

# MEDIÇÕES DAS VIBRAÇÕES GERADAS POR COMBOIOS DE ALTA VELOCIDADE

## MEASUREMENTS OF VIBRATIONS INDUCED BY HIGH-SPEED TRAINS

Martins, João, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, jpmartins@civil.uminho.pt*

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

Gomes Correia, António, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, agc@civil.uminho.pt*

Ramos, Luís F., *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, lramos@civil.uminho.pt*

Delgado, João, *REFER, Lisboa, Portugal, jcdelgado@refer.pt*

### RESUMO

O presente artigo descreve as acções empreendidas no âmbito de um projecto de investigação em Portugal para realizar a medição das vibrações geradas pelo tráfego de comboios, em particular os comboios de alta velocidade. Neste contexto estão em curso campanhas de medição de vibrações com recurso a acelerómetros na Linha do Norte, onde são instrumentadas secções com diferentes características geométricas e geotécnicas. Para a campanha de testes preliminares, neste artigo são apresentados os aspectos relativos aos equipamentos usados, às dificuldades experimentais e ao processo de processamento e interpretação de resultados, ilustrando-se algumas das medições efectuadas. Os resultados das medições servirão também de suporte à calibração de modelos numéricos em desenvolvimento.

### ABSTRACT

The paper describes actions in the aim of a research project in Portugal to carried out measurements of train induced vibrations, particularly high speed trains. In this context, it is being performed a vibration measurement test campaign with accelerometers in the Linha do Norte, where sections with different geometric and geotechnical characteristics will be instrumented. For the preliminary test campaign, in this paper aspects related to equipment, to difficulties experimented and results processing and interpretation process are presented, being illustrated some measurements of vibrations that were performed. The measurements results will be used as support to calibrate numerical models in development.

### 1. INTRODUÇÃO

Uma das características essenciais do comportamento de uma estrutura solo-via férrea relaciona-se com a sua deformação ao carregamento. Uma estrutura solo-via férrea óptima deverá suportar deformações do carril (assentamentos reversíveis e permanentes) compatíveis com o seu bom desempenho em serviço (deformações admissíveis). Estes dependerão, acima de tudo, do suporte do carril, da carga por eixo e da velocidade do comboio (Brandl 2004).

Assim, as acções geradas pelo tráfego de comboios, e particularmente as vibrações, assumem um papel preponderante no comportamento da estrutura solo-via férrea, nomeadamente no que diz respeito a vias férreas de alta velocidade. Por um lado, podem conduzir a um aumento elevado nos custos de exploração e manutenção, e por outro, a maiores níveis de desconforto dos passageiros e a maiores vibrações induzidas nas estruturas circundantes. As vibrações provocadas pela passagem de comboios de alta velocidade são, portanto, um indicador de qualidade e desempenho da estrutura solo-via férrea. Neste contexto, têm vindo a ser

desenvolvidos modelos numéricos para prever as vibrações geradas por comboios de alta velocidade. Desta forma, a medição de vibrações “in situ” assume um papel determinante, quer na avaliação da qualidade da via, quer na validação dos modelos numéricos em desenvolvimento. Atendendo à previsível construção de linhas férreas de alta velocidade em Portugal, a medição de vibrações geradas pela passagem de comboios de alta velocidade merece o maior interesse.

No âmbito do protocolo de colaboração entre a Rede Ferroviária Nacional e a Tecminho – Associação Universidade Empresa para o desenvolvimento enquanto representante do consórcio UM/LNEC/IST/FCT-UNL no sentido de desenvolver o conhecimento no âmbito da metodologia de construção e controlo de aterros para vias férreas e das camadas da plataforma da via, realizou-se uma campanha de testes preliminares de aperfeiçoamento das técnicas de medição das vibrações com recurso a acelerómetros, na Linha do Norte. Esta campanha é parte integrante do Projecto de Investigação POCI/ECM/61114/2004, intitulado “Interação solo-via férrea para comboios de alta velocidade” financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

A referida campanha consistiu na medição de vibrações nas superfícies do solo de fundação, da camada de leito de via, sub balastro e do balastro. Nesta fase apenas foi testada a funcionalidade em campo dos equipamentos e procurou-se resolver problemas relativos aos processos de fixação dos equipamentos, alimentação eléctrica, suportes para unidades de leitura e aquisição, condições de condicionamento de aparelhagem mais sensível, etc.

