



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

DESENVOLVIMENTO DE UM CAMPO EXPERIMENTAL PARA A ANÁLISE E PREVISÃO DE VIBRAÇÕES E RUÍDO RE-RADIADO INDUZIDOS POR TRÁFEGO FERROVIÁRIO

PACS: 43.40

Aires Colaço¹; Pedro Alves Costa¹; Paulo Amado-Mendes²; Rui Calçada¹

¹Construct-FEUP, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

{aires@fe.up.pt; pacosta@fe.up.pt; ruiabc@fe.up.pt}

²ISISE, Dep. Civil Engineering, University of Coimbra, Pólo II, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

{pamendes@dec.uc.pt}

Keywords: Campo Experimental do Carregado; vibrações induzidas por tráfego ferroviário; interação solo-estrutura; funções de transferência

ABSTRACT

The use of hybrid approaches to predict vibrations and re-radiated noise induced by railway traffic is a valuable tool, allowing the reduction of the uncertainty in the prediction process with the combination of numerical and experimental results. In this way, an experimental test site on a stretch of the Portuguese railway network is presented, in which a comprehensive experimental campaign was developed, including the characterization of the track, the ground and the building under study. The complete geomechanical characterization of the experimental test site, associated to the experimental evaluation of transfer functions between the railway track and the building, will be the base for the definition of the hybrid model.

RESUMO

Abordagens híbridas, englobando e combinando resultados numéricos e experimentais, constituem ferramentas valiosas no processo de análise e previsão de vibrações e de ruído re-radiado no interior de edificações existentes junto a corredores ferroviários. Neste sentido, o presente trabalho apresenta a descrição de um campo experimental desenvolvido pelos autores, junto a um troço renovado da rede ferroviária portuguesa, o qual contempla uma edificação devidamente caracterizada. A existência de uma completa caracterização geomecânica do campo experimental, associada à avaliação experimental de funções de transferência entre os diferentes meios, desde a via-férrea à estrutura construída no maciço adjacente, possibilita a definição e validação de um modelo híbrido de previsão de vibrações e ruído re-radiado induzidos por tráfego ferroviário.



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

1. INTRODUÇÃO

A avaliação experimental de vibrações e ruído re-radiado no interior de edificações construídas nas proximidades de vias férreas é uma etapa fundamental para a validação experimental dos modelos numéricos de previsão e a sistematização de técnicas de medição. A contemplação dos diferentes meios envolvidos na resposta dinâmica do sistema, desde a fonte geradora de vibrações ao recetor, permite ainda abordar o problema de uma forma global e integrada.

Na bibliografia da especialidade, diferentes casos de estudo associados à problemática em causa podem ser encontrados, envolvendo a caracterização geométrica e mecânica da via-férrea e material circulante, bem como a caracterização geomecânica do maciço de fundação. Estes trabalhos contemplam, na maioria dos casos, a avaliação de registos de vibrações induzidas pela passagem de tráfego ferroviário em diferentes pontos da via e à superfície do maciço, podendo-se destacar os trabalhos apresentados por Degrande & Schillemans [1], Auersch [2], Lombaert et al. [3], Galvín & Domínguez [4], Connolly et al. [5], entre outros. Apesar do número significativo de estudos experimentais retratados, existe uma dificuldade real na obtenção dos registos em formato digital, bem como uma completa e exaustiva identificação dos dados necessários para alimentar os modelos numéricos. Por outro lado, a maioria destes trabalhos experimentais apenas foca a medição da resposta da via e do maciço geotécnico, não contemplando diretamente o recetor, ou seja, as edificações construídas nas proximidades das linhas férreas. Esta aparente lacuna deve-se, sobretudo, à dificuldade inerente em encontrar um local apropriado que permita conjugar, em simultâneo, os diferentes meios de análise e a existência de uma correta caracterização geomecânica do local. Este trabalho pretende, assim, apresentar um caso de estudo abrangente, caracterizando de uma forma exaustiva os diferentes meios envolvidos, de forma a permitir, numa fase posterior, a definição e validação de um modelo híbrido de previsão de vibrações e ruído re-radiado induzidos por tráfego ferroviário.

