

# **CAMPANHA DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES DEVIDAS AO TRÁFEGO FERROVIÁRIO REALIZADA NA ESTAÇÃO DO ORIENTE**

## **MEASUREMENT CAMPAIGN OF VIBRATIONS INDUCED BY RAILWAY TRAFFIC PERFORMED IN ORIENTE TRAIN STATION**

Gomes, Jorge; *LNEC, Lisboa, Portugal, jgomes@lnec.pt*

Marcelino, João; *LNEC, Lisboa, Portugal, marcelino@lnec.pt*

Manso, João; *LNEC, Lisboa, Portugal, jmanso@lnec.pt*

### **RESUMO**

A circulação do tráfego ferroviário é uma fonte geradora de ruído e vibrações. Com a implementação da Rede de Alta Velocidade é necessário avaliar os seus efeitos nas zonas circundantes às linhas de caminho de ferro. Para determinar as leis de propagação de vibrações nas zonas adjacentes às linhas existentes, onde previsivelmente irá rodar a nova geração de comboios, a pedido da Rede Ferroviária de Alta Velocidade (*RAVE*) foram previstas campanhas de medição de vibrações em diversos perfis. Para dar início a esse trabalho, foi levada a cabo a primeira campanha em Junho de 2009, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (*LNEC*), na zona da Estação do Oriente. A consideração dessa situação como a situação de referência permite a previsão da situação futura, com a construção das linhas de Alta Velocidade. Assim, este trabalho compreende, por um lado, a caracterização do local, da metodologia de ensaio e dos equipamentos de medição e, por outro, a definição da metodologia de tratamento e análise de resultados. Por fim, são apresentados os resultados obtidos e respetiva interpretação, procurando-se aferir o comportamento do solo ao longo do perfil estudado e definir as situações mais condicionantes.

### **ABSTRACT**

Train circulation is a source of noise and vibrations. With the implementation of the high-speed network, assessment on these effects should be performed in the areas surrounding the railway tracks. In order to determine the vibration propagation laws in the areas near the existing rail tracks, where the new trains are supposed to pass, the national committee of the high-speed network (*Rede Ferroviária de Alta Velocidade - RAVE*) ordered some vibration measurements campaigns in several profiles. In June 2009, it took place a series of measurements, made by *LNEC* answering a request of *RAVE*, in order to establish the default situation of the Oriente Station area, in terms of vibrations. By achieving this it became possible to predict the default situation in the future, after the high-speed network has been built. This work is divided into two different parts, the first one relates to the site characterization, the test methodology and the equipment used and, the second one, to the analysis of the results. The last part will refer all the results obtained and its interpretation, in order to understand the soil behaviour through the studied profile and defining the worst situations possible.

## **1 - INTRODUÇÃO**

Em Abril de 2009, a Rede Ferroviária de Alta Velocidade (*RAVE*) solicitou a colaboração do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (*LNEC*) para a implementação das diretivas definidas na Declaração de Impacte Ambiental (*DIA*). A *DIA* foi emitida para o estudo prévio do sub-troço Lisboa/Moita via Terceira Travessia do Tejo (*TTT*), no corredor Chelas/Barreiro (modos ferroviário e rodoviário), inserida na ligação ferroviária de Alta Velocidade Lisboa/Madrid.

Esta campanha de medições procura estabelecer valores que caracterizem a situação atual, a considerar como referência, e, por outro lado, permite a previsão da situação futura com a execução das linhas de Alta Velocidade.

## **2 - MEDIÇÕES**

### **2.1 - Metodologia de ensaio e equipamento de medição**

A intervenção na Estação do Oriente passa pela construção de novas linhas, pelo que o estudo incidirá sobre a zona que será afetada. A escolha do local para a realização da campanha de medições foi efetuada tendo em conta todas as condicionantes existentes, nomeadamente a urbanística, e de forma a cumprir todos os objetivos iniciais. Esses objetivos passam por uma caracterização da situação atual (situação de referência), avaliando a atenuação das vibrações com a distância à linha-férrea.