## **2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E GEOTÉCNICA DA VIA**

O local escolhido para a realização dos testes preliminares foi o P.K. 36,850km (fig. 1) junto à estação do Carregado, que integra o subtroço 1.2 da Linha do Norte. A escolha deste local para a realização dos primeiros testes deveu-se, por um lado às condições de fundação e geométricas da linha e, por outro, à proximidade da central do Carregado que é uma fonte de ruído ambiente significativa. Deste modo, pretendeu-se que os testes preliminares se realizassem nas piores condições de ruído ambiente de forma a testar todos os sensores em condições adversas.

Este local caracteriza-se pela existência de uma via simples, denominada linha antiga, e por uma via dupla, que, de acordo com o projecto de execução, é constituída por carris UIC 60 em bitola ibérica (1,668 m), travessas monobloco de betão armado pré-esforçado (modelo DW, comprimento de 2,60 m e peso de 204 kgf) colocadas com afastamento entre eixos de 0,60 m sobre uma camada de balastro granítico de dimensões nominais de 25/50 mm. A camada de balastro assenta sobre uma camada de sub balastro, que por sua vez assenta sobre uma plataforma de classe P3, segundo a ficha *UIC 719R*.

No que se refere ao enquadramento geológico, o subtroço 1.2 desenvolve-se ao longo do bordo Oeste da Bacia Aluvionar do Tejo interessando formações pliocénicas, miocénicas, depósitos aluvionares e de terraço. O local referente ao estudo localiza-se numa zona de depósitos aluvionares que se caracterizam por exibirem à superfície uma capa de natureza argilo-siltosa dessecada, sobreposta a níveis predominantemente lodosos moles a muito moles que podem atingir espessuras da ordem de grandeza de metros (citado em Fortunato 2005).

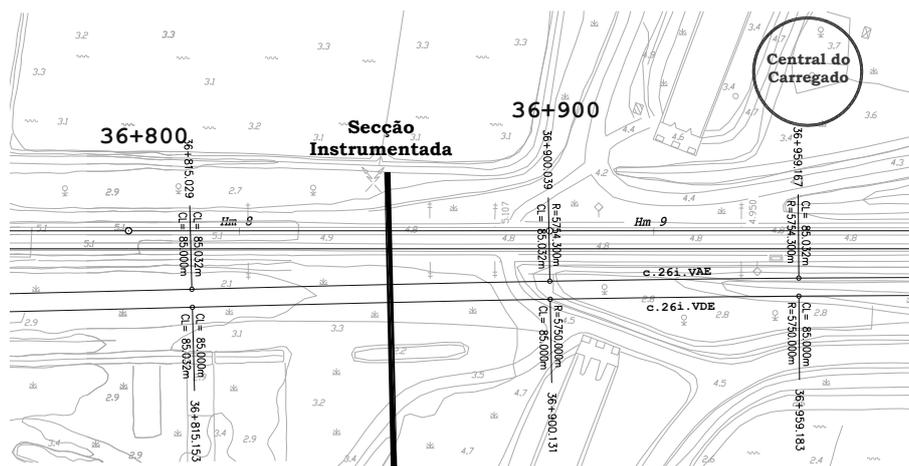


Figura 1 – Planta da secção instrumentada

### 3. PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

O plano de instrumentação consistiu na instalação à superfície de acelerómetros distribuídos ao longo de uma secção perpendicular ao eixo da via-férrea (fig. 1). As medições das vibrações foram realizadas com recurso a oito acelerómetros uniaxiais, colocados na vertical de modo a efectuarem a leitura das vibrações verticais à passagem de diferentes tipos de composições. O perfil da secção instrumentada encontra-se representado na Figura 2. Os pontos de medição permitem conhecer a resposta do “campo próximo” e do “campo afastado”.

No Quadro 1 resumem-se as distâncias adoptadas para cada um dos acelerómetros e respectivas características. Anote-se que tratando-se de testes preliminares, no solo de fundação foram utilizados diferentes tipos de acelerómetros para a mesma posição.