2. APRESENTAÇÃO GERAL DO CAMPO EXPERIMENTAL

Os autores do presente trabalho têm vindo a desenvolver um campo experimental principal, que contempla um troço renovado da Linha do Norte (km 41+625), junto ao Carregado – Portugal (Figura 1). Este local foi palco de diversas campanhas experimentais, existindo uma abrangente caracterização das propriedades geomecânicas e geométricas da via e do maciço envolvente, assim como o registo de medições de tráfego em número significativo [6, 7].

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre



(a)



(b)



(c)

Figura 1 – Campo Experimental do Carregado: a) localização no panorama nacional; b) fotografia de satélite de pormenor; c) fotografia do troço da via-férrea em estudo.

Dando seguimento ao desenvolvimento do campo experimental apresentado, a implementação de uma edificação na vizinhança da linha ferroviária constitui objetivo imediato. Deste modo, o campo experimental em causa é estendido visando agora a incorporação do receptor, isto é, uma edificação na proximidade da via férrea. Tal objetivo é alcançado pela construção integral de uma estrutura metálica modular nas proximidades do troço em questão, conforme esquematizado na Figura 2.

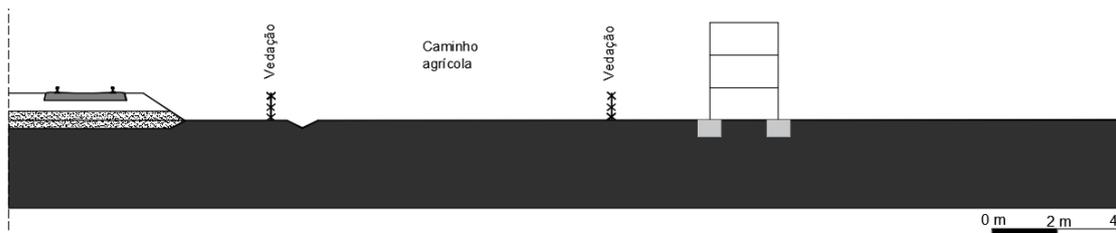


Figura 2 – Localização da estrutura em relação ao troço da via-férrea em análise.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

3. CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DA ESTRUTURA

3.1. Propriedades gerais

A edificação anteriormente referida consiste numa estrutura porticada de três pisos, com uma dimensão em altura de 3 m e uma área em planta de 2.1 x 2.1 m². A estrutura idealizada é composta por perfis metálicos do tipo IPE100 conectados através de ligações aparafusadas. Os pilares são divididos em troços de 1.0 m, com uma massa individual de aproximadamente 8 kg. As vigas têm uma massa individual aproximada de 17 kg. Em relação às lajes do edifício, estas correspondem a placas de aglomerado de madeira do tipo MDF hidrófugo (do inglês “Medium Density Fiberboard”) com uma espessura nominal de 30 mm, perfazendo uma massa por laje de aproximadamente 95 kg. A Figura 3 apresenta o enquadramento da estrutura descrita em relação à via-férrea.



Figura 3 – Registo fotográfico do enquadramento da estrutura em relação à via-férrea.

3.2. Identificação modal e calibração do modelo numérico

Apesar da relativa simplicidade da estrutura construída e do conhecimento das propriedades mecânicas dos diferentes elementos, persistem algumas incertezas no que diz respeito ao comportamento modal do sistema de lajes. De modo a ultrapassar estas, e numa perspetiva futura de modelação numérica da estrutura, foi realizado um ensaio de vibração ambiental de forma a estimar as características modais principais do sistema, parâmetros essenciais para o processo de calibração do modelo numérico.