Assim, foi escolhido um perfil transversal, com um desenvolvimento de cerca de 150 m, a partir da linha para o exterior da estação, localizado na zona do Viaduto Ferroviário de Transição (VFT). Foram efetuadas medições em 12 pontos distintos, englobando um total de 20 medições (Figura 1). Para além da componente vertical, medida em todos os 12 pontos de leitura, foram também efetuados registos de algumas componentes horizontais consideradas mais significativas. Foram efetuados registos em 4 pontos na plataforma das linhas (Figura 2), no VFT (pontos 1, 1C, 2 e 3) e em 8 pontos localizados ao nível do solo existente (pontos 4 a 11).



Figura 1 - Plano de colocação dos pontos de medida (planta)

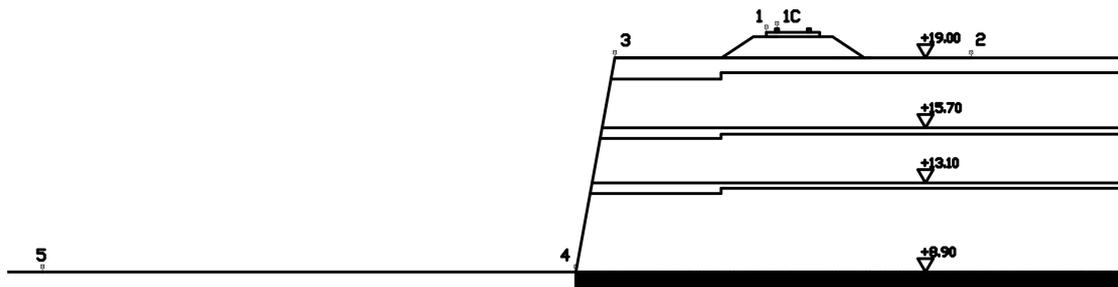


Figura 2 - Esquema de colocação dos pontos de medida – 1 a 5 (corte vertical)

Os acelerómetros foram fixados a blocos metálicos, previamente solidarizados com os elementos a monitorizar. Na zona da plataforma (pontos 1, 1C, 2 e 3), os blocos metálicos foram solidarizados diretamente à travessa, ao carril e à laje de betão através de um ligante apropriado e testado em situações semelhantes. Nos pontos de monitorização localizados no solo, os blocos metálicos foram ligados a estacas cravadas no terreno, de modo a que os valores medidos fossem representativos das acelerações do solo. Foram utilizados dois tipos de estacas, umas metálicas, para solos rijos, e outras de madeira, para solos mais brandos.

Para a medição das vibrações, foram utilizados acelerómetros do tipo piezoeléctrico de grande sensibilidade (1 V/g). Foram ainda usadas unidades de condicionamento de sinal (com ampliações de sinal até 40 dB) concentradas junto à unidade de aquisição de dados, que engloba uma placa de digitalização de 16 bits e um computador portátil.

A aquisição de dados e a gestão de todas as fases da campanha foram efetuadas com recurso ao módulo High Speed Acquisition do software *LNEC-SPA*, desenvolvido no *LNEC* (Mendes e Costa, 2007). Este módulo permite efetuar aquisição a frequências muito elevadas, de forma a minimizar o fenómeno de alisamento de frequências, e automaticamente, aplicar filtros digitais, fazendo a re-amostragem do sinal, para que a dimensão do registo não se torne excessiva. Foram efetuados registos com duração de 120 s, com uma frequência de amostragem de 2000 Hz.

## 2.2 - Campanhas

As medições efetuadas abrangeram situações de passagem de comboios durante o dia e ruído ambiente. As medições efetuadas correspondem ao tráfego normal da Linha do Norte (LN), isto é, não se preconizou quaisquer condições especiais, quer em termos do material circulante, quer em termos de

velocidade de circulação. Foram efetuadas 22 campanhas de medições, das quais foram escolhidas 15, consideradas mais relevantes e que se apresentam no Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição das campanhas de medições realizadas

Campanha		
Hora	Código	Descrição
14:50:00	Ambiente 3	Registo de ambiente sem passagem de comboios
14:58:00	UTE2240	Passagem do comboio UTE2240 na linha 1
15:35:00	CB na Linha 2	Passagem de um comboio na linha 2
15:38:00	LOC5600	Passagem do comboio LOC5600 na linha 1
15:57:00	UTE2240	Passagem do comboio UTE2240 na linha 10
16:08:00	CPA	Passagem do comboio CPA na linha 1
16:14:00	LOC5600	Passagem do comboio LOC5600 na linha 1
16:27:00	UTE2240	Passagem do comboio UTE2240 na linha 1
16:56:00	UTE2240	Passagem do comboio UTE2240 na linha 1
17:08:00	CPA	Passagem do comboio CPA na linha 1
17:26:00	UTE2240	Passagem do comboio UTE2240 na linha 1
17:57:00	UTE2240	Passagem do comboio UTE2240 na linha 1
18:08:00	CPA	Passagem do comboio CPA na linha 1
18:10:00	Ambiente 7	Passagem de comboio na estação direção Norte-Sul
18:13:00	Ambiente 8	Registo de ambiente sem passagem de comboios