Para leitura e gravação dos sinais foi utilizado um sistema de aquisição da National Instruments NI SCXI – 1600, com cartas de acelerometria SCXI – 1531 com 16 bit de resolução, e um PC portátil, ambos alimentados através de baterias próprias. A experiência na medição de vibrações permitiu aferir que a alimentação do sistema de aquisição através de um gerador introduz maior ruído nas medições sendo desejável a utilização das baterias dos próprios equipamentos. A aquisição de dados foi realizada com um intervalo de tempo  $\Delta t = 0,0005$  s, ou seja, com uma frequência de amostragem de 2000 Hz.

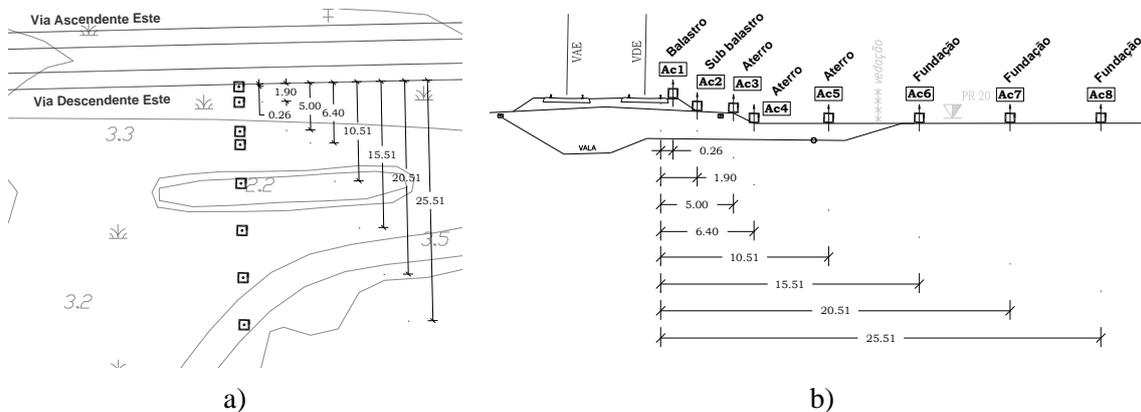


Figura 2 – Secção instrumentada: a) planta; b) secção

Quadro 1 – Características dos acelerómetros utilizados na medição das vibrações

Designação	Acelerómetro	Sensibilidade (V/g)	Gama de medida (g)	Distância (m)
Ac1	Wilcoxon 799M	1	±5	0,26
Ac2	Wilcoxon 799M	1	±5	1,90
Ac3	PCB 393B13 / Wilcoxon 799M	10 / 1	±0,5 / ±5	5,00
Ac4	PCB 393B13 / Wilcoxon 799M	10 / 1	±0,5 / ±5	6,40
Ac5	PCB 393B13 / Wilcoxon 799M	10 / 1	±0,5 / ±5	10,51
Ac6	PCB 393B13 / Wilcoxon 799M	10 / 1	±0,5 / ±5	15,51
Ac7	PCB 393B13 / Wilcoxon 799M	10 / 1	±0,5 / ±5	20,51
Ac8	PCB 393B13 / Wilcoxon 731A	10 / 10	±0,5 / ±0,5	25,51 / 20,51

Para realizar a medição de vibrações à superfície deverá garantir-se a adesão do sensor a esta, de modo a que seja assegurada a sua verticalidade e estabilidade durante a medição. De acordo com medições realizadas, tal poderá ser efectuado utilizando um cubo de aço selado na superfície (SUPERTRACK 2005) ou estacas de alumínio (Degrande 2000) ou de madeira (Bahrekazemi 2004) cravadas no terreno. Para as medições realizadas os acelerómetros colocados no balastro e sub balastro foram montados sobre uma estaca de ferro em forma de ponteiro, enquanto que os restantes foram montados em estacas de madeira, como se pode ver na Figura 3. Entende-se que um sistema do tipo estaca-sensor permite uma adesão eficaz à superfície, minimizando a massa do conjunto e assim elevar a sua frequência de ressonância. Após a cravação das estacas, sobre cada uma foi colada, no caso das estacas de ferro, ou aparafusada, no caso das estacas em madeira, uma chapa em alumínio. Depois de fixada a chapa à estaca, aparafusou-se o acelerómetro à chapa de alumínio através de um furo roscado à medida do parafuso que o acelerómetro contém na base, de modo a facilitar a sua instalação.