Para a avaliação dos modos associados ao movimento vertical do conjunto das lajes, foi adotado um *setup* experimental composto por uma densa malha de acelerómetros, devidamente orientados, para a obtenção de uma adequada resolução espacial. Deste modo, foram considerados um total de treze acelerómetros por piso, permitindo registar a componente vertical das acelerações durante um período de dez minutos e com uma frequência de aquisição igual a 2048 Hz. Os acelerómetros indicados correspondem a acelerómetros unidireccionais de elevada sensibilidade (10 V/g), com uma gama de medição de $\pm 0.5G$, da National InstrumentsTM. O sistema de aquisição LabView foi usado para o registo da resposta estrutural.

As séries temporais em acelerações recolhidas foram processadas através dos algoritmos de identificação “peak picking” e “frequency domain decomposition” (FDD), implementados no *software* comercial ARTeMIS Extractor [8]. A exposição das técnicas de análise indicadas está fora do âmbito do presente trabalho, pelo que uma descrição exaustiva ode ser encontrada em Magalhães & Cunha [9]. A partir do *software* indicado é possível avaliar o espectro de resposta indicado na Figura 4. As configurações modais dos três primeiros modos de vibração encontram-se representados na Figura 5, em correspondência com as diferentes frequências de excitação identificadas no espectro de resposta. De realçar, desde já, a existência de um conjunto de três frequências muito próximas associadas a cada tipologia de modo de vibração em correspondência com os três níveis do edifício. De modo a simplificar a representação gráfica, apenas as configurações modais associadas ao primeiro piso da estrutura serão apresentadas.

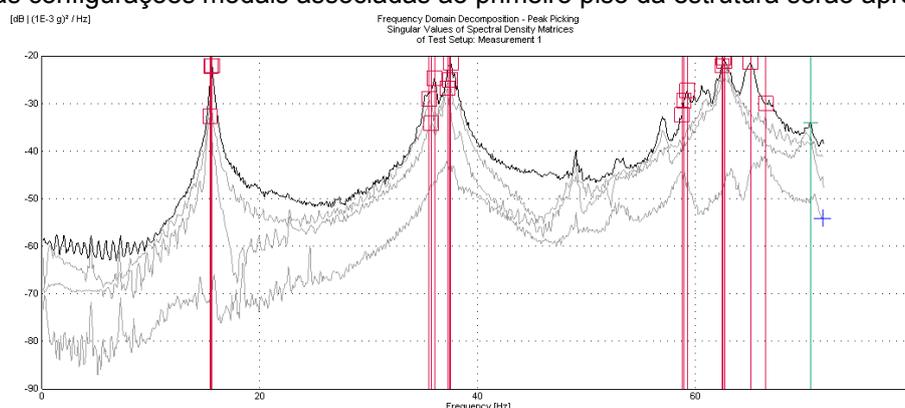


Figura 4 – Ensaio de identificação modal: espectro de resposta.

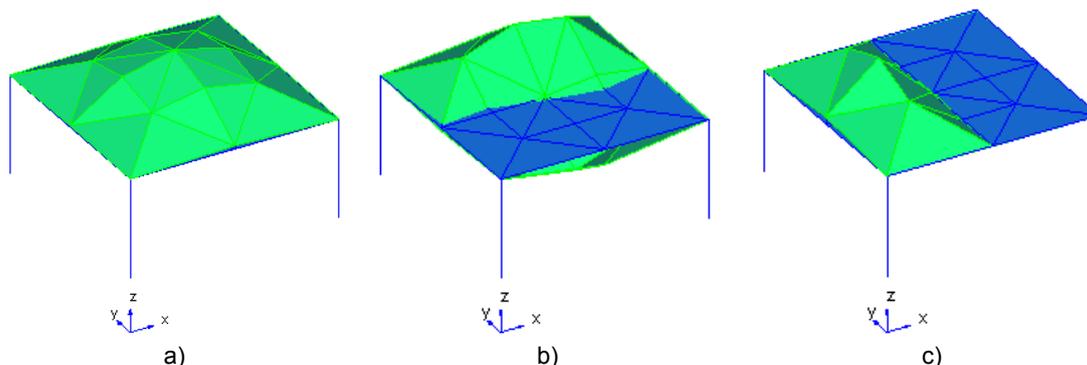


Figura 5 – Ensaio de identificação modal – configurações modais: a) 1º Modo: $f=15.42$ Hz; b) 2º Modo: $f=35.13$ Hz; c) 3º Modo: $f=37.07$ Hz.

4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CURVAS DE IMPEDÂNCIA DAS FUNDAÇÕES

O ensaio de impedância consiste na aplicação de um impacto à superfície das sapatas e na subsequente medição da resposta dinâmica das mesmas. Assim, e tendo por objetivo a averiguação das curvas de impedância vertical associadas a cada uma das sapatas, foram considerados quatro pontos de medição por sapata (possibilitando a definição de um valor médio) e a aplicação do impacto teve lugar no centro geométrico da mesma (Figura 6a).

O sistema de aquisição LabView foi usado para o registo da resposta dinâmica das sapatas, medida por intermédio dos acelerómetros colocados de acordo com a configuração experimental

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

referida. Em relação às especificações dos equipamentos de medição, foram usados acelerómetros unidireccionais de elevada sensibilidade (10 V/g), com uma gama de medição de $\pm 0.5G$, da National Instruments™. A excitação exterior imposta à estrutura foi aplicada com recurso a um martelo instrumentado (ICP® Impact Hammer Model 086D50), com capacidade de registo da ação aplicada.

Uma vez conhecida a carga aplicada e a resposta das sapatas é possível calcular a curva de resposta em frequência de acordo com a seguinte expressão:

$$H(\omega) = \frac{F_j^{av}(\omega)}{x_i^{av}(\omega)} \quad (1)$$

onde $x_i^{av}(\omega)$ e $F_j^{av}(\omega)$ representam os valores médios do deslocamento no ponto de observação i e da força de impacto, respetivamente, ambos definidos no domínio da frequência. A Figura 6 apresenta as curvas obtidas (parte real e imaginária) para as quatro diferentes sapatas. A curva média encontra-se representada a preto.

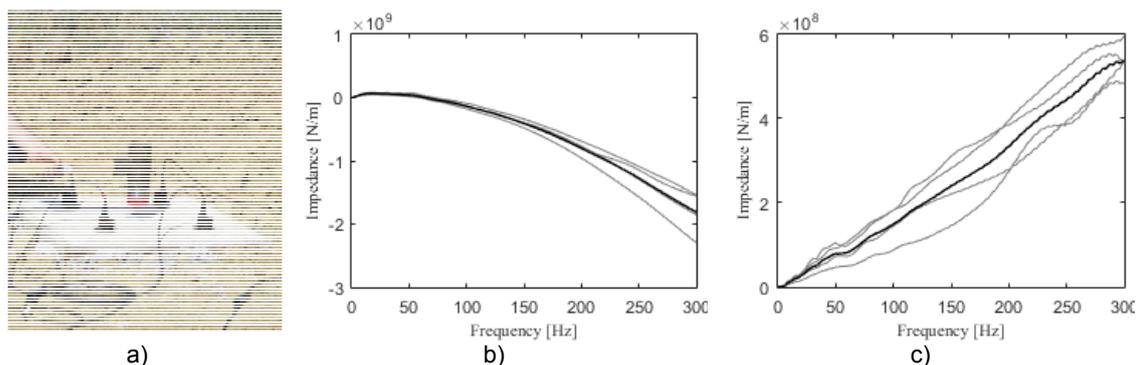


Figura 6 – Impedância vertical das fundações: a) configuração experimental; b) componente real da curva de impedância; c) componente imaginária da curva de impedância (curvas a cinza: curvas de impedância das sapatas individuais; curva a preto: média das quatro sapatas).

5. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

Por definição, a função de transferência corresponde à relação, no domínio da frequência, entre a resposta de um sistema linear face à aplicação de uma dada excitação. No presente caso, a excitação consiste na aplicação de um impacto à superfície do solo por intermédio de um excitador dinâmico colocado nas proximidades da linha-férrea e a avaliação da resposta por intermédio de acelerómetros colocados em diferentes posições do maciço e da estrutura. Deste modo, as propriedades elastodinâmicas que caracterizam o caminho de propagação entre a via-férrea e o edifício são incorporadas nas curvas experimentais, reduzindo as incertezas que resultam da caracterização geotécnica do maciço. A Figura 7 apresenta a configuração experimental adotada para um alinhamento central de pontos, onde se encontram esquematicamente representados os pontos de medição e a posição do excitador dinâmico.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

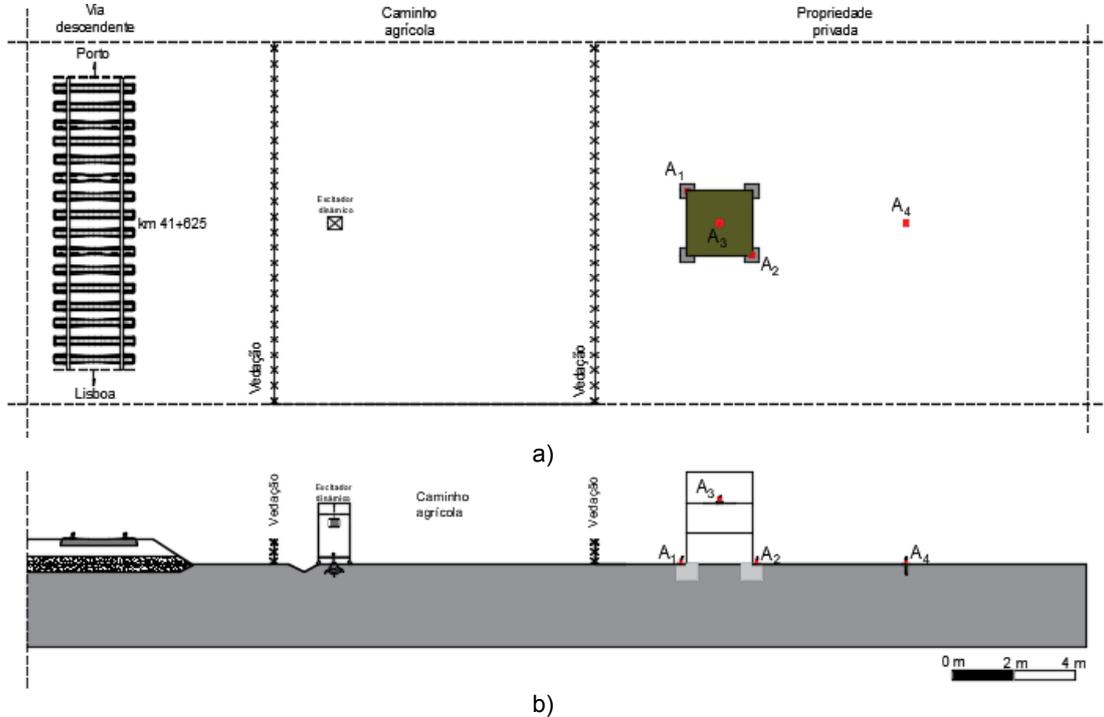
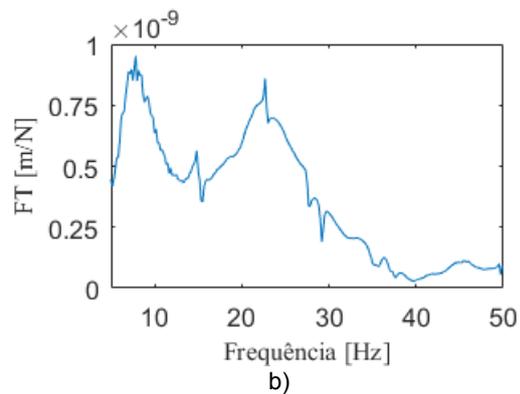
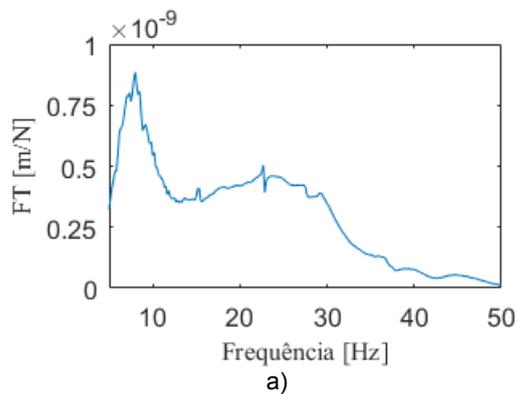


Figura 7 – Representação esquemática da configuração experimental adotada para avaliação de funções de transferência: a) vista em planta; b) vista em corte.

