



PREVISÃO DA VIBRAÇÃO E RUÍDO ESTRUTURAL EM EDIFÍCIOS, DEVIDOS A FUTURA PASSAGEM DE COMBÓIOS NUMA NOVA VIA FÉRREA PRÓXIMA.

O QUE SE SABE E O QUE NÃO SE SABE.

Schiappa, F. ¹

¹Acústica XXI
{ fschiappa@yahoo.com }

Resumo

Descreve-se o método experimental: Os locais de interesse – pontos de medição; A determinação (cálculo) da transmissão (função de transferência) da via férrea para os edifícios; A previsão dos valores da velocidade de vibração e dos níveis de ruído estrutural nos edifícios (piso 0, quartos e salas) e sua comparação com os valores de incomodidade. Cálculo do isolamento. Boa prática da verificação das previsões após a entrada em funcionamento da nova via.

O que se sabe e o que não se sabe. Necessidade de melhor conhecimento.

Palavras-chave: vibrações, ruído estrutural, previsão, isolamento, verificação.

Abstract

Prediction of Future Railway Trains Induced Vibration and Structural Noise in Buildings. Experimental method: The locals and measuring points selection; The evaluation of the transfer function between the railway and the selected points in the buildings; Prediction of the vibration values and noise levels on the selected measuring points, and comparison with the discomfort acceptance criteria; Isolation calculus; Good practice of predictions assessment.

What do we know and what we don't. Need for a better knowledge.

Keywords: vibrations, structural noise, prediction, isolation, verification.

PACS no. 43.40.At, 43.40.Ng

1 O Estudo Experimental

1.1 Princípio

A previsão experimental, em edifícios existentes, da vibração e ruído estrutural (ruído emitido nos compartimentos pela vibração do piso, paredes e tecto), vibração devida a uma futura fonte próxima, é hoje matéria teoricamente conhecida e de procedimento simples.

A vibração é quantificada pelo movimento, expresso em velocidade, de pontos seleccionados.

O estudo, após observação do local, desenvolve-se em três fases:

- i) Determinação experimental da Função de Transferência da vibração, da via para os edifícios próximos, seleccionados, para os locais (habitados), seleccionados, onde se pretende evitar incomodidade para as pessoas;
- ii) Sabidas, a vibração gerada pelo futuro tráfego ferroviário, estimada por medição, experimentalmente, em troço em exploração, e a Função de Transferência determinada para os locais seleccionados, estima-se nestes os futuros valores da vibração e do ruído estrutural, este pela norma ISO 14837-31:2017, e comparam-se com os respectivos valores admissíveis;
- iii) Projecta-se o isolamento, se necessário.

1.2 Medição

Qualquer estudo experimental exige a precisa medição das grandezas físicas relevantes, e o seu relacionamento por um modelo conceptual matemático desejavelmente simples mas adequado. No caso das vibrações mecânicas, o movimento das partículas materiais é actualmente medido por equipamentos de aquisição e digitalização dos sinais [5] emitidos por sensores, actualmente acelerómetros, fixados nos locais cujo movimento se pretende medir.

Relembra-se que: na medição em diversos pontos, uns mais próximos da fonte de vibração, onde o movimento (aceleração) será mais intenso (e eventualmente as frequências do sinal serão superiores, outros mais afastados da fonte, em que o movimento será muito menor, poderá ser preciso dispor de sensores e sistemas diferentes, para os primeiros pontos usar sensores e equipamentos com maior alcance, e para os segundos sensores mais sensíveis e equipamentos ajustados para digitalização de menores intensidades, e com menor nível de ruído, este uma ordem de grandeza abaixo dos menores valores a medir. [6]

Relembra-se também que os critérios de avaliação das vibrações sendo expressos em velocidade, grandeza de que depende também o ruído aéreo emitido, é necessária a integração das acelerações medidas.

Refere-se também que o conteúdo em frequência significativo das vibrações no tema em causa está geralmente compreendido entre 4 Hz [2] e não mais que 100 a 125 Hz.

2 Função de Transferência

2.1 Determinação Experimental

Sendo P_c um ponto material, escolhido próximo da (futura) fonte, de onde a vibração se vai propagar para um ponto P_e escolhido em local (habitado) do edifício, e considerando que as equações dinâmicas que relacionam o movimento de P_e com o de P_c são lineares (pequenos movimentos), simplifadamente:

$$V_Z(f) = T_{C \rightarrow Z}(f) \times V_C(f) \quad (1)$$

onde (ver fig.^a 1) $V_Z(f)$ e $V_C(f)$ são as transformadas de Fourier das funções do tempo velocidade vertical do ponto P_Z escolhido no piso do compartimento onde se pretende evitar incomodidade,

