

COMBÓIOS DE ALTA VELOCIDADE PREVISÃO DE VIBRAÇÕES PROXIMO DE FUTURA VIA ESTIMATIVAS DA SOLICITAÇÃO E FUNÇÃO DE TRANSFERENCIA

HIGH SPEED TRAINS FUTURE RAILWAY NEARBY VIBRATION PREDICTION INPUT AND TRANSFER FUNCTION ESTIMATES

Schiappa F. ¹, Domingues O. ²

¹ Acústica 21
{fschiappa@yahoo.com}

² Acústica 21
{odetedomingues@acustica21.com}

1 - RESUMO

Esta comunicação relata, no âmbito do estudo feito para a previsão das vibrações nos edifícios próximos de uma futura via de alta velocidade (a linha Poceirão Caia), originadas pela passagem dos comboios, a estimativa do espectro de vibrações verticais próximo da via, e a estimativa da função de transferência através dos solos da via para construções próximas. Comparam-se os valores previstos com os valores admissíveis, de acordo com os critérios geralmente adoptados, e sugerem-se medidas de minimização onde necessárias.

O presente estudo baseou-se na metodologia já proposta em comunicação anterior [1], adaptada [2] ao caso em estudo e aos meios disponíveis.

Previamente foi medida a situação de referencia, nos locais seleccionados numa primeira triagem, locais onde já existe uma fonte de vibrações, estrada ou via férrea.

A previsão das vibrações próximo da via obteve-se pela transposição de medições realizadas no TGV francês [3].

A transmissão destas para as construções (habitações) seleccionadas próximo da via, obteve-se por medição nos locais seleccionados, em dois pontos afastados, utilizando uma solicitação impulsiva. Os resultados das medições, em espectros de frequência, permitiram estimar o amortecimento. Descreve-se os procedimentos utilizados, a realização e resultado das medições.

Igualmente se refere a necessidade do controle das vibrações durante a obra de construção da via, e as linhas gerais do isolamento das vibrações, onde necessário.

Propõe-se este estudo de caso como base de método para futuros estudos em Portugal.

1 bis - ABSTRACT

This paper relates the study for the prediction of the vibrations caused in the nearby buildings by a future high speed railway (the Poceirao Caia line) in Portugal, namely the vibration input and the soil transmission estimates, done for; the predicted values on the buildings

foundations are compared with the relevant standards and criteria, and where necessary, guidelines for the vibration isolation are proposed.

The present work was based on the methodology proposed in a previous paper [1], adapted [2] to the field and to the means available.

Ambient vibration was measured near the selected nearby buildings, where a vibration source, road or railway, already exists.

Prediction of the vibrations near the railway was done by transposing the measurement values reported due to the French high speed train (TGV) [3].

Vibration transmission through the soil was estimated by measurements performed on the ground in the selected places, near the buildings likely to undergo vibrations above acceptable limits. Sensitive accelerometers and impulsive forces were used. Damping was evaluated using the frequency analysed measurements. Evaluation and measurement proceedings are described, the performing and results of the measurements are referred. Vibration control during construction works is suggested. This case study is proposed as a basis for future similar studies.

2 - A FUTURA LINHA

O traçado previsto para a futura via atravessa apenas uma povoação, sobrepondo-se a uma via férrea convencional já existente, desenvolvendo-se a maioria do restante percurso por áreas não urbanizadas. Todo o troço foi subdividido em subtroços, referindo-se os locais em estudo pelas cotas quilométricas com origem no início dos subtroços, e pelas designações toponímicas, quando conhecidas. Uma pequena parte do troço da futura via férrea encontra-se representada na figura 1, onde se identificam três edifícios de habitação potencialmente expostos a impactes negativos, do conjunto global de 16 situações (construções próximas) objecto de análise.

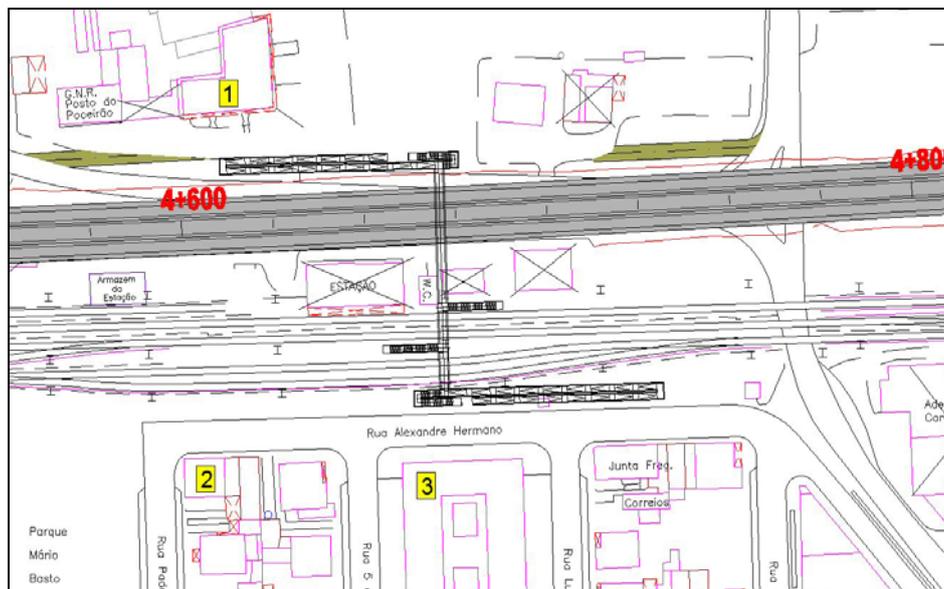


Figura 1 – Vila do Poceirão com o traçado previsto da via férrea de A V, mostrando três dos edifícios listados, três primeiras linhas da tabela 3.

3 - CARACTERÍSTICAS DA VIA E DAS COMPOSIÇÕES

Os elementos conhecidos e utilizados neste estudo foram os seguintes:

3.1 - Planta topográfica, com o traçado previsto da linha, incluindo aterros, valas e viadutos, com as construções próximas, e informação sobre a composição geológica local;

3.2 - Velocidade nominal dos comboios de alta velocidade

passageiros: $V_{\text{comb}} = 350$ km / hora;

mercadorias: $V_{\text{comb}} = 160$ km / hora.

3.3 - Pesos por eixo

passageiros: 170 kN ;

mercadorias, 250 kN.

3.4 – Composições:

3.4.1 - passageiros: comprimento total: 200 m; distância entre bogies das carruagens: 18,7 m, distância entre eixos no bogie: 3,0 m;

3.4.2 - mercadorias: comprimento total: 500 m (1 locomotiva + 35 vagões); distância entre bogies: 18 m.

3.5 - Vias: dupla;

3.5.1 - Carris: altura: 17,2 cm; área da secção: 76,70 cm²; massa: 60,1 kg/m; inércia da secção (I_x) 3038,3 cm⁴; $E = 210$ GPa, $G = 77$ GPa; $\nu = 0,31$;

3.5.2 - Travessas: de betão 2,60 m x 0,30 m x 0,30 m, espaçadas de 0,60 m;

3.5.3 - Balastro: espessura 0,35 m; sub-balastro: espessura 0,25 m;

3.5.4 - Aterro: espessura do coroamento: 0,45 m; espessura do aterro: 1,0 m;

3.5.5 - Fundação: argila silto-arenosa: espessura 3,0 m; altura total cerca de 5,5 m.

4 - QUANTIFICAÇÃO DA VIBRAÇÃO. CRITÉRIOS DE ADMISSIBILIDADE

A vibração, movimento de um, ou mais, pontos de uma edificação, ou de um solo, é quantificada pela velocidade do ponto representativo do local em estudo, como seja o piso de uma habitação (para averiguação de incomodidade), ou a fundação de um edifício (também para eventual averiguação de danos). A velocidade, (grandeza vectorial, definida pelas suas três componentes, funções do tempo, mas avaliada pela(s) componente(s) mais significativa(s) captada, por exemplo, durante a passagem de um comboio), é geralmente quantificada pelos seus valores máximo e eficaz; os equipamentos de medição e aquisição e processamento de sinal calculam um valor eficaz corrente, num intervalo de tempo reduzido (1 s) determinando uma média linear, ou exponencialmente decrescente com valores anteriores, sendo assim possível determinar um valor máximo do valor eficaz corrente.

A velocidade de vibração, máxima ou eficaz, é geralmente referida em mm/s; quando referida em dB_v , o valor de referência é $v_{\text{ref}} = 5 \times 10^{-5}$ mm / s (nos EUA usa-se um valor de referência de 1 $\mu\text{polegada/s}$, que conduz a valores 5,9 dB_v superiores).

As vibrações são geralmente classificadas em impulsivas (como as provocadas pelo uso de explosivos), quantificadas pelo valor máximo $v_{\text{máx}}$ (ppv), ou continuadas, como as geradas pela passagem dos comboios ou pelo trabalho da equipamentos motorizados, quantificadas pelo valor eficaz v_{ef} (rms).

Os critérios de admissibilidade geralmente aceites encontram-se descritos em Schiappa de Azevedo, F., Domingues, O. e Castro, J., 2010, [1, 4].

Usaram-se, para incomodidade devida a vibrações continuadas, as tabelas 1 e 2 (os limites da tabela 2 só serão aplicáveis se o nível sonoro previsto no interior dos edifícios, avaliado durante o tempo de passagem do comboio, for $L_{eq} < 30 \text{ dB(A)}$):

Tabela 1 – Limites admissíveis da velocidade de vibração sensível

Edifícios	v_{ef} , mm / s	v_{ef} , dB_v
Habitacões, hotéis, hospitais, e similares	0,10	66
Ed. de comércio, serviços e industriais	0,20	72

Tabela 2 – Limites admissíveis da velocidade de vibração ruidosa, e ruído emitido

Edifícios	v_{efA} (pesada A), mm / s	L_A , dB_A
Habitacões, hotéis, hospitais, e similares	0,03	30

Em locais ou edifícios com requisitos especiais, estes foram tomados em conta.

5 - PREVISÃO

O método de previsão das vibrações geradas pelo tráfego ferroviário de alta velocidade, é essencialmente o descrito em Schiappa de Azevedo, F., Domingues, O. e Castro, J., 2010, [1]. Ver também referências anteriores, [2, 3], [5, 6]. De acordo com o método proposto [1], realizou-se uma triagem inicial para a selecção dos locais e construções a estudar em detalhe.

5.1 - Triagem inicial

Sobre a planta com o traçado previsto da via dupla, traçaram-se duas linhas paralelas às vias, distando destas de 70 m, que corresponde à extensão potencialmente influenciada pelas vibrações.

Este valor foi obtido do gráfico de previsão da figura 2, para o limite admissível de velocidade $v_{ef} = 0,1 \text{ mm/s}$, gráfico corrigido para uma velocidade dos comboios de $v_{comb} = 350 \text{ km / hora}$, por multiplicação dos valores de v por $350/240 = 1,46$ (ou seja “subindo” a curva 3,3 dB_v). Esta proporcionalidade, que não é consensual, encontra-se, porém, do lado da segurança.

Listaram-se todos os edifícios situados na faixa entre as paralelas (incluindo seis construções previstas próximo da linha, subestações, postos de vigia e socorro), obtendo-se 46 locais.

Para cada um (para grupos de construções seleccionou-se a habitação mais próxima do eixo da futura via), considerando a respectiva distância à via (eixo da via mais próxima), calcularam-se os valores (iniciais) da velocidade.

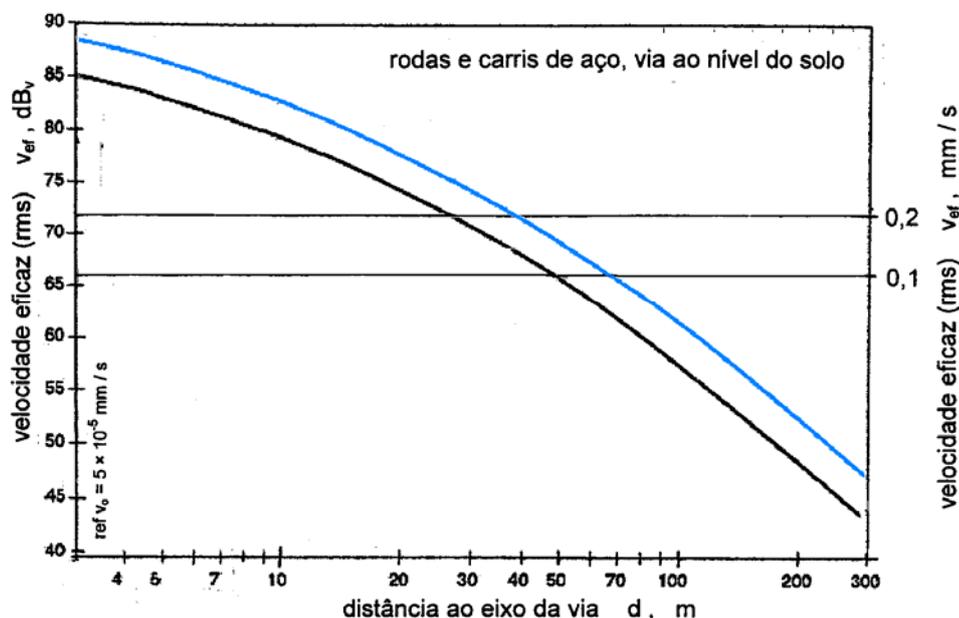


Figura 2 – Previsão inicial da velocidade efectiva de vibração em função da distância à via, para velocidade do comboio de 240 km / hora [2]; para $V_{comb} = 350$ km / hora, elevou-se a curva 3,3 dB_v, curva a azul.

5.2 - Reconhecimento

Por deslocação aos locais dos edifícios listados (excluindo os edifícios previstos, inexistentes), fez-se um reconhecimento, procurando identificar-se:

O tipo e qualidade da construção: tradicional de alvenaria de pedra ou de tijolo, com madeira; recente, com estrutura e pisos de betão armado; só de rés do chão, n.º de pisos incluindo o da soleira;

O uso das construções: habitação, apoio agrícola (recolha de alfaías ou animais), comércio ou escritório, habitação desabitada ou ruína.

Só para as habitações e escolas se considerou o limite admissível de $v_{ef} = 0,1$ mm / s .

Acrescentaram-se alguns edifícios de que houve notícia terem os seus proprietários manifestado alguma preocupação.

O resultado da triagem inicial e do reconhecimento está resumido na tabela 3, seguinte:

Tabela 3 – Listagem dos edifícios, sua localização, velocidade inicialmente prevista, tipo e uso

Lote	Ocor.	km	d , m ¹	V , mm/s	Designação	Tipo	Uso
A	1(E)	4,600	26,2	0,26	EN 5	2 pisos, rec.te	habitação
A	2(D)	4,600	56,4	0,12	r. Alex. Hermano	1 piso, tradic.	habitação
A	3(D)	4,675	60,2	0,11	r. Alex. Hermano	2 pisos, rec.te	habitação
A	4(E)	4,700	19,0	0,31	EN 5	1 piso, recente	habitação
A	5(D)	4,725	59,0	0,12	r. Alex. Hermano	2 pisos, tradic.	escritório
A	6(D)	4,750	59,0	0,12	r. Alex. Hermano	1 piso, tradic.	habitação
A	7(D)	4,775	71,5	0,09	r. 1.º de Janeiro	2 pisos, tradic.	habitação

Lote	Ocor.	km	d, m ¹	V, mm/s	Designação	Tipo	Uso
A	8(E)	8,950	81,0	0,08	Casal Freitas	1 piso, tradic.	habitação
A	9(D)	9,200	59,4	0,14	estr. de Fern. Pó	1 piso, tradic.	habitação
A	10(D)	9,200	115,6	0,05	estr. de Fern. Pó	1 piso, tradic.	escola 1 ^o c ^o
A	11(D)	9,300	84,9	0,07	estr. de Fern. Pó		habitação
A	12(D)	9,850	50,1	0,14	rua Campos	1 piso, tradic.	habitação
A	13(E)	11,100	34,0	0,21		1 piso, tradic.	habitação
A	14(D)	24,600	75,5	0,08	herd. da Afeiteira	1 piso, tradic.	habitação
A	15(E)	25,475	24,2	0,27	Af. ^a , r. 7 de Abr.	1 piso, tradic.	habitação
A	16(E)	25,550	30,0	0,23	Afeiteira	1 piso, recente	habitação
A	17(D)	28,800	62,1	0,08	"		habitação
B1	1(E)	2,200	67,2	0,10	Colónias	1 piso, recente	habitação
B1	2(E)	2,350	63,0		Colónias	1 piso	picadeiro
B1	3(D)	6,500	134,0	0,02	Herd. das Silveiras	1 piso, recente	habitação
B1	4(D)	12,825	50,2	0,06	M.te da Videira	2 pisos, alv. ^a	habitação
B2	1(E)	0,400	78,0	0,14	Herdade Foros do Cortiço	1 piso, tradic.	estúdio TV
B2	2(E)	0,425	49,3			1 piso, tradic.	habitação
B2	3(E)	0,475	39,6			1 piso, tradic.	habitação
B2	4(E)	0,525	29,0				pavilhão desportivo
B2	5(D)	14,350	48,3	0,14	Alcanede - Silval	1 piso, tradic.	habitação
C2	1(D)	2,125	76,5	0,09	Monte do Seixo	2 pisos, tradic.	habitação
C2	2(E)	8,900	52,0				cemitério
D1	1(D)	10,900	34,0	0,22	M. da Amendoeira	1 piso, tradic.	habitação
D1	2(E)	11,020	17,5	0,25	Carrapatosa	1 piso tradic.	habitação
D1	3(D)	25,600	62,0		Monte dos Outeiros	1 piso	
D2	1(D)	0,450	47,5	0,13	M.te do Carapeto	1 piso, tradic.	habitação
D2	2(D)	5,900	69,0	0,10		1 piso, tradic.	habitação
D2	3(D)	17,400	29,1	0,25	Centro empresarial do Caia	2 pisos, tradic.	escritór.s, armazém

¹ – distância entre o receptor sensível e o eixo da via mais próxima.

5.3 – Situação de referência

5.3.1 – Equipamento utilizado para a medição

1 sistema de aquisição B&K Type 3160-A-042, de 4 canais (+ 2 de geração de sinal) – PULSE, n.º de série 3160-100197;

1 acelerómetro triaxial B&K 4524, nº de série 30285;

Programação de aquisição e tratamento B&K LabShop, versão 14, com chave D20159.

5.3.2 – Valores obtidos

Junto à fundação dos edifícios listados como habitações e escolas (com excepção daqueles aos quais não foi possível aceder) mediu-se a velocidade de vibração nas suas três componentes. As medições foram realizadas em 2 e 4 de Novembro de 2010. Os resultados mais significativos encontram-se na tabela 4:

Tabela 4 – Edifícios listados, sua localização, valor de referência da velocidade

Lote	Ponto	km	designação	Ocorr. ^a	$V_{ }$, mm/s	$V_{ -}$, mm/s	V_{\uparrow} , mm/s
A	V1	4,600	EN 5		0,0337	0,0774	0,0501
A	V2	4,675	r. Alex. Hermano	comboio	0,0240	0,0396	0,0265
A	V3	9,200	estr. de Fern. Pó		0,0180	0,0197	0,0144
A	V4	9,850	rua Campos	comboio	0,0771	0,0851	0,117
A	V5	11,100			0,0180	0,0233	0,0171
A	V6	25,475	Afeiteira, r. 7 de Abr.		0,0182	0,0213	0,0132
B1	V1	2,200	Colónias		0,0168	0,0226	0,0148
B2	V1	0,400	Herdade P.º Band. ^a		0,0218	0,0204	0,0130
B2	V2	14,350	Alcanede - Silval		0,0185	0,0283	0,0155
D1	V1	11,020	Carrapatosa		0,0210	0,0450	0,0228
D2	V1	0,450	M.te do Carapeto		0,0220	0,0481	0,0339
D2	V2	17,400	C.º empr. do Caia		0,0182	0,0267	0,0194

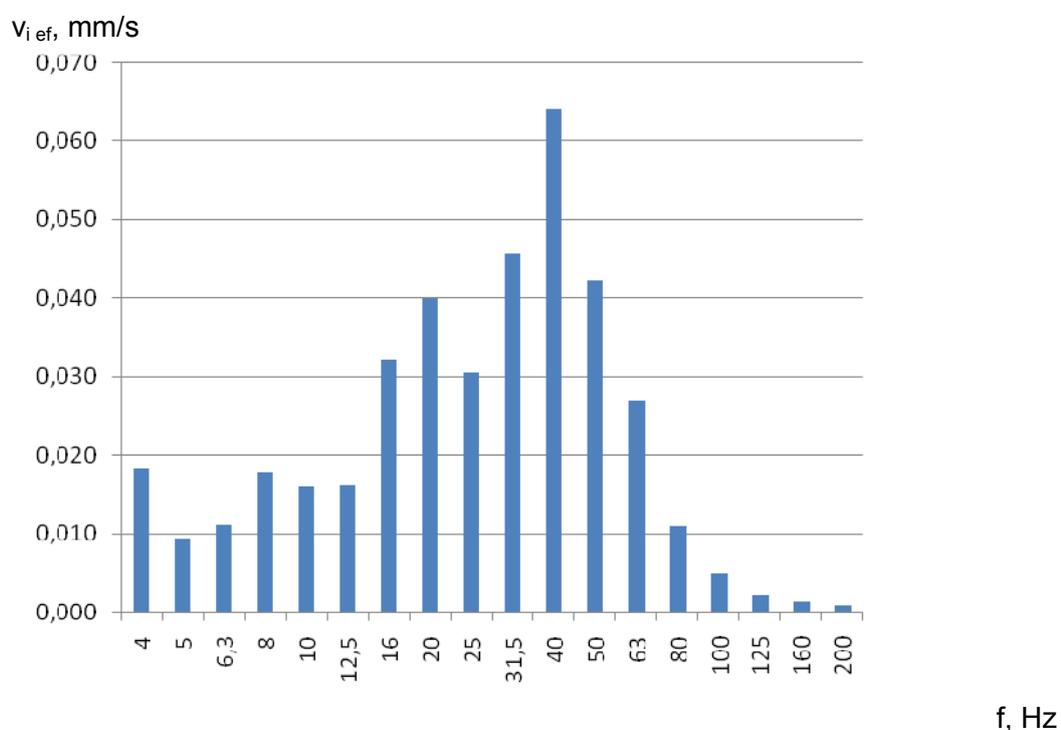


Figura 3 – Espectro da velocidade, componente vertical, obtido junto às fundações da habitação na rua Campos, devida à passagem de comboio na linha, a cerca de 22 m

A medição da situação de referência, no caso da vibração, só importa nas situações em que exista previamente, devida a fontes próximas, uma intensidade significativa, em particular superior ao valor admissível, considerado para o módulo da velocidade. No caso presente, apenas em um local, na habitação na rua Campos, a velocidade de vibração vertical, devida a passagem de comboio na via próxima, é superior ao limiar de sensibilidade humana, 0,11 mm/s, figura 3.

5.4 – Breve referência teórica

O método de previsão vai basear-se na teoria conhecida aplicável aos sistemas dinâmicos, procurando-se ajustar os parâmetros das equações ao caso em estudo. Desejavelmente devem conhecer-se as características dinâmicas dos comboios, as características geométricas e materiais das vias e estruturas subjacentes (que comportam aspectos estáticos, cinemáticos e dinâmicos), e as características dinâmicas dos edifícios.

Muito sucintamente, pode descrever-se a geração das vibrações [1]:

Conjunto de pesos moveis (transmitidos à via pelos rodados) + Movimento vertical dos rodados (devido a alguma curvatura vertical dos carris), $w + y \rightarrow$ {dinâmica das composições + dinâmica da via e solo subjacente, C } \rightarrow Movimento do solo adjacente à via, $u_1 \rightarrow$ {Propagação da vibração pelo solo, S } \rightarrow Movimento junto e sob as fundações dos edifícios, $u_2 \rightarrow$ {Propagação da vibração pelo edifício, E } \rightarrow Movimento de pisos e paredes, z .

Note-se que alguma curvatura dos carris d^2y/dx^2 , (x coordenada do eixo da via) obriga os rodados (no referencial da respectiva composição) a um movimento acelerado $d^2y/dt^2 = V_{\text{comb}}^2 \cdot d^2y/dx^2$.

Considerando lineares as relações entre as variáveis

$$\{C\} u_1 = w, \quad \{S\} u_2 = u_1, \quad \{E\} z = u_2, \quad (1a, 1b, 1c)$$

onde $\{C\}$, $\{S\}$, e $\{E\}$ são os operadores diferenciais que modelam a dinâmica dos subsistemas, e aplicando-lhes a transformação de Fourier, obtêm-se os espectros

$$U_1 = T_C \times W, \quad U_2 = T_{S21} \times U_1, \quad Z = T_E \times U_2, \quad (2a, 2b, 2c)$$

onde os T são as funções de transferência dos subsistemas.

A dificuldade na modelação teórica, e a incerteza e variabilidade das características, na prática, dos materiais e das soluções construtivas, obrigam a uma determinação experimental daquelas funções de transferência, quer em linhas já existentes, quer nos locais de futura implantação, em condições que permitam a utilização dos resultados na previsão dos valores das vibrações.

5.5 – Técnica proposta

A previsão mais precisa dos valores da vibração junto aos edifícios listados, V_2 , baseou-se na equação acima, 2b, referida aos espectros de velocidade ($V_2 = \omega U_2$; $V_1 = \omega U_1$):

$$V_2 = T_{S21} \times V_1 \quad (3)$$

e no modelo geralmente aceite [6] para a função de transferência T_{S21}

$$V_2 = V_1 \times (d_2 / d_1)^{-m} \cdot \exp(-b \cdot \omega (d_2 - d_1) / C) \quad (4)$$

onde d_2 e d_1 são as distâncias ao eixo da via dos pontos 1 (próximo da via) e 2 (junto ao edifício), o segmento 12 perpendicular à via, m é o expoente da “dispersão” geométrica, b o coeficiente de amortecimento, característico do solo, e C a velocidade de propagação no solo das ondas de vibração de Rayleigh.

5.6 – Identificação das características de propagação dos solos

5.6.1– Equipamento de Medição

Utilizou-se o seguinte equipamento:

Sistema de aquisição, marca 01 dB, modelo Symphonie 1390, de 2 canais, nº SYMP 03 – 1914;

2 acelerómetros uniaxiais PCB, modelo 393B05, n.ºs de série 22705 e 22706, sensibilidade nominal 1 V/ms^{-2} .

Programação de aquisição e tratamento de sinais 01 dB, versão 4.313 dBTrig32 e dB Trait32

5.6.2– Método

Para a determinação dos parâmetros da equação anterior, seguiu-se no simplificada a técnica referida na pág.^a 66 da referência 3. Colocaram-se dois acelerómetros fixos ao solo em pontos designados por 1 e 2, a distância entre eles geralmente de 30 m, em local próximo aos edifícios listados que pareceu representativo da zona em estudo: utilizando uma massa constituída por uma vara com a massa de 15 kg, tendo na seu extremo inferior uma outra massa de 15 kg, deixou-se cair o conjunto, de alturas de 0,3 a 0,4 m, no solo à distância, em regra de 4 m, do primeiro acelerómetro (ponto 1); registaram-se as vibrações assim obtidas, e calcularam-se os espectros em bandas de 1/3 de oitava para cada par de registos; a gama de frequências considerada foi: $4 \text{ Hz} < f < 250 \text{ Hz}$.

A equação acima pode escrever-se (V_1 e V_2 representam agora os valores máximos da velocidade eficaz, rms, para cada uma das bandas de frequência de 1/3 de oitava na gama considerada, d_1 e d_2 : as distâncias dos acelerómetros, 1 e 2, ao ponto de impacto)

$$\ln(V_2 / V_1) = -m \ln(d_2 / d_1) - (b \cdot \omega_i (d_2 - d_1) / C) \quad (5)$$

ou

$$(b / C) = (-m \ln(d_2 / d_1) + \ln(V_1 / V_2)) / (\omega_i (d_2 - d_1)) \quad (5b)$$

eq. que permite, escolhido $m = 0,5$, parâmetro da dispersão geométrica, determinar b / C .

Se o comportamento do solo (superficial) seguisse exactamente o modelo de dissipação viscosa acima, b / C seria semelhante para as várias frequências. Os ensaios mostraram um comportamento algo histerético para o amortecimento, pelo que, em cada local listado, se determinaram os diferentes valores de b / C , para cada frequência $f_i = \omega_i / (2 \pi)$ da gama considerada, calculando a média dos valores obtidos nos diversos ensaios no mesmo local. Os valores obtidos, para os solos predominantemente arenosos variaram entre $2,46 \cdot 10^{-4}$ e $1,44 \cdot 10^{-3} \text{ s/m}$ para a frequência de 8 Hz, e entre $1,52 \cdot 10^{-4}$ e $3,13 \cdot 10^{-4} \text{ s/m}$ para a frequência de 100 Hz, e para os predominantemente xistosos, entre ≈ 0 e $9,78 \cdot 10^{-4}$ e $1,71 \cdot 10^{-3}$, para 8 Hz, e entre $1,48 \cdot 10^{-4}$ e $2,53 \cdot 10^{-4}$ para 100 Hz. As medições foram realizadas em 24 de Novembro e 2 de Dezembro de 2010, tendo os solos um teor de água elevado.

Considerando que os ensaios de propagação foram feitos à superfície, e que à profundidade da base das fundações, quer da via, quer dos edifícios, são espectáveis maiores valores de C e menores de b (parâmetro inversamente relacionado com a qualidade do meio), utilizaram-se na previsão, por razões de segurança, valores de b / C metade ($0,5 \times$) dos determinados.

Não se determinaram as velocidades de propagação das ondas de Rayleigh, que deverão ser da ordem de grandeza de 250 m/s e superiores, nos solos arenosos, e maiores ainda nos solos mais compactos [7].

5.7 – Previsão do valor da velocidade de vibração próximo da via

No caso presente utilizaram-se os espectros médios, obtidos em um local próximo da via de alta velocidade francesa, próximo da aldeia de Baron (a NE de Paris) [3]. Este local, embora com a via em aterro com 3 m de altura é o mais bem documentado, tendo os espectros sido obtidos com passagens do TGV com velocidade média de 294 km / hora e do Eurostar com velocidade média de 283 km / hora, encontrando-se o ponto de medida a 17,5 m do eixo da via, [3, anexo D, local também identificado com a letra D].

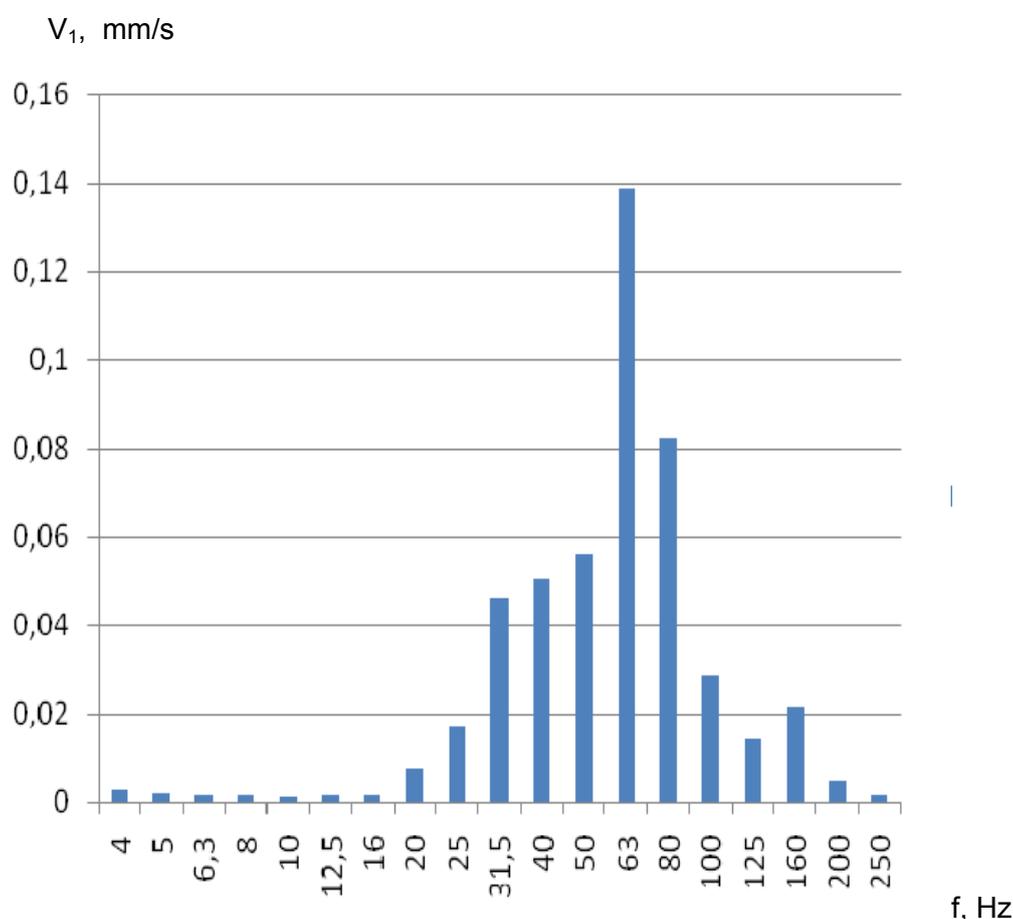


Figura 4 – Espectro previsto para a velocidade vertical efectiva de vibração, V_1 , a 17,5 m da via, para os comboios de passageiros, a 350 km / hora

Os espectros reportados, na ref.^a 3, foram corrigidos, em amplitude (amplificados pela relação 350 / 294 ou 283) e frequência (translação em frequência, para a direita, de uma banda, sendo $f_{i+1} / f_i = 1,26$, valor próximo daquelas relações de velocidades, 350 / 283 = 1,24; 350 / 294 = 1,19).

Finalmente fez-se a média dos espectros (médios, corrigidos) para os dois tipos de composições, figura 3.



Figura 5 – Acelerómetro e massa de excitação para caracterização da propagação

A velocidade de vibração próximo da via $V_1(f_i)$ pode, em alternativa, obter-se utilizando um modelo numérico de geração de vibrações por cargas em movimento, em que os parâmetros característicos da via e camadas sub e adjacentes são conhecidos com menor incerteza.

Outro método, alternativo ao usado, será o de medir a vibração próximo de linhas de alta velocidade já em exploração, com composições semelhantes, e com carris e subestrutura também semelhantes às da futura linha [2].

As dificuldades para realizar este procedimento (determinação de locais semelhantes, com tráfego de composições semelhantes, custo da deslocação de pessoal e equipamentos), e o não se ter podido dispor de um modelo numérico, útil aliás para comparação com a estimativa feita, fez adoptar o procedimento proposto, transpondo a medições referidas.

5.8 – Previsão do valor da velocidade de vibração nos edifícios

Para cada edifício listado, o espectro de velocidade (rms) previsível, ao nível da soleira, será:

$$V_2(f_i) = T_{S21}(f_i) \times V_1(f_i) \quad (3b)$$

onde $T_{S21}(f_i)$ é agora a função de transferência obtida pela identificação efectuada.

Note-se ainda que, na identificação das características de propagação dos solos, se utilizou o expoente da atenuação geométrica de 0,5 (em alguns locais de 0,4), dada a propagação circunferencial da vibração gerada nos ensaios, mas na previsão das vibrações geradas futuramente pelos comboios, em que a forma das ondas geradas pelas cargas em movimento, as torna mais rectilíneas, adoptou-se um expoente de atenuação geométrica de 0,1, e o mesmo amortecimento por dissipação de energia (calcularam-se também os valores previstos da velocidade acústica, embora se considere o ruído aéreo predominante).

O valor global (rms):

$$V_2 = (\sum_i (V_2(f_i))^2)^{1/2} \quad (6)$$

Nesta previsão mais precisa, identificaram-se os seguintes locais onde pode vir a ocorrer incomodidade, listados na tabela 5.

O critério seguido nesta identificação foi $V \geq 0,03$ mm/s, visto que, no decorrer da exploração, a degradação das condições iniciais (das rodas, carris e vias) pode aumentar o valor da velocidade de vibração. Deve prever-se + 10 dB_v ou seja $\times 3,16$, [2]. Excluíram-se nesta tabela as construções previstas não existentes.

Tabela 5 – Listagem dos edifícios, sua localização, velocidade prevista, tipo e uso

Lote	Ocor.	km	fotogr.	d, m	V, mm/s	designação	Tipo	uso
A	0a	3,900		34,5	0,06	Poçoirão	2 pisos, rec.te	?
A	1	4,600	<u>283</u>	28,0	0,12	EN 5	2 pisos, rec.te	habitação
A	1	4,600	<u>277</u>	58,0	0,05	r. Alex. Hermano	1 piso, tradic.	?
A	1	4,675	<u>278</u>	62,0	0,04	r. Alex. Hermano	2 pisos, rec.te	habitação
A		4,700	<u>282</u>	23,0	0,14	EN 5	1 piso, recente	habitação
A		4,725	<u>279</u>	61,0	0,04	r. Alex. Hermano	2 pisos, tradic.	escritório
A		4,750	<u>280</u>	61,0	0,04	r. Alex. Hermano	1 piso, tradic.	habitação
A		4,775	<u>281</u>	74,0	0,03	r. 1.º de Janeiro	2 pisos, tradic.	habitação
A	4	11,100	<u>288</u>	34,8	0,08		1 piso, tradic.	habitaç.?
A		18,300	<u>291</u>	49,0	0,04	Piçarras	1 piso, trad.	habitaç.?
A		25,475	<u>293</u>	27,0	0,09	Af. ^a , r. 7 de Abr.	1 piso, tradic.	habitaç.?
A	8	25,550	<u>294</u>	32,0	0,06	Afeiteira	1 piso, recente	habitaç.?
D1	1	10,900	<u>306</u>	34,3	0,05	M. da Amendoeira	1 piso, tradic.	habitação
D1		11,020	<u>303, 304</u>	30,0	0,07	Carrapatoza	1 piso tradic.	habitação
D2	1	0,450	<u>307</u>	54,0	0,08	M.te do Carapeto	1 piso, tradic.	habitação
D2	3	17,400	<u>309</u>	29,1	0,10	Centro empresarial do Caia	2 pisos, tradic.	escritór.s, armazém

No caso dos edifícios recentes de r/c e 1.º andar, na EN 5 e na rua Alexandre Hermano, no Poçoirão, (linhas 2 e 4 da tabela 4) é ainda de considerar a possibilidade de alguma amplificação, por ressonância, em alguma laje do 1.º andar. Note-se que o espectro previsto para os comboios de passageiros, que levam 2 s a passar, tem um conteúdo relativamente baixo na banda dos 25 Hz ($< 0,02$ mm/s a 17,5 m), maior nas dos 31,5 e 40 Hz; para os comboios de mercadorias, que levam 11 s a passar, tal possibilidade depende do espectro da vibração causada por estas composições.

5.9 – Isolamento da via

Optando-se, para os locais com eventuais impactos negativos, tabela 4, pelo isolamento da via, colocando sob esta uma camada de material elástico, há que determinar as características desse material, em particular a sua elasticidade. Geralmente limita-se a máxima deflexão (deslocamento vertical) da mesma via, sob a acção das cargas sobre ela (via e comboio). Se for escolhido $\delta = 2$ mm, o isolamento, correspondendo a uma frequência própria das massas sobre o material elástico

$$f_o = \omega_o / (2 \pi) = (1 / 2 \pi) (g / \delta)^{1/2} \quad (7)$$

de cerca de 11,5 Hz, será efectivo para as frequências de 16 Hz e superiores; querendo baixar estas frequências para metade, terá de se permitir uma deformação estática 4 vezes superior.

Note-se que a carga por unidade de área (ou de comprimento) dos comboios de mercadorias, será muito superior à dos de passageiros, bem como a deflexão estática provocada por aqueles relativamente à destes, variando em relação directa.

Note-se também que embora o corte das frequências de 16 Hz e superiores pareça adequado face à previsão das vibrações geradas pelos comboios de passageiros, para uma deformação estática de 2 mm, causada por estes mesmos comboios, a passagem dos rodados, gera, em cada ponto da via esforços com frequências de cerca de 5 e 10 Hz, durante cerca de 2s¹. Se as distâncias entre os bogies de cada carruagem e de carruagens adjacentes forem semelhantes, a frequência de 10 Hz predominará sobre a de 5 Hz.

Outro método de isolamento consiste na abertura de uma vala, próximo da via, que deverá ter uma profundidade não inferior a 0,6 vezes o comprimento de onda, λ , da vibração a isolar [2]. Para uma onda de Rayleigh, com $c_R \approx 200$ m/s, à frequência de 10 Hz, corresponde um comprimento de onda

$$\lambda = c / f \quad (8)$$

de 20m, donde uma vala de 12 m, valor excessivo (4 m seria suficiente para o isolamento das frequências acima de 30 Hz, para a c_R considerada)

Outra hipótese de minorar o impacto das vibrações nas habitações será o reconstruí-las a uma distancia superior a 70 m da via.

5.10 – Velocidade crítica e ressonância

Deverá ter-se em atenção que a aproximação da velocidade do comboio, nominalmente 350 km/h = 97,2 m/s, da velocidade de propagação de ondas de flexão ao longo da via e respectiva subestrutura, poderá conduzir a alguma sobreposição das ondas frente aos rodados do comboio. Velocidades típicas de propagação das ondas na via oscilam entre 400 e 900 m/s, [5].

Igualmente, a existência no solo sob a via e na sua proximidade, de uma camada superficial mais elástica sobre uma camada mais rígida (rocha) pode conduzir a reflexões de ondas, e assim a alguma amplificação de componentes de algumas frequências. Uma estimativa destas frequências é $f_n = (2n - 1) C_s / (4 h)$ e $f_n = n C_p / (2 h)$ respectivamente para as ondas de corte (componente horizontal) e de compressão, sendo h a profundidade da camada superficial [5]; à frequência de 10 Hz, e a uma velocidade $C_p \approx 600$ m/s, corresponde uma profundidade de $h \approx 30$ m.

Crê-se, que nenhum destes fenómenos terá impacto significativo nos edificios listados.

É recomendável (para além de um projecto cuidadoso da via) que, quando da entrada em funcionamento da linha, se realize uma campanha de medição das vibrações na via e próximo dela, e em alguns dos edificios listados, para se averiguar da existência e contribuição destes fenómenos.

¹ Assumiu-se um comboio de passageiros de 200 m, com 10 carruagens.

5.11 – Controle da vibração durante as obras de construção

Durante a construção, operações como o desmonte de rocha com explosivos, ou a cravação de estacas (com bate estacas) provocam vibrações impulsivas, outras operações como a utilização de máquinas de perfuração (para a colocação de estacas moldadas), e de demolição (pica paus), bem como outro equipamento pesado de escavação e transporte provocam vibrações continuadas.

Como as obras são geralmente incómodas, mas de duração limitada, aplicam-se os critérios de danos.

Os valores limite admissíveis de danos são os seguintes:

Critério da Norma Portuguesa NP 2074 (danos pelas vibrações impulsivas).

Limites admissíveis, em valor máximo do módulo da velocidade, $|v|_{\text{máx}}$ na base do edifício:

tipo de solo → ↓ tipo de construção	incoerentes soltos e coerentes moles	incoerentes compactos e coer. duros e méd.	coerentes rijos
sensíveis	1,75 – 2,5 mm / s	3,5 – 5,0 mm / s	7,0 – 10 mm / s
correntes	3,5 – 5,0 mm / s	7,0 – 10 mm / s	14 – 20 mm / s
de betão armado	10,5 – 15 mm / s	21 – 30 mm / s	42 – 60 mm / s

Os primeiros valores para um número de solicitações impulsivas superior a três por dia, os segundos para 3 ou menos solicitações diárias.