A Figura 8 apresenta, a título de exemplo, as funções de transferência para os pontos anteriormente indicados. Estas curvas serão fundamentais na definição de um modelo híbrido, no qual se pretende a combinação de resultados obtidos por via numérica com resultados obtidos experimentalmente, reduzindo as incertezas associadas ao processo de previsão, resultados estes sempre baseados no conceito de função de transferência.



FIA 2018

XI Congresso Iberoamericano de Acústica; X Congresso Ibérico de Acústica; 49º Congresso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

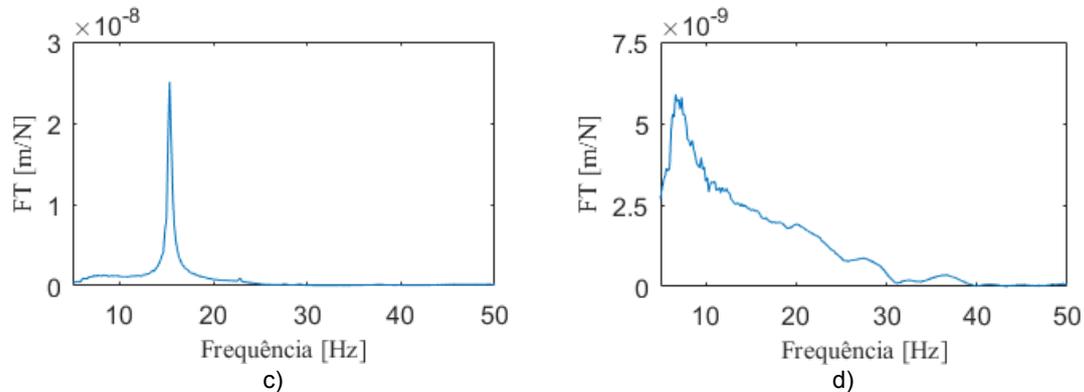


Figura 8 – Funções de transferência: a) Ponto A1; b) Ponto A2; c) Ponto A3; d) Ponto A4.

6. RESPOSTA DINÂMICA DA ESTRUTRA SOB A AÇÃO DE TRÁFEGO FERROVIÁRIO

De uma forma muito breve, na presente secção é apresentada, a título de exemplo, a resposta dinâmica da estrutura sob a ação de tráfego ferroviário. Neste encaixe, a Figura 9 apresenta o registo de velocidades para um ponto localizado no centro geométrico da laje do segundo piso induzido pela passagem do comboio AlfaPendular à velocidade de 220 km/h. Os registos aqui apresentados serão úteis numa etapa posterior ao presente trabalho, em que se procederá à validação experimental do modelo híbrido anteriormente referido.

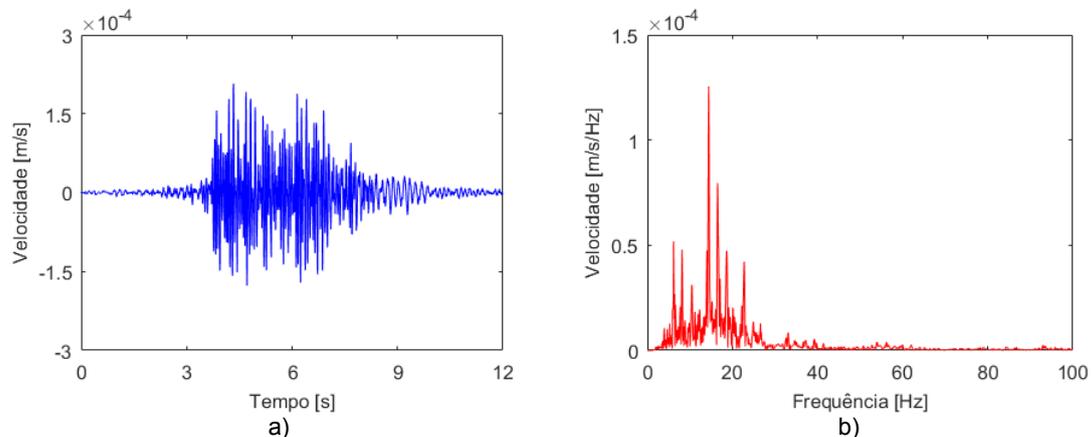


Figura 9 – Registo de velocidades induzidas pela passagem de comboio AlfaPendular para ponto localizado no centro geométrico da laje do segundo piso da estrutura: a) registo temporal; b) conteúdo em frequência.

7. CONCLUSÕES

O presente documento apresenta a descrição geral dos trabalhos práticos que decorrem no Campo Experimental do Carregado. O objetivo final passa por uma caracterização abrangente da globalidade do sistema envolvido, incluindo a via-férrea, maciço de fundação e estrutura adjacente, de forma a dotar os autores de um caso de estudo prático que permita a validação de modelos numéricos para previsão de vibrações e ruído re-radiado induzidos por tráfego

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

ferroviário. Associado a este objetivo, os autores pretendem retirar partido das potencialidades do caso de estudo para a definição de um modelo híbrido que permita a combinação dos resultados experimentais e numéricos, baseando-se no conceito de funções de transferência.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por:

- Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 - CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.; Projecto PTDC/ECMCOM/1364/2014 e Bolsa Individual SFRH/BD/101044/2014.
- Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade - COMPETE e por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto POCI-01-0145-FEDER-007633 (ISISE) e através do Programa Operacional Regional CENTRO2020 no âmbito do projeto CENTRO-01-0145-FEDER-000006 (SUSpENsE).”
- Projeto POCI-01-0145-FEDER-029577 – financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais (PIDDAC) através FCT/MCTES.
- Comissão Europeia através do Projeto H2020 MARIE SKŁODOWSKA-CURIE RISE, Grant No. 691135 “RISEN: Rail Infrastructure Systems Engineering Network”.

REFERÊNCIAS

1. Degrande, G. and L. Shillemans, (2001), Free fields vibrations during the passage of a Thalys high-speed train at variable speed. *Journal of Sound and Vibration*. **247**(1): p. 131-144.
2. Auersch, L., (2005), The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle-track-soil interaction and measurements on high-speed lines. *Journal of Sound and Vibration*. **284**: p. 103-132.
3. Lombaert, G., G. Degrande, J. Kogut, and S. François, (2006), The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations. *Journal of Sound and Vibration*. **297**: p. 512-535.
4. Galvín, P. and J. Domínguez, (2009), Experimental and numerical analyses of vibrations induced by high-speed trains on Córdoba-Málaga line. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. **29**(4): p. 641-657.
5. Connolly, D.P., G. Kouroussis, P.K. Woodward, P. Alves Costa, O. Verlinden, and M.C. Forde, (2014), Field testing and analysis of high speed rail vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. **67**: p. 102-118.
6. dos Santos, N.C., A. Colaço, P.A. Costa, and R. Calçada, (2016), Experimental analysis of track-ground vibrations on a stretch of the Portuguese railway network. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. **90**: p. 358-380.
7. Alves Costa, P., R. Calçada, and A. Cardoso, (2012), Track-ground vibrations induced by railway traffic: In-situ measurements and validation of a 2.5D FEM-BEM model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. **32**: p. 111-128.
8. SVS, Structural Vibration Solution - ARTEMIS Extractor Pro. Release 5.3, ed; 2012.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

9. Magalhães, F. and A. Cunha, (2011), Explaining operational modal analysis with data from an arch bridge. *Mechanical Systems and Signal Processing*. **25**(5): p. 1431-1450.