### 3 - RESULTADOS

#### 3.1 - Tratamento das séries

As séries resultantes das aquisições do ensaio, foram tratadas por meio de programas de cálculo automático, desenvolvidos no *LNEC*, para processamento digital dos sinais resultantes da circulação ferroviária.

Como já foi referido, nesta campanha foram utilizados acelerómetros, ou seja, as séries obtidas no campo apresentaram-se sob a forma de acelerações. Partindo desta grandeza, é possível, através de tratamento matemático, a obtenção de outras grandezas físicas, nomeadamente velocidades e deslocamentos.

Como se optou por realizar uma integração no domínio no tempo, foi necessário corrigir os valores, retirando a linha de tendência. Para a determinar recorreu-se, uma vez mais, a um filtro, mas neste caso um filtro de média móvel de 50 pontos.

Um dos problemas do seu registo *in situ* relaciona-se com fatores externos que influenciam os resultados obtidos. A esses fatores externos vulgarizou chamar-se ruído e, com o objetivo de melhorar a análise, é fundamental tentar reduzir a sua influência nas séries obtidas (Marcelino e Monteiro, 2006). Tal é possível recorrendo, por exemplo, a filtros, que poderão ser analógicos, incorporados na própria cadeia de aquisição, ou digitais, aplicados às séries digitalizadas. Neste caso, foi utilizado um filtro digital. Dentro das várias possibilidades é necessário escolher qual o que se adequa melhor ao caso em estudo. Considerou-se, com base na experiência relatada na bibliografia, tendo em consideração os objetivos do estudo, que a componente de frequências geradas pela passagem dos comboios, e com interesse para os fins em causa, se situa abaixo de 250 Hz. Assim, a escolha recaiu sobre a utilização de um filtro passa-baixo (Smith, 1999), em que se eliminavam todas as frequências acima dos 250 Hz (frequência de corte).

Devido à falta de legislação existente em Portugal para a análise de vibrações, recorreu-se à bibliografia específica para este tipo de situação, em que são apresentados valores limites de velocidades admissíveis, sendo necessário portanto, integrar as acelerações obtidas.

Nas situações relativas à passagem dos comboios, devido à curta duração das vibrações geradas pela sua passagem, foi aplicada, no início do tratamento a todas as séries, uma janela temporal. A dimensão da janela temporal foi definida, para cada campanha, em função dos resultados obtidos em todos os pontos de forma a incorporar os efeitos provocados pela passagem do comboio.

Foram determinados os valores *RMS* (*root mean square*) das várias grandezas (acelerações e velocidades), distribuídos por bandas de 1/3 de oitava. Esta análise permitiu perceber quais as frequências mais relevantes produzidas pela passagem de comboios. Os valores de *RMS* são uma medida da potência do sinal, muito usada, nomeadamente, na análise de sinais, e deve ser utilizada para a caracterização das leis de propagação do meio. A análise de frequências de um som pode ser feita dividindo as componentes da frequência em bandas com larguras bem definidas, a que se chamam bandas de oitavas. A banda de frequência de uma oitava, ou de 1/3 de oitava, é definida pela frequência central da banda,  $f_c$ , e pelos extremos, inferior  $f_1$  e superior  $f_2$ . Em cada banda, o nível de pressão sonora é considerado igual ao valor da pressão da frequência central da banda. As seguintes expressões mostram as relações existentes entre as frequências características da banda:

$$f_c = f_1 \cdot f_2 \quad [1]$$

Para o caso das bandas de uma oitava:

$$f_2 = 2f_1 \quad [2]$$

Para o caso das bandas de 1/3 de oitava:

$$f_2 = 2^{\sqrt[3]{f_1}} \quad [3]$$

### 3.2 - Apresentação de resultados

Com base nos valores obtidos, realizou-se uma análise geral para os casos considerados mais relevantes. Para facilitar a análise, optou-se por agrupar os vários casos consoante a tipologia da fonte geradora de vibração, os grupos considerados foram (ver também o Quadro 1):

- Ambiente – onde se inserem os resultados dos ambientes 3, 7 e 8;
- UTE2240 – onde se inserem os resultados medidos às 14h58, 15h57, 16h27, 16h56, 17h26 e 17h57;
- CB, linha 2 – onde se inserem os resultados da passagem de uma composição na linha 2;
- LOC5600 – onde se inserem os resultados medidos às 15h38 e 16h14;
- CPA – onde se inserem os resultados medidos às 16h08, 17h08 e 18h08.

Nos Quadros 2 a 7, apresenta-se um resumo dos valores máximos registados para as grandezas analisadas.

Quadro 2 – Valores máximos para as medições "Ambiente 3 e 8"

Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)	Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)
1V	21,4	0,027	6V	28,5	0,068
1CV	15,1	0,025	6L	12,2	0,018
2V	13,7	0,018	6T	29,1	0,047
3V	11,6	0,017	7V	12,0	0,028
3L	15,5	0,022	8V	13,2	0,033
3T	10,3	0,021	8L	18,6	0,017
4V	17,9	0,043	8T	22,9	0,046
4L	26,1	0,036	9V	22,2	0,055
4T	18,7	0,022	10V	10,6	0,023
5V	47,6	0,103	11V	11,9	0,029

Quadro 3 – Valores máximos para as medições “Ambiente 7”

Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)	Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)
1V	951,6	1,327	6V	6,5	0,017
1CV	761,2	1,041	6L	1,9	0,004
2V	156,9	0,259	6T	3,7	0,004
3V	93,6	0,161	7V	11,9	0,039
3L	121,1	0,219	8V	9,5	0,023
3T	106,8	0,136	8L	8,1	0,018
4V	38,3	0,073	8T	13,0	0,015
4L	51,5	0,090	9V	5,3	0,012
4T	25,3	0,037	10V	4,4	0,010
5V	23,5	0,048	11V	4,1	0,003

Quadro 4 – Valores máximos para as medições “UTE2240”

Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)	Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)
1V	80511,5	80,004	6V	7,4	0,012
1CV	85051,2	138,939	6L	5,9	0,010
2V	2911,8	4,029	6T	8,0	0,012
3V	1830,2	2,828	7V	10,2	0,022
3L	3253,6	4,449	8V	218,3	0,311
3T	1425,8	1,971	8L	836,8	0,940
4V	657,8	0,678	8T	581,4	0,614
4L	370,5	0,524	9V	12,0	0,019
4T	406,1	0,332	10V	9,8	0,032
5V	14,7	0,044	11V	52,7	0,099

Quadro 5 – Valores máximos para as medições “CB, linha2”

Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)	Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)
1V	2746,0	3,799	6V	8,8	0,019
1CV	2475,7	3,185	6L	8,3	0,012
2V	3186,3	2,777	6T	13,8	0,016
3V	392,7	0,599	7V	12,7	0,025
3L	474,6	0,679	8V	8,8	0,014
3T	221,7	0,277	8L	9,5	0,014
4V	77,2	0,112	8T	17,1	0,040
4L	113,8	0,169	9V	20,4	0,043
4T	65,5	0,091	10V	9,1	0,021
5V	33,1	0,089	11V	9,6	0,022

Quadro 6 – Valores máximos para as medições “LOC5600”

Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)	Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)
1V	83766,6	60,281	6V	8,8	0,017
1CV	79931,7	103,507	6L	8,2	0,014
2V	3598,8	3,763	6T	13,8	0,018
3V	2586,6	3,408	7V	13,7	0,021
3L	4677,8	5,701	8V	12,9	0,027
3T	1554,3	2,748	8L	30,1	0,027
4V	554,0	0,658	8T	32,6	0,031
4L	852,9	0,924	9V	14,4	0,029
4T	554,5	0,494	10V	10,9	0,026
5V	16,4	0,046	11V	31,7	0,117

Quadro 7 – Valores máximos para as medições “CPA”

Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)	Pontos	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Velocidade (mm/s)
1V	78052,0	23,151	6V	2,9	0,006
1CV	80677,6	138,881	6L	1,6	0,003
2V	799,3	0,866	6T	2,8	0,002
3V	470,8	0,670	7V	4,1	0,010
3L	823,0	1,074	8V	164,2	0,229
3T	231,1	0,323	8L	572,1	0,575
4V	1030,0	1,578	8T	740,7	0,704
4L	749,5	0,964	9V	3,1	0,007
4T	562,9	0,673	10V	3,3	0,007
5V	4,3	0,011	11V	2,0	0,007

Os valores registados na travessa (1V) e em especial no carril (1CV) devem ser encarados com algumas reservas para as situações de passagem do comboio. A circulação do comboio provoca, localmente, um nível de vibração elevado, o que pode perturbar as medições nesses locais.

#### 4 - VALORES NORMATIVOS

Em LNEC (2002) apresentam-se valores limites de velocidade efetiva, separando-os em dois grupos principais. Um referente à perceção humana das vibrações e outro aos danos provocados no edificado pelas mesmas vibrações.

Assim, considera-se que, em geral, a perceção humana é praticamente nula para velocidades de vibrações inferiores a 0,11 mm/s, tornando-se perceptível até 0,28 mm/s, sendo que após este limite e até 1,10 mm/s se torna nítida. Ultrapassando este valor (1,10 mm/s) admite-se que a perceção se torna muito nítida (Figura 3).

O segundo grupo classifica a velocidade das vibrações consoante o dano que estas provocam no edificado. Para valores inferiores a 3,5 mm/s considera-se que as vibrações não exercem quaisquer danos e que a partir deste valor até 7,0 mm/s pode originar apenas queda de cal. Entre 7,0 e 21,0 mm/s pode provocar fendilhação ligeira, que tenderá a acentuar-se caso os valores atinjam os 42,0 mm/s. Por fim, considera-se que ultrapassando este valor, os danos no edificado serão consideráveis (Figura 3).

Uma vez que não há, em Portugal, normativas para classificar as vibrações provocadas pela passagem de comboios, considerou-se oportuno comparar os valores obtidos nas campanhas com os valores

normativos de outro tipo de vibrações, nomeadamente, cravação de vários tipos de estacas (estacas-prancha, estacas betonadas *in situ*, entre outras), assim como de consolidação dinâmica e vibrosubstituição. Os valores limites referentes a estas ações apresentam-se na Figura 3, em função da distância à fonte geradora de vibrações.

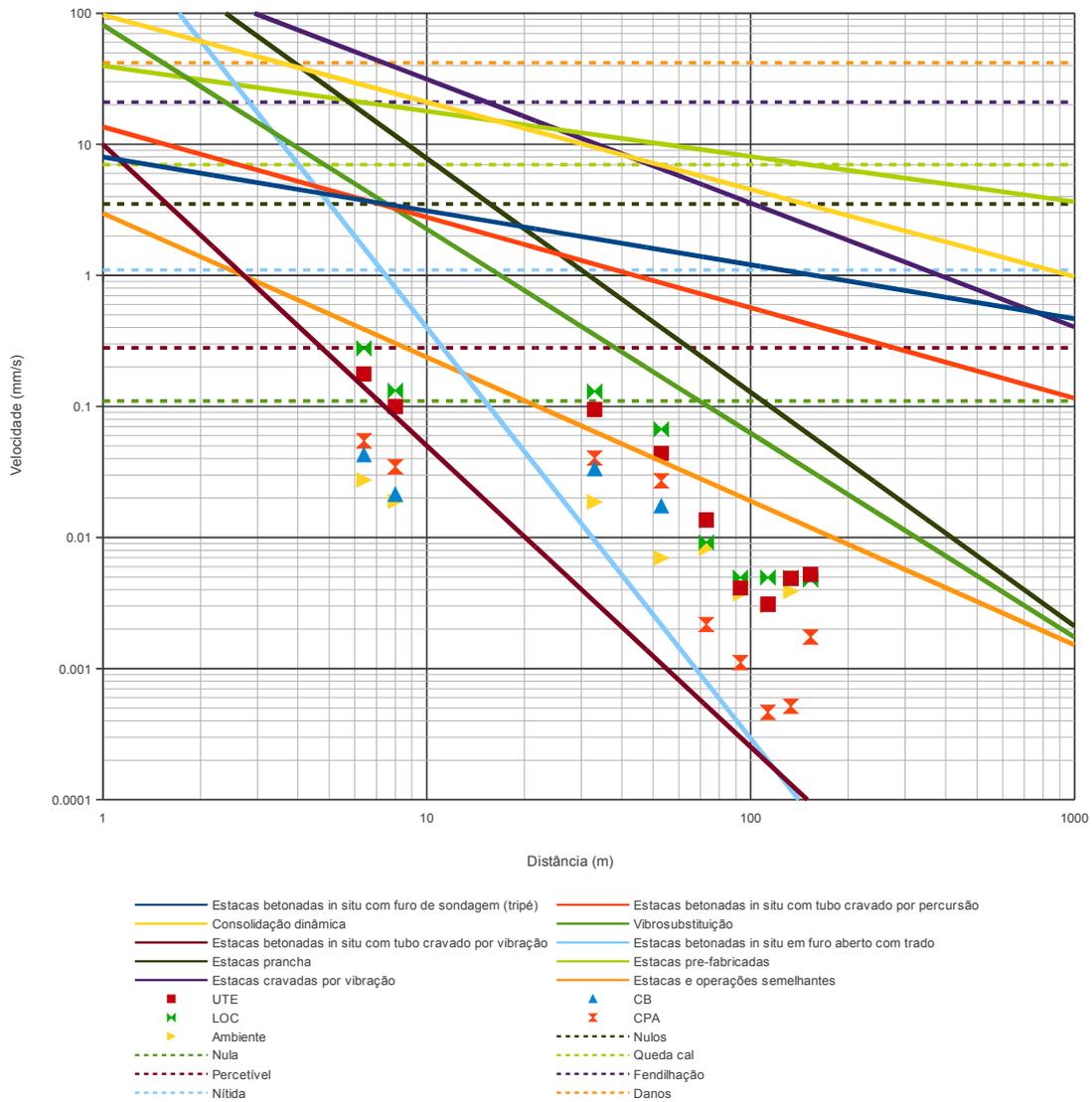


Figura 3 - Distribuição espacial da velocidade efetiva e confrontação com os limites de percepção humana e danos estruturais e com os valores de referência da Norma Inglesa BS 5228, Part 4

## 5 - CONCLUSÕES

A campanha de medições realizada serviu para avaliar o nível de vibrações existentes no local, para os diversos cenários considerados.

Os valores máximos medidos não deverão ser muito diferentes dos futuramente registados após a implementação das linhas de Alta Velocidade, caso as cargas axiais do comboio que vier a ser escolhido não difiram muito das cargas axiais dos comboios que transitam atualmente, uma vez que as velocidades de circulação nesta zona serão semelhantes.

Em alguns pontos, as velocidades medidas estão acima do valor máximo recomendável, de 0,11 mm/s. Esses valores foram registados na laje de suporte da linha (pontos 1, 1C, 2 e 3) e no ponto 4 colocado ao nível do passeio junto do edifício VFT (Figura 2).

Na área de implantação da estação ocorrem valores de velocidade superiores aos considerados admissíveis, o que pode indiciar um deficiente isolamento das vibrações resultantes da passagem dos comboios. Para que os valores de velocidades neste local não provoquem incomodidade às pessoas poderá ser ponderada a implementação de medidas de minimização.

Nos recetores colocados fora do limite do edifício da estação (pontos 5 a 11) não se prevê que sejam registados valores superiores de 0,11 mm/s, pelo que, para estes locais, não se afigura necessário considerar medidas de minimização.

## REFERÊNCIAS

- BS5228, Part 4 (1992) – Noise control on construction and open sites. Part 4. *Code of practice for noise and vibration control applicable to pilling operations*. British Standards Institute, London.
- LNEC (2002) – *Aspetos Regulamentares e Normativos no domínio do Ruído e Vibrações*. Curso lecionado no LNEC, Lisboa, Portugal.
- Marcelino, J., Monteiro, C. (2006) – Medição das vibrações em aterros geradas por comboios de alta velocidade. *Proc. JPEE2006 – 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*. LNEC, Lisboa, Portugal.
- Mendes, L. e Costa, A. C. (2007) – LNEC-SPA, Signal Processing and Analysis Tools for Civil Engineers – Version 1.0 – Build 12", *Relatório n<sup>o</sup>29/2007 NESDE*, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Smith, S. W. (1999) - The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. *California Technical Publishing*. ISBN 0-9660176-6-8.