

CONDICIONAMENTO DE VIBRAÇÕES RESULTANTES DA PASSAGEM DE COMPOSIÇÕES DO METROPOLITANO

P. Martins da Silva¹; Lara Vasconcelos²

^{1,2} Engenharia de Acústica e Ambiente, Lda.

geral@acusticaeambiente.com

Resumo

A ocorrência de vibrações em edifícios pode ter origens diversas, sendo normalmente provenientes do funcionamento de equipamentos electromecânicos ou estruturas de transportes localizadas nas proximidades. Estas vibrações propagam-se pelo solo e pelos edifícios.

Entre estas estruturas de transportes assumem relevância particular as de transportes ferroviários subterrâneos.

Apresenta-se estudo realizado para o Metropolitano de Lisboa, com dimensionamento de disposições de redução das amplitudes dos campos de vibrações propagadas, dimensionamento este realizado com o apoio de técnicas apropriadas de modelação digital.

Palavras-chave: Vibrações, Ruído, Soluções.

Abstract

The vibrations in buildings may have several and different sources. Normally, they are originated by electromechanical equipments or by transportation infrastructures, located nearby. These vibrations propagating along the terrain may cause the vibration of buildings.

Among all the transportation infrastructures systems one of the most relevant in this respect are the Cities Underground.

This paper presents a study for the Metropolitano of Lisboa (Lisbon Underground). The study includes the calculation and definition of adequate solutions to minimize the amplitude of the established vibration fields, using techniques of digital modelling.

Keywords: Vibration, Noise, Solutions.

1 Introdução

A ocorrência de vibrações em edifícios pode ter origens diversas, sendo normalmente provenientes do funcionamento de equipamentos electromecânicos ou estruturas de transportes localizadas nas proximidades. Estas vibrações propagam-se pelo solo e pelos edifícios.

Entre estas estruturas assumem relevância particular as de transportes ferroviários subterrâneos. O desenvolvimento de uma rede de transporte ferroviário subterrâneo em zona urbana determina a ocorrência de *situações de conflito* diversas, por vezes muito delicadas quando se trate de linhas passando na proximidade de edifícios que, pelas suas características ou das actividades neles desenvolvidas, implicam a necessidade de conseguir atenuações elevadas para as vibrações em causa.

A percepção, por parte dos ocupantes dos edifícios solicitados por vibrações, ocorre, normalmente, em relação ao ruído radiado pelos elementos de construção, dado que o ouvido apresenta sensibilidade mais elevada que os terminais nervosos que proporcionam a percepção táctil das vibrações.

Esta percepção de ruído, ou em casos mais graves de vibrações, pode induzir receios relativamente a aspectos ligados à estabilidade estrutural, se bem que as vibrações tornadas perceptíveis apenas por via auditiva apresentem intensidades muito inferiores aos limiares de risco para as construções.

Sublinhe-se que o conceito de incomodidade é relativamente vago, traduzindo essencialmente uma posição de rejeição em resposta a consequências diversas determinadas pelo factor de incomodidade, de que podem apontar-se, a título exemplificativo, as seguintes:

- Alterações do estado de saúde, o que, no domínio em referência, se coloca quase exclusivamente em relação a trabalhadores utilizando ferramentas vibratórias.
- Afecção da eficácia ou do rendimento no desempenho de actividades laborais.
- Afecção sensível da situação de bem-estar, particularmente na habitação, em locais de lazer ou repouso, seja pelas vibrações apercebidas como tal ou em consequência do ruído a que poderão dar origem, como se sublinhou.

No que respeita o condicionamento de vibrações, apenas duas tipologias de soluções são normalmente consideradas:

1. Condicionamento da fonte;
2. Condicionamento do receptor.

O primeiro tipo de acções traduz-se na introdução de elementos resilientes na base da fonte de vibrações a isolar, no sentido de reduzir as intensidades das vibrações transmitidas à estrutura de suporte (edifício ou solo); são encontradas aplicações desta tipologia no condicionamento normal de equipamentos a instalar nos edifícios e nas vias de transporte ferroviário.

A segunda tipologia de acções traduz-se na introdução de elementos resilientes na estrutura dos receptores, isolando-os do meio envolvente; aplicações típicas desta solução são normalmente encontradas na aeronáutica, onde se isolam componentes eléctricos e electrónicos, no sentido de não serem influenciados pelas vibrações do corpo dos aviões, ou mais recentemente, em edifícios, onde se isola o edifício do terreno envolvente (este tipo de medida é também conhecido por B.B.I., do ing. “Base Building Isolation”).

Apresenta-se estudo visando o condicionamento de ferrovia subterrânea, como exemplo típico de solução considerando o condicionamento da fonte.

No que respeita às linhas de circulação do Metropolitano, há que ter presente que este sistema de circulação baseia-se na sujeição passiva do veículo a uma trajectória realizada mediante o par rodado-carril. Esta sujeição, relativamente frouxa no plano transversal (dado o jogo necessário entre os rebordos dos rodados e os carris para manter a estabilidade do sistema), implica, pelo contrário, uma ligação firme no plano vertical, onde o contacto rodado-carril deve ser mantido em permanência.

Esse contacto está na origem de esforços que constituem a fonte de vibrações transmitidas ao meio onde se apoia o carril: os rodados e os carris apresentam irregularidades que dão origem a esforços, determinando vibrações de componentes particularmente intensas até cerca de 250 Hz, para valores correntes da velocidade.

Para que se limitem os ruídos inerentes ao contacto rodado-carril, nas condições de sujeição referidas, a infra-estrutura deve ser dotada de elasticidade, que vai estabelecer um efeito de filtragem na transmissão dos estímulos ao solo; na instalação comum nas linhas do metropolitano (Sistema STEDEF) são integrados correntemente dois níveis de “cortes” por elementos resilientes.

Em termos de percepção, por parte dos ocupantes de edifícios a cujas estruturas ocorra transmissão de vibrações, esta verifica-se, normalmente, primeiro em relação ao ruído resultante da radiação por parte dos elementos excitados do que, propriamente, em relação às vibrações, dado que o ouvido constitui um captor muito mais sensível que os terminais nervosos que tornam possível uma percepção táctil das vibrações. Há que sublinhar que a ocupação muito densa do espaço urbano coloca, correntemente, em vizinhança muito próxima linhas de circulação ferroviária e edifícios, nalguns casos destinados a utilizações muito sensíveis ao tipo de acções em causa.

A análise dos sistemas de circulação ferroviária torna aparente alguns factores importantes para a compreensão das características das vibrações que podem ocorrer em estruturas vizinhas:

- Valor elevado das massas em jogo, sendo portanto elevadas as potências armazenadas que serão transmitidas à infra-estrutura, logo com elevada capacidade para determinar afectação das condições ambientais;
- Carácter relativamente determinístico, resultante do facto de os rodados reproduzirem ciclicamente as excitações devidas a defeitos próprios, para além de que as unidades em circulação se compõem de carruagens, o que determina uma “repetição” da aplicação das estimulações, facilitando, em consequência, a sua percepção (individualizada) relativamente ao ruído de fundo;
- Carácter, em regra marcadamente heterogéneo e não linear, dos meios em que ocorre a transmissão, implicando uma dificuldade grande em modelar o comportamento respectivo. A acrescer o facto, de que, para as situações que se colocam com maior gravidade, os “percursos” no meio entre as envolventes dos túneis e as fundações dos edifícios são relativamente pequenos.

A origem das vibrações devidas à circulação ferroviária localiza-se, como referido, no contacto rodado/carril, todavia, para a quase totalidade dos problemas nesta área, a “solução” vai encontrar-se na via ou no espaço onde se propaga o estímulo até ao local onde a acção nociva se faz sentir. Com efeito, a complexidade da estrutura do material rolante leva a que as intervenções nele sejam difíceis e de uma eficácia não estimável com fiabilidade.

A origem de vibrações reside, como se referiu, nas irregularidades, mesmo que muito reduzidas, no contacto dos rodados com o carril, vibrações que se transmitem à estruturas dos túneis, propagando-se até aos edifícios. Sendo praticamente inviável actuar sobre o modo como a transmissão ocorre no solo e dado que uma qualquer actuação teria consequências relativamente diminutas no que respeita à atenuação determinada (percursos curtos), o condicionamento deverá diminuir a potência dos estímulos originados no contacto dos rodados com os carris e incrementar o amortecimento na

propagação entre os carris e as estruturas dos túneis; este último aspecto é o considerado no presente estudo.

O dimensionamento das disposições de condicionamento implica o recurso a procedimentos de análise prospectiva de desempenhos, apoiados em técnicas adequadas de modelação digital.

2 Modelação

2.1 Conformação geral

A definição das medidas de condicionamento a estabelecer assenta, como se referiu, em processos de modelação da função de transferência entre travessas de suporte dos carris e fundações dos edifícios.

Toma-se, como estímulo aplicado nas travessas, um estado de vibração cuja intensidade se fixa a partir dos resultados de diversas medições realizadas e que, pese embora a dispersão de valores, se define como segue, o que corresponde à assunção de uma “posição de segurança”, face ao conjunto dos valores disponíveis:

a) $v_{ef} = 0,001$ m/s – gama de frequências de 50 a 100 Hz

v_{ef} – valor eficaz da velocidade de vibração

No que respeita à caracterização do processo no elemento final (fundações dos edifícios), assume-se que a intensidade dos campos sonoros (particulares) estabelecidos aquando da passagem de uma composição isolada deve satisfazer ao seguinte:

b) $L_A \leq 40$ dB(A)

Na transferência entre os estados a) e b) consideram-se as quatro áreas referidas a seguir:

- i) Os túneis são considerados como corpos rígidos admitindo-se que entre as travessas de apoio dos carris e as envolventes dos túneis é possível estabelecer dois níveis de atenuação, mediante a integração de “cortes elásticos”:
 - Palmilhas resilientes sob as travessas biblocos
 - Placas de material resiliente entre a soleira do túnel e o betão de enchimento

A modelação da propagação entre a zona estabelecida para aplicação do estímulo (travessas dos carris como se referiu) e a envolvente do túnel foi tratada como uma rede (poderá referenciar-se, como analogia, uma rede eléctrica) em que as impedâncias inseridas em série compreendiam elementos resilientes onde ocorrem dissipações de energia (logo atenuações das intensidades dos estímulos) e as impedâncias em paralelo correspondem a elementos que se considera funcionam apenas através da sua inércia;

- ii) O terreno onde ocorre a propagação dos estímulos é considerado homogéneo e sem perdas, admitindo-se que esta propagação se verifica por ondas planas até distâncias não superiores a cerca do triplo do diâmetro médio do túnel e por ondas cilíndricas para distâncias superiores àquele valor;
- iii) Admite-se que a propagação dos estímulos mecânicos ao longo das estruturas dos edifícios se verifica sem perdas;

- iv) Admite-se que a propagação sonora (no interior dos espaços que integram os edifícios) dos sinais radiados, em consequência dos estados de vibração que são determinados nos elementos de construção, ocorre por ondas planas.

A aceitação das hipóteses referidas em (iii) e (iv) permite transformar a condição em b) referida atrás na seguinte:

c) $v_{ef} \leq 3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

Assim, o condicionamento a introduzir deverá ser dimensionado de modo que a conjugação da atenuação propiciada na transmissão dos estímulos mecânicos entre as travessas onde assentam os carris e as envolventes dos túneis, conjugada com a atenuação na propagação entre a envolvente do túnel e as fundações dos edifícios determine que os estados de vibração estabelecidos nestas fundações satisfaçam à condição indicada em c). Pelo que se referiu atrás, assume-se que o primeiro tipo de atenuação corresponde a fenómenos de dissipação de energia e o segundo a uma dispersão espacial de energia radiada pela envolvente do túnel.

2.2 Cálculos

2.2.1 Dados de base

As características dos estímulos vibratórios que resultam da passagem de composições do Metropolitano exibem, como se referiu atrás, características que indiciam periodicidades, o que se traduzirá em concentrações da densidade espectral que, obviamente, facultam a identificação do ruído correspondente (para além de se tratar de emissões de duração reduzida), o que o torna particularmente conspícuo e, portanto, contribui para a incomodidade que poderá determinar no percipiente. Há a assinalar, também que o ruído resultante da passagem de veículos em túneis pode dar lugar a “associações” com receios de eventuais consequências nocivas de ordem estrutural, o que constitui outro factor possível de agravamento de incomodidade.

Procedeu-se, como forma de análise comprovativa, ao registo e análise dos estímulos devidos a passagens de composições em linha do Metropolitano. A captação dos sinais teve lugar em cave, sensivelmente à cota das linhas, sendo de cerca de 10 m a distância entre a envolvente do túnel e a envolvente do edifício (onde foi colocado o transdutor da cadeia de medição). Procedeu-se a medições em período nocturno

Os resultados das medições evidenciam a concentração espectral indicativa da periodicidade, e os valores obtidos, na gama em que onde se apresentam como mais elevados, são de cerca de $4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

As vibrações devidas à passagem de composições do Metropolitano ocorrem, obviamente, em “sobreposição” a um campo residual com origens diversas, em que domina o tráfego rodoviário, na situação em apreço.

Pese embora o facto de os estímulos com origem nas passagens de composições do Metropolitano terem características de duração e de composição espectral que as torna particularmente sensíveis, e, por consequência, bastante conspícuas, entendeu-se de utilidade proceder à caracterização do campo residual de vibrações em pontos ao longo do percurso em causa.

As medições tiveram lugar em período nocturno junto a troço de via com piso irregular e o outro ponto junto a troço de via com tapete de betão betuminoso.

Os valores residuais da vibração apresentam, para as gamas de frequências entre 50 Hz e 100 Hz (gama onde se localiza a densidade espectral mais elevada para estímulos devidos a passagem de composições do Metropolitano, a velocidades de cerca de 50 km/h), valores da ordem de $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$.

2.2.2 Estimação das atenuações

2.2.2.1 Propagação entre a zona de aplicação do estímulo (travessas) e a envolvente do túnel

Procedeu-se a modelação em analogia com propagação ao longo de linha eléctrica, considerando-se as características seguintes para os materiais que estabelecem os dois “cortes elásticos” considerados:

- a) Palmilhas resilientes sob travessas bibloco;
Rigidez dinâmica $\approx 150 \text{ MN/m}^3$
- b) Manta resiliente colocada entre soleira do túnel e betão de enchimento
Rigidez dinâmica $\approx 20 \text{ MN/m}^3$

As características referenciadas para a manta resiliente correspondem ao tipo CDM DFMA L10 (duas camadas, uma face ondulada).

Na Tabela 1 apresentam-se as curvas de atenuação correspondentes às duas situações modeladas:

- Colocação de palmilhas resilientes sob as travessas;
- Colocação de palmilhas resilientes sob as travessas e de manta resiliente entre soleira do túnel e o betão de enchimento

Tendo em conta a amplitude do estímulo mecânico aplicado (0,001 m/s) como se referiu atrás, a consideração de um só nível de atenuação (palmilhas resilientes sob as travessas) conduziria a uma atenuação de cerca de 10 dB na gama de frequências tomada como referência o que determinaria, na envolvente do túnel estimulação caracterizada por:

$$v_{ef} \approx 30 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Este resultado torna patente a necessidade de ser introduzido o nível de atenuação correspondente à colocação de manta resiliente entre a soleira do túnel e o betão de enchimento, o que conduz a uma atenuação global de cerca de 35 dB na gama de frequências com interesse, logo levando a que o estado de vibração determinado na envolvente do túnel se caracterize como segue:

$$v_{ef} \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Verifica-se, assim, a satisfação do critério apontado atrás ($v_{ef} \leq 3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$).

2.2.2.2 Propagação entre a envolvente do túnel e as fundações dos edifícios

Dadas as distâncias reduzidas entre a envolvente do túnel e as fundações dos edifícios que se situam mais próximas (distâncias inferiores ao triplo do diâmetro médio do túnel) admite-se que a propagação da energia radiada em consequência do estado de vibração da envolvente do túnel ocorre por ondas planas, logo sem atenuação.

De acordo com a estimacão feita na alínea anterior para o valor eficaz da velocidade de vibração na envolvente do túnel e admitida a não atenuação na propagação no terreno e demais hipóteses referidas atrás, o nível sonoro dos ruídos correspondentes a passagens isoladas de composições caracterizar-se-á como segue:

$$L_A \approx 35 \text{ dB(A)}$$

Tabela 1 - Vibrações devidas a circulação ferroviária

