

## **VIBRAÇÕES AMBIENTES. CRITÉRIOS DE DANOS E DE INCOMODIDADE. ACTUALIDADE E PERSPECTIVAS FUTURAS**

PACS :43.55.Ng

Schiappa de Azevedo, Fernando <sup>1</sup>; Patrício, Jorge <sup>2</sup>

1 LNEC,

Av. do Brasil

1700-066 LISBOA, Portugal

Tel: 351 21 844 3523; Fax: 351 21 844 3025

E-mail: fschiappa@mail.telepac.pt

2 LNEC,

Av. do Brasil,

1700-066 LISBOA, Portugal

Tel: 351 218 443 273; Fax: 351 21 844 3028

E-mail: jpatricio@lnec.pt

### **RESUMO**

Uma multiplicidade crescente de máquinas, equipamentos e veículos motorizados, geram cada dia mais vibrações mecânicas. Os edifícios recentes amortecem-nas pior, e os monumentos antigos são-lhe naturalmente mais sensíveis. Esta situação é factor de incomodidade para as pessoas e de degradação do património arquitectónico e histórico.

Revêem-se nesta comunicação, os princípios e os critérios normativos usados em Portugal, pelo Inec, na avaliação das vibrações ambientes, no que respeita a incomodidade para as pessoas e a danos nas edificações, referindo-se brevemente o disposto na normalização europeia, e referindo-se alguns casos práticos. Apresentam-se propostas de trabalho para o futuro.

### **1. FONTES E EFEITOS DAS VIBRAÇÕES**

A cravação de estacas, o desmonte de maciços rochosos, a exploração de pedreiras, a demolição de edifícios (em particular com explosivos), são fontes tradicionais de solicitações dinâmicas. A maquinaria motorizada e a sua potência têm aumentado, quer nos estaleiros de obras quer nas instalações industriais. Nos edifícios de habitação e de serviços (comércio e escritórios) multiplicam-se sistemas de ventilação ou condicionamento de ar, de refrigeração, de bombagem de água, e de geração e aproveitamento de energia. Nas cidades cresce o número das redes de tráfego rodoviário e ferroviário, com veículos e composições por vezes de grande tonelagem. Nas povoações tráfego pesado crescente passa rente a habitações, casas e monumentos sensíveis. Em instalações industriais recentes coexistem numa única edificação áreas de fabrico, de escritórios e de lazer. Por outro lado, os edifícios recentes com estrutura e paredes de betão armado, embora mais resistentes, transmitem melhor as solicitações e amortecem pior as vibrações. São cada dia mais as pessoas que, em suas casas sentem ou "ouvem" vibrações, e delas se queixam, referindo principalmente o incómodo nocturno e o receio de danos cosméticos ou mesmo estruturais. Esta situação conduz a uma presença e importância crescentes das vibrações mecânicas como um factor de incomodidade para as pessoas e de degradação do património arquitectónico e histórico.

Os efeitos das vibrações podem classificar-se em três grupos: i) incomodidade para as pessoas; ii) mau funcionamento de equipamentos sensíveis (em hospitais, laboratórios técnicos e científicos, e até em habitações); iii) danos nas edificações (em particular nos edifícios e monumentos antigos). A incomodidade para as pessoas pode ainda subdividir-se em quatro graus: i.i) nociva para a saúde, envolvendo geralmente ferramentas vibratórias; i.ii) inconveniente ou impeditiva da realização normal de trabalho; i.iii) excessiva, eventualmente tolerável em situações transitórias, como por exemplo, durante uma viagem, ou provocada por obras limitadas no tempo; i.iv) sensível, no sossego da habitação ou em outros locais de lazer ou repouso.

## 2 INTRODUÇÃO

### 2.1 - Propagação de ondas pelos solos

A maioria das solicitações chegam às construções através dos solos. Nestes, propagam-se ondas de tensão e deformação de diversos tipos. A velocidade  $c$  com que estas ondas se propagam no solo depende do seu tipo e características de elasticidade ( $E$ ) e de massa ( $\rho$ ):

$$c = (E / \rho)^{1/2} \quad (3)$$

Valores típicos desta velocidade, para as ondas de compressão, designadas por ondas  $p$ , são 330 a 340 m/s para o ar, 1450 a 1530 para a água, 160 a 600 para aterros, 1000 a 2500 para argila compacta, 3000 a 3500 para o betão, 1700 a 7000 para o calcáreo, 4600 a 8400 m/s para rochas duras (granito, basalto e outras).

A extensão no material percorrido por uma onda ( $p$ ) relaciona-se com a velocidade das partículas  $u'$  pela expressão:

$$\varepsilon = u' / c = u' / (E / \rho)^{1/2} \quad (4)$$

As velocidades das ondas de corte, de Rayleigh e de Love são mais baixas (dependendo do coeficiente de Poisson) aproximando-se das ondas  $p$  para rochas mais rijas, e sendo cerca de um terço daquelas para rochas médias.

As frequências presentes nas ondas que atravessam os solos são muito variadas, dependendo do modo de geração, podendo variar entre os 2 e os 100 Hz. Próximo de uma explosão em rochas rijas, o registo de velocidade pode conter frequências superiores aos 100 Hz.

Para ondas sinusoidais, a frequência  $f$  e o comprimento de onda  $\lambda$  estão relacionados

$$\lambda = c / f \quad (5)$$

Para as frequências e solos correntes, os comprimentos de onda são da ordem de grandeza das dimensões dos edifícios.

### 2.2 Atenuação das ondas com a distância

Desde a origem até ao local de interesse as ondas (bi ou tridimensionais) atenuam-se fundamentalmente por dois mecanismos: o geométrico e o de dissipação. Componentes das ondas de frequências mais altas atenuam-se mais rapidamente (ou mais próximo da fonte), ondas mais rápidas (em materiais mais coerentes e rijos) propagam-se a maiores distâncias.

Na prática as ondas não se atenuam sempre com a distância. Em meios estratificados e se a sua geometria o favorecer as ondas podem concentrar-se (lembremo-nos das ondas do mar) ou sobrepor-se a outras reflectidas, podendo medir-se maiores valores da vibração em pontos mais afastados.

### 2.3 Vibração dos edifícios

Os edifícios e seus componentes (pisos, paredes) podem ser modelados como sistemas discretos (constituídos por massas concentradas, molas e amortecedores).

A conhecida equação do movimento  $u$  de um sistema mecânico linear com um grau de liberdade, solicitado na sua base por um deslocamento  $y$  escreve-se, em função da deformação  $z = u - y$ :

$$z'' + (c / m) z' + (k / m) z = y'' \quad (6)$$

Este modelo põe em evidência (para além de  $y''$ ) as frequências próprias do sistema, neste caso, apenas uma,

$$\omega_0 = (k / m)^{1/2} \quad (7)$$

O amortecimento é geralmente referido em percentagem do amortecimento crítico,  $2 (k m)^{1/2}$  :

$$\xi = c / 2 (k m)^{1/2} = \delta / \omega_0 \quad (8)$$

Correntemente, para pequenas oscilações, as estruturas metálicas apresentam amortecimentos relativos,  $\xi$ , da ordem dos 0,3 a 0,5 %, os edifícios de estruturas pré-esforçadas e mistas de aço e betão, da ordem de 0,5 a 0,8 %, de betão armado, de 0,7 a 1,0 %, e os edifícios de alvenaria de pedra e de madeira, da ordem de 1,0 a 1,5 % ; para oscilações significativas estes valores serão tipicamente duplos, em alguns casos ainda superiores.

Designando por  $Z$  a amplitude da deformação e por  $Y$  a amplitude do movimento da base, a amplificação  $Z / Y$  é, na ressonância (para solicitação sinusoidal), aproximadamente:

$$Z / Y \approx 1 / (2 \xi) \quad (9)$$

Para um sistema com 1 % de amortecimento relativo ( $\xi = 0,01$ ), partindo do repouso, esta amplificação verifica-se, a 99 %, após 73 oscilações.

## 2.4 Vibrações continuadas e impulsivas

Designam-se por vibrações impulsivas aquelas que resultam de uma solicitação de curta duração e se prolongam para além dela: vibrações originadas por explosões, pelo trabalho de bate-estacas, prensas de impacto, etc. As vibrações continuadas serão, complementarmente, as que resultam de uma solicitação com duração significativa e coexistem com ela.

As normas distinguem geralmente as vibrações nestes dois tipos. A ISO 4866:1990(E), secção 3.2, distingue-as pela duração da solicitação, conforme  $<$  ou  $>$  que  $\tau = (5 / (2 \pi)) (T / \xi)$ .

## 3 CRITÉRIOS DE ADMISSIBILIDADE

### 3.1 Grandezas a medir. Medição

Os critérios de incomodidade e danos têm sido tradicionalmente expressos em velocidade da vibração, medida ou nos edifícios (nos pisos ou outros elementos), ou junto às suas fundações, velocidade expressa ou em valor máximo (de pico, ou p.p.v.) ou eficaz (r.m.s.).

A norma ISO 2631 requer o cálculo dos espectros de aceleração ou velocidade. A versão de 1997 da sua parte 1 aponta para o uso de uma aceleração pesada na avaliação da incomodidade física. Outras normas requerem o cálculo de funções mais complexas (ver 3.3).

### 3.2 Normas portuguesas e critérios LNEC

A Comissão Técnica de Normalização Portuguesa, CT28 - Acústica e Vibrações, na SC5 - Vibrações, pretende actualizar as NPs, publicando, em breve, para além de uma norma de vocabulário, duas normas sobre danos nas construções e uma sobre sensibilidade humana.

Para as **vibrações impulsivas** a norma portuguesa NP 2074 de 1983 (já revista, aguardando-se a sua publicação) dispõe o seguinte, quanto a danos nas edificações:

Quadro 1 - NP 2074 de 1983 - Valores Limite da Velocidade Máxima (em Módulo) da Vibração na Base da Edificação ( $|v|_M$ , mm/s)

$ v _M \setminus$ tipo de solo $\rightarrow$	incoerentes soltos e coerentes moles	incoerentes compactos e coerentes duros e médios	coerentes rijos
$\downarrow$ tipo de construção \	$c < 1000$ m/s	$1000 < c < 2000$ m/s	$2000$ m/s $< c$
sensíveis	1,75 - 2,5	3,5 - 5	7 - 10
correntes	3,5 - 5	7 - 10	14 - 20
de betão armado	10,5 - 15	21 - 30	42 - 60

Notas: 1 - os primeiros valores valem para um número diário de vibrações superior a três, os segundos para 3 ou menos vibrações diárias; 2 - a grandeza a medir é o módulo resultante da medição das três componentes ortogonais da velocidade de vibração.

O critério proposto na revisão da NP 2074, baseia-se, não no máximo do módulo do vector velocidade, mas no maior do máximos das suas três componentes.

Quadro 2 - NP 2074 revista - Valores Limite do Valor da Maior Componente da Velocidade da Vibração na Base da Edificação ( $v_{i \text{ máx}}$ , mm/s)

$v_M$ \ tipo de solo →	incoerentes soltos e coerentes moles	incoerentes compactos e coerentes duros e médios	coerentes rijos
↓ tipo de construção \	$f < 10$ Hz	$10 < f < 40$ Hz	$40 \text{ Hz} < f$
sensíveis	1,3 - 1,8 - 2,5	2,5 - 3,5 - 5	5 - 7 - 10
correntes	2,5 - 3,5 - 5	5 - 7 - 10	10 - 14 - 20
de betão armado	6,5 - 9 - 12,5	12,5 - 17,5 - 25	25 - 35 - 50

Notas: 1 - os primeiros valores valem para um número total de vibrações superior a cem, os segundos para um número diário de vibrações superior a três, os terceiros valores valem para 3 ou menos vibrações diárias; 2 - a grandeza a medir é a componente mais significativa da velocidade de vibração; 3 -  $f$  é a frequência predominante no espectro de velocidade.

Para as **vibrações continuadas**, enquanto não houver normas portuguesas aplicáveis, o LNEC tem utilizado o seguinte critério, quanto a **incomodidade** para os seres humanos, nas suas habitações ou em locais de trabalho intelectual:

Quadro 3 - Incomodidade: Valores Limite da Velocidade Eficaz da Vibração no Local

$v_{ef}$ (mm/s)	sensação
$v_{ef} < 0,11$	nula
$0,11 < v_{ef} < 0,28$	perceptível, suportável para pequena duração
$0,28 < v_{ef} < 1,10$	nítida, incómoda, podendo afectar as condições de trabalho
$1,10 < v_{ef}$	muito nítida, muito incómoda, reduzindo as condições de trabalho

Nota: Componente vertical, ou horizontal se esta for mais significativa

Quanto a **danos** nas edificações correntes (excluindo monumentos e edifícios sensíveis), o LNEC tem utilizado o seguinte critério:

Quadro 4 - Danos: Valores Limite da Velocidade Eficaz da Vibração, no Local

$v_{ef}$ (mm/s)	efeitos
$v_{ef} < 3,5$	praticamente nulos
$3,5 < v_{ef} < 7$	possibilidade de danos cosméticos em edifícios antigos
$7 < v_{ef} < 21$	fendilhação ligeira nos revestimentos
$21 < v_{ef} < 42$	fendilhação acentuada nos revestimentos e alvenarias
$42 < v_{ef}$	danos consideráveis; possível fendilhação da estrutura de betão armado

Nota: Componente vertical ou horizontal se esta for mais significativa. Nas vibrações continuadas de maior intensidade o factor de crista,  $v_M / v_{ef}$ , é geralmente menor, e este critério corresponde  $\approx$  à limitação de  $v_M < 5$  ou  $10$  mm/s, respectivamente para edifícios antigos ou recentes.

Aguarda-se a publicação de uma nova Norma Portuguesa (na ausência de norma europeia), elaborada na CT 28, cujo critério será o seguinte.

Quadro 5 - Danos: Valores Limite da Velocidade Efectiva da Vibração, no Local

$v_{ef}$ em mm/s	duração inferior a 1 hora/dia	duração superior a 1 hora/dia

construções sensíveis (e1)	1	0,7
construções correntes (e2)	2	1,8
construções reforçadas (e3)	5	5

Notas:  $v_{ef}$  - valor da componente mais significativa; e1 - construções sensíveis: monumentos e outros edifícios históricos, hospitais, casas antigas em centros históricos, depósitos de água e chaminés em alvenaria, etc.. e2 - construções correntes, como edifícios de habitação em boa alvenaria, edifícios industriais menos recentes, etc.. e3 - Construções reforçadas, como edifícios com estrutura de betão armado, edifícios industriais de construção recente, etc..

O critério LNEC de incomodidade, no que respeita às vibrações perceptíveis, simplificado e menos permissivo, relativamente a versões mais antigas, tem a vantagem da simplicidade, mas deve ser aplicado em termos de ordem de grandeza: a duração da vibração é também um parâmetro importante, e a sensibilidade humana varia de pessoa para pessoa. O LNEC cruza geralmente o critério desta norma adiante referido com o seu (quadro 3). Em termos de normalização portuguesa, e na ausência de norma europeia, a tendência irá no sentido da adopção dos critérios da ISO 2631.

Para os equipamentos sensíveis, os níveis de vibração admissíveis devem ser especificados pelos respectivos fabricantes.

Quanto a **ruído estrutural** o LNEC tem utilizado o seguinte critério, que assegurará geralmente a não emissão pelo elemento vibrante, piso, tecto ou parede, de ruído superior a 40 dB(A): valor eficaz da componente da vibração perpendicular ao elemento vibrante acima dos 63 Hz, e nas bandas audíveis:

$$v_{ef}(f \geq 63 \text{ Hz}) < 0,03 \text{ mm/s} \quad (10).$$

### 3.3 Normas internacionais

As normas consultadas pelo LNEC são: Norma DIN 4150 , Vibração estrutural em edifícios, parte 1 (1975) ..., parte 2, efeito nos seres humanos, parte 3 (1986), efeitos nas estruturas; Norma Suíça SN 640312, Efeito das vibrações nas construções (1979); Normas Britânicas BS 6472 (1992), ... exposição humana a vibrações nos edifícios (1 a 80 Hz); BS 7385 - 2 (1993) ... vibrações em edifícios - ... avaliação de danos oriundos de vibrações nas fundações; Norma ISO 2631, ... exposição humana à vibração de todo o corpo, parte 1 (1985), ..., parte 2, (1989), vibração continuada e impulsiva em edifícios.

Nas DIN 4150 e BS 6472, a sensibilidade humana é avaliada por funções complexas: a "intensidade de percepção" empírica, designada por KB, (no intervalo de frequências de 1 a 80 Hz onde  $v$  ,  $a$  , são as amplitudes da velocidade e aceleração, em  $\text{mm} / \text{s}$  e  $\text{mm} / \text{s}^2$  , considerada a vibração aproximadamente sinusoidal, de freq.<sup>a</sup>  $f$  , em Hz),

$$KB = (0,4 / \pi) v / (1 + 0,032 f^2)^{1/2} = (0,2 / \pi^2) a / (1 + 0,032 f^2)^{1/2} \quad (13)$$

cujos valores admissíveis variam de 0,1 para residências, de noite, até 0,6 , para edifícios industriais, para vibração continuada ou muito repetida; para vibrações pouco frequentes e de dia, os valores vão de 4 a 12, nos mesmos locais; e a "dose de vibração" VDV (para vibrações impulsivas e intermitentes)

$$VDV = [ \int_0^T a^4(t) dt ]^{1/4} \quad (14)$$

(em  $\text{m} / \text{s}^{1,75}$  , onde  $a(t)$  é a aceleração, em  $\text{m} / \text{s}^2$  e T a duração da vibração, em s ), cujos valores admissíveis (limite de incomodidade) computados para um dia, em edifícios de habitação, variam de 0,4 a 0,8 para o período diurno (16 h) e é de 0,26 para o nocturno (8h).

Na BS 6472, para vibrações transversais ao corpo humano, os valores admissíveis de velocidade, constantes dos 2 aos 80 Hz , variam entre 0,4 e 3,2  $\text{mm} / \text{s}$  , para as vibrações continuadas, e entre 0,4 e 51,2  $\text{mm} / \text{s}$  , para as impulsivas, até 3 ocorrências. Para vibrações na direcção longitudinal do corpo humano os correspondentes limites, dos 8 aos 80 Hz, são, 0,14 a 1,12  $\text{mm} / \text{s}$  , e 0,14 a 17,9  $\text{mm} / \text{s}$  .

A SN 640312, em valores máximos do módulo do vector velocidade, medido nas paredes junto às fundações, refere o limiar de sensibilidade humana como  $0,1 < |v|_M < 0,4 \text{ mm / s}$ .

A ISO 2631 (cuja parte 1 foi revista em 1997) aplica-se ao conforto humano. A figura 2 mostra a curva base, que multiplicada pelos factores do quadro 5, dá o limite admissível do espectro dos valores eficazes da vibração decomposta nas bandas de 1/3 de 8.<sup>a</sup>.

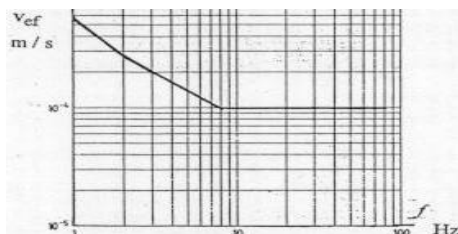


Figura 1 - ISO 2631-2: Curva base a aplicar quando a posição dos ocupantes humanos da construção varia, ou é desconhecida

Quadro 5 - ISO 2631-2 (1989): Factores Multiplicativos a Aplicar à Curva Base

Local	Período	Vibração continuada ou intermitente	Vibração impulsiva, várias ocorr. <sup>s</sup> /dia
locais muito sensíveis	dia ou noite	1	1
habitação	dia	2 a 4	30 a 90
habitação	noite	1,4	1,4 a 20
escritório	dia ou noite	4	60 a 128
oficina	dia ou noite	8	90 a 128

Quanto a danos: a DIN 4150, parte 3, para vibrações de curta duração, estabelece limites para o máximo valor (pico) de qualquer das três componentes da velocidade, entre 3 a 50 mm/s, conforme os edifícios e as frequências predominantes. Para vibrações continuadas, medidas no piso superior, o limite é de 5 mm / s ; a SN 640312 estabelece valores limite admissíveis entre os 3 e os 40 mm / s conforme o tipo de construção, o tipo de vibração (impulsiva ou continuada) e as frequências predominantes; a BS 7385 considera que abaixo do valor de pico de 12,5 mm / s para qualquer das três componentes da velocidade de vibração, medida junto às fundações, há pouca probabilidade da ocorrência de danos, e os seus limites variam dos 15 aos 20 mm / s , conforme o tipo de edifício a es frequências presentes.

#### 4 CASOS PRÁTICOS

Os casos que se apresentam são geralmente casos de incomodidade para as pessoas, embora na sua maioria as mesmas pessoas associem às vibrações que sentem a existência de fendas visíveis nos revestimentos. É necessário a publicação e publicitação das normas e regulamentos que consciencializem as pessoas dos níveis de sensibilidade para os humanos e dos níveis de danos para as edificações, estes muito superiores àqueles.

Os critérios utilizados pelo LNEC têm mostrado boa concordância com a realidade:

1 - Vibrações em habitação, causadas por linha ferroviária subterrânea (metropolitano).

*O edifício é de estrutura de betão armado, com pouco amortecimento. A preocupação da administração da linha é o eventual incómodo para os moradores e o modo como o reduzir.*

Os valores efectivos, global e para frequências nas bandas dos 63 Hz e superiores, obtidos em apartamentos e garagem, durante a passagem de composições, foram ( f são as frequências predominantes no espectro de velocidade):

\ grandeza ponto de med. <sup>a</sup> \	$v_{ef}$ mm/s	$v_{ef}(f \geq 63 \text{ Hz})$ mm/s	f Hz
piso de sala, 3. <sup>o</sup> G, comp. vertical	0,137	0,130	10 ; 50
idem, de noite, comp. vert.	0,083	0,068	50 ; 63 ; 3,15
base de parede, 3. <sup>o</sup> G, comp. trans.	0,029	0,026	50 ; 10 ; 3,15
base de parede, 3. <sup>o</sup> G, comp. long.	0,022	0,019	50 ; 2 ; 2,5 ; 6,3
piso de sala, 1. <sup>o</sup> B, comp. vert.	0,051	0,035	80 ; 4 ; 10
piso, cave, comp. vert.	0,100	0,078	63 ; 80 ; 3,15
base de parede, cave, comp. trans.	0,057	0,046	63 ; 80 ; 5

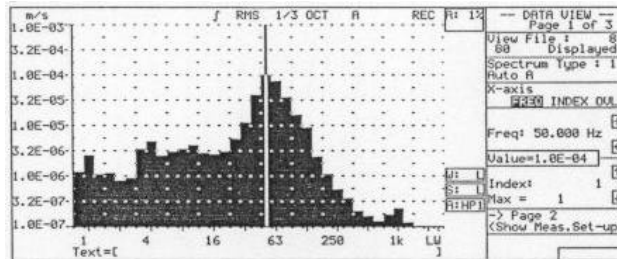


Figura 2 - Espectro da componente vertical da velocidade, eficaz, no piso da sala do 3.<sup>o</sup> G

Apenas um valor,  $v_{ef} = 0,137$ , não passou no critério LNEC de incomodidade ( $v_{ef} < 0,11$  mm/s); mas apenas dois valores,  $v_{ef}(f \geq 63 \text{ Hz}) = 0,019$  e  $0,026$  passaram no critério LNEC da não emissão de ruído estrutural ( $v_{ef}(f \geq 63 \text{ Hz}) < 0,03$  mm/s). O valor máximo do espectro eficaz de velocidade correspondente ao valor global  $v_{ef} = 0,137$  foi  $v_{ef}(f = 50 \text{ Hz}) = 0,100$  mm/s, inferior ao valor 0,2 a 0,4 da ISO 2631. De facto, a passagem dos comboios ouvia-se, mas não se sentia.