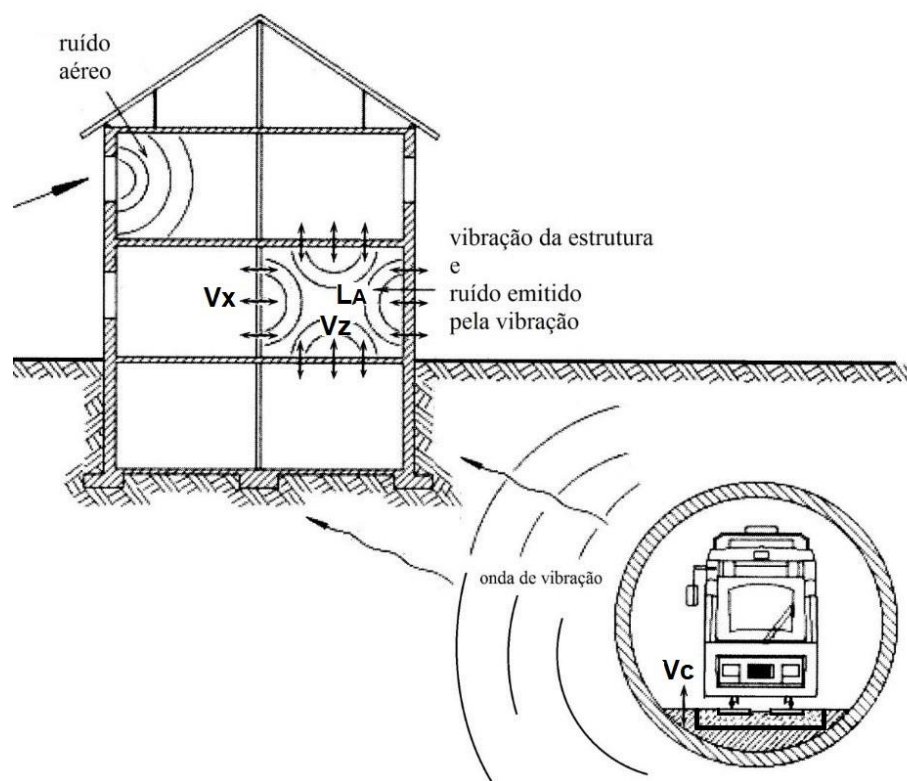


Figura 1 – Propagação da vibração da via férrea para o edifício.

e da velocidade vertical no túnel da futura via férrea, no ponto P_C escolhido (semelhante para o ponto P_X , representativo da vibração horizontal da parede, de movimento com velocidade horizontal V_X), e $T_{C \rightarrow Z}(f)$ a Função de Transferência da vibração entre P_C e P_Z .

$T_{C \rightarrow Z}(f)$ é muito simplesmente calculada experimentalmente, antes do assentamento da via (mas já com a estrutura do túnel razoavelmente finalizada) provocando próximo do ponto C uma vibração vertical, com uma máquina da construção, pica pau ou cilindro vibrador, e medindo em ambos os pontos P_C e P_Z o seu movimento (vibração) vertical (horizontal para P_X). Os pontos P_Z , este normalmente escolhido próximo do meio vão do piso, e P_C deverão estar no mesmo plano vertical ortogonal (ou quase) ao eixo da via.

3 Previsão e Avaliação

A previsão de V_Z (analogamente a de V_X) é muito simplesmente calculada introduzindo na equação 1, que já serviu para a determinação de $T_{C \rightarrow Z}(f)$, a solicitação V_C , agora medida em via em exploração, em ponto C análogo, quando da passagem de composições semelhantes às que circularão na futura via. Atenção que esta solicitação vem afectada do corte efectuado por eventual isolamento, se existir, que terá de ser considerado. Igualmente o desgaste de caris e rodados influi na vibração gerada.

Das previsões dos espectros determinam-se os valores globais eficazes (rms) da velocidade de vibração nos pontos (locais) seleccionados nos pisos dos compartimentos dos edifícios; com os valores da velocidade de vibração, determina-se os níveis de ruído estrutural correspondente, pela ISO 14837-31:2017 [1].

Comparam-se os valores obtidos, espectrais e globais, com os correspondents valores admissíveis. Se aqueles forem superiores a estes, é necessário prever um isolamento.

Os valores admissíveis são, resumidamente:

- a1) - $V_{ef} \text{ global} \leq 0,11$ a $0,28$ mm/s (componente vertical, a meio vão do piso);
- a2) - $V_{ef}(f_i) \leq$ valores da norma ISO 2631:1989 (espectro de valores eficazes da componente vertical da velocidade, a meio vão do piso), máx^o do espectro $0,1$ ou $0,14$ mm/s;
- a3) $LA \leq 27$ dBA

4 Isolamento

4.1 Modelo

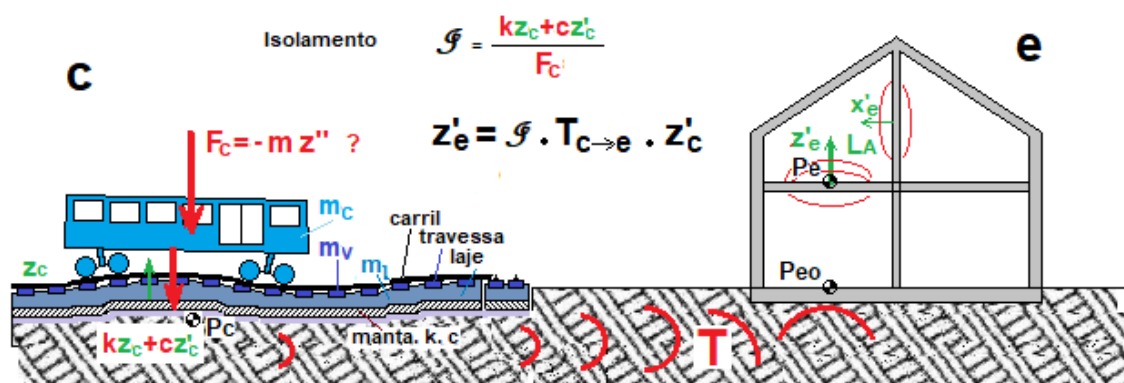


Figura 2 – Esquema simples da geração e propagação das ondas de vibração, da via para o edifício, vibração dos seus elementos, e ruído estrutural.

A fig^a 2, mostra em esquema o “percurso” da vibração e o modelo simples da geração e isolamento. Como é sabido [2], o isolamento da vibração “na fonte” é geralmente realizado pela introdução sob as travessas da via de placas de material visco elástico (poliuretano microcelular), ou introduzindo (betonando) sob a via, carris e travessas, uma laje de betão, assente (moldada) numa manta viscoelástica. Qualquer destas soluções, pode ser modelada, para efeito de cálculo, por um sistema mecânico simples, linear, de massa-mola-amortecedor.

Para estes modelos simples, com um grau de liberdade (considerando das composições apenas a sua massa), a função de corte do isolamento, \mathcal{G} , dependente dos valores da rigidez, k , e do amortecimento, c , das placas ou da manta, e da massa, m , sobre elas, combóio e via, e laje (na solução com manta, sem a laje, com o material para isolamento sob as travessas), está representada na figura 3 [3, pg.^a 596; 2].

Numa primeira abordagem pode supôr-se que a suspensão do combóio tem uma rigidez, e um amortecimento ambos muito superiores aos da manta, assim que a massa m_c acompanha na vertical as massas $m_v + m_l$, da via, mais laje subjacente, donde $m = m_c + m_v + m_l$. Ver secção 5.

Nos estudos em que tem participado, o autor tem utilizado o modelo atrás descrito, constituído por:

i) um primeiro sistema, consistindo na via férrea, composições circulares e isolamento, modelado como um sistema de parâmetros concentrados, por uma equação linear $m - k - c$; que gera ondas de tensão e deformação, na base da manta, (no caso da fig.^a 2); concretamente por

i1) combóio com carruagens, bogies e rodados, rails e travessas, m , + palmilhas e pantufas (sob as travessas), k , c ; ou, alternativamente:

i2) combóio com carruagens, bogies e rodados, rails e travessas, laje, m , + manta (sob a laje), k , c ;

ii) um segundo sistema, o solo, onde as ondas de tensão (e deformação) se propagam atingindo as fundações do edifício; não sendo o solo nem um meio contínuo nem homogéneo, é no entanto expectável que as ondas se atenuem, das formas conhecidas, geométrica e com dissipação; mas a sua medição experimental dá a real atenuação, entre os pontos de medida, junto à via, P_c , e no edifício, P_{e0} , (na fundação à cota da soleira);

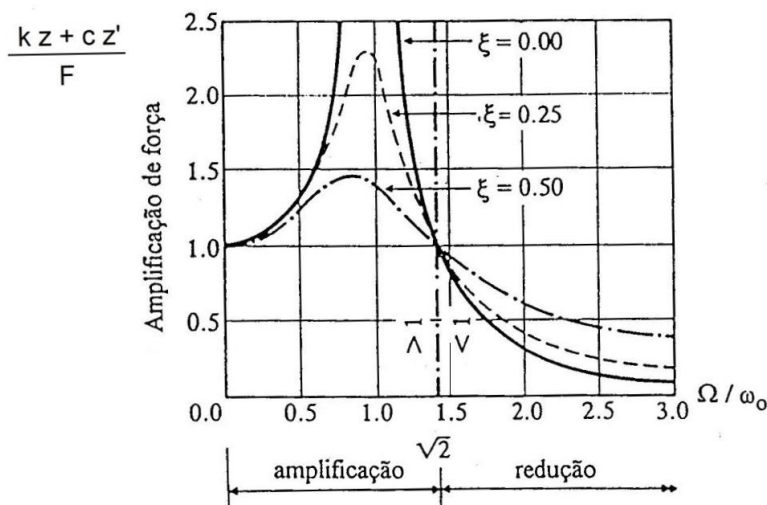


Figura 3 – Função de Corte, \mathcal{S} , de um Isolamento com um grau de liberdade

iii) o terceiro sistema, o edifício com a sua estrutura, pisos e paredes, que poderão exibir frequências próprias, das lajes, responsáveis por ampliações “locais” da vibração, de P_{e0} , até P_e . A função de transferência entre estes dois pontos é também calculada por medição. Os pontos P_e poderão ser vários. A subdivisão do percurso das vibrações descrito em 2. justifica-se porque o edifício apresenta frequências próprias, ao contrário do solo que se comporta como um meio contínuo.

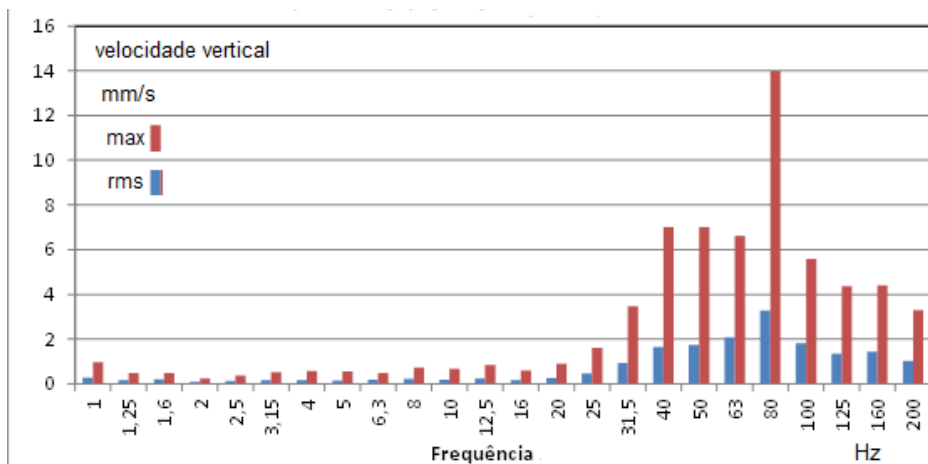


Figura 4 – Espectro de vibração numa travessa de via, devido a uma passagem de combóio.

A equação na fig.^a 2 pode escrever-se:

$$V_e = \mathcal{F} \times T_{c \rightarrow e} \times V_c \quad (2)$$

onde: $T_{c \rightarrow e} = T_{c \rightarrow eo} \times T_{eo \rightarrow e}$. $T_{eo \rightarrow e}$ pode determinar-se, tal como se refere atrás, secção 2., colocando a fonte de vibração, pica-pau ou cilindro, ou mesmo usando o tráfego rodoviário próximo, se existir e fôr suficiente, à cota da soleira do edifício.

Note-se que o espectro da vibração oriunda do tráfego ferroviário tem conteúdos mais significativos nas frequências dos 50 aos 80 ou 100 Hz, e as frequências próprias dos elementos (pisos) dos edifícios aparecem geralmente entre os 20 eo 40 Hz; edifícios podem ter frequências próprias de vibração vertical na ordem dos 10 Hz, mas estas são difíceis de excitar, pela energia que é necessária. Assim, a frequência própria do isolamento, ver fig.^a 3, deverá em princípio estar bem abaixo do 20 Hz (dependendo das frequências próprias detectadas no edifício). Ver exemplos nas figuras, 7, 8, e 9.

Note-se na figura 4 os maiores conteúdos nas frequências dos 40 aos 160 Hz, máx^o nos 80. O algum conteúdo nas frequências de 125, 160 e 200 Hz, não habitual, deve-se à existência de um aparelho de via, e também à proximidade do sensor ao carril.

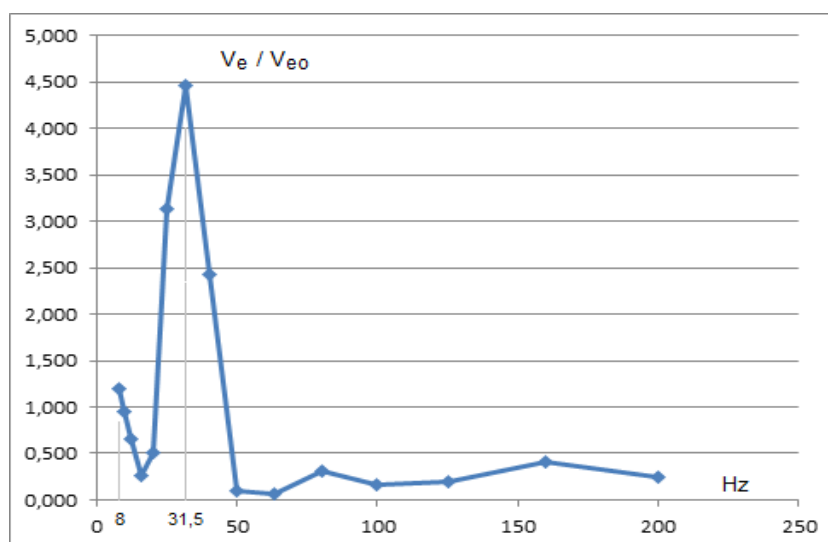


Fig.^a 5 – Função de transferência, $T_{eo \rightarrow e}$, num edifício de 7 andares, da cota 0 para o piso de uma sala do 1.^o andar, a meio vão, 2 pisos acima

Note-se a frequência própria do piso da sala, $\approx 31,5$ Hz. A freq.^a de 8 Hz, será a 1.^a frequência propria vertical de todo o edifício?

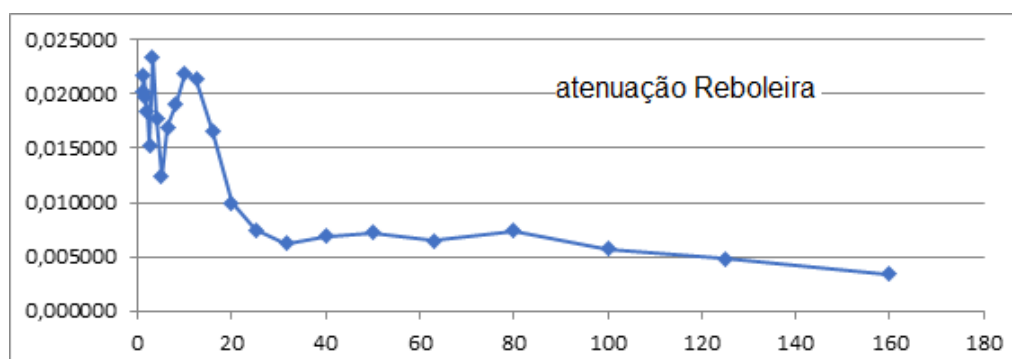


Fig.^a 6 – Espectro da atenuação da vibração, da travessa para a parede do túnel, medida num troço recente de via em túnel com travessas prismáticas com placa microcelular subjacente.

Note-se a frequência “própria” aos ≈ 10 Hz, e a atenuação acima dos ≈ 20 Hz. O andamento da curva deve ser semelhante ao da função de corte do isolamento.

4.2 Estudo

É um procedimento iterativo: para uma solução de isolamento mais simples, conhecidos os valores de m , k e c :

i) determina-se a função de corte \mathcal{F} cuja expressão analítica é [3]:

$$\mathcal{F} = \{ (k^2 + \Omega^2 c^2) / [(k - m \Omega^2)^2 + \Omega^2 c^2] \}^{1/2} \quad (3)$$

(Ω , frequência, em rad/s, $= 2 \pi f$, f em Hz; na fig.^a 3, $\omega_0 = (k / m)^{1/2}$)

ii) introduz-se \mathcal{F} na equação (2) ou (2bis):

$$V_e = \mathcal{F} \times T_{c \rightarrow e_0} \times T_{e_0 \rightarrow e} \times V_c \quad (2bis)$$

iii) verifica-se se os valores obtidos V_e previsíveis da velocidade de vibração são inferiores aos valores admissíveis; se sim, calculam-se, pela norma ISO 14837-31:2017 os correspondentes níveis de ruído previsíveis; verifica-se se são inferiores ao valor admissível; se sim, o isolamento considerado será satisfatório; se não, repete-se o procedimento com um isolamento mais poderoso.

Parece simples, mas...

5 O que Não se Sabe...

5.1 Função de Transferência. Dúvida

A função de transferência determinada com a vibração “pontual” de uma máquina (colocada no túnel, sob o edifício, pica-pau ou cilindro vibrador), será igual à oriunda de uma vibração “linear” causada por um comboio de várias carruagens, vindo ao longo da via?

Terminada a obra, com a via em exploração, poderão repetir-se as medições iniciais e comparar a Função de Transferência “real” com a obtida anteriormente.

5.2 Função de Transferência. Caso Prático

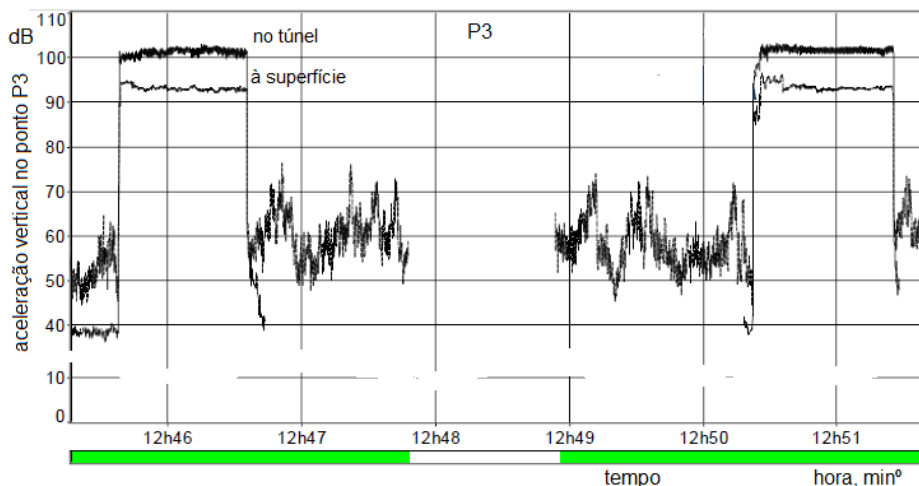


Figura 7 – Aceleração vertical, medida no túnel e em edifício à superfície

Num estudo para uma futura via férrea em túnel, foram executadas as medições atrás referidas entre o túnel e a soleira dos edifícios seleccionados. Para um dos edifícios, referido como ponto P3, as vibrações geradas no túnel por um pica pau foram medidas, componente vertical da aceleração, no túnel e na soleira do edifício, e estão representadas, em valor eficaz (rms) corrente, em dB, em função do tempo, no gráfico, fig.^a 7.

Foi depois calculada a Função de Transferência da vibração, do túnel para a superfície, em amplificação (adimensional) vs. frequência, por bandas de frequência de 1/3 de oitava, representada na figura 4.

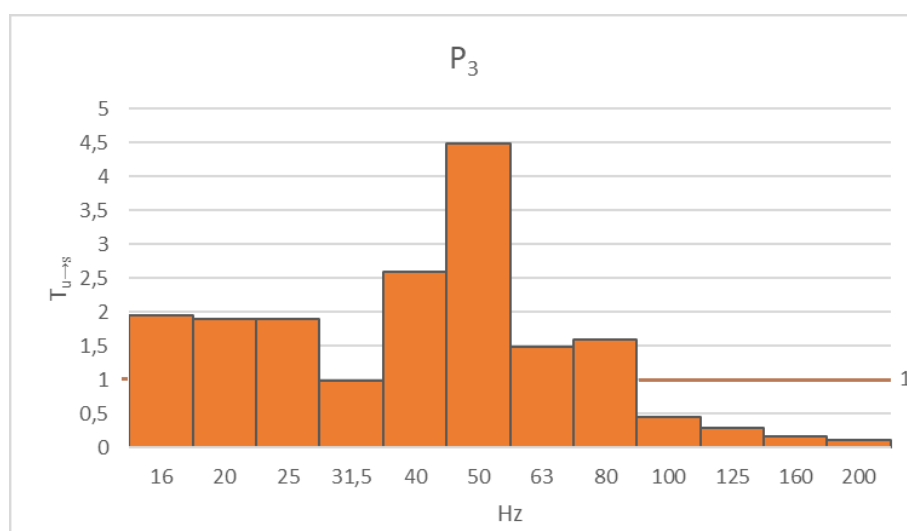


Figura 8 – Função de Transferência da vibração vertical em P3, do túnel, em P3u, para a superfície, em P3s.

A observação de ambas as figuras mostra imediatamente, que às medições temporais da figura 7 não pode corresponder a função de transferência da figura 8, onde a amplificação da vibração é sempre superior a 1, para todas as frequências, dos 16 aos 80 Hz (cerca de 1 aos 31,5), chegando a 4,5 aos 50 Hz!.

Não encontro explicação para este resultado. Se o autor do estudo leu um documento normativo que anda pela comunidade técnica das vibrações devidas a tráfego ferroviário, onde se misturam vários textos e estudos, Manual da FTA, Projecto Rivas, etc, pode ter acrescentado ao processamento das medições uns +6dB, para prevenir a eventual ocorrência de ressonâncias em pisos de compartimentos e +10 dB em “todas as bandas de frequência”, para acomodar futuras degradações das rodas e carris... Estes acrescentos talvez justifiquem a transformação da atenuação em amplificação... visto que as diferenças no gráfico das acelerações, em função do tempo, diferem aparentemente de cerca de 9 dB.

Na dúvida, dever-se-ia procurar nos edifícios estudados, compartimentos (salas, quartos) susceptíveis de entrar em ressonância, medindo-se, e calculando-se as funções de transferência da superfície para os pisos, a meio vão, desses compartimentos.

5.3 Vibração Emitida pelos Combóios

O espectro da vibração emitida pelas composições ferroviárias, V_c , a introduzir nas fórmulas (1) ou (2) decorre de medição efectuada no ponto representativo escolhido P_c .

Este espectro está “contaminado” por um eventual isolamento, que normalmente se desconhece, existente no troço em exploração onde se realizou a medição, e também pelo estado de degradação dos carris e dos rodados da composição, ver secção anterior 5.2.. Desconhece-se a evolução (agravamento) da vibração emitida pelos combóios desde cada rectificação até à próxima.

5.4 Modelo Dinâmico

O autor, nos seus estudos, tem usado o modelo dinâmico, constituído por três subsistemas acoplados, em série, atrás descrito em 4.1.

O subsistema i), que inclui o isolamento, modelado como sistema discreto, massa(s) + mola(s), tem de ser calculado, para se determinar a eficiência do isolamento, e prever as vibrações e o ruído estrutural nos edifícios. Os subsistemas ii) e iii) são identificados pelas medições, não se prevendo intervir na sua resposta dinâmica.

Por razões práticas, o subsistema i) que conceptualmente termina nas faces inferiores dos elementos elásticos (palmilhas e pantufas ou manta), é prolongado até um ponto do túnel ou solo próximo, devendo esse pequeno percurso ter características conhecidas. Assim, no estudo de novas vias em túnel, o ponto P_c é geralmente escolhido na parede do túnel, já construído, ao nível do que vai ser o nível dos carris da futura via.

5.5 Massa

O desconhecimento das características da suspensão das carruagens e o pressuposto que seriam superamortecidas (talvez errado, as carruagens antigas parecia terem apenas molas de lâminas, mas o escorregamento entre elas poderia trazer alguma dissipação; creio que foram usadas molas helicoidais), levaram a considerar as carruagens, bogies com as rodas, e a própria via, como uma massa única.

A existência de dois níveis de suspensão das carruagens, primária e secundária obrigaria a considerar o material circulante como um sistema, só por si, com três graus de Liberdade e duas frequências próprias; este facto necessita estudo, que eventualmente permita, “longe” das novas frequências próprias (?), a consideração simplista de uma massa reduzida (de quanto?).

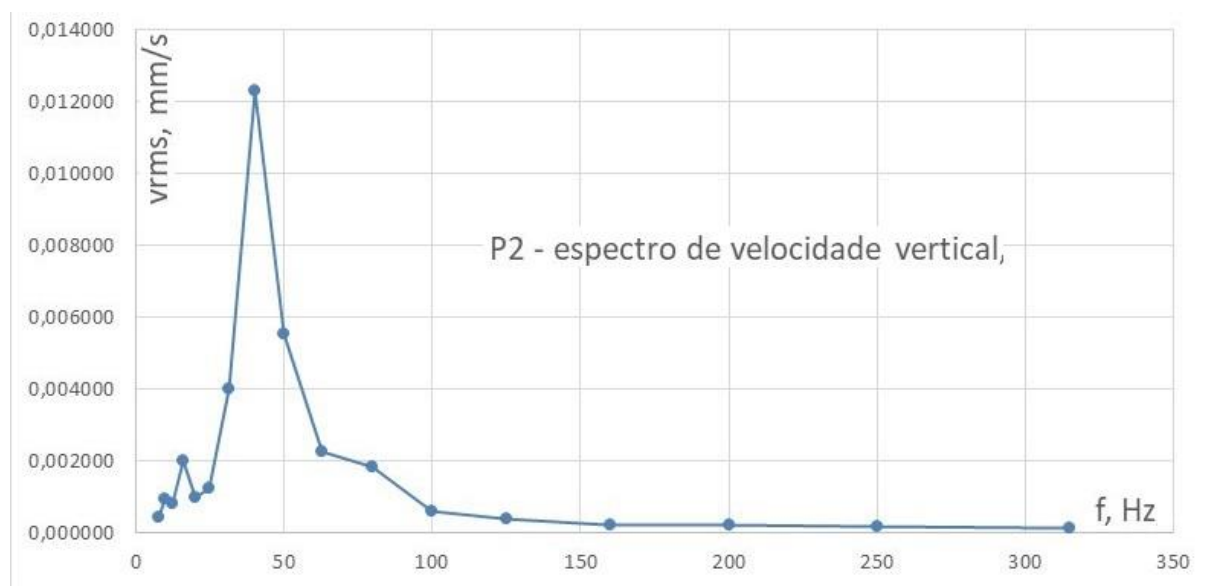


Figura 9 – Espectro de velocidade de vibração na soleira de um edifício, próximo de uma via férrea subterrânea reabilitada, com um isolamento de travessas prismáticas com palmilhas duplas

5.6 Caso Prático

Um estudo realizado para a reabilitação de um troço de via, de facto de um aparelho de via, anteriormente de carris sobre travessas e balastro, aconselhou uma solução com travessas prismáticas

de betão com isolamento de palmilhas. Esta solução, caracterizadas por medição, ver figura 6, foi transposta para o troço em estudo, agora duplicando as palmilhas, previa-se ter uma frequência “própria” inferior a 10 Hz, da ordem dos 8 Hz, a acreditar na curva de atenuação da fig.^a 6, agora com palmilhas duplicadas.

Medições realizadas após a obra, mostraram num dos pontos (P2) um pico principal na zona dos 40 Hz, e um segundo aos 16 Hz, figura 9. Os outros registos mostram componentes mais significativas nade frequências “altas”, dos 31,5 - 40 -50 aos 100 – 160, e algum conteúdo em frequências mais baixas, entre os 12,5 e os 16. Os resultados obtidos, todos abaixo dos limites de incomodidade (que era o que se pretendia), não são conclusivos quanto à forma da função de corte do isolamento aplicado.

Refere-se que pela primeira vez, na vida profissional do autor, o dono da obra aceitou incluir no plano de trabalhos, uma medição final, para avaliar as previsões feitas no estudo...

5.7 Rigidez e Amortecimento

O conhecimento dos valores da rigidez e amortecimento dos materiais viscoelásticos usados para isolamento é imprescindível para o cálculo da sua eficiência. Dado que são não lineares, as suas características, k , ou E , e c , deverão ser determinadas por ensaio com os materiais no mesmo estado de compressão em que vão funcionar sob os comboios e a via [2].

Os materiais em poliuretano microcellular, que vão perdendo rigidez pelo achatamento das células, figura 10, deverão ser escolhidos de forma a virem a funcionar com rigidez mínima, ou próxima, baixando-se assim a frequência “própria” do isolamento.

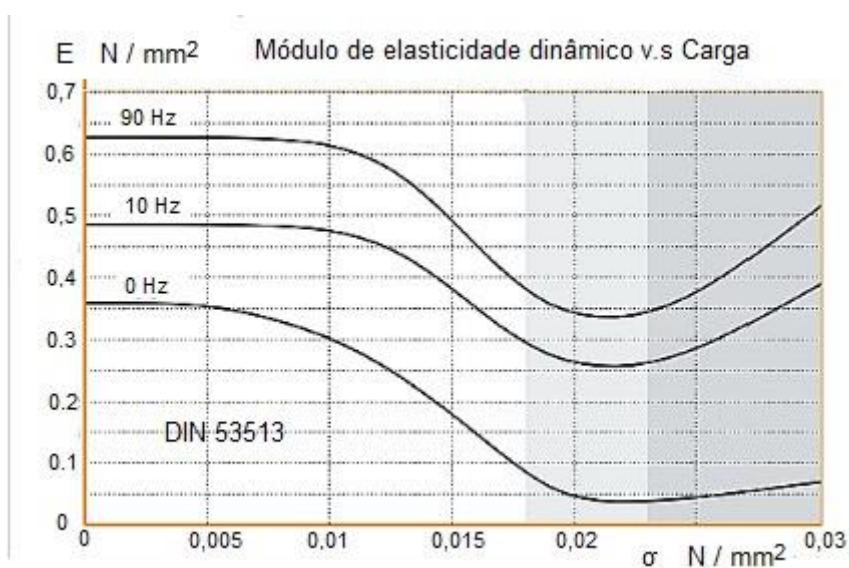


Figura 10 – Módulo de Elasticidade em função da tensão de compressão para um poliuretano microcellular (Getzner)

5.8 Modelo Matemático (rever fig^a 2 e secção 4.1)

Ignorando a dinâmica (vertical) das composições, um modelo de dois graus de Liberdade, considerando as elasticidades das placas e pantufas, sob as travessas, e da manta, sob a laje subjacente, é adequado. Todas as outras rigidezes que se queiram considerar, originam frequências próprias muito altas, e pouco alteram as baixas frequências dos isolamentos.

Num caso “prático” o autor simulou em modelo de dois graus de liberdade a utilização simultânea de manta e travessas com pantufas com placas viscoelásticas; a simulação foi inconclusiva: se por um lado o segundo isolamento desdobra a frequência própria do primeiro, originando uma outra mais alta, a falta de valores credíveis para as elasticidades e amortecimentos, impede o tirar de conclusões em qualquer caso prático. Ficou ao autor a convicção que é preferível um único isolamento, ou placas sob as travessas ou manta sob laje.

Fica por estudar a influência prática da suspensão das carruagens. Tentativa de modelar analiticamente a força dinâmica exercida pelas carruagens sobre a via, não se considera aqui, por falta de validação experimental [4].

5.9 Outros Modelos Matemáticos. Exemplo

Outros investigadores preferem modelos usando a força de contacto rodados-carris, como solicitação, e consideram outras elasticidades, como a das palmilhas entre os carris e as travessas, aumentando o número de graus de Liberdade.

Exemplo na figura seguinte,

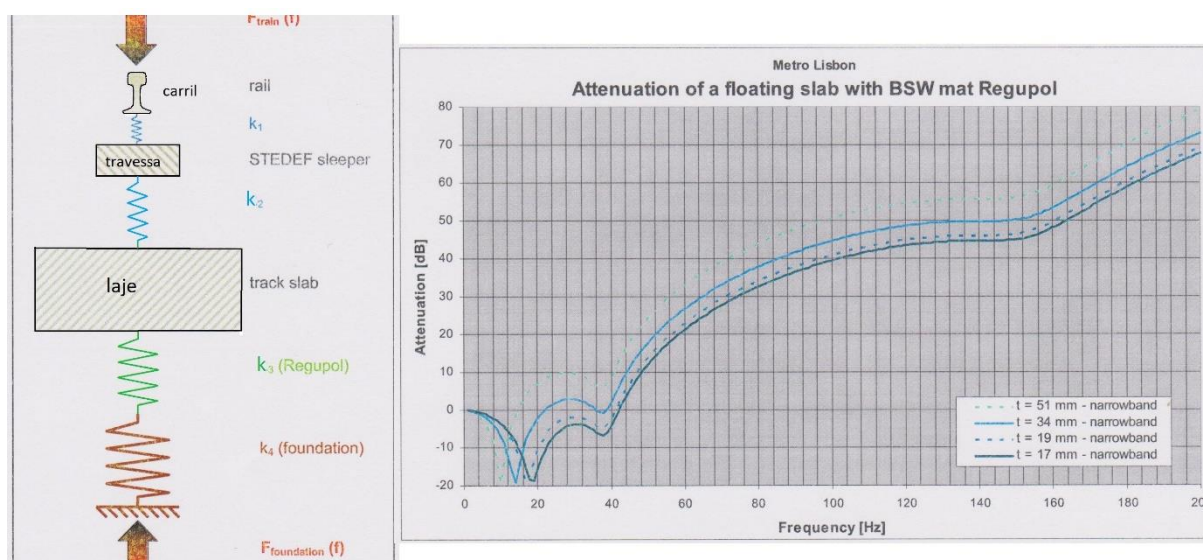


Figura 11 – Modelo $v(F)$ e sua característica. De Ingenieurbüro Dr. Heiland- Metro Lisbon, Dynamical Design of MSS Solution 1-3, with Regupol SB 16/100 mats, Bochum, 2010

6 Conclusões prévias

Muita investigação está por fazer, para que os especialistas nesta área de previsão das vibrações em edifícios devidas novas vias férreas possam prever futuros níveis de vibração, e dimensionar o seu isolamento.

6.1 Previsão da vibração e ruído estrutural

6.1.1 – Função de Transferência Via – Locais Habitados: O método descrito parece adequado, salvo a dúvida se a excitação pontual descrita representa adequadamente a causada pelo movimento linear da composição com várias carruagens. Esta dúvida pode vir a ser esclarecida por medição após a e entrada em funcionamento da nova linha.

6.1.2 – Previsão da Vibração; Depende do valor da solicitação, vibração induzida pelo movimento da composição, medida (em Pc; usa-se um ponto na parede do túnel ao nível da via), mas afectada por isolamento existente (desconhece-se? envelhecido?), e pelo grau de degradação de carris e rodados.

6.2 Isolamento das vibrações

6.2.1 – Rigidez e amortecimento do material isolante: Desconhecimento em geral. Os valores de rigidez indicados pelos fabricantes são em geral pouco credíveis, excepção para o exemplo da fig.^a 10.

6.2.2 – Massa a usar no modelo m-c-k? Desconhecimento da dinâmica das carruagens.

7 Conclusões finais

Propõe-se, como regra, que:

7.1 As empresas gestoras e exploradoras de vias férreas, nos contratos para estudos de previsão de vibrações e seu isolamento, devem ainda incluir:

→a realização de uma medição final, após a entrada em exploração da nova linha, dos valores (espectros de velocidade vertical) da vibração e nível de ruído estrutural, e vibração emitida pelas composições (em Pc) para comparação dos resultados finais, com os previstos no estudo;

→as características dimensionais e de massa (massa suspensa, dos bogies e rodados) do material circulante, de rigidez e amortecimento das suspensões, o tipo de via (rails e travessas elegíveis);

→plantas e cortes verticais da zona em estudo, mostrando os edifícios próximos, a futura implantação da via, a sua fundação e túnel (se fôr o caso), a geologia do solo.

7.2 Nos concursos para fornecimento dos materiais de amortecimento, devem exigir:

→ensaio de determinação das características de rigidez e amortecimento, por ex.^o segundo a DIN 53513.

7.3 Propõe-se igualmente, que as empresas gestoras e exploradoras de vias férreas, em cooperação com organismos de investigação e universidades, promovam a investigação nesta área da previsão e isolamento das vibrações, em troços de via adaptados e instrumentados. Os resultados das medições após as obras devem constituir um banco de conhecimentos experimentais.

Referências

- [1] Valerio P., Schiappa T., Schiappa F. – Previsão do Ruído Emitido no Interior de Edifícios pela sua Vibração Estrutural, Devida a Fontes de Vibração Próximas. Caso de Estudo – in Acústica 2024. Faro. Setº de 2024.
- [2] Schiappa, F. - Procedimento de Ensaio: Isolamento de Vibrações geradas por Combóios. Materiais Visco Elásticos usados sob as Vias. Ensaio para a Determinação das suas Características de Elasticidade e Amortecimento. – in Acústica 2024. Faro. Setº de 2024.
- [3] Rao, S.– Mechanical Vibrations. Addison Wesley. 1995. Fourth ed., (pg. 596).
- [4] A. C. Costa, F. Ribeiro, J. B. Serra - Obra Especial 3 – Túnel sob os Edifícios da av.º D. Carlos I n.ºs 42 e 44. Análise Numérica ... para Caracterização das Vibrações Induzidas nos Edifícios pela Circulação das Composições [do ML]. LNEC, Março de 2022.
- [5] Oliveira Costa, C., Schiappa de Azevedo, F. et al. - Elementos de Sistemas e de Análise e Processamento de Sinais – LNEC, 1991.
- [6] ISO 4866, de 1990 (E) – Vibrações Mecânicas e Choques – Vibrações em Construções – Princípios para a Medição das Vibrações e Avaliação dos seus Efeitos nas Construções.