



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## CENTRO DE GEOTECNIA DO I.S.T

---



Institute for International Research  
Liberi mandati em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com

### MEDIÇÃO DE RUÍDOS E VIBRAÇÕES PARA AVALIAR A INCOMODIDADE HUMANA

Gustavo Paneiro

TUNNELING 2006

Maio de 2006

IST  
Centro de Geotecnia



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## DEFINIÇÕES

---



Institute for International Research  
Liberi mandati em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com

### RUÍDO

Segundo Sarsby (2000) o ruído pode ser definido como a transmissão de energia em meio sólido líquido ou gasoso, através de súbitas flutuações de pressão, originadas por alguns objectos em vibração (por exemplo, a voz, colunas de som, maquinaria, etc).

### VIBRAÇÕES

No sentido lato, a vibração corresponde a um movimento mecânico periódico, ou aleatório, de um elemento estrutural, movimento esse que se caracteriza por ser repetitivo a partir de uma posição de repouso (Regazzi, R. & Ximenes, G., 2004)

Na Geomecânica e na prática geotécnica, a vibração corresponde a uma resposta elástica do terreno (solos e/ou rochas), aquando da passagem de uma onda de tensão, tendo com origem uma solicitação dinâmica de génese natural (como por exemplo os sismos) ou artificial (explosões, cravação de estacas, etc.).

IST  
Centro de Geotecnia



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## RUÍDO - NORMAS



Institute for International Research  
Liber mandata em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com

O regime jurídico em matéria de ambiente sonoro, está consignado no Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro que constitui o RLPS (Regime Legal sobre Poluição Sonora). Este diploma classifica os locais como “zonas sensíveis” e “zonas mistas” na perspectiva da sua susceptibilidade ao ruído.

### NO RLPS:

**Zonas Sensíveis:** “áreas definidas em instrumentos de planeamento territorial como vocacionadas para usos habitacionais, existentes ou previstos, bem como para escolas, hospitais, espaços de recreio e lazer e outros equipamentos colectivos prioritariamente utilizados pelas populações como locais de recolhimento, existentes ou a instalar”.

**Zonas Mistas:** “zonas existentes ou previstas em instrumentos de planeamento territorial eficazes, cuja ocupação seja afectada a outras utilizações, para além das referidas na definição de zonas sensíveis, nomeadamente a comércio e serviços”.

IST  
Centro de Geotecnia



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## RUÍDO



Institute for International Research  
Liber mandata em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com

### PERÍODO DIURNO:

Compreende o intervalo de tempo entre as 07:00 e as 22:00 horas

### PERÍODO NOCTURNO:

Compreende o intervalo de tempo entre as 22:00 e as 07:00 horas

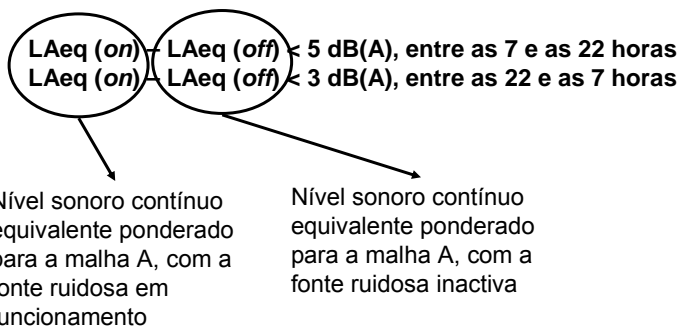
Para cada um destes períodos existe um limite máximo de ruído que é estabelecido segundo o tipo de zona considerado:

Tipo de local	Período Diurno (07-22 horas)	Período Nocturno (22-07 horas)
Zona Sensível	55 dB(A)	45 dB(A)
Zona Mista	65 dB(A)	55 dB(A)

IST  
Centro de Geotecnia

## RUÍDO

Relativamente às actividades ruidosas permanentes, o RLPS (Capítulo II - Actividades ruidosas em geral, artigo 8º - Actividades ruidosas permanentes) proíbe a sua instalação em zonas classificadas como sensíveis, ficando a instalação e exercício de actividades ruidosas remetida para zonas classificadas como mistas, ou na envolvente de zonas sensíveis ou mistas, sujeitas ao cumprimento do seguinte critério:



De acordo com o Artigo 12º do RLPS, no interior de edifícios onde sejam exercidas actividades que requeiram concentração e sossego é aplicável o disposto no n.º 3 do artigo 8º (**critério de incomodidade**).