## 2 - Vibrações em hotel, causadas por linha ferroviária subterrânea (metropolitano).

*O edifício é de construção tradicional de alvenaria de pedra e madeira, reforçado recentemente, principalmente junto às fundações, com betão armado. A preocupação da administração era o eventual incómodo dos hóspedes.*

Os valores máximo (estimado) e efectivos da componente vertical da velocidade, global, máximo do espectro e para frequências nas bandas dos 63 Hz e superiores, obtidos todos numa sala de estar durante a passagem de composições, foram ( f são as frequências predominantes no espectro de velocidade):

\ grandeza ponto de med. <sup>a</sup> \	$v_{ef}$ mm/s	$v_M$ mm/s	máx( $v_{ef}(f)$ ) mm/s	$v_{ef}(f \geq 63 \text{ Hz})$ mm/s	f Hz
piso, ≈ 12h30min	0,219	0,630	0,180	0,015	25 ; 31,5
idem, referência	0,010	0,058	0,004	0,004	10 ; 50 ; 25
piso, ≈ 18h30min	0,183	0,535	0,140	0,014	25 ; 31,5
piso, ≈ 01h00min	0,129	0,373	0,098	0,017	25 ; 31,5

Nota - De noite os números de carruagens por composição e de passageiros por carruagem são menores.

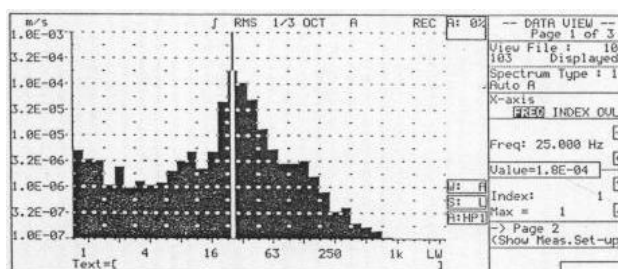


Figura 3 - Espectro da componente vertical da velocidade, eficaz, no piso da sala de um hotel

Neste caso, as vibrações foram sensíveis ao tacto (quase imperceptível a observada de noite), ficando englobadas como perceptíveis no critério LNEC; apenas a das 12h30 se pode considerar abrangida pela ISO 2631, cujo limite, de dia, é de 0,2 a 0,4 mm/s. Quanto a ruído estrutural, a passagem dos comboios foi acusticamente imperceptível, tendo satisfeito folgadoamente a  $v_{ef}(f \geq 63 \text{ Hz}) < 0,03 \text{ mm/s}$ .

### 3 - Vibrações num edifício industrial recente devidas ao funcionamento de uma centrifugadora.

*Durante o funcionamento de uma centrifugadora, com um cesto de 1,60 m de diâmetro, montada no 5.º piso, cuja rotação aumentava de 0 até 750 r.p.m. (12,5 Hz), o edifício entrava em ressonância. A preocupação da administração era a possibilidade de danos cosméticos e mesmo estruturais. O edifício era seguro?*

Tendo-se realizado um ensaio com um saco de 10 kg a  $\approx 0,80 \text{ m}$  do eixo, o valor máximo da componente horizontal da aceleração foi de  $a_M = 104 \text{ mm/s}^2$  na frequência de ressonância de  $f = 4,42 \text{ Hz}$ , donde se estimou um valor máximo para a velocidade de  $v_M = 3,76 \text{ mm/s}$  e um valor eficaz de  $v_{ef} \approx 2,7 \text{ mm/s}$ . O deslocamento máximo,  $d_M \approx 0,14 \text{ mm}$ .

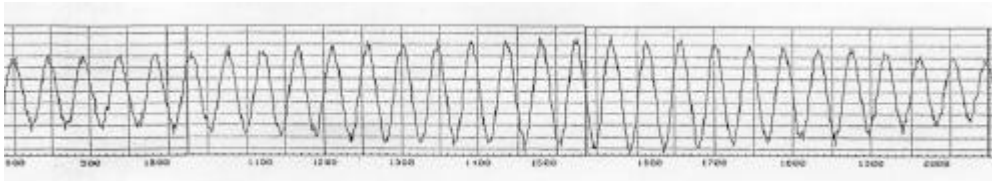


Figura 4 - Registo da aceleração horizontal no 5.º piso próximo da ressonância

A vibração embora francamente sensível e incómoda, não causou quaisquer danos visíveis nos revestimentos.

### Caso 4 - Vibrações em casas de habitação, causadas pela abertura de uma caverna em solo rochoso, com explosivos.

*As habitações situavam-se a cerca de 500 m do local das explosões. As queixas dos moradores incidiam sobre a existência de fendas nos revestimentos e no receio de danos estruturais.*

Tendo-se realizado medições em diversas habitações, as vibrações, impulsivas, não foram sentidas pelo operador. Numa das medições observou-se que a onda de pressão aérea fez oscilar audivelmente uma porta-janela.

A figura 5 mostra um dos gráficos de uma componente horizontal da velocidade, obtido por integração da aceleração. Observam-se duas vibrações impulsivas, a primeira provavelmente oriunda da onda propagada pelo solo e a segunda provavelmente da onda de pressão aérea. O valor máximo (neste caso) foi de  $v_M \approx 0,06 \text{ mm/s}$ .

As fendas existentes nos revestimentos (argamassas) foram atribuídas a retracção, provavelmente devida à existência de argila nas areias.

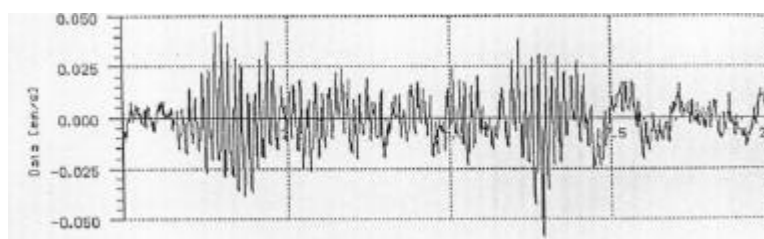


Figura 5 - Registo de componente horizontal da velocidade numa habitação

## 5 CONCLUSÕES

É hoje cada vez maior o número de queixas de vibrações ambientes, principalmente em edifícios com pouco amortecimento, onde as vibrações sensíveis e o ruído estrutural aparecem mais facilmente. As vibrações sensíveis são quase sempre responsabilizadas pelos moradores pelas



fendas nos revestimentos de suas casas, geralmente sem razão (são em geral devidas a assentamentos diferenciais das fundações ou a retração das argamassas). Os critérios simples usados pelo LNEC têm-se, na prática, revelado correctos.

Embora hoje em Portugal exista já da parte das empresas públicas e do estado a consciência da necessidade de prever o impacto de vias férreas (novas ou remodeladas) e de obras de construção, em particular quando recorrem a explosivos, na maioria dos casos os projectos de obras particulares dos edifícios ou das instalações mecânicas, quando existem, ou a instalação destas, não prevêem, nem sequer têm em conta as vibrações que virão a ocorrer.

É assim necessário:

- 1) Consciencializar os cidadãos em geral e os promotores de obras para a necessidade de serem previstas e monitorizadas as vibrações ambientes, dando-lhes a conhecer os valores admissíveis quanto a incomodidade e danos nas edificações.
- 2) Promover o aperfeiçoamento e publicação das normas relativas a incomodidade e danos, bem como a publicação de regulamentação que exija a sua aplicação.
- 3) Promover o desenvolvimento de equipamento de medição da vibrações, incluindo a possibilidade da transmissão das medições a distancia, económico e de fácil manuseamento.

## REFERÊNCIAS

- 1 - Bachmann, H. and Ammann, W - Vibrations in Structures, Induced by Man and Machines, 1987, IABSE.
- 2 - Patrício, J. et al. - Ambiente em Edifícios Urbanos, Lisboa, LNEC, 2000.