro a vibrações Parte 2: Vibrações em edifícios (1 Hz a 80 Hz)”, Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2022.
- [15] ISO 2631-2:1989, “ Evaluation Of Human Exposure To Whole-Body Vibration - Part 2: Continuous And Shock-Induced Vibrations In Buildings (1 To 80 Hz)”, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [16] Leventhall, G. , Pelmear, P., Benton, S., “A Review of Published Research on Low-Frequency Noise and its Effects”, Report for Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra), London, 2003.