A experiência resultante da instalação das estacas permitiu concluir que as estacas de madeira oferecem alguma dificuldade na cravação sobre superfícies mais “rígidas” e provocam alguma perturbação no material da camada. Assim, julga-se que será preferível a utilização de estacas de alumínio em forma de cruz de modo a facilitar a cravação e a minimizar o problema referido.

#### 4. MEDIÇÕES DE VIBRAÇÕES “IN SITU”

Numa primeira fase procedeu-se à realização de medições de ruído ambiente e de vibrações devidas à passagem de diferentes composições. Estas medições serviram essencialmente para afinação do sistema de aquisição, nomeadamente no que se refere à digitalização dos sinais.



a)



b)

Figura 3 – Acelerómetro colocado no: a) sub balastro; b) no solo de fundação

Numa segunda fase, procedeu-se à medição de vibrações à passagem de várias composições, tanto na Via Descendente Este (*VDE*) como na Via Ascendente Este (*VAE*). Foram registadas as vibrações induzidas pelas passagens de composições do tipo Alfa Pendular, Intercidades, que transitarium a uma velocidade de cerca de 220 km/h, 190 km/h, respectivamente, de acordo com informações recolhidas junto dos técnicos da REFER, e composições do tipo Suburbano e Regional que transitarium a uma velocidade de cerca de 120 km/h, segundo a mesma fonte. Neste artigo apenas serão apresentados os resultados obtidos à passagem do Alfa Pendular e Intercidades.

As maiores acelerações registaram-se quando as composições circulavam na *VDE*. Registaram-se acelerações máximas no balastro de cerca de  $30 \text{ m/s}^2$  e  $55 \text{ m/s}^2$ , para o Alfa Pendular e o Intercidades, respectivamente, sendo perceptível a passagem de cada um dos eixos das composições nos registos relativos aos acelerómetros instalados mais próximos da via. Anote-se, no entanto, que as acelerações máximas registadas de cerca de  $55 \text{ m/s}^2$  podem ter sido condicionadas pela gama de medida do acelerómetro que é cerca de  $50 \text{ m/s}^2$ , podendo este eventualmente ter saturado durante as medições. Na figura 4 apresentam-se os resultados das medições para a passagem de uma composição do tipo Alfa Pendular.

As ordens de grandeza observadas nas medições das acelerações estão de acordo com o que era esperado de acordo com experiências realizadas noutros países, mesmo para comboios de alta velocidade (Degrande 2000).