## RUÍDO

As diferenças apresentadas anteriormente poderão ser incrementadas no caso do ruído particular em causa se manifestar no período de referência, num intervalo de tempo igual ou inferior a 8 horas:

Duração acumulada de ocorrência do ruído particular, T	d [dB(A)]
T < 1 hora	4
1 hora < T ≤ 2 horas	3
2 horas < T ≤ 4 horas	2
4 horas < T ≤ 8 horas	1
T > 8 horas	0

No período nocturno, os valores de d iguais a 4 e 3 indicados no quadro anterior apenas são aplicáveis para actividades com horário de funcionamento até às 24 h. Para aquelas que ultrapassem este horário, aplicam-se os restantes valores, mantendo-se D=2 para qualquer T ≤ 4.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## RUÍDO - METODOLOGIA DE MEDIÇÃO



Institute for International Research  
Lider mundial em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com

1. Análise preliminar da área a monitorizar, seleccionando-se um conjunto de locais de medição onde se considera que os níveis de ruído sejam mais elevados
2. As medições de ruído deverão ser realizadas em ambos os períodos de referência (diurno e nocturno), durante o funcionamento da fonte (ruído ambiente) e na sua ausência (ruído residual)
3. As avaliações de ruído deverão ser realizadas com recurso a equipamento que cumpre os requisitos do RLPS e da norma NP 1730 (1996) – “Acústica – Descrição e medição do ruído ambiente”

### Equipamento:

- Analisador de Ruído de marca *Brüel & Kjaer* modelo 2260;
- Calibrador sonoro de marca *Brüel & Kjaer* modelo 4231;
- Filtros de 1/1 de oitava dos 31,5 Hz aos 8 kHz e 1/3 de oitava dos 16Hz aos 12,5 kHz;
- *Software Noise Explorer™ B&K 7815*;
- Tripé.

IST  
Centro de Geotecnia



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## RUÍDO - METODOLOGIA DE MEDIÇÃO



Institute for International Research  
Lider mundial em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com



Para a realização das medições adopta-se a metodologia que consta da norma NP 1730 (1996):

- Microfone 1,5 m acima do solo;
- Microfone afastado mais de 3,5 m de qualquer superfície reflectora;
- Medições efectuadas com filtro de ponderação A;
- Medição realizada em Fast (e em Impulsivo noutra canal e em simultâneo).

IST  
Centro de Geotecnia



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## RUÍDO - METODOLOGIA DE MEDIÇÃO



Institute for International Research  
Liber mandati em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com

De acordo com as exigências da norma NP 1730 (1996) - "Acústica - Descrição e medição do ruído ambiente" e do RLPS, os parâmetros a analisar são os seguintes:

- $LA_{eq}$  - Nível sonoro contínuo equivalente, expresso em dB(A);
- $LA_{IM}$  - Nível sonoro contínuo equivalente medido em modo Impulsivo, expresso em dB(A);
- $LA_{Min}$  - Nível sonoro mínimo do tempo total de medição, expresso em dB(A);
- $LA_{10}$  - Nível sonoro excedido em 10% do tempo total de medição, expresso em dB(A);
- $LA_{50}$  - Nível sonoro excedido em 50% do tempo total de medição, expresso em dB(A);
- $LA_{95}$  - Nível sonoro excedido em 95% do tempo total de medição; expresso em dB(A);
- $LA_{Max}$  - Nível sonoro máximo do tempo total de medição, expresso em dB(A).

IST  
Centro de Geotecnia



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## RUÍDO - METODOLOGIA DE ANÁLISE



Institute for International Research  
Liber mandati em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com

De acordo com o estabelecido pelo Decreto-Lei 292/2000, de 14 de Novembro, a análise dos resultados obtidos será realizada a dois níveis, analisando-se o cumprimento do **critério de exposição máxima** (estabelecido pelo ponto 3 do Artigo 4º do RLPS) e do **critério de incomodidade** (estabelecido pelo ponto 3 do Artigo 8º do RLPS). Segundo o Artigo 12º, as medições realizadas no interior de edifícios apenas se analisa o cumprimento do critério de incomodidade.

A análise do cumprimento do critério de incomodidade será realizada por comparação dos níveis de ruído ambiente com os níveis de ruído residual.

