

RUÍDO E VIBRAÇÕES INERENTES AO AVANÇO DE UMA OBRA GEOTECNICA URBANA – CAIS DO SODRÉ

NOISE AND VIBRATIONS INHERENT TO THE ADVANCE OF AN URBAN GEOTECHNICAL WORK – CAIS DO SODRÉ

Navarro Torres, Vidal, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal*, vnavarr@mail.ist.utl.pt

Dinis da Gama, Carlos, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal*, dgama@ist.utl.pt

Barroso, Fernando, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal*, pcm4028@mail.ist.utl.pt

RESUMO

A maioria das obras geotécnicas realizadas em zonas urbanas ocasiona impactes ambientais, tais como ruídos e vibrações, causados pelos equipamentos mecânicos operações de construção, os quais devem ser adequadamente controlados. Quando estas acções ultrapassam os níveis admissíveis, causam incomodidade humana que pode manifestar-se através de alterações neurológicas, desconforto, problemas de saúde, diminuição da capacidade de concentração e eficiência no trabalho.

Para além da protecção ambiental, há aspectos de responsabilidade social que é imprescindível considerar, pelo que são necessários estudos e medições anteriores à obra (situação de referência) e a sua subsequente monitorização durante as diferentes fases do avanço, para identificar eventuais impactes e tomar as necessárias medidas correctivas.

ABSTRACT

Most geotechnical works conducted in urban areas cause environmental impacts, such as noise and vibrations, caused by machinery and construction operations, that must be adequately controlled. When these physical actions exceed the permissible levels, they may cause human discomfort, neurological alterations, problems of health, reduction of concentration capacity and less efficiency in the work.

Besides environmental protection there are also social responsibility aspects that must be taken into account, so it is essential to perform field studies since the characterization of the reference (baseline) situation and subsequent measurements at different stages of construction in order to identify environmental effects and corrective actions when required.

1. INTRODUÇÃO

As obras geotécnicas urbanas têm de ser realizadas de forma sustentável e nomeadamente considerando a componente ambiental. Dentro desta componente, o ruído e vibrações constituem os descritores ambientais que merecem uma atenção especial, por serem os que podem causar maior incomodidade às pessoas residentes ou utentes, com são as ruas e estações de transportes públicos.

A avaliação do ruído e vibrações precisam, nesses casos, de uma caracterização na situação de referência, seguida da monitorização nas sucessivas fases do avanço da obra, para determinar se a alteração afecta a qualidade ambiental ou não. Para este objectivo é necessário realizar medições "in situ" e comparar os resultados obtidos com as Normas de qualidade em vigor.

Para o caso estudo, inclui-se a obra que envolve a estação de comboios e de metro no Cais do Sodré, onde se realizaram campanhas de monitorização de ruído e vibrações em simultâneo e as Normas de qualidade ambiental foram o Decreto-Lei n.º 292/2000 e a Norma ISO 2631.

2. O RUÍDO, AS VIBRAÇÕES E AS NORMAS DE QUALIDADE AMBIENTAL

2.1 O ruído e o ambiente nas obras geotécnicas urbanas

2.1.1. Indicadores para a avaliação

Os impactes ambientais das construções podem ser divididos em três categorias (Sarsby, 2000): contínuos, transientes ou intermitentes. No caso de obras geotécnicas urbanas, o ruído é intermitente, pelo que a pressão sonora depende do tempo e da frequência.

O indicador mais usado é o *Nível Contínuo Sonoro Equivalente* $L_{Aeq,T}$ [5] que é o valor médio energético do som ao longo do intervalo de tempo e é definido como o valor do nível de pressão sonora em dB (A) do som contínuo e estável, que dentro de um intervalo de tempo T , possui a mesma pressão sonora quadrática média que o ruído medido e cujo valor varia com o tempo (ISO 1996). A equação (1) permite calcular este indicador em função da pressão sonora instantânea $P_{A(t)}$ (Pa), do intervalo de tempo $T = (t_2 - t_1) = \Delta t$ de duração (s), da pressão de referência $P_o = (2 \times 10^{-5} \text{ Pa ou } 20 \mu \text{ Pa})$ e do nível de pressão sonora ponderada A para a amostra i L_{pAi} (dB).

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_A^2(t)}{P_o^2} dt = 10 \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T 10^{0.1 L_{pAi}} \right] \quad (1)$$

Para a caracterização das características impulsivas do ruído utiliza-se o *nível pico* ou máximo $L_{máx}$, que é o nível em dB (A) que corresponde ao valor máximo da pressão acústica instantânea, para um valor máximo da pressão acústica instantânea $P_{máx}$ (Pa) e para uma pressão de referência P_o (Pa), calculado com a equação (2).

$$L_{máx} = 20 \log \frac{P_{máx}}{P_o} \quad (2)$$

Quando se verifica que um ponto de medição é influenciado por várias fontes do ruído o nível sonoro resultante L_{suma} em função das pressões de cada fonte p_i (equação (3)) [1].

$$L_{p_{suma}} = 10 \cdot \log \left(10^{0.1 p_i} \right) \quad (3)$$

A percepção sonora de uma pessoa ante um ruído é função da pressão sonora e a sua frequência, pois a sensibilidade máxima do ouvido humano está na gama de 2000 a 5000 Hz e a mínima nas frequências muito altas ou muito baixas. O nível da pressão sonora e o da sonoridade coincidem para uma frequência de 1000 Hz, ou seja nesta frequência coincidem os fonios e os decibéis. Os distintos eventos sonoros que provocam o mesmo nível de sonoridade determinam as curvas isosónicas (Fig. 1 esquerda) ou de igual nível de sonoridade. Existem 3 tipos de curvas de ponderação denominadas Rede A, B e C e para fins ambientais a mais usada é a A que atenua progressivamente as frequências inferiores a 1000Hz eliminando as muito altas e muito baixas (Fig. 1 direita).

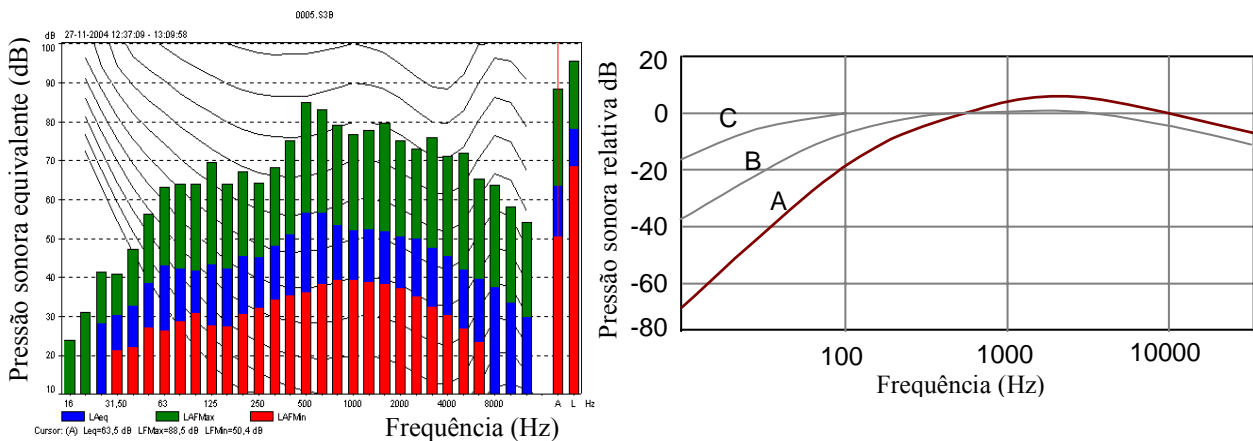


Figura 1- Curvas isonónicas (esquerda) e curvas de ponderação (direita)

A propagação das ondas sonoras é muito complexa, mas para as condições de baixa velocidade do ar e pouca turbulência, existentes na zona das medições, permite estimar a atenuação das intensidades sonoras com a distância, utilizando a seguinte equação:

$$L_2 = L_1 - 20 \text{Log}(D_2 / D_1) \quad (4)$$

onde L_2 é o nível de ruído a uma distância D_2 da fonte, L_1 é o nível de ruído na fonte e D_1 é a distância de 2 metros da fonte.

2.1.2 Norma de qualidade ambiental sonora

A Norma de qualidade sonora considerada é o Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro[2] que constitui o Regime Legal sobre Poluição Sonora, também designado por Regulamento Geral do Ruído (RGR) classifica os locais como “zonas sensíveis” e “zonas mistas” (Tabela 1).

Tabela 1 – Padrão de qualidade ambiental do ruído[2]

| 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) |

O Decreto-Lei n.º 292/2000 de 14 de Novembro no Anexo 1, indica que o valor do LAeq do ruído ambiente determinado durante a ocorrência do ruído particular deverá ser corrigido de acordo com as características tonais ou impulsivas do ruído particular, passando a designar-se por nível de avaliação, LAr, aplicando a seguinte fórmula: $LAr = LAeq + K1 + K2$, onde K1 é a correcção tonal e K2 é a correcção impulsiva.

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.

2.2 A velocidade de vibração de partículas e a norma iso 2631

2.2.1. Conceito de propagação atenuação das ondas no terreno

Considerando a propagação das ondas no sentido unidimensional num terreno homogéneo (Fig. 2) pode-se obter as expressões[9] apresentadas a seguir.

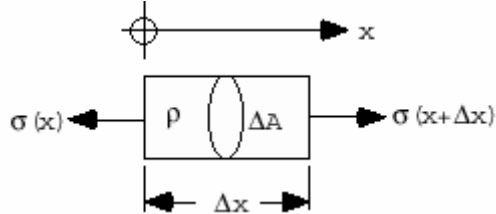


Figura 2 – Esquema da propagação das ondas no sentido unidimensional

Pela segunda lei de Newton o balanço de forças precisa $\sum_x F_x = m \cdot a_x$, onde $\sum_x F_x$ é o somatório das forças no sentido x , m é a massa e a_x é a aceleração no sentido x . Como a força é o produto do esforço pela área (ΔA), resulta:

$$[\sigma(x + \Delta x) - \sigma(x)]\Delta A = \rho_r \Delta A \Delta x a_x \quad (5)$$

Baseado na equação (5) e aplicando os padrões de cálculo diferencial, obtém-se a seguinte equação:

$$\rho_r a_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{[\sigma(x + \Delta x) - \sigma(x)]}{\Delta x} = \frac{d}{dx}(\sigma_{xx}) \quad (6)$$

Substituindo a aceleração $a_x = \partial^2 u / \partial t^2$ e $\sigma_{xx} = \lambda \theta + 2u(\partial u / \partial x)$ a equação da elasticidade anterior resulta uma geral da propagação unidimensional

$$\rho_r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} + 2u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (7)$$

a equação (8) expressa a atenuação da vibração em função do factor α , denominado *atenuação geométrica*, que segundo vários autores[3] pode ser expresso em função das velocidades vibratórias de pico pela relação:

$$v_2 = v_1 e^{-\alpha(D_2 - D_1)} \quad (8)$$

onde v_1 é a velocidade de vibração à distância d_1 , v_2 é a velocidade de vibração à distância $d_2 > d_1$, e α é o factor de atenuação que depende do tipo de terreno.

2.2.2 A Norma ISO 2631-2:1989

Esta Norma ISO 2631-2:1989[8] foi tem como objectivo a *avaliação da exposição humana à vibração de corpo inteiro* e está dividida em duas partes principais (Tabela 2).

Tabela 2 – Partes da Norma Internacional ISO 2631 - Avaliação da exposição humana à vibração de corpo inteiro

| Parte | Denominação |
|------------|--|
| ISO 2631-1 | Requisitos gerais |
| ISO2631-2 | Relativamente a vibração induzida por impacto em prédios |

A *ISO 2631-1* define métodos de monitorização das vibrações e os seus efeitos nas pessoas, ao nível do corpo inteiro e indica os principais factores que se combinam para determinar o grau de aceitabilidade à exposição da vibração.

Adicionalmente, contem informações e orienta quanto aos possíveis efeitos da vibração sobre a saúde, o conforto, o limite de percepção, na faixa de 0.5 a 80Hz, e o enjoo, para frequências entre 0.1 e 0.5 Hz.

3. CASO DE ESTUDO

Refere-se a monitorização na situação de referência e nas sucessivas fases de avanço da obra denominada “Execução dos Toscos do Edifício da CP/REFER – Interface do Cais do Sodré, Lisboa” tendo-se definido previamente 5 pontos de medição(Fig. 3).

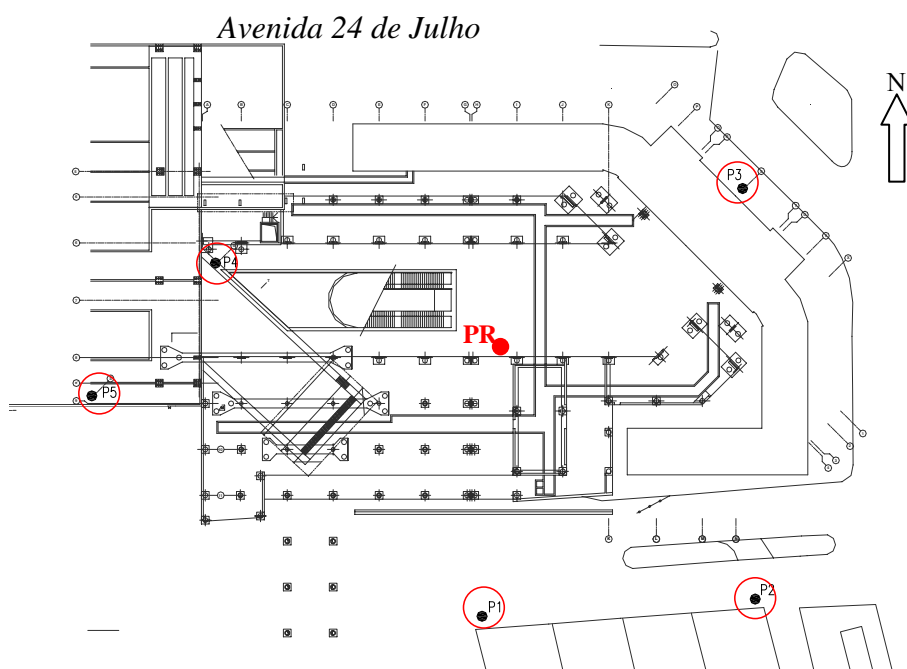


Figura 3 – Localização do pontos de medição do ruído e vibrações[5]

3.1 Níveis de incomodidade humana devido ao ruído

As medições para a situação de referência foram realizadas no dia 26 de Novembro do ano 2004 antes do inicio das obras e as monitorizações 10 de Fevereiro e 05 de Maio de 2005.

Para este fim foi utilizado um sonómetro Bruel & Kjaer 2260 cujos registos foram armazenados na sua memória através do Software BZ 7201 que permite gravar simultaneamente parâmetros (estáticos) de Banda Larga e parâmetros (discretos e estáticos) em Banda de Oitava (Fig. 4, exemplo dos pontos de medição 1 e 2).

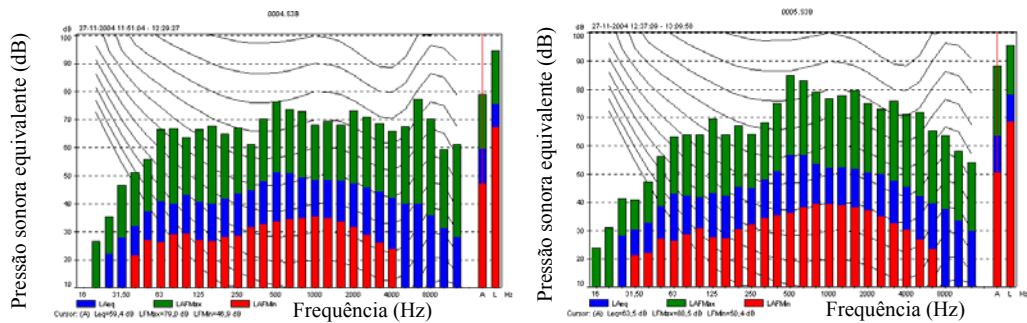


Figura 4 – Resultados das medições nos pontos 1 e 2 na situação de referência

A atenuação do ruído na situação de referência a partir dos pontos de medição (Fig. 5 esquerda) para as cinco zonas objecto de medições, até uma distância de 100 metros da fonte, variaram de 33 a 49 dB e ao ponto central PR varia de 35.3 dB (1163.7 μ Pa) a 55.8 dB(12488.23 μ Pa) dando um total de 60.26dB (20607.7 μ Pa) (Fig. 5 direita).

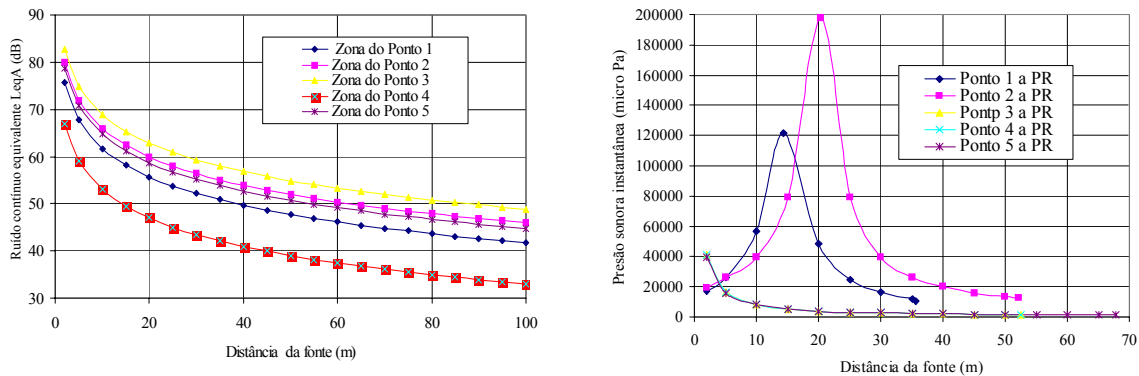


Figura 5 – Atenuação com a distância desde os pontos de mediação[5]

O ruído particular corrigido com as características tonais ou impulsivas, designa-se por *nível de avaliação*, LAr, que para o caso estudo resultou como apresentado na Tabela 3, verificando-se que em termos de *afecção* na situação de execução da obra na 1ª monitorização nos pontos 1, 4 e 5 houve alteração desfavorável e na 2ª monitorização só no ponto 1.

Em termos de qualidade ambiental definida pelo Decreto-Lei n.º 292/2000 e considerando a zona como *mista* já na situação de referência o ruído ultrapassava o valor máximo permitido quase em todos os pontos e na situação de obra acentua-se ligeiramente esta diferença.

Tabela 3 –Comparação do ruído na situação de referência com as medições dos dias 10/02/2005 e 5/05/05 nos cinco pontos previamente definidos[5,6,7]

| Ponto medição | Situação de referência LAr(dB) | | Monitorização LAr (dB) | | | |
|---------------|--------------------------------|--------------|------------------------|--------------|------------|--------------|
| | 26/11/04 | D.L.292/2000 | 10/02/2005 | D.L.292/2000 | 05/05/2005 | D.L.292/2000 |
| 1 | 62.40 | -2.60 | 70.05 | +5.05 | 65.71 | +0.71 |
| 2 | 66.54 | +1.54 | 62.37 | -2.63 | 60.38 | -4.62 |
| 3 | 72.85 | +7.85 | 70.94 | +5.94 | 70.99 | +5.99 |
| 4 | 69.23 | +4.23 | 71.70 | +6.70 | 67.45 | +2.45 |
| 5 | 68.92 | +3.92 | 75.22 | +10.22 | 69.45 | +4.45 |

3.2 Níveis de incomodidade humana perante vibrações

Para avaliar a incomodidade humana devida às vibrações e de acordo com a norma ISO 2631[9], efectuou-se a monitorização das vibrações com os seguintes objectivos:

- A nível absoluto: avaliar as vibrações em situação de obra para quantificar os níveis de vibração junto dos receptores sensíveis, comparando-os com os máximos permitidos na norma ISO 2631 e identificará as populações expostas a níveis não regulamentares;
- A nível relativo: comparar a magnitude das vibrações ocasionadas pelas acções de obra com as magnitudes características da situação de referência

Na prática, a incomodidade humana causada pelas obras no Cais do Sodré foi analisada em função das velocidades de vibração registadas, dividindo-as em dois grupos: as que constituem a situação de referência (vibrações habituais do trânsito pesado, por exemplo) cujas medições foram efectuadas dia 26 de Novembro de 2004 e, aquelas comprovadamente oriundas das obras actualmente em curso no Cais do Sodré foram medidas em 10 de Fevereiro e a 5 de Maio de 2005 nos mesmos locais e à mesma hora dos registos efectuados na situação de referência. A média das velocidades de vibração registadas é o indicador estatístico que melhor caracteriza a situação em causa com o objectivo de avaliar a incomodidade humana relativamente às vibrações em diversos locais, que a Norma ISO 2631 distingue em vários tipos (ver Tabelas 4 e 5 e as Figs. 6 e7): hospitais, residências e escritórios durante os períodos diurno e nocturno.

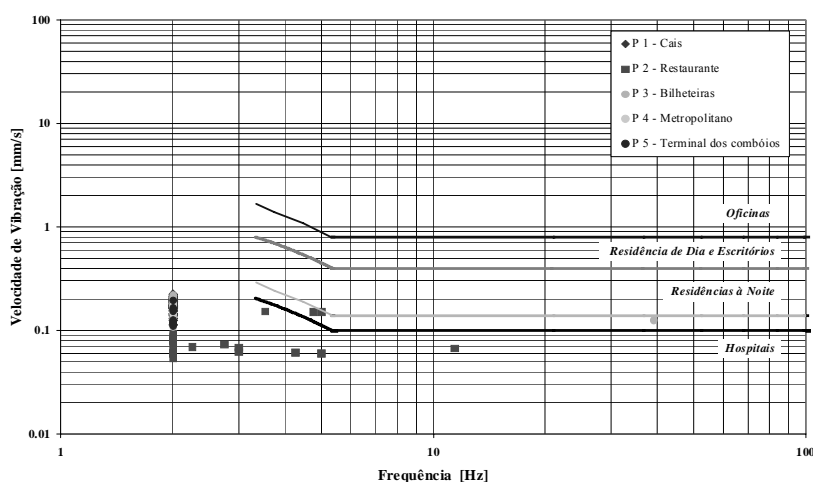


Figura 6 – Limites da Norma ISO 2631 e vibrações registadas em 10-Fev.-2005[6]

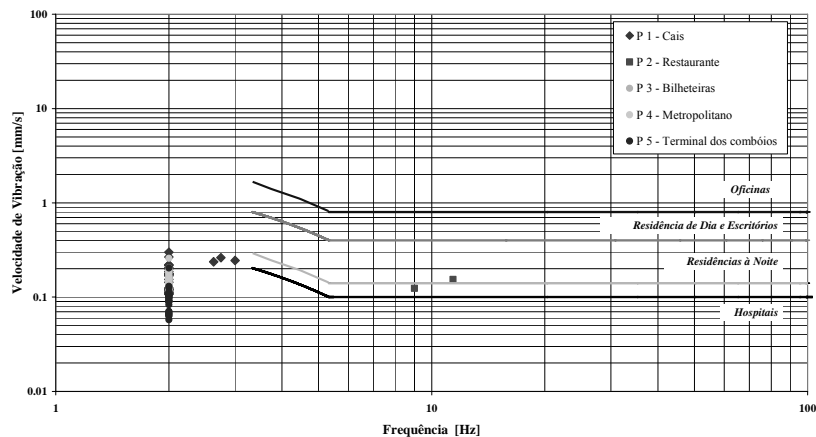


Figura 7 – Limites da Norma ISO 2631 e vibrações registadas em 5.Mai.2005[7]

O quociente entre as médias do valor de pico (PVS) das velocidades de vibração na situação de referência e na situação de obra, define dois tipos de *factores de afectação*, respectivamente os relativos, calculáveis pela expressão 9 e os absolutos, dados pela expressão 10:

$$FA_R = \frac{\text{Velocidade de vibração na situação de obra}}{\text{Velocidade de vibração na situação de referência}} \quad (9)$$

$$FA_A = \frac{\text{Velocidade de vibração na situação de obra}}{0.40 \text{ mm/s}} \quad (10)$$

Nesta última relação (Expressão 10) considerou-se que os limites admissíveis típicos dos frequentadores da Estação do Cais do Sodré são assimiláveis aos correspondentes a residências durante o dia e a escritórios, ambos definidos pela Norma ISO 2631 como iguais a 0.40 mm/s.

No registo das vibrações foi tomada em devida consideração a natureza dos eventos, geralmente oriundos da circulação de automóveis e veículos pesados de transporte de passageiros, que foram devidamente referenciados assim como o tipo de terreno de fundação. Entre os vários processos de registo possíveis, optou-se pelo modo manual, para garantir que as situações correspondentes a intensidade de vibração mais elevadas fossem detectadas, ao longo de um intervalo de tempo de gravação dos eventos pré-determinado, que se fixou em 5 segundos.

Nesta última relação considerou-se que os limites admissíveis típicos dos frequentadores da Estação do Cais do Sodré são assimiláveis aos correspondentes a residências durante o dia e a escritórios (zonas industriais), ambos definidos pela Norma ISO 2631 como iguais a 0.40 mm/s.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os valores dos 5 pontos monitorizados, sendo imediato concluir que existem dois tipos de situações: aquelas em que o factor de afectação é superior à unidade (significando incomodidade) e as que se caracterizam por factores inferiores a 1, ou seja, situações de conformidade.

Tabela 4 – Factores de afectação de incomodidade humana relativa[5,6,7]

| Local das Medições | Velocidade de Vibração Média* [mm/s] | | | Factor de Afectação Relativo | |
|----------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| | Situação de Referência | Situação de Obra | | | |
| | Medição em 26.Nov.2004 | Medição em 10.Fev.2005 | Medição em 05.Mai.2005 | FA _{Rel} 10.Fev. 2005 | FA _{Rel} 05.Mai.2005 |
| P1(Cais) | 0.050 | 0.175 | 0.172 | 3.52 | 3.44 |
| P2 (Rest.) | 0.048 | 0.085 | 0.134 | 1.78 | 2.79 |
| P3 (Bilhet.) | 0.222 | 0.168 | 0.147 | 0.75 | 0.66 |
| P 4 (ML) | 0.162 | 0.160 | 0.159 | 0.99 | 0.98 |
| P 5 (Term. Comboios) | 0.164 | 0.144 | 0.095 | 0.88 | 0.58 |

Tabela 5 – Factores de afectação de incomodidade humana absoluta em função da ISO 2631 [5,6,7]

| Local das Medições | Veloc. de Vibração Média* [mm/s] | | | ISO 2631 | Factor de Afectação Absoluto | | |
|----------------------|----------------------------------|------------------|-------------|----------------------|------------------------------|-------------|-------------|
| | Situação de Referência | Situação de Obra | | Veloc. Limite [mm/s] | | | |
| | 26.Nov 2004 | 10.Fev 2005 | 05.Mai 2005 | | 26.Nov 2004 | 10.Fev 2005 | 05.Mai 2005 |
| P1(Cais) | 0.050 | 0.175 | 0.172 | 0.40 | 0.125 | 0.437 | 0.43 |
| P2 (Rest.) | 0.048 | 0.085 | 0.134 | 0.40 | 0.120 | 0.212 | 0.335 |
| P3 (Bilhet.) | 0.222 | 0.168 | 0.147 | 0.40 | 0.555 | 0.420 | 0.368 |
| P 4 (ML) | 0.162 | 0.160 | 0.159 | 0.40 | 0.405 | 0.400 | 0.398 |
| P 5 (Term. Comboios) | 0.164 | 0.144 | 0.095 | 0.40 | 0.41 | 0.360 | 0.238 |

4. CONCLUSÕES

As obras geotécnicas no âmbito urbano necessitam, cada vez mais, de monitorização sistemática do ruído e vibrações, por forma a que estes empreendimentos tenham um carácter de sustentabilidade ambiental.

No caso em estudo, após as medições de ruídos e vibrações na situação de referência e a monitorização durante as duas fases da situação de obra efectuadas no obra de construção dos toscos do edifício CP-REFER no Cais do Sodré, conclui-se que os dois tipos de impactes gerados no decorrer dessas actividades, revelam conformidade geral com os normativos vigentes devido a muito poucas variações em relação a norma em vigor.

Verificaram-se excepções no que se refere à incomodidade relativa (perante as vibrações da situação de referência) em dois dos cinco locais monitorizados, embora todos eles estejam abaixo dos limites fixados pela normalização internacional.

REFERÊNCIAS

- [1] Gayubas, Juan Carlos, 1998. Guia Práctica para el Control Ambiental en Canteras y Graveras. Entrono Gráfico S.L., Madrid.
- [2] Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro. Regulamento Geral do Ruído.
- [3] Kolsky, H. 1963. Stress Waves in Solids. Dover Publications, New York.
- [4] Navarro Torres, V. e Dinis da Gama C., 2005. Engenharia ambiental subterrânea e aplicações. CETEM/CYTED/CNPq Rio de Janeiro.
- [5] Centro de Geotecnia 2004. Ruído e vibrações na situação de referência na zona da obra de execução dos toscos do Edifício da CP/REFER – Cais do Sodré, Lisboa. Relatório técnico.

[6] Centro de Geotecnia 2005. Ruído e vibrações na realização da 1ª Fase (Zona 1) da obra de execução dos toscos do Edifício da CP/REFER – Cais do Sodré, Lisboa. Relatório técnico.

[7] Centro de Geotecnia 2005. Monitorização de ruído e vibrações no dia 05 de Maio de 2005 na realização da obra de execução dos toscos do Edifício da CP/REFER – Cais do Sodré, Lisboa. Relatório técnico.

[8] ISO 2631-2 :1989 International Standardisation Organisation.

[9] University of Illinois, 2001. Geology 351 – Geophysical Methods for Geology. Engineering and Environmental Sciences (ATH).

[10] Sarsby, R., 2000. Environmental Geotechnics. Thomas Telford, London, U.K.