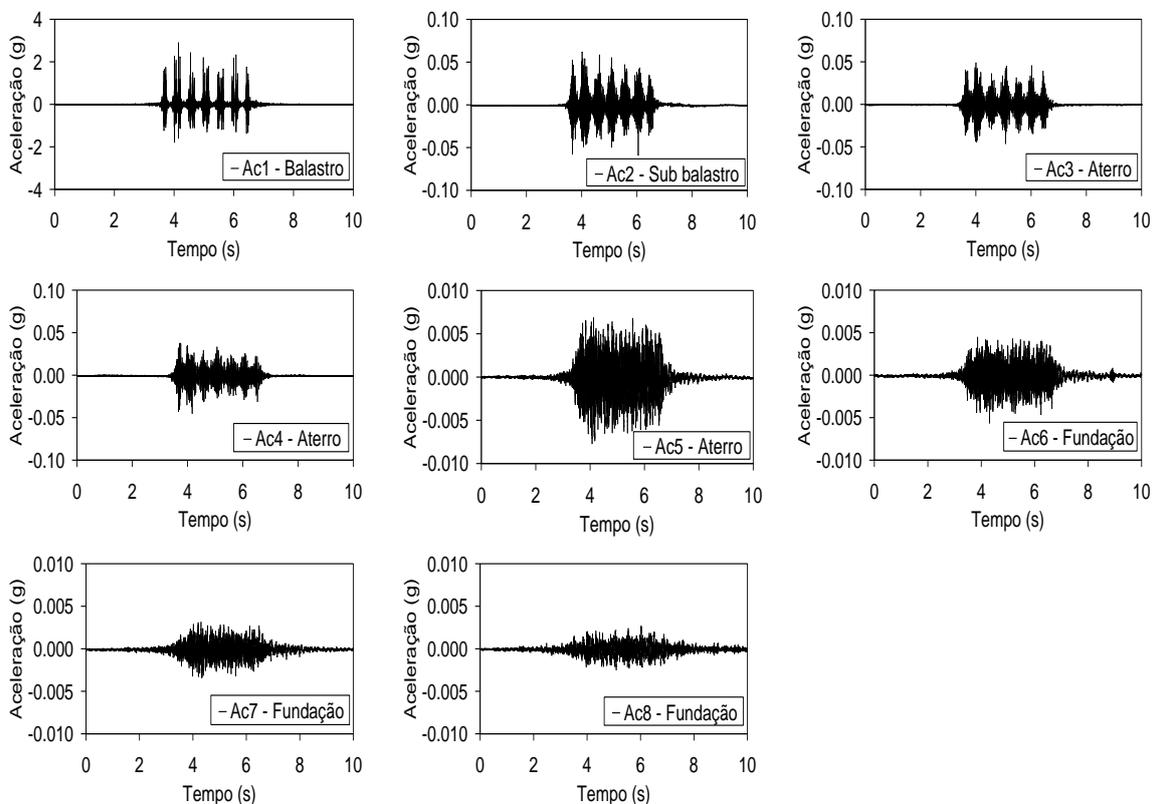


Figura 4 – Medição de acelerações à passagem de uma composição do tipo Alfa Pendular na Via Descendente Este

## 5. PROCESSAMENTO DE RESULTADOS

### 5.1. Determinação da velocidade de circulação

No estudo da resposta da fundação à passagem do comboio torna-se fundamental conhecer a velocidade a que circulam os comboios. De facto, enquanto que em certos casos, de passagens experimentais dos comboios se pode impor a velocidade de circulação, em geral, nas medições feitas com o tráfego normal da linha, tal não é, em princípio, possível. Em teoria, a determinação da velocidade é simples desde que se conheça a geometria do comboio. Determinado o instante correspondente à passagem de cada eixo, e conhecida a distância entre eixos, trata-se de uma operação elementar. Na prática, porém, pode ser muito difícil estabelecer o “momento de passagem do eixo”. Na Figura 5a, ilustra-se a determinação do momento em que passam os eixos num diagrama de acelerações determinado através dum modelo de cálculo.

Neste caso é simples a determinação do intervalo de tempo que medeia a passagem dos rodados sendo, portanto, simples também a determinação da velocidade. O cálculo é normalmente feito através da determinação do tempo que decorre da passagem do primeiro ao último rodado, para minimizar o erro.

A Figura 5b, refere-se também à passagem do primeiro bogie do comboio, mas neste caso das medições efectuadas, não sendo inequívoca a localização dos instantes de passagem dos eixos. Tendo em atenção a forma como se apresentam as leituras reais foi necessário desenvolver um algoritmo para determinação da velocidade de circulação.

Nesse algoritmo a estimativa inicial da velocidade é feita com base na determinação dos instantes em que ocorrem o primeiro e último picos de aceleração, admitido que estes correspondem à passagem do primeiro e último rodado, respectivamente. Em seguida, admitindo que esta estimativa pode estar afectada de um erro resultante da dificuldade em determinar o momento exacto de passagem dos eixos, verifica-se se é possível obter uma melhor estimativa desse valor.

Por “melhor estimativa” entende-se, o valor do instante inicial e da velocidade de circulação que maximizam uma função objectivo. No caso considerou-se a seguinte função:

$$FO = \{Eixos\}_{(t_{ini}, V)}^T \times \{a\} \quad (1)$$

onde  $\{a\}$  representa o vector de acelerações e  $\{Eixos\}_{(t_{ini}, V)}^T$  representa um vector onde todos os elementos são nulos à excepção dos elementos correspondentes à posição dos rodados. Este vector depende do instante inicial e da velocidade de circulação, isto é de:  $(t_{ini}, V)$ , que são, precisamente as variáveis que se pretende otimizar.

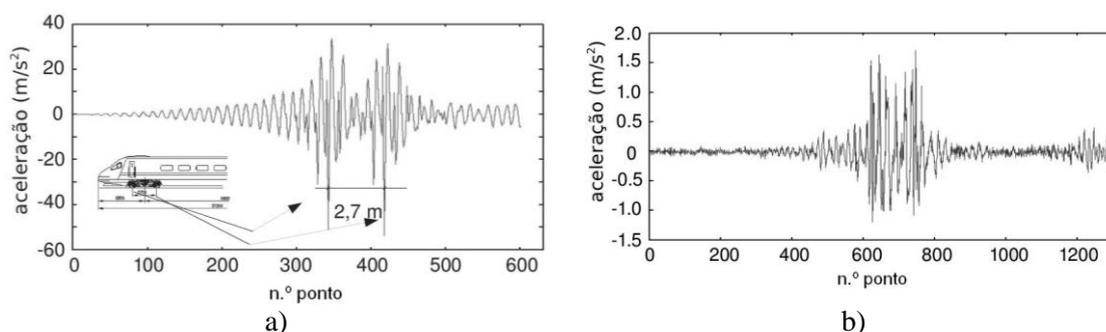


Figura 5 – Instante de passagem dos eixos: a) modelo analítico; b) medições reais

Consoante a forma do registo digital, do ruído, etc, a aplicação do algoritmo pode levar a pequenas variações da estimativa inicial de velocidade. Na Figura 6 apresenta-se a estimativa de velocidade e posição dos eixos para uma das medições efectuadas para o comboio Alfa Pendular sendo que neste caso, a estimativa inicial de velocidade e a estimativa final apenas diferem de 0,9 km/h.

## 5.2. Velocidades e deslocamentos

Para além do valor das acelerações interessa conhecer o valor das velocidades e deslocamentos induzidos pela passagem dos comboios. Estes podem ser obtidos através das acelerações por integração e integração dupla, respectivamente. No entanto, a integração de amostras digitais tende a propagar os erros e o ruído causando desvios significativos do resultado. Uma forma de ultrapassar este problema consiste em aplicar filtros digitais às leituras efectuadas bem como à integração numérica das mesmas.

Nos diagramas seguintes apresenta-se um exemplo de aplicação de um filtro de “base line correction” e de média móvel aos diagramas de aceleração e velocidade. Na Figura 7, apresentam-se os diagramas sem filtragem onde se verifica haver um desvio resultante da integração nos diagramas de velocidade e de deslocamento. Na Figura 8 é apresentado o resultado desses diagramas mas considerando a correcção com o filtro acima indicado. Os diagramas referem-se ao segundo ponto de leitura.

Como se pode verificar nas Figuras 7 e 8, o processamento de sinais necessita de processamento, nomeadamente através da aplicação de filtros, sem os quais os resultados vêm afectados de importantes erros. É sabido que a aquisição de dados resultantes de vibrações tem de ser sujeita a cuidadoso processamento do sinal digital. Não obstante as dificuldades numéricas, sempre presentes na aplicação de filtros, a informação obtida é muito valiosa na avaliação da qualidade e desempenho da via férrea. Anote-se, ainda, que os resultados obtidos estão concordantes com a experiência internacional, validando por isso a metodologia utilizada.

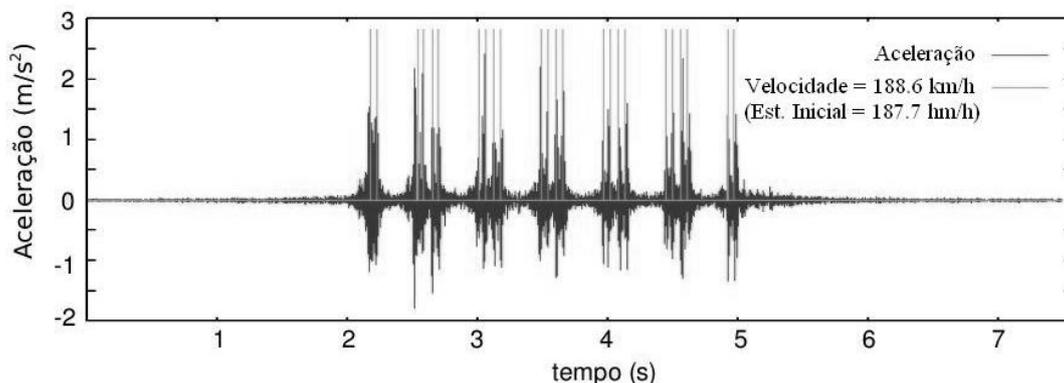


Figura 6 – Determinação da velocidade de circulação e posição dos eixos

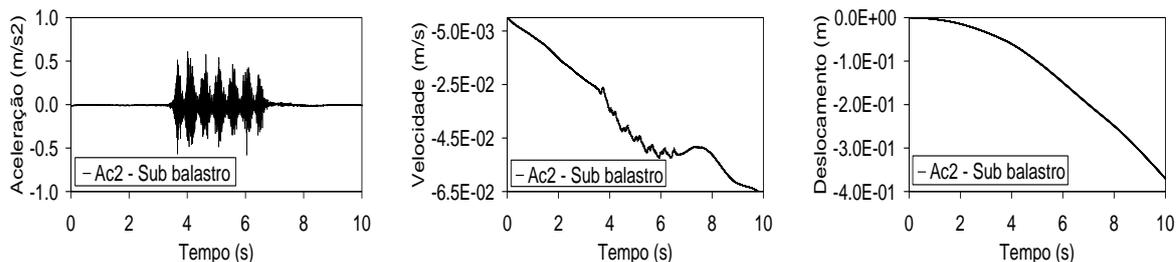


Figura 7 – Cálculo de velocidade e deslocamentos sem filtros

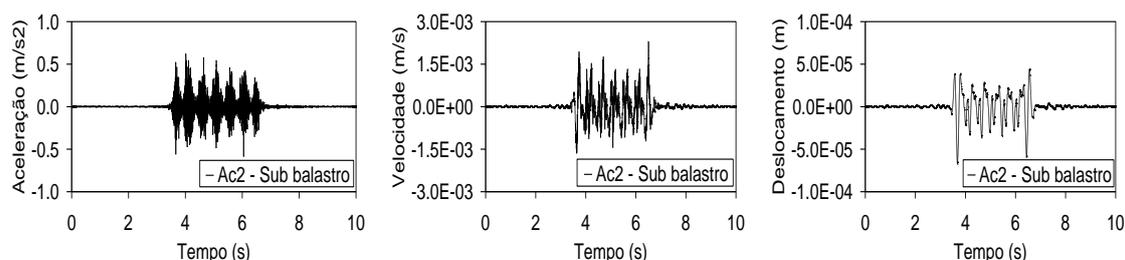


Figura 8 – Cálculo de velocidade e deslocamentos com filtros

## 6. CONCLUSÕES

A medição de vibrações à passagem de comboios de alta velocidade constitui um instrumento preponderante na avaliação da qualidade e desempenho da via férrea. A vibração excessiva da estrutura solo-via férrea acarreta elevados custos de exploração, nomeadamente no que diz respeito a vias férreas de alta velocidade, para além do desconforto provocado aos passageiros e pessoas que vivem na proximidade da via. Por outro lado, fornece dados essenciais à validação de modelos numéricos. O estudo aprofundado deste fenómeno assume grande interesse atendendo à construção de linhas férreas de alta velocidade em Portugal.

O presente artigo aborda os aspectos relativos à medição de vibrações “in situ” geradas pela passagem de comboios de alta velocidade. As medições realizadas permitiram afinar procedimentos e detectar algumas lacunas na preparação dos trabalhos de campo e algumas faltas de equipamento. Para além destes aspectos, foram ainda efectuados com sucesso diversos registos de vibrações que permitem já algum trabalho de gabinete no que respeita ao seu processamento.

## AGRADECIMENTOS

A presente comunicação foi realizada no âmbito do protocolo de colaboração entre a Rede Ferroviária Nacional e a Tecminho – Associação Universidade Empresa para o desenvolvimento enquanto representante do consórcio UM/LNEC/IST/FCT-UNL no sentido de desenvolver o conhecimento no âmbito da metodologia de construção e controlo de aterros para vias férreas e das camadas da plataforma da via, parte integrante do projecto POCI/ECM/6114/2004 – “Interacção solo-via férrea para comboios de alta velocidade”.

## REFERÊNCIAS

- Bahrekazemi, M. (2004). *Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction*. PHD Thesis. Royal Institute of Technology, Sweden.
- Brandl, H. (2004). “Geotechnical aspects for high-speed railways.” *Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction*, Gomes Correia & Loizos (eds), Rotterdam, Netherlands, 117-132
- Degrande, G. (2000). *Free field vibrations measurements during the passage of a Thalys high speed train*. Internal report BWM-2000-06, Katholieke Universiteit Leuven, Department of Civil Engineering.
- Fortunato, E. (2005). *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- SUPERTRACK (2005). *SNCF Final Report 2-Track measurements in Zouffgen*.