No entanto, o valor do ruído ambiente deverá ser corrigido de acordo com as características tonais ou impulsivas do ruído particular, passando a designar-se por nível de avaliação,  $L_{Ar}$ , aplicando a seguinte fórmula:

$$L_{Ar} = LA_{eq} + K1 + K2$$

Estes valores serão  $K1 = 3$  dB ou  $K2 = 3$  dB se for detectado que as componentes tonais ou impulsivas, respectivamente, são características essenciais do ruído particular ou serão  $K1 = 0$  dB ou  $K2 = 0$  dB se estas componentes não forem identificadas. Caso se verifique a coexistência de componentes tonais e impulsivas, a correcção a adicionar será de  $K1+K2 = 6$  dB.

IST  
Centro de Geotecnia

O método para detectar as características tonais do ruído dentro do intervalo de tempo de avaliação consiste em verificar, no espectro de um terço de oitava, se o nível de uma banda excede o das adjacentes em 5 dB ou mais, caso em que o ruído deve ser considerado tonal.

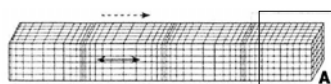
O método para detectar as características impulsivas do ruído dentro do intervalo de tempo de avaliação consiste em determinar a diferença entre o nível sonoro contínuo equivalente,  $LA_{eq, T}$ , medido em simultâneo com característica impulsiva e *fast*. Se esta diferença for superior a 6 dB, o ruído deve ser considerado impulsivo.

Ponto	Ruído Ambiente $LA_{eq}$ (dB(A))	Nível de Avaliação $LAr$ (dB(A))	Ruído residual $LA_{eq}$ (dB(A))	Diferença $LA_{eq}$ (dB(A))
E2	39,1	42,1	37,6	4,5
E7	59,8	62,8	52,8	10,0
E15	63,6	63,6	51,5	12,1

### O fenómeno vibratório...

Do ponto de vista da **GERAÇÃO**, após a libertação súbita de qualquer forma de energia no terreno, desencadeia-se a propagação (radial) de ondas volumétricas e superficiais, que atingem as populações e estruturas próximas, com amplitudes de vibração que dependem de vários factores (Dinis da Gama, 2003):

- Quantidade de energia libertada no fenómeno que as ocasionou;
- Distância entre a origem e o ponto onde se registam os seus efeitos;
- Propriedades transmissoras e dissipadoras dos terrenos envolvidos;
- Resistência dinâmica das estruturas e dos seus componentes mais frágeis.



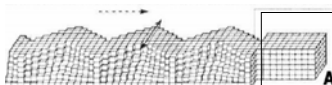
Ondas P



Ondas S



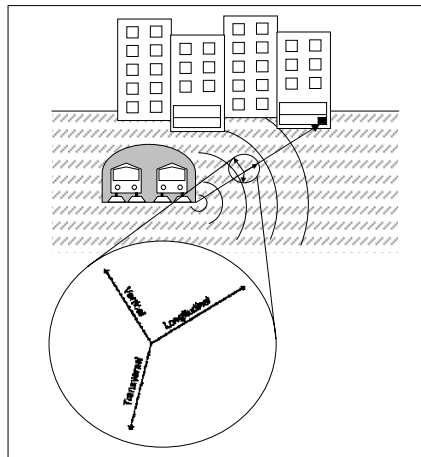
Ondas R



Ondas L

## VIBRAÇÕES

Tendo em consideração os tipos de ondas sísmicas, Kramer (1996) considera que as principais características das vibrações em terrenos são a amplitude (expressa através de grandezas físicas presentes no fenómeno vibratório, deslocamentos, velocidades ou acelerações), a frequência e a duração.



Também as componentes do movimento vibratório ao longo das direcções do espaço são importantes, na medida em que os problemas reais processam-se à escala tridimensional.



## VIBRAÇÕES

### PROPAGAÇÃO

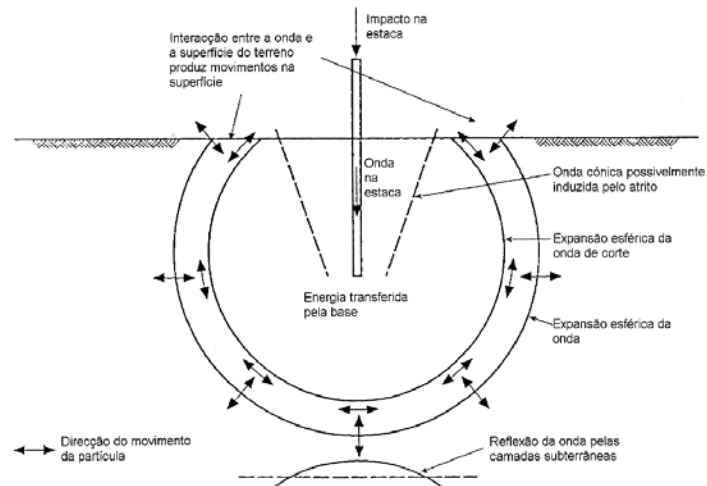
Segundo Sarsby (2000), em qualquer ponto do interior do maciço circundante, o movimento máximo das partículas postas a vibrar é devido a uma das componentes e não à energia total da onda tendo, geralmente, maior importância a componente vertical.

Em resultado dessa desigual distribuição de energia, a velocidade vibratória decresce de modo irregular com a distância percorrida, sendo determinada na prática, uma atenuação da sua amplitude a partir dos valores de pico resultantes das três principais componentes (longitudinal, transversal e vertical).

Os factores que contribuem para a atenuação das vibrações com a distância são (Sarsby, 2000):

- A expansão geométrica das ondas;
- A progressiva separação das três componentes, que provêm das suas diferentes velocidades de propagação;
- A presença de descontinuidades nos maciços, causando reflexões, refracções, difracções e dispersões;
- O atrito interno dinâmico característico das rochas.

### Componentes vibratórias geradas na cravação de uma estaca (Sarsby, 2000, adaptado por Dinis da Gama, 2003)

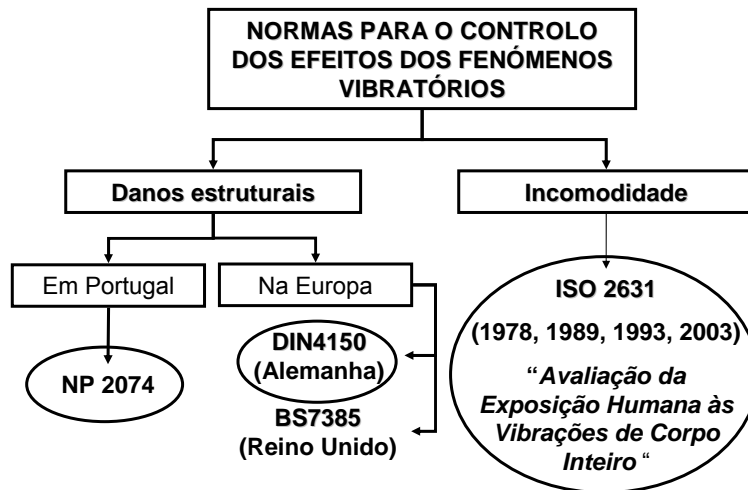


### EFEITOS DAS VIBRAÇÕES

Os efeitos das vibrações podem classificar-se em três grupos, apresentados de seguida, por ordem crescente de severidade e irreversibilidade nos danos:

- Afecção do funcionamento normal de equipamentos ou instrumentos sensíveis (por exemplo em hospitais, laboratórios técnicos e científicos e até em habitações);
- Incomodidade para as populações que sentem as vibrações, causando receios e, conseqüentemente, queixas;
- Danos nas estruturas (em particular, nos monumentos e edifícios altos ou antigos) e nos maciços remanescentes, para o caso de operações de escavação, por exemplo.





### NORMA PORTUGUESA 2074

**“Avaliação da Influência em Construções de Vibrações Provocadas por Explosões ou Solicitações Similares”**

De uma forma conservadora, esta norma permite obter a velocidade da vibração admissível de pico ( $v_L$ ), através do produto de três factores:

- O tipo de terreno de fundação ( $\alpha$ );
- O tipo de construção ( $\beta$ );
- A periodicidade diária das solicitações dinâmicas ( $\gamma$ ).

$$v_L = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma$$

Por análise da NP 2074, o valor máximo admissível alcança os 60 mm/s, incorporando mesmo assim um elevado factor de segurança, justificável para a prevenção de danos estéticos nas estruturas.

Não considera o efeito da frequência.

TIPOS DE CONSTRUÇÃO (que afectam os valores da constante $\beta$ )	CARACTERÍSTICAS DO TERRENO (que afectam os valores da constante $\alpha$ )					
	Solos incoerentes; areias e misturas areia-seixo bem graduadas; areias uniformes; solos coerentes moles e muito moles		Solos coerentes muito duros, duros e de consistência média; solos incoerentes compactos; areias e misturas areia-seixo graduadas; areias uniformes		Rocha e solos coerentes rijos	
	$c_p \leq 1.000 \text{ m/s}$		$1.000 \text{ m/s} < c_p < 2.000 \text{ m/s}$		$c_p \geq 2.000 \text{ m/s}$	
	$\gamma = 1,0$	$\gamma = 0,7$	$\gamma = 1,0$	$\gamma = 0,7$	$\gamma = 1,0$	$\gamma = 0,7$
Construções sensíveis	2,50	1,75	5,00	3,50	10,00	7,00
Construções correntes	5,00	3,50	10,00	7,00	20,00	14,00
Construções reforçadas	15,00	10,50	30,00	21,00	60,00	42,00

$$\gamma = \begin{cases} 1,0 & \longrightarrow < 3 \text{ eventos diários} \\ 0,7 & \longrightarrow > 3 \text{ eventos diários} \end{cases}$$

### DIN 4150 (ALEMANHA)

Fornecer os valores limite de velocidade de vibração de partículas em mm/s, considerando o tipo de estrutura civil e o intervalo de frequência, em Hz, os quais demonstram se encontrarem os edifícios fora de risco de danos.

É considerada como norma-padrão em toda a Europa.

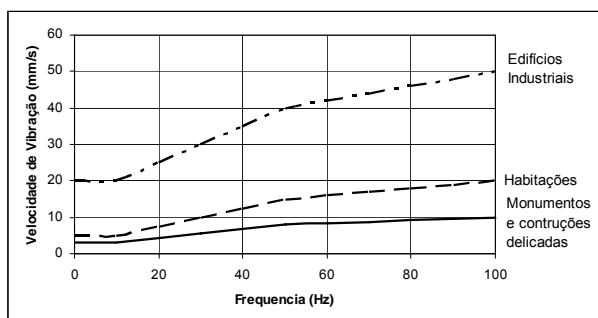
São consideradas três classes de edifícios:

- Edifícios estruturais;
- Habitações;
- Monumentos e construções sensíveis.

As frequências são analisadas em três intervalos, ou seja, valores menores que 10 Hz, valores entre 10 – 50 Hz e valores entre 50 – 100 Hz. A norma prevê que, para frequências acima de 100 Hz, a estrutura suporta níveis altos de vibração.

Os valores de velocidade de vibração de partícula definidos variam de 3 mm/s, no caso de monumentos e construções delicadas com frequência inferior a 100 Hz, até 50 mm/s, no caso de estruturas industriais com frequência entre 50 – 100 Hz.

TIPOS DE ESTRUTURAS	FUNDAÇÃO			ANDAR MAIS ALTO DO EDIFÍCIO
	Frequência (Hz)			
	< 10	10 – 50	50 – 100	Qualquer Frequência
Industrial	20 mm/s	20 – 40 mm/s	40 – 50 mm/s	40 mm/s
Habitacões	5 mm/s	5 – 15 mm/s	15 – 20 mm/s	15 mm/s
Edifícios particularmente delicados	3 mm/s	3 – 8 mm/s	8 – 10 mm/s	8 mm/s



### ISO 2631

#### “Avaliação da Exposição Humana às Vibrações de Corpo Inteiro”

Em Portugal, para a avaliação das vibrações admissíveis dos prédios quanto ao conforto das populações, não existem normas oficiais. Assim, recomendam-se procedimentos estabelecidos pela Norma ISO 2631, da *International Standardization Organization*, com sede na Suíça.

Trata-se, portanto, de uma Norma Internacional destinada à “Avaliação da Exposição Humana às Vibrações de Corpo Inteiro”, que define e fornece valores numéricos dos limites de exposição a vibrações transmitidas ao corpo humano, na amplitude de frequências entre 1 e 80 Hz, para vibrações periódicas e não periódicas.

Os limites admissíveis de vibração são definidos para os três critérios geralmente reconhecíveis de preservação do conforto, eficiência de trabalho e segurança ou saúde, denominados, respectivamente: nível de conforto, nível de eficiência (fadiga) e limite de exposição. Estes limites estão especificados em termos de frequência vibratória, grandeza de aceleração, tempo de exposição e a direcção da vibração em relação ao tronco humano.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## VIBRAÇÕES – NORMAS



Institute for International Research  
Liberi mandati em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com

Em termos de conteúdo, a Norma está dividida em duas partes principais:

PARTE	DENOMINAÇÃO
ISO 2631-1	Requisitos gerais
ISO2631-2	Relativamente a vibração induzida por impacto em prédios

A ISO 2631-1 define métodos de medida da vibração de corpo inteiro e indica os principais factores que se combinam para determinar o grau de aceitabilidade à exposição da vibração

A ISO 2631-2 apresenta um guia para aplicação da ISO 2631-1 sobre a resposta humana à vibração dos prédios, incluindo curvas ponderadas, em função da frequência, de igual nível de perturbação para os seres humanos, assim como métodos de medição a serem utilizados.

A direcção de propagação das vibrações relaciona-se com um sistema de coordenadas do corpo humano em posição anatómica normal, da forma seguinte: segundo o eixo Z no sentido dos pés à cabeça, o eixo X no sentido das costas ao peito e o eixo Y no sentido do lado direito ao esquerdo (Figura 20).

IST  
Centro de Geotecnia

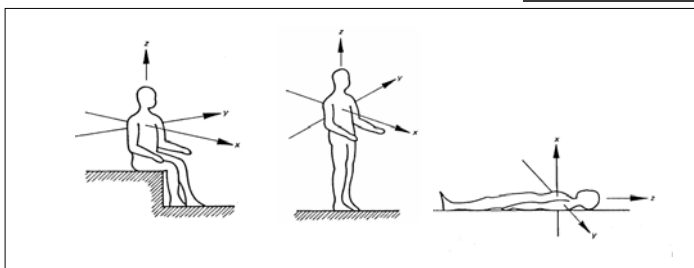


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## VIBRAÇÕES – NORMAS



Institute for International Research  
Liberi mandati em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com



### RECOMENDAÇÕES:

- Devem realizar-se medições tão perto quanto possível do ponto ou área na qual a vibração é transmitida ao corpo;
- Deve-se ainda medir a vibração na superfície estrutural que suporta as pessoas, no(s) ponto(s) de maior intensidade, tipicamente: no centro da laje dos pisos, para vibrações verticais e nos pisos próximo às paredes, por exemplo nos vãos das portas e janelas, para vibrações horizontais;
- Quando existir qualquer elemento elástico, é recomendável interpor alguma forma de suporte rígido entre o sujeito e o elemento elástico.

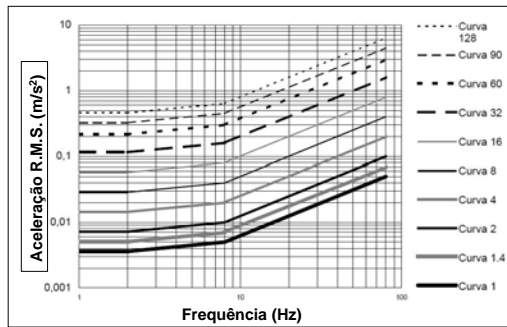
IST  
Centro de Geotecnia



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## VIBRAÇÕES - NORMAS

Institute for International Research  
Liberando a inovação e informação para empresas  
www.iirportugal.com



LOCAIS	HORÁRIO	VIBRAÇÃO CONTÍNUA OU INTERMITENTE	OCORRÊNCIAS DIÁRIAS
Hospitais, precisão	Dia ou noite	1	1
Residências	Dia	2 a 4	30 a 90
	Noite	1,4	1,4 a 20
Escritórios	Dia ou noite	4	60 a 128
Oficinas	Dia ou noite	8	90 a 128

IST  
Centro de Geotecnia



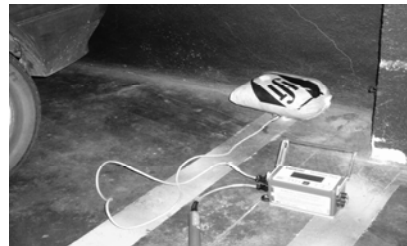
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## VIBRAÇÕES - MONITORIZAÇÃO

Institute for International Research  
Liberando a inovação e informação para empresas  
www.iirportugal.com

### EQUIPAMENTOS

Sismógrafo MiniMate Plus da Instancel Inc.



Geofone triortogonal  
piezoelétrico

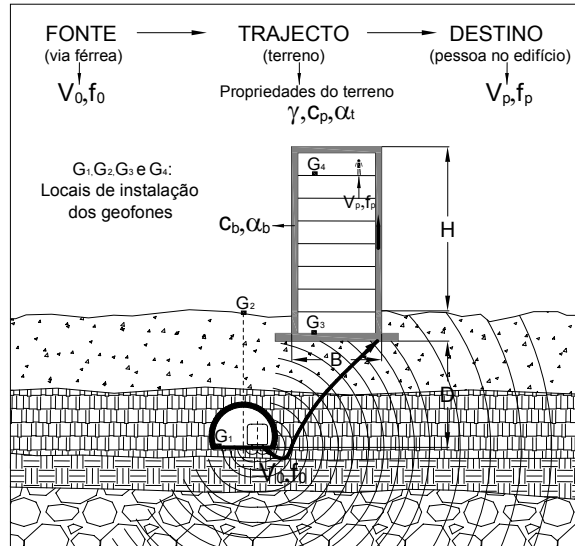
**Standard** – 0,254 a 254 mm/s

**Low Level** – 0,254 a 254 mm/s

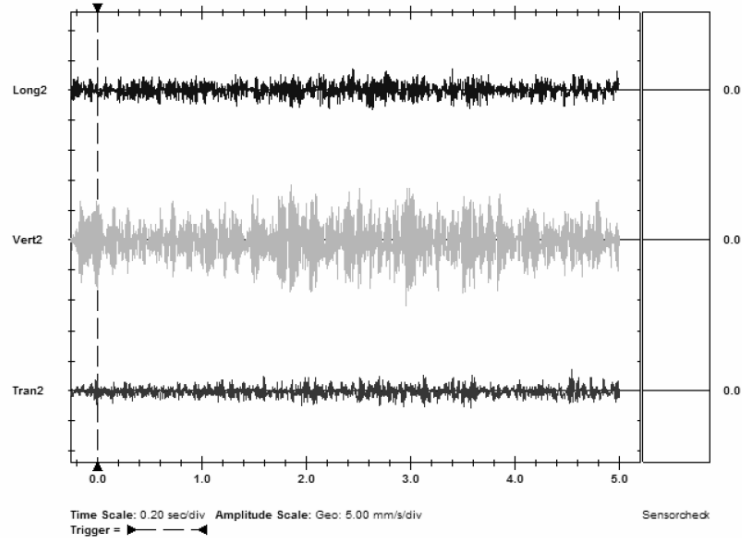
SOFTWARE

IST  
Centro de Geotecnia

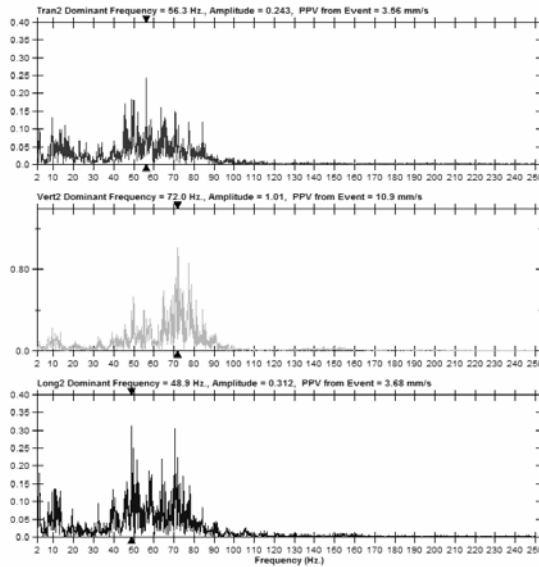
MÉTODO DE MONITORIZAÇÃO



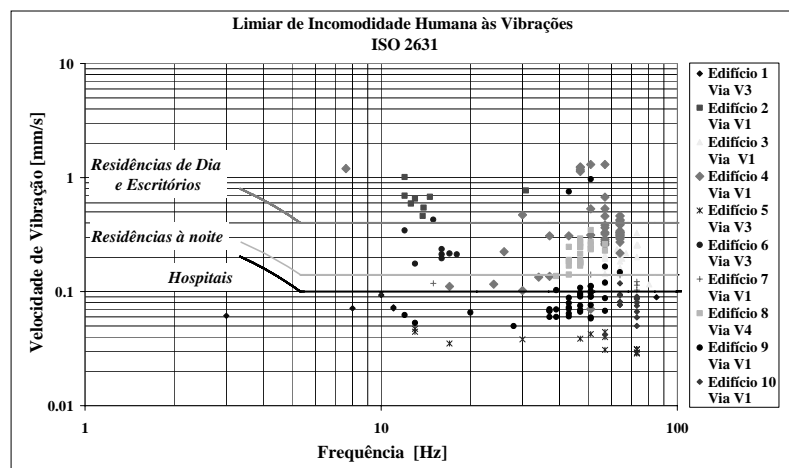
Exemplo de um registo da amplitude de vibração



## Exemplo de um registo – Tranformada de Fourier (Frequências)



## Comparação dos registos com a Norma ISO 2631



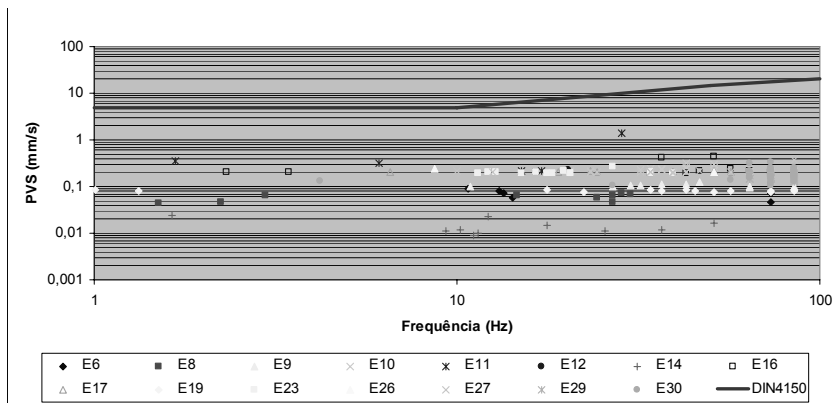


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

## VIBRAÇÕES - NORMAS

Institute for International Research  
Liberi mandati em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com

### Comparação dos registos com a Norma DIN 4150



IST  
Centro de Geotecnia



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

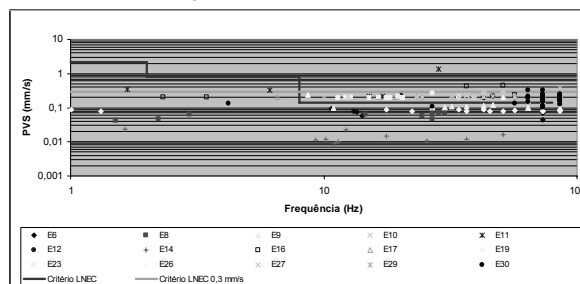
## VIBRAÇÕES - NORMAS

Institute for International Research  
Liberi mandati em formação e informação para empresas  
www.iirportugal.com

### CRITÉRIOS DE CONFORTO DO LNEC

Os Critérios de Conforto estabelecidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil para a incomodidade humana, consideram os seguintes limites da velocidade de vibração:

- Velocidade de vibração menor que 0,3 mm/s;
- Valor eficaz de vibração (RMS) menor que 0,14 mm/s para frequências de 8 a 80 Hz;
- Valor eficaz de vibração menor que 0,78 mm/s a 2 Hz;
- Valor eficaz de vibração menor que 2,2 mm/s a 1 Hz, de noite.



IST  
Centro de Geotecnia

### No ruído...

Intensidade do ruído

$$L = \text{Log} \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{ [bels]} = 10 \text{Log} \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{ [decibéis]}$$

Intensidade do ruído  
ambiente

No ruído, efectua-se uma mudança de escala no que respeita à diferença de pressão provocada por fenómenos de ruído, para melhor interpretação dos dados, passando-se para a unidade Décibel, que corresponde a uma escala logarítmica.

### Nas vibrações...

Tal como no ruído, poder-se-á efectuar esta mudança de escala através da relação:

$$v(\text{dB}) = 20 \text{Log} \left( \frac{V}{V_{\text{ref}}} \right)$$

Amplitude (velocidade de vibração) do evento

Velocidade de vibração a 0 dB

O valor da velocidade de vibração de referência depende do considerado, podendo ir de  $10^{-6}$  mm/s (para o caso Europeu) a  $10^{-8}$  mm/s (para o caso americano). N entanto, outros valores, de menor expressão, na gama de valores apresentados, poderão ser adoptados.