



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Estudo de vibrações induzidas pela circulação ferroviária

**Caso estudo: Alargamento da plataforma ferroviária da Gare
Oriente**

Manuel João Pego Monteiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Júri

Presidente: Prof. José Manuel Matos Noronha da Câmara

Orientadores: Prof. Jaime Alberto dos Santos

Eng. João Manuel Marcelino Mateus da Silva

Vogal: Prof. Jorge Miguel Silveira Filipe Mascarenhas Proença

Outubro de 2009

Agradecimentos

Desejo exprimir o meu reconhecimento a todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, Professor Jaime Santos e Engenheiro João Marcelino. A sua assistência foi crucial ao longo do trabalho desenvolvido de forma a levar a bom termo a Dissertação de Mestrado.

Agradecer também às entidades RAVE e REFER pela permissão de utilização dos dados obtidos em campo fundamentais para o desenvolvimento da presente Dissertação.

À minha família pelo apoio incondicional e incentivo dados ao longo de todo o trajecto na faculdade que culmina neste trabalho.

Por fim, um reconhecimento a todos aqueles que de algum modo contribuíram para o sucesso deste trabalho, desde a secção de Geotecnia do Instituto Superior Técnico e diversas pessoas do Laboratório Nacional Engenharia Civil.

Resumo

Este trabalho descreve um conjunto de investigações e subseqüentes interpretações levadas a cabo no sentido de realizar um estudo sobre as vibrações originadas pela circulação de comboios.

Nas últimas décadas, o desenvolvimento dos comboios de alta velocidade veio colocar na ordem do dia a necessidade de uma atenta monitorização do fenómeno.

O estudo pretende dar uma visão do estado de desenvolvimento das técnicas de aquisição e de tratamento dos dados. A isto acrescentar uma nova experiência contando com importantes conceitos em áreas como a análise de sinais, engenharia sísmica geotécnica e engenharia ferroviária.

Tomando por base uma campanha de medição desenvolvida em Julho de 2009 na proximidade da Gare do Oriente, foi realizada uma campanha de campo com o objectivo de medir as vibrações induzidas pela circulação de comboios. O passo seguinte foi desenvolver todo um conjunto de ferramentas de análise em ambiente Matlab, incorporando criteriosamente filtros digitais para o processamento dos sinais.

Esta temática apresenta hoje especial interesse de investigação, pois a medição das vibrações resultantes da passagem de comboios e a respectiva análise pode constituir uma ferramenta útil, quer para o dimensionamento da via, quer para situações em que é necessário avaliar medidas de mitigação.

Palavras-chave: vibração, sinal, comboio, medição e filtro.

Abstract

This work describes a set of research studies that were made with the intent of studying vibrations created by the circulation of trains.

In the last decades, the development of high-speed trains emphasized the need to closely monitor this phenomenon.

The purpose of this study is to provide a state-of-the-art about data acquisition process. It also presents a new experience, including important concepts in certain areas such as analysis of signals, seismic geotechnical engineering and track engineering.

A field study with the purpose of measuring vibrations induced by train circulation was carried out in July of 2009 and took place at *Gare do Oriente* (train station located in Lisbon). The next step was to develop a whole set of analysis tools in Matlab, meticulously incorporating digital filters for signal processing.

Nowadays, this subject is considered to be of special interest for research, since measuring vibrations from train circulation and its subsequent analysis can prove to be useful tools for both rail track design and situations where mitigation measures need to be evaluated.

Keywords: vibration, signal, train, measurement e filter.

Conteúdo

Agradecimentos.....	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Conteúdo	v
Índice de Tabelas.....	vii
Lista de abreviações	x
1. Introdução.....	1
2. Sistemas Vibratórios	3
2.1 Sinais.....	3
2.2 Análise Espectral	5
2.3 Descritores da vibração:.....	6
3. Comboios e as vibrações	8
3.1 Fenómeno.....	8
3.2 Transmissão de cargas	14
3.3 Análise de frequências	15
3.4 Valores regulamentares	18
3.4.1 Danos nos Edifícios.....	18
3.4.2 Percepção humana da vibração	20
3.4.3 Percepção humana do ruído estrutural	21
3.4.4 Interferência com equipamentos.....	22
3.5 Mitigação	23
4. Estudos publicados	27
4.1 Testes de homologação da linha de Alta Velocidade entre Paris - Bruxelas.....	27
4.2 ICE Alta Velocidade Alemã	29
4.3 Estudo de projecto do AVE	30
4.4 Australia Railway Line Melbourne-Geelong	32
4.5 Alta Velocidade na Suécia.....	33
4.6 Metro de Pequim.....	36
Para este estudo não são fornecidos resultados da campanha de medição.....	37
4.7 Testes de homologação da linha de Alta Velocidade entre Bruxelas e Colónia	37
4.8 Shinkansen Alta Velocidade Japonesa	39
5. Trabalho de campo	42
5.1 Metodologia de aplicação teórica do trabalho de campo.....	42
5.2 Montagem e localização.....	43
5.3 Aplicação prática.....	45
5.3.1 Objecto de estudo	45
5.3.2 Material circulante	46

5.3.3 Caracterização do tipo de fundação	47
5.3.4 Modelo experimental	49
6. Análise computacional	54
6.1 Princípios de análise	54
6.2 Correção à linha base	55
6.3 Projecto de filtros	55
6.4 Integração do sinal.....	64
6.5 Descritores de sinal.....	65
6.6 Cálculo da velocidade do comboio	66
7. Discussão de resultados	69
7.1 Comentários iniciais	69
7.2 Resultados Globais	70
7.3 Análise das frequências	72
7.4 Análise de duração do sinal.....	73
7.5 Avaliação dos limites da vibração.....	73
7.6 Comparação de resultados com casos de estudo.....	75
8. Conclusões	76
9. Referências bibliográficas	78
Anexos	80
Anexo 1 - Especificações técnicas do equipamento de medição.....	81
Anexo 2 – Características do comboio Alfa Pendular – ETR 460.....	83
Anexo 3 – Teste de Filtros	84
Anexo 4 – Quadro de resultados para cada tipo de comboio e registo ambiente.....	85
Anexo 5 - Resultados gráficos comboio Alfa Pendular.....	87
Anexo 6 - Resultados gráficos comboio de carruagens e locomotiva.....	89
Anexo 7 - Resultados gráficos comboio Unidade Tripla Eléctrica.....	91
Anexo 8 - Resultados gráficos de registo ambiente	93

Índice de Tabelas

Tabela 1 : Unidades SI de vibração (ISO 1000). Adaptado da norma Europeia ISO 1000.....	6
Tabela 2 - Factores relacionados com a fonte da vibração. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005)..	12
Tabela 3 - Factores relacionados com a propagação da vibração. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005).....	13
Tabela 4 – Efeito das cargas suspensas e não suspensas. Teixeira (2009).....	15
Tabela 5 - NP 2074 de 1983 – Valores limite da velocidade máxima em módulo $ V _m$ da vibração na base da edificação.....	18
Tabela 6 - NP 2074 revista – Valores limite da maior componente da velocidade da vibração na base da edificação.....	19
Tabela 7 – Critério adaptado de Shiappa de Azevedo e tal. (2001).....	19
Tabela 8 – Critério de valores admissíveis dependendo do tipo de construção. Shiappa de Azevedo et al. (2001)	20
Tabela 9 - Critério de valores admissíveis dependendo do tipo de edifício. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005)	20
Tabela 10 - Critério de valores admissíveis relativo a sensações humanas. Shiappa de Azevedo et al. (2001).....	21
Tabela 11 - Critério de valores admissíveis para pessoas dependendo do tipo de edifício. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005).....	21
Tabela 12 - Critério de valores admissíveis por humanos ao ruído estrutural. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005)	22
Tabela 13 – Resultados obtidos na campanha de medição	29
Tabela 14 – Dados do ensaio.....	30
Tabela 15 – Valor registado do descritor aceleração	32
Tabela 16 - Transdutores utilizados em Ledsgard	33
Tabela 17 – Valores tipo registados nos ensaios.....	39
Tabela 18 – Valores tipo registados na primeira campanha de medição.....	40
Tabela 19 – Valores tipo registados na segunda campanha de medição	41
Tabela 20 - Aquisições realizadas.....	46
Tabela 21 – Teste de Filtros: Registo CPA 18h08 – 1V. Passa-baixo a 500Hz.	63
Tabela 22 – Geometria do comboio Alfa Pendular.....	67
Tabela 23 - Estimativa da velocidade	68
Tabela 24 – Avaliação da vibração.....	74
Tabela 25 – Equipamento utilizados em campanha de medição.....	81
Tabela 26 – Descritores de vibração: Resultados - Parte I.....	85
Tabela 27 - Descritores de vibração: Resultados - Parte II	86

Índice de Figuras

Figura 1 - Descritores de vibração velocidade. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005).....	7
Figura 2 - Fonte de vibração e os seus efeitos no meio envolvente. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005).....	8
Figura 3 - Propagação das vibrações no solo. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005).....	9
Figura 4 - Aceleração no domínio do tempo em campo livre com a passagem do comboio a 120km/h. Curva superior: distância de 3m ao centro da linha; curva inferior: distância de 32m ao centro da linha. Heckl et al. (1996).....	10
Figura 5 - Modelo dinâmico da interacção via-veículo. Esveld (2001).	14
Figura 6 - Níveis de velocidade monitorizados a 8 metros do centro da linha em via balastrada. Curva 1: comboio de passageiros a 250 km/h; curva 2: comboio de passageiros a 160 km/h; comboio de mercadorias a 100 km/h. Heckl et al. (1996).....	16
Figura 7 - Manutenção de via: esmerilagem.	23
Ilustração 8 e 9 - Medidas de mitigação actuantes no campo da rigidez de via. Hanson (2000).	25
Ilustração 10 - Localização dos pontos de medição. Degrande et al. (2001).	27
Ilustração 11 - Acelerómetro montado sobre suporte de alumínio do tipo PCB.	28
Ilustração 12 - Acelerómetros colocados no carril e na travessa da linha 2 do tipo Dytran.	28
Figura 13 - Variação da vibração no solo para distância de 10-15m da linha.	30
Figura 14 - Acelerómetro montado. Rovira et al. (2003).....	31
Figura 15 - Estacas de suporte em campo livre Rovira et al. (2003).....	31
Figura 16 - Modelo instrumental. Leon (2001).	32
Figura 17 – Modelo de campanha de medição aplicado em Ledsgard em Maio. Hildebrand (2001). ...	34
Figura 18 - Ledsgard, Maio de 2000. Velocidade RMS dependente da distância ao centro da linha. Para várias velocidades. Hildebrand (2001).	35
Figura 19 - Modelo de medição aplicado em Norrala. Hildebrand (2001).	36
Figura 20 - Locais de medição localizados ao longo da parede do edifício do Laboratório e modelo instalado no interior do edifