

## TRÁFEGO FERROVIÁRIO

### VALORES LIMITE PARA VIBRAÇÕES DEVIDAS A METRO URBANO OU VEÍCULOS SIMILARES

#### 0. PREÂMBULO

Após a libertação súbita de qualquer forma de energia no terreno, desencadeia-se a propagação (em todas as direções) de ondas volumétricas e superficiais que atingem pessoas e estruturas próximas, com amplitudes de vibração que dependem de vários fatores, nomeadamente: a quantidade de energia libertada no fenómeno que as ocasionou, a distância entre a origem e o ponto onde se registam os seus efeitos, as características dinâmicas das construções e dos seus componentes mais frágeis, e as propriedades transmissoras ou dissipadoras dos meios de propagação (terrenos envolvidos).

Os problemas ocasionados por estes fenómenos podem ser de dois tipos: os danos diversos nos edifícios ou nas estruturas situadas na vizinhança dos locais onde ocorrem solicitações dinâmicas, e as perturbações causadas nas pessoas que se encontram nas proximidades (incluindo as que ocupam esses mesmos edifícios).

Tendo em conta as exigências requeridas para o conforto nos edifícios com utilização sensível, habitação, escolas e hospitais, assim como na ausência de disposições regulamentares aplicáveis, publica-se, no presente documento, os valores limite para as vibrações induzidas nos edifícios em causa, definidos pelo LNEC, tanto pela circulação ferroviária de composições do Metro, ou de veículos similares (Elétricos sobre carris), como pela construção das respetivas infraestruturas, visando criar ou manter as condições de conforto adequadas às funcionalidades associadas a esses edifícios, tanto do ponto de vista da perceção das vibrações como do ruído estrutural derivado, servindo assim de referência para a avaliação de impactes e de conformidade, nas fases de construção e exploração (Estudos de Impacte Ambiental).

#### 1. INTRODUÇÃO

Com a melhoria da qualidade da edificação, a que também correspondeu a verificação de novos critérios e exigências de isolamento sonoro relativamente a fontes exteriores (e também interiores), outros aspetos começaram a ter uma maior importância na definição do conforto dentro dos edifícios (nomeadamente habitações), situando-se neste âmbito as vibrações e os efeitos delas derivados

Apesar de não ser diretamente aplicável ao objeto em questão (linhas de Metro e veículos similares), a Diretiva EU 2016/797, do Parlamento Europeu e do Conselho, 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 e construção do sistema ferroviário não deve provocar níveis de vibração inadmissível para as atividades que se desenrolem nas áreas próximas da infraestrutura, em condições normais.

#### 2. CRITÉRIOS

Os critérios relacionados com os valores limite de vibrações são expostos seguidamente, tendo em conta a cronologia dos eventos, ou seja, Fase de Construção e Fase de Exploração, e nesta última para Via em túnel e Via à superfície,

##### 2.1 Fase de Construção

###### Critério de Danos:

Devem ser observados os critérios de dano recomendados pela NP 2074:2015, para a velocidade de vibração (de pico), definidos em função das frequências dominantes registadas,  $f$ , e do tipo de estrutura, de acordo com o disposto no Quadro I:

# Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Quadro I - Valores limite recomendados para a velocidade de vibração (de pico), em mm/s

Tipo de estruturas	Frequência dominante, f		
	f ≤ 10 Hz	10 Hz < f ≤ 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

A classificação das estruturas deve ser efetuada de modo conservador, mediante a análise de diversos fatores, designadamente: o estado de conservação (por exemplo, considerando sensíveis as edificações antigas ou com revestimentos cerâmicos colados com argamassa), a respetiva esbelteza (por exemplo, considerando chaminés e torres como sensíveis) e o seu valor patrimonial (por exemplo, considerando sensíveis os monumentos ou as infraestruturas de transporte).

Devem ser consideradas como correntes, as estruturas mais comuns, como por exemplo, edifícios de habitação ou escritórios, que não sejam demasiadamente esbeltos, isto é, aqueles cuja relação altura vs. menor dimensão da base seja maior do que 2. Devem também ser consideradas como estruturas reforçadas, os edifícios recentes em betão armado ou com elementos estruturais de natureza metálica e, dentro destes, os que tenham uma finalidade puramente industrial.

**NOTA 1** - Nos edifícios sensíveis, os valores limite terão de ser definidos em função da respetiva sensibilidade (por exemplo, existência de equipamentos sensíveis em hospitais e laboratórios).

## **Critério de Perceção:**

### Máquinas e Atividades sem componentes impulsivas.

No caso deste tipo de equipamentos, ou atividades a perceção 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 no Quadro II, 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.

