



PROCEDIMENTO DE ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE RIGIDEZ E AMORTECIMENTO DE MATERIAIS UTILIZADOS EM VIAS FÉRREAS PARA O ISOLAMENTO DE VIBRAÇÕES GERADAS PELOS COMBÓIOS

Schiappa, F. ¹

¹Acústica XXI
{ fschiappa@yahoo.com }

Resumo

O isolamento, na fonte, das vibrações geradas pelo movimento dos combóios em vias próximas de edifícios com ocupação humana, é geralmente feito colocando elementos planos de materiais resilientes sob a via. O cálculo da eficiência do isolamento, geralmente modelado como um sistema linear, requer o conhecimento da rigidez e amortecimento daqueles materiais, e a sua dependência da deformação e da frequência. Propõe-se um procedimento de ensaio para sua determinação.

Palavras-chave: vibrações, isolamento, ensaio, rigidez, amortecimento.

Abstract

Test Procedure for the Evaluation of the Stiffness and the Damping of the Vibration Isolation Materials used in Railways.

Trains rolling in railways near buildings with human occupancy, produce vibrations and structural noise, which may need to be reduced by isolating the buildings from the railways. In order to predict the isolation efficiency, the frequency dependent stiffness and damping of the materials used under the railway have to be calculated. An experimental test procedure is proposed.

Keywords: vibrations, isolation, test, stiffness, damping.

PACS no. 43.40.Tm, 43.40.At

1 Introdução

Este A presença crescente de vias férreas de transporte, à superfície e subterrâneas, em áreas urbanas, cada vez mais densificadas, com edifícios de betão altamente transmissores das vibrações, origina um crescente número de situações de incomodidade humana.

As ondas de vibração geradas pela rotação dos rodados das composições sobre os carris, que se propagam pelas estruturas dos edifícios, fazem vibrar pisos e paredes, cuja vibração poderá ser sentida, mas também emitir ruído.

É assim hoje boa prática, na medição de vibrações, e na previsão de futuras, considerar ambas as variedades: a vibração sensível e a ruidosa.

A redução das vibrações nos edifícios é geralmente tentada próximo da fonte, intercalando isolamento entre os carris e a fundação da via (ou laje de piso do túnel).

2 Isolamento

Há, essencialmente, duas soluções práticas deste isolamento, ver figura 1:

1 – A colocação sob as travessas da via, (hoje geralmente constituídas por dois blocos de betão ligados por um perfil de aço), de palmilhas (duas, uma por bloco) de material elástico e com alguma capacidade de amortecimento (estas palmilhas são posicionadas sob os blocos por meio de “pantufas” da borracha).

2 – A colocação (betonagem) sob as travessas da via de uma laje pesada (com espessura da ordem dos 50 cm), esta laje assente (betonada) sobre um tapete contínuo, ou manta, de material elástico e também amortecedor. Esta segunda solução tem uma variante, mais complexa, em que a laje (em troços) é assente sobre um conjunto de apoios elásticos substituíveis

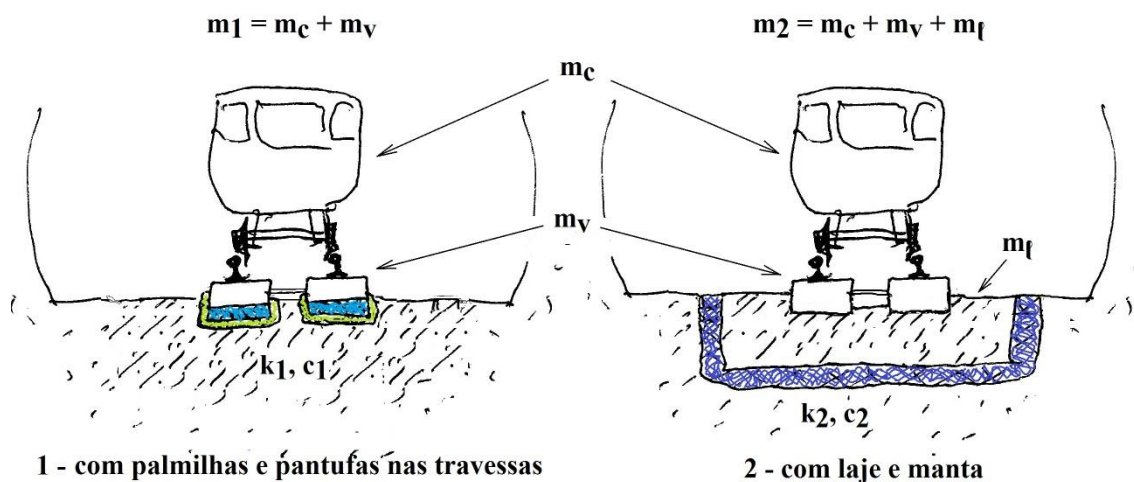


Figura 1: Soluções correntes para o isolamento das vibrações.