Critério LNEC (recente) de danos pelas vibrações continuadas:

Limites admissíveis, em valor da maior componente da velocidade, v_{ef} na base do edifício:

v_{ef} mm / s	duração < 1 h / dia	duração \geq 1 h / dia
edifício sensível	1,0	0,7
edifício corrente	2,0	1,8
ed.º com estrut.ª de betão arm.º	5,0	5,0

Nos procedimentos recomendados, procura-se não só evitar estragos nas construções, mas sensibilizar previamente os proprietários e moradores, e instruí-los que as vibrações sensíveis não são necessariamente danosas, evitando-se reclamações e procedimentos judiciais e cautelares (embargo da obra) injustificados (referência 8).

Resumidamente os procedimentos recomendados são:

Previamente:

Contacto com os moradores e proprietários dos edifícios listados, explicando-lhe que as vibrações susceptíveis de causar danos são muito superiores às sentidas (cerca de 30 vezes, para as continuadas).

Realização de uma inspecção para a identificação de danos preexistentes, com documentação fotográfica.

Durante a obra:

Inicialmente, utilizar as máquinas com potência reduzida, ou realizar desmontes de teste, com cargas de explosivo reduzidas, monitorizando simultaneamente a vibração, para determinar as condições em que aquelas podem ser utilizadas, ou os desmontes realizados, sem exceder os valores da velocidade admissíveis.

Monitorizar as vibrações durante as operações susceptíveis de conduzir, junto aos edifícios, a valores da velocidade próximos dos admissíveis. Para estimar os valores ocorridos em pontos onde não se mediu, pode desenhar-se um mapa de vibração. A descrição da técnica para obras com uso de explosivos encontra-se na referência 4. Fórmulas de previsão encontram-se também nas referências 2 (secção 10.2) e 4.

Após a obra:

Nova inspecção para identificação de novos danos, inexistentes à data da primeira inspecção, e determinação das suas causas.

Elaboração do relatório da monitorização, incluindo os mapas de vibração, onde pertinente.

5.12 – Recepção e exploração da via e material circulante

No que respeita ao impacto em termos de vibrações, recomenda-se que, quando da recepção e testes iniciais para verificação da boa construção da via e características do material circulante, se realize uma campanha de medição das vibrações, para a determinação dos valores da vibração próxima da via e determinação de eventuais componentes excessivas (como se disse antes) e também dos valores nas edificações listadas, junto e ao nível das fundações, e também no 1.º piso, no caso dos edifícios recentes com 1.º andar.

Esta medição permitirá também avaliar a justeza da previsão efectuada.

Periodicamente deverão realizar-se novas campanhas para determinação da evolução dos valores inicialmente medidos (o teor de água nos solos poderá ser responsável por alguma variação). Na ausência de outro equipamento existente com esse fim, esta evolução poderá dar indicações de eventual degradação das superfícies de carris e rodas, bem como de degradação na subestrutura da via.

6 - CONCLUSÕES

6.1 - O método de previsão das vibrações geradas pelo tráfego ferroviário de alta velocidade, na futura linha Poceirão Caia, aqui descrito parece adequado, e em particular permitiu reduzir o número de locais com impacto, dos 34 seleccionados na primeira triagem, para 16, estes com elevada segurança, 10 dB_v.

O procedimento descrito pode constituir uma metodologia a adoptar em futuras previsões de vibrações próximo de futuras vias de comboios de alta velocidade. Próximo de povoações com edifícios recentes com mais de um piso é também importante a identificação da função de transferência da fundação dos edifícios para os níveis com ocupação humana.

6.2 - Gostaríamos de referir os seguintes aspectos críticos:

6.2.1 - A previsão das vibrações geradas nos edifícios próximos depende directamente do conhecimento da vibração gerada pelos comboios, de passageiros e mercadorias, próximo da via. A comparação de resultados de medições em outros locais com resultados de um modelo numérico ajustado ao local em estudo permitirá uma maior confiança na estimativa da vibração próximo da via.

6.2.2 – Uma boa identificação da transmissão através dos solos exige:

6.2.2.1 - a possibilidade da colocação de uma linha de sensores no percurso da construção para a via, na perpendicular e a possibilidade de gerar a solicitação no local por onde passa o eixo da via; e

6.2.2.2 – em solos rústicos, a colocação dos sensores e a execução da solicitação a alguma profundidade, tipicamente 1 a 1,5 m.

6.2.3 – Próximo de povoações com edifícios recentes com mais de um piso é importante a identificação também da função de transferência da fundação dos edifícios para os níveis com ocupação humana. Tal terá de ser feito também experimentalmente, solicitando o edifício junto à fundação, usando preferivelmente um vibrador que possibilite um varrimento em frequência.

6.2.4 - Para além do isolamento, uma hipótese de minorar o impacto das vibrações nas habitações em áreas rústicas será o reconstruí-las a uma distância superior a 70 m da via.

BIBLIOGRAFIA.

1 - Schiappa de Azevedo, Fernando; Domingues, Odete; Castro, Joana – High Speed Trains in Portugal. Vibration Impact Assessment. Em português: Impacto dos Comboios de Alta Velocidade no Ambiente. Previsão das Vibrações. in Internoise 2010, Lisbon, Portugal, 13-16 June 2010.

2 - Office of Railroad Development – High Speed Ground Transportation. Noise and Vibration Impact Assessment. U. S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration. Prepared by Harris, Miller, Miller & Hanson. October 2005.

3 - Summary of European High-Speed Rail Noise and Vibration Measurements. HMMH Report no. 293630-2. Harris, Miller, Miller & Hanson. April 1996.

4 - Schiappa de Azevedo, Fernando – Vibrações na Escavação e Exploração de Obras Subterrâneas. Limites. Previsão e Controle. Exemplos. In Encontro Nacional “Espaço Subterrâneo e sua Utilização”- ENESU2010. LNEC, Lisboa, Portugal, Outubro de 2010.

5 – Hall, L. – Simulations and Analyses of Train Induced Ground. Dissertation, April 2000. Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden.

6 – Alarcon, G. et al. – Test and Prediction of Free Field Vibrations Caused by High Speed Trains near the Spanish Candidate ITER Site. In Eleventh International Congress on Sound and Vibration, July 2004, St. Petersburg, Russia.

7 – Almeida, F., Sousa Oliveira, C., et. al. – Caracterização Dinâmica das Areias de Faro Através de Ensaios Sísmicos. s. l. (Universidade de Aveiro?). s. d. (>1994?).

8 - Schiappa de Azevedo, Fernando; Domingues, Odete; et al – Ambiente em Edifícios, LNEC, Lisboa, 2010.