Quadro II - Valores limite 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

**NOTA 2** - Estes valores são válidos para a componente vertical ou horizontal da velocidade, caso esta última seja a mais significativa. O valor inferior apresentado (0,11 mm/s) é considerado como o limiar de perceção.

### Máquinas e Atividades com componentes impulsivas.

No caso deste tipo de equipamentos ou atividades, a perceção de vibrações no interior dos edifícios na fase de construção, dado 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), para a gama espectral situada entre 1Hz e 80 Hz, respetivamente:

Quadro III - Valores limite para a perceção da vibração no interior de edifícios

$V_{pico}$ (mm/s)	Sensação
$V_{pico} \leq 0,14$	Nula
$0,14 < V_{pico} \leq 0,30$	Percetível, suportável para pequena duração
$0,3 < V_{pico} \leq 1$	Nítida, incómoda, podendo afetar as condições de trabalho
$1 < V_{pico} \leq 10$	Suportável para pequena duração
$10 < V_{pico}$	Não tolerável

**NOTA 3** – Estes valores são válidos para período do dia (8h-20h). Sugere-se que o enquadramento limite seja o definido para “Percetível, suportável para pequena duração”, 0,30 mm/s 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.

## 2.2 Fase de Exploração

### Via em Túnel – Critério de Perceção

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. 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), limite este que aumenta para 0,4 mm/s a 2 Hz, e 0,8 mm/s a 1 Hz. Para o período diurno (08-20h), o valor da velocidade eficaz,  $v_{ef} < 0,20$  mm/s, assumido para bandas de frequência central entre 8 e 80 Hz, aumenta para os 0,56 mm/s para 2 Hz, e 1,12 mm/s para 1 Hz.

**NOTA 4** - Estes valores são válidos para a componente vertical ou horizontal da velocidade, caso esta última seja a mais significativa.

### Via em Túnel – Critério de Ruído-Radiado

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:

- 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;

## Laboratório Nacional de Engenharia Civil

- 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.

**NOTA 5** - É aceitável assumir-se o valor médio de 0,025 mm/s, o qual é representativo da maior parte das situações.

**NOTA 6** - Como opção alternativa, tendo a conta que o ruído de baixa frequência é algo complexo do ponto de vista da percepção humana, pode considerar-se, como valor limite para o ruído, o nível de 27 dB(A), calculado para as bandas de frequência de terço de oitava compreendidas entre os 16 Hz e 250 Hz), ao qual corresponde aproximadamente a resposta de 10% dos indivíduos mais sensíveis [16]

### Via à Superfície – Critério de Percepção

Para a percepção de vibrações no interior dos edifícios, em termos de valor eficaz da velocidade de vibração, recomendam-se os valores de referência indicados no Quadro IV, em que a vibração possa ser considerada Perceptível, durante o período do dia de exploração da infraestrutura (08-20h), e Nula durante o período complementar de exploração.

Quadro IV - Valores limite para a percepção 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

Assim como, a 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 20h-08h), limite este que aumenta para 0,4 mm/s a 2 Hz, e 0,8 mm/s a 1 Hz. Para o período diurno (08-20h), o valor da velocidade eficaz,  $vef < 0,20$  mm/s, assumido para bandas de frequência central entre 8 e 80 Hz, aumenta para os 0,56 mm/s para 2 Hz, e 1,12 mm/s para 1 Hz.

**NOTA 7** - Estes valores são válidos para a componente vertical da velocidade de vibração; ou horizontal, caso esta última seja a mais significativa. O valor inferior apresentado (0,11 mm/s) é considerado como o limiar de percepção. Apesar de o critério preconizado para o período da noite (mais restritivo) englobar a verificação do critério do período diurno, em termos de medidas corretivas, pode haver casos de gestão de operações em que tal diferenciação possa ser aplicável.

### Via à Superfície – Critério de Ruído-Radiado

Para efeitos da previsão do ruído estrutural que se possa estabelecer em compartimentos de habitações expostas e/ou outros edifícios de uso sensível, tendo em consideração a especificidade da situação em análise (ruído e vibrações induzidas pela circulação de tráfego ferroviário), recomenda-se para o valor eficaz da velocidade de vibração do elemento de compartimentação horizontal (pavimento), componente vertical ou horizontal se mais relevante, integrada nas bandas de frequência central situadas entre 16 Hz e 250 Hz, seja inferior a 0,05 mm/s.

# Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**NOTA 8** - 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  $L_{Aeq}$  (com afetação dos pesos da malha A, em cada banda de frequências de terços de oitava, compreendida entre os 16 Hz e 250 Hz) a 9 - 10 dB, recomenda-se o valor de  $L_{Aeq} = 36$  dB [16-250 Hz], para o ruído estrutural estabelecido no interior. Este critério é mais permissivo do que o preconizado para as vias em túnel, porquanto há, aquando de cada passagem, um efeito de mascaramento por ruído aéreo proveniente diretamente da infraestrutura.

### 3. AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE

Para efeitos de avaliação de conformidade dos vários critérios expostos, deve ser determinado o valor médio correspondente às 10 passagens mais desfavoráveis dos veículos em causa, em ambos os sentidos. 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).

### REFERÊNCIAS

- ANDREWS, J.; BUEHLE, D.; HARJODH, G., 2013 – **Transportation and Construction Vibration Guidance Manual**, Report CT-HWANP-RT13-069.25.3, California Department of Transportation, 2013.
- BSI, 2014 - Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites. Part 2, Vibration. UK, BS 5228-2:2009+A1:2014.
- CARRILLO, A.; PATRICIO, J.; SCHIAPPA, F., 2018 – **Criteria for vibration levels from Metro Lines to comply with acceptable noise inside residential buildings**, in Acta Acustica united with Acustica Vol. 105, Nº 1, January/February 2019, pp 152-161..
- ELIAS, P.; VILLOT, M., 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, 2018 – **Transit Noise and Vibration Impact Assessment**. Federal Transit Administration United States Department of Transportation, September 2018.
- IPQ, 2007 – **Vibrações mecânicas e choques. Avaliação da exposição do corpo inteiro a vibrações. Parte 1. Requisitos gerais**. Caparica. NP ISO 2631-1:2007.
- IPQ, 2015 – **Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas**. Caparica. NP 2074:2015.
- IPQ, 2021 – **Vibrações mecânicas e choques. Vibrações em estruturas fixas. Guia para a medição de vibrações e a avaliação do seu efeito em estruturas**. Caparica 2074
- a. NP ISO 4866:2021.
- ISO, 2003a – **Acoustics: Normal equal-loudness-level contours**. Geneva, Switzerland, ISO 226: 2003.
- ISO, 2003b – **Evaluation of human exposure to whole-body vibration: Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 Hz to 80 Hz)**. Geneva, Switzerland, ISO 2631-2: 2003.
- OLIVA, D.; HONGISTO, V.; KERÄNEN, J.; KOSKINEN, V., 2011 – **Measurement of low frequency noise in rooms**. Finnish Institute of Occupational Health, Helsinki, Finland, 2011.
- PATRÍCIO, J.; SANTOS, A. (coords), 2000 – **Ambiente em edifícios urbanos**. Lisboa. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. ISBN:9724918513.
- PATRÍCIO, J.; SCHIAPPA DE AZEVEDO, F., 2015 – **Crítérios para limitação de vibrações, em edifícios provenientes de vias férreas**, in Proceedings of Euro-Elecs 2015, 21-23 de julho, Guimarães, Portugal.
- RANTATALO, M.; XIN, T., 2013 – **Review of countermeasures and regulations for railway induced ground vibrations in tunnels**. Lulea University of Technology, 2013.
- SCHIAPPA DE AZEVEDO, F.; DOMINGUES, O.; SECIO, F.; VALÉRIO, P., 2004 – **Future tunnel railway underneath a city transfer function estimate and ambient vibration prediction**, in Proceedings of Forum ACUSTICUM, 7-12 de setembro, Krakow, Polónia.
- SIMMONS, C., 1997 – **Measurement of Sound Pressure Levels at Low Frequencies in Rooms. Comparison of Available Methods and Standards with Respect to Microphone Positions**. SP

REPORT 1997:27.SP, 1997.

- VILLOT, M.; BAILHACHE, S.; GUIGOU, C.; JEAN, P., 2015 – **Prediction of Railway Induced Vibration and Ground Borne Noise Exposure in Building and Associated Annoyance**, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, January, volume 126, 2015, 289-296.
- VILLOT, M.; PHILIPPE, J.; GRAU, L., 2017 – **Predicting ground-borne noise from vibration of radiating**
- WADDINGTON, D.; WOODCOCK, J.; SMITH, M.; JANSSEN, S.; WAYE, K., 2015 – **CargoVibes: Human response to vibration due to freight rail traffic**, in International Journal of Rail Transportation, Volume 3 (4), (2015), pp. 233-248.
- WOODCOCK, J.; PERIS, E.; MOORHOUSE, A.; Waddington, D., 2014 – **Guidance document for the evaluation of railway vibration**. Deliverable D1.5. Project CargoVibes. European Commission.