As soluções acima descritas são modeláveis analiticamente de uma forma simples por modelos lineares de massa-mola-amortecedor, cujas soluções permitem calcular a sua eficiência no “corte” da vibração que se transmite edifício acima.

Relembra-se o conhecido modelo [1]:

$$m z'' + c z' + k z = f(t) \quad (1)$$

(escreve-se a equação canónica, z o deslocamento vertical da massa, f a força que nela actua, que na realidade se desconhece)

Na prática, o comportamento do sistema é caracterizado pelos parâmetros:

$$\text{frequência própria } \omega_0 = (k / m)^{1/2}$$

$$\text{constante de amortecimento } \delta = c / (2 m)$$

donde

$$\text{frequência própria do sistema amortecido: } \omega = (\omega_0^2 - \delta^2)^{1/2}$$

$$\text{amortecimento relativo: } \xi = c / 2 (k m)^{1/2} = \delta / \omega_0 .$$

Para uma força sinusoidal, $f(t)$, de frequência Ω e amplitude F , a amplificação (e redução) da força transmitida à fundação da via (relativamente à que seria transmitida se não existissem os elementos viscoelásticos, k, c) é:

$$T = \{ (k^2 + \Omega^2 c^2) / ((k - m \Omega^2)^2 + \Omega^2 c^2) \}^{1/2} \quad (2)$$

ou, pondo $R = \Omega / \omega_0$,

$$T = \{ (1 + (2 \xi R)^2) / ((1 - R^2)^2 + (2 \xi R)^2) \}^{1/2} \quad (2a)$$

e está representada graficamente na fig. 2:

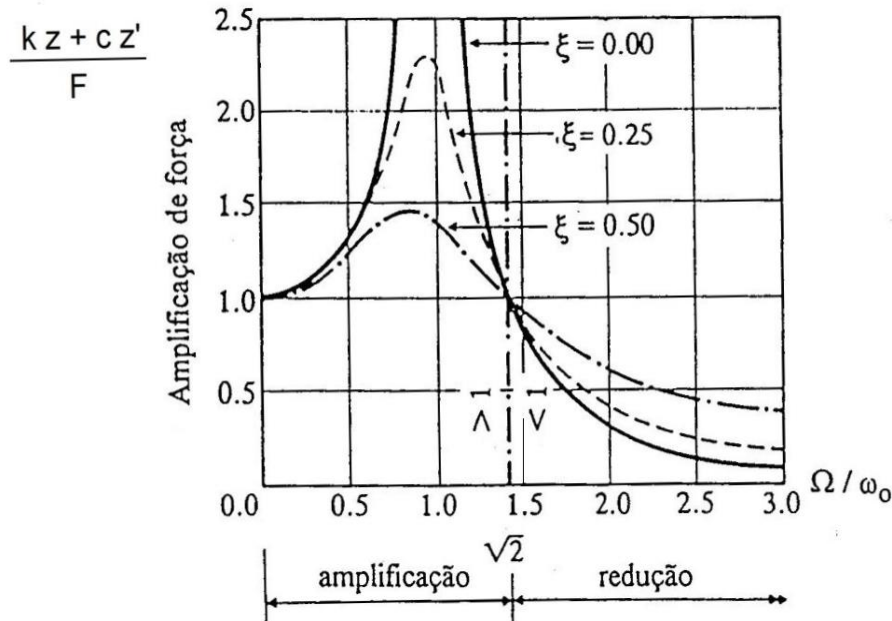


Figura 2 – Amplificação da força dinâmica gerada por uma máquina, em função da frequência da força dividida pela frequência própria da máquina sobre os apoios isolantes.

[de: S. Rao – Mechanical Vibrations. Addison Wesley. 1995. Fourth ed., pg. 596.]

Para uma onda de vibração (tensão e deformação) com componentes com diversas frequências, aquelas com frequências inferiores a $1,414 \times \omega_0$ serão amplificadas, as com frequências superiores serão reduzidas. O amortecimento (c) é benéfico nas baixas frequências, e inconveniente nas altas.

Daí, a necessidade do conhecimento não só da massa das composições, vias, e laje subjacente, no caso do isolamento com manta, mas também da elasticidade e amortecimento dos materiais viscoelásticos usados.

3 Projecto

O estudo do impacto da exploração de uma (futura) via férrea próxima de um edifício com ocupação humana requer o conhecimento da vibração gerada pelo movimento das composições, e das funções de transferência desde a via até aos locais do edifício habitados. Este conhecimento obtém-se, de forma simples, por via experimental.

Se os valores previstos (ou medidos) nos locais habitáveis excederem os limites (limiares) de incomodidade, é necessário introduzir isolamento.

O isolamento tem de ser calculado, introduzindo no modelo m,c,k os respectivos parâmetros.

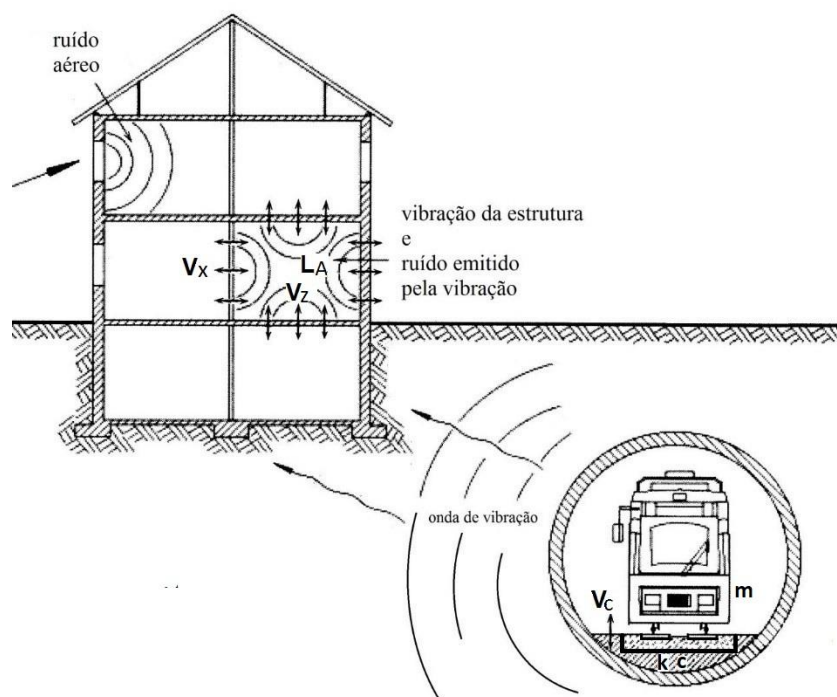


Figura 3 – Propagação das Ondas de Vibração

O valor da massa é facilmente calculado a partir das massa das composições (com ou sem passageiros; sobre o valor da massa a utilizar no modelo, algo se dirá em outra comunicação) incluindo os rodados, das massas dos rails e travessas; a massa da laje subjacente (no caso da utilização de manta) resulta das suas dimensões e da massa específica do betão utilizado.

Os valores da rigidez e amortecimento têm de ser determinados experimentalmente, testando provetes dos materiais viscoelásticos a utilizar.

Determinada a característica (função de transferência) do isolamento, esta é intercalada na cadeia de transmissão das ondas de vibração, desde a fonte (via férrea) até ao edifício nos locais onde se pretende assegurar comodidade, rever figura 2.

4 Modelo Matemático

4.1 Massa

No caso de amortecimento introduzido por palmilhas e pantufas nos blocos das travessas, a massa a considerar é a massa do comboio mais a massa da via. Em todos os cálculos vai considerar-se sempre os parâmetros m , c e k referidos a 1 metro linear da via/composição..

4.1.1 Massa do Comboio

De tabela das características das composições do ML, para duas carruagens motoras e quatro rebocadas, obtem-se em media $m_c = 2160 \text{ kg}_m$, valor semelhante para os três tipos, ML95, 97 e 99, com uma carga nominal máxima de 6 pessoas por m^2 . De notar que não encontrei quaisquer características da suspensão. Presumiu-se que as três massas, carruagem, bogies e rodados, se movem na vertical como uma só.

4.1.2 Massa da Via

Os carris de tipo 50E6 (antigo U50) têm uma massa de $50 \text{ kg}_m / \text{m}$, cada;

as travessas bibloco, os blocos ligados por um “tie-bar” têm cada uma massa de 180 kg_m ; distanciadas na via de $0,75 \text{ m}$, contribuem para a via com $240 \text{ kg}_m / \text{m}$.

Assim, $m_v = 2 \times 50 + 240 = 340 \text{ kg}_m$ e solução de isolamento com palmilhas (e pantufas) sob as travessas, a massa (por metro) do modelo simples m-k-c, de um grau de liberdade, é $m_1 = m_c + m_v = 2160 + 340 = 2500 \text{ kg}_m / \text{m}$.

No caso de isolamento com manta e laje subjacente à via, a massa desta laje tem de ser considerada; dependente principalmente da espessura da laje, poderá ser escolhida de acordo com a eficiência pretendida para o isolamento.

4.2 Elasticidade

4.2.1 Palmilhas Microcelulares com Pantufas

Um valor usado como standard [2] para as palmilhas com 12 mm de espessura (excluindo as pantufas) é: $k_p = 9 \text{ kN} / \text{mm}$ por por palmilha, a palmilha com dimensões $0,64 \times 0,26 \text{ m}^2$, o que faz $k_{pu} = 9 \times 10^3 \times 10^3 \text{ (N} / \text{m)} / (0,64 \times 0,26) = 54 \text{ k}^2\text{N} / \text{m}^3$; para 2 palmilhas (1 travessa) e $1/0,75$ travessas por metro, vem: $k_1 = 2 \times 9 / 0,75 = 24 \text{ kN} / \text{mm} (/ \text{m}) = 24 \text{ k}^2\text{N} / \text{m} (/ \text{m})$. Ignoro se a elasticidade das pantufas foi tida em conta, não é referida na referência da nota 1.

4.2.2 Estimativa da Deflecção Estática

A função tensão – extensão, ou força F – deformação z da palmilha, ou melhor do conjunto palmilha – pantufa, $F(z)$ não é linear. A rigidez (inverso da elasticidade) aumenta geralmente com a deformação. A determinação da elasticidade deve ser feita em torno da deformação, z_e , devida ao peso da composição e da via, $(m_c + m_v) g = m_1 g$.

A figura 4, seguinte, mostra o gráfico força, F , vs. deformação, z , geralmente obtido carregando um provete do material resiliente usado para isolamento, com forças crescentes e registando os pares (F, z) :

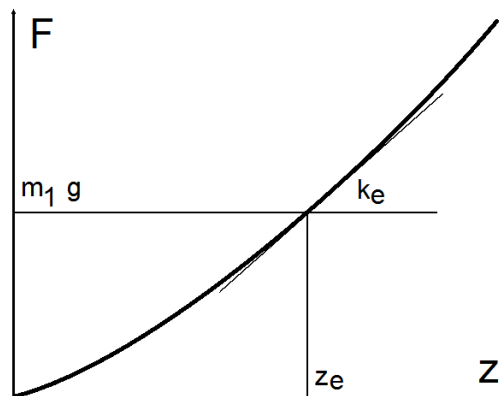


Figura 4 – Curva força, F , vs. deformação, z , para um material elástico.

Na ausência do ensaio atrás referido, a deflecção estática, z_e , pode ser estimada dividindo o peso do combóio mais o peso da via, pela rigidez estática, k_e , indicada pelo fabricante.

No exº acima referido ($k_p = 9 \text{ kN/mm}$ por palmilha) para $m_1 = 2500 \text{ kg}_m$, donde $m_1 g = 24,5 \text{ kN}$, donde a compressão estática vertical (durante a passagem da composição) sobre as palmilhas (e pantufas) é:
 $\sigma_e = 24,5 / ((2 \times 0,64 \times 0,26) \times (1 / 0,75)) = 24,5 / 0,44 = 55,2 \text{ kPa} = 0,055 \text{ N/mm}^2$ (sendo $0,44 \text{ m}^2$ a área das palmilhas (e pantufas) por m linear).

Materiais como o poliuretano microcelular, devido à variação de forma da sua estrutura interna, apresentam uma rigidez em função da carga como a exemplificada na figura 5:

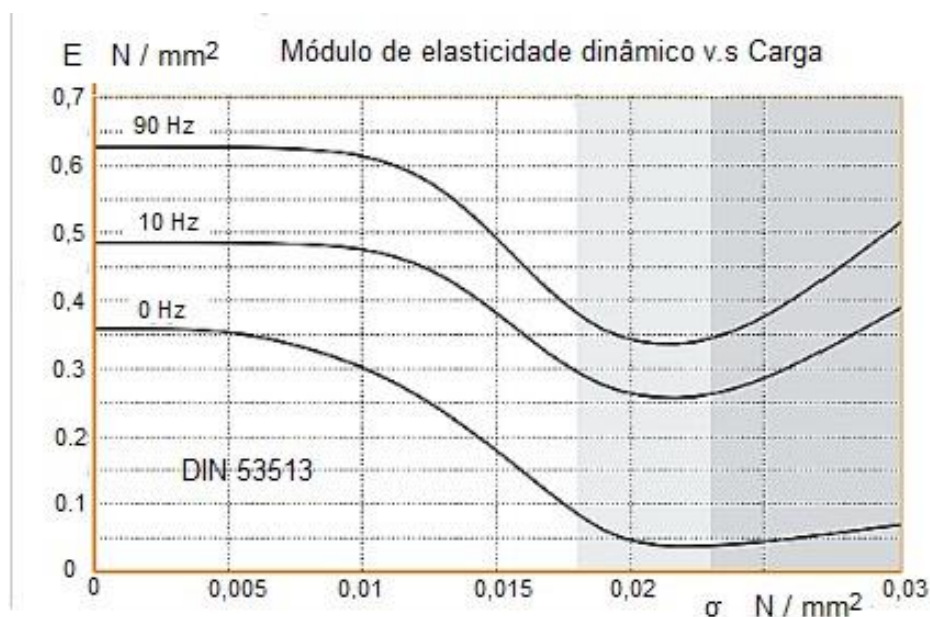


Figura 5 – Módulo de Elasticidade em função da tensão de compressão para um poliuretano microcelular (Getzner)

4.3 Amortecimento

4.3.1 Dissipação de Energia

Da equação do movimento de um sistema m-c-k:

$$m z'' + c z' + k z = f(t) \quad (1)$$

o trabalho elementar das forças, para uma solitação sinusoidal de freq.^a Ω :

$$m z'' dz + c z' dz + k z dz = F_M \text{sen}(\Omega t) dz \quad (3)$$

que integrado ao longo de um ciclo (período), entre t_0 e $t_0 + T$, $T = 2\pi / \Omega$:

$$m \int z'' z' dt + c \int z'^2 dt + k \int z z' dt = F_M \int \text{sen}(\Omega t) z' dt \quad (4)$$

Como é sabido, o balanço das energias cinética e elástica ao fim de um ciclo é zero, e assim:

$$c = F_M \int \text{sen}(\Omega t) z' dt / \int z'^2 dt \quad (5)$$

O trabalho da força pode ser calculado de forma simples a partir do gráfico $F(z)$:

$$c = \int F(z) dz / \int z'^2 dt \quad (6)$$

ou, voltando à primitiva forma da energia dissipada, temos:

$$c = \int F(z) dz / \int z' dz \quad (7)$$

Assumindo, para $F(t)$ a forma sinusoidal acima, e invertendo a curva, $F(z)$, obtida em ensaio, pondo-a na forma

$$z = z(F) = z(F_M \text{ sen}(\Omega t)) \quad (8)$$

z' fica

$$z' = dz/dt = dz/dF \times F_M \times \Omega \times \cos(\Omega t) \quad (9)$$

ou:

$$z' = dz/dt = dz/dF \times F_M \times \Omega \times \cos(\text{arc sen}(F / F_M)) \quad (9a)$$

sendo:

$$z' dz = (dz/dF)^2 \times F_M \times \Omega \times \cos(\text{arc sen}(F / F_M)) dF \quad (10)$$

ou

$$\int z' dz = \int (dz/dF)^2 \times F_M \times \Omega \times \cos(\text{arc sen}(F / F_M)) dF \quad (11)$$

num ciclo de carga e descarga, ver adiante, fig.^a 5;

ou, ainda:

$$\int z'^2 dt = \int (dz/dF \times F_M \times \Omega \times \cos(\Omega t))^2 dt \quad (12)$$

num intervalo $T = 2\pi / \Omega$.

A figura 6 seguinte esquematiza um ciclo de carga e deformação $F(z)$.

Note-se que na formulação apresentada, F representa a variação de força $\Delta F = F - F_e$, e z a correspondente variação de deformação $\Delta z = z - z_e$.

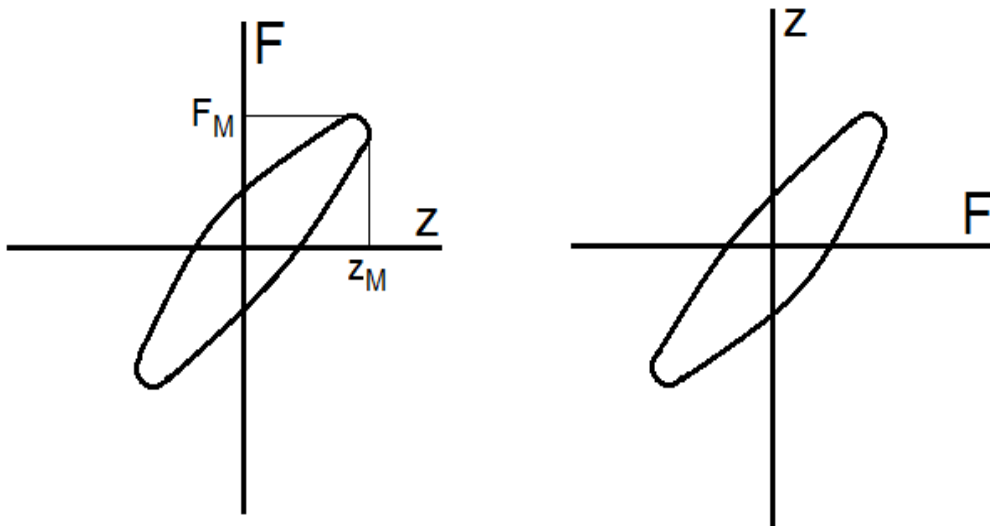


Figura 6 – Função força – deformação, $F = F(z)$, e a inversa, $z = z(F)$, num ciclo de carga e descarga, no provete de material viscoelástico.

Na prática, os ciclos obtidos são muito mais complexos, pelo que, após alguma evolução, se escolherá um representativo [3].

5 Ensaio

5.1 Equipamento

5.1.1 Prensa

5.1.1.1 Compressão Estática

Para ensaiar o material viscoelástico em condições semelhantes às da sua utilização, é necessário dispor-se de uma prensa de compressão, com dois pratos de pelo menos $200 \times 200 \text{ mm}^2$, capaz de efectuar cargas alternadas (sinusoidais) de frequências desejavelmente até 80 Hz, ciclos sobrepostos a uma carga estática, e com um sistema de medição da força e do deslocamento entre os pratos.

Para provetes de $0,2 \times 0,2 = 0,04 \text{ m}^2$, a carga estática será de 2,21 kN, pelo que a capacidade da prensa deverá ser não inferior 2,5 kN.

5.1.1.2 Sobrepressão Alternada

A Norma ISO 2631-2 refere como limiar de sensibilidade o valor de $v_{ef} = 0,1 \text{ mm/s}$, para valor eficaz da velocidade de vibração em cada banda normalizada de frequência, por 1/3 de oitava, nas bandas de 8 a 80 Hz, valores superiores para as frequências mais baixas, inferiores a 8, até 1 Hz (0,57 mm/s). A vibração a que palmilhas e pantufas estão geralmente sujeitas é consideravelmente maior. Medições feitas em travessas de madeira da linha do ML entre o Corte Inglês e a Praça de Espanha, deram espectros de valores eficazes da velocidade vertical, de que um exemplo representativo (lido em 12-02-2020, às 17h35) é dado nas tabela 1 e figura 7, seguintes:

Tabela 1 – Espectro da velocidade vertical de vibração, de valores eficazes máximos por bandas de frequência normalizadas de 1/3 de oitava.

| | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| f , Hz | 1 | 1,25 | 1,6 | 2 | 2,5 | 3,15 | 4 |
| v_{ef} , mm/s | 0,28 | 0,26 | 0,30 | 0,38 | 0,23 | 0,19 | 0,18 |

| | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| f | 5 | 6,3 | 8 | 10 | 12,5 | 16 | 20 | 25 |
| v_{ef} | 0,16 | 0,24 | 0,31 | 0,48 | 0,47 | 0,71 | 1,12 | 1,66 |

| | | | | | | | | | |
|------|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|
| 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 |
| 2,9 | 4,8 | 7,3 | 12,6 | 23,6 | 10,3 | 10,9 | 15,7 | 5,9 | 5,4 |

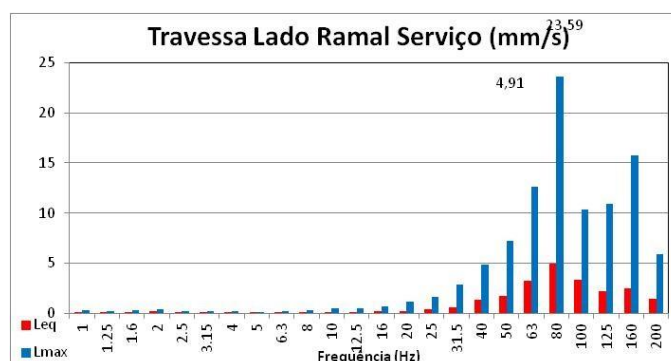


Figura 7 – Exemplo de um espectro da velocidade vertical, medida em travessa, originado por uma passagem de comboio na respectiva via.

O espectro de deslocamentos $z(f)$ obtém-se do de velocidade:

$$z(f) = v(f) / \omega = (1 / 2 \pi) v(f) / f$$

ou, para as frequências normalizadas:

$$z(f_i) = (1 / 2 \pi) v(f_i) / f_i$$

Os deslocamentos, i. e. os acréscimos à deformação estática dos elementos amortecedores, palmilhas e pantufas, correspondentes estão na tabela 2:

Tabela 2 – Espectro do acréscimo de deformação vertical (de vibração), de valores eficazes máximos por bandas de frequências normalizadas de 1/3 de oitava.

| | | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| f , Hz | 1 | 1,25 | 1,6 | 2 | 2,5 | 3,15 | 4 |
| Δz_{ef} , mm | 0,0440 | 0,0328 | 0,0296 | 0,0303 | 0,0149 | 0,0098 | 0,0072 |

| | | | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| f , Hz | 5 | 6,3 | 8 | 10 | 12,5 | 16 | 20 | 25 |
| Δz_{ef} , mm | 0,0052 | 0,0060 | 0,0062 | 0,0076 | 0,0060 | 0,0071 | 0,0089 | 0,0106 |

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 |
| 0,0147 | 0,0192 | 0,0231 | 0,0319 | 0,0469 | 0,0164 | 0,0139 | 0,0156 | 0,0047 | 0,0034 |

Identificando as componentes da vibração em cada banda de frequência, com sinusoides de frequência f_i e com valor eficaz $z_i \equiv \Delta z_i$, a sua amplitude será: $\text{amp}(z_i) = 1,4 z_i$, e a dupla amplitude, i. e. valor pico a pico, $2,8 z_i$.

5.1.2 Sensores

5.1.2.1 Compressão Estática e Dinâmica

A prensa de ensaio, para além da compressão estática, tem de ter capacidade de realizar ciclos de sobrecarga, com frequências desde 1 Hz, até uma frequência máxima, de preferência 200 Hz, ou pelo menos de 80 Hz.

Estes ciclos de sobrecarga devem ser controlados, ou em

→ amplitude de deformação, pico a pico, a estabelecer, que num primeiro valor poderá considerar-se

$$\Delta z = 0,06 \text{ mm, p.}^a \text{ a frequência de 40 Hz; ou em}$$

→ amplitude de sobrecarga, pico a pico, a estabelecer, que num primeiro valor poderá considerar-se

$$\Delta F = k \Delta z = 1,5 \times k \times 0,06 \text{ N, p.}^a \text{ a frequência de 40 Hz,}$$

sendo k a rigidez estática do provete, determinada num ensaio estático prévio, o factor 1,5 geralmente considerado a relação entre a chamada rigidez dinâmica e a estática.

Para um provete de 12 mm (+ pantufa), de $0,20 \times 0,20 \text{ m}^2$, a rigidez (dinâmica) “standard” fica (ver atrás secção 4.2.1):

$$k_{\square} = 24 \times 10^6 \times 0,2 \times 0,2 \text{ N / m} = 0,96 \times 10^6 \text{ N/m} = 0,96 \text{ kN / mm ,}$$

a amplitude, pico a pico, da força vibrante, a 40 Hz,

$$\Delta F = k_{\square} \times \Delta z = 57,6 \text{ N}$$

A relação entre esta amplitude pico a pico, e a força estática é:

$$\Delta F / F_e = 57,6 / 2210 = 0,026 = 2,6 \%$$

6 Procedimento de Ensaio [3]

6.1 Sistema de Ensaio

6.1.1 Máquina e Sistemas de Aplicação da Compressão e de Medição

Características: Capacidade de ensaiar à compressão provetes de 200×200 mm, espessura variável, 12 mm ou superior. Ensaio i) compressão estática; ii) compressão quasi-estática, variável; iii) compressão dinâmica, “sinusoidal” com frequências desde 1 Hz, até 80 Hz, ou mesmo superiores.

6.1.2 Sistema de Medição

iv) sensor de carga, central ao provete; v) sensores de deformação do provete (de aproximação dos pratos), dois diametralmente opostos.

6.1.3 Controle

vi) sistema com capacidade de controlar os valores da força aplicada, estática mais dinâmica, ou da deformação (aproximação dos pratos), estática mais dinâmica.

6.1.4 Sistema de Aquisição

vii) captação dos sinais dos sensores, e sua digitalização, eventual filtragem e tratamento; viii) Possibilidade de memorização e apresentação da evolução (ciclos) de carga e deformação (do provete).

6.2 Testes

6.2.1 Compressão quase estática

Medir previamente o afastamento dos pratos com o provete, sem carga (ou apenas com o peso do prato superior, anotar este peso)

Carregar o provete de $F=0$, até 2,5 kN, e reverter até $F=0$, medindo $F(z)$. Repetir 5 ciclos, adquirir 10 pontos de 0 a 2,5 kN, cada ciclo 2 minutos.

Determinar a rigidez entre os valores de F entre 1,9 e 2,5 kN. Anotar as deformações nestes valores da carga. Anotar os tempos de carga e descarga. Anotar as diferenças entre os ciclos.

Determinar a espessura do provete após os 5 ciclos (medir o afastamento dos pratos à carga 0).

6.2.2 Fluência

Num bastidor, com fusos e porcas, comprimir entre dois pratos o provete até à deformação obtida para a carga de 2,2 kN. Com dois sensores de deslocamentos, medir a espessura inicial do provete, comprimir até à deformação medida para $F=2,2$ kN.

Deixar um semana. Libertar a carga, medir a deformação.

Alternativa: comprimir os pratos com uma carga constante de 2,2 kN. Neste caso medir a deformação após a carga, e uma semana depois.

Libertar a carga e medir a deformação.

6.2.3 Vibração

Na prensa (macaco), com uma compressão inicial de $F_0 = 2,21$ kN, exercer compressões adicionais alternadas (sinusoidais), às frequências normalizadas de 1, 2, 2,5, 3,15, 4, 6,3, 8, 10, etc. Hz, até 80 Hz ou superior, com amplitude de deformação pico a pico de 0,06 mm, ou amplitude de força, pico a pico, 57,6 N. Os valores das compressões alternadas podem ser ajustados, para cada frequência, por exemplo com os valores da tabela 2, e figura 7, e com o valor de k obtido na compressão estática (secção 6.2.1), multiplicado por 1,5.

Registrar os ciclos de carga e descarga. Variam no tempo? A sua forma e posição estabilizam? Fazer pelo menos 10 ciclos? Até estabilizarem? Note-se que na prática os ciclos de carga e descarga são muito mais complexos que o da fig.^a 8, sendo necessário seleccionar um, atingida alguma estabilidade [2].

Anotar os acontecimentos.

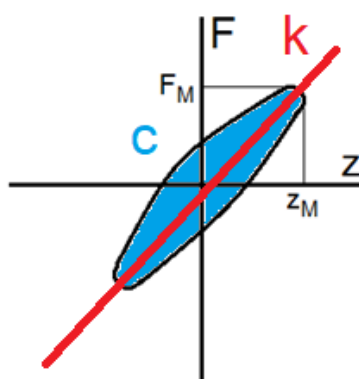


Figura 8 – Ciclo completo de carga e descarga

Determinar k e c :

c poderá ser determinado conforme indicado atrás, secção 4.3.1.

k poderá determinar-se pela melhor recta que representa os pontos de $F(z)$.

Maior resolução para as medições da deformação, poderá obter-se ensaiando 2 ou mais provetes sobrepostos; maior resolução para as medições da força exigirá provetes com maior área, neste caso com maiores cargas estáticas.

Este procedimento, que tem de ser validado experimentalmente, destina-se a placas (palmilhas) e mantas de espessura muito menor que as dimensões da área [4], que funcionam em compressão.

7 Conclusões

O cálculo do isolamento necessita do conhecimento, para além da massa envolvida, das características de rigidez e amortecimento dos materiais viscoelásticos a utilizar. O procedimento de ensaio proposto, a validar experimentalmente, visa, não só a determinação da rigidez, mas também do amortecimento inerente ao material ensaiado.

Este ensaio deverá ser realizado em provetes do material previsto em anteprojecto, em condições semelhantes às da sua utilização, em particular com a carga estática calculada para a linha em estudo.

Referências

- [1] S. Timoshenko, et al. – Vibration Problems in Engineering, fourth edition, John Wiley. 1974.
- [2] Ingenieurbüro Dr. Heiland -- Metro Lisbon, Dynamical Design of MSS Solution 1-3, with Regupol SB 16/100 mats, Bochum, 2010.
- [3] R. Clamroth – Determination of Viscoelastic Properties by Dynamic Testing – Polymer testing, 1981.
- [4] DIN 51513 – 1990-03 – Determination of the Viscoelastic Properties of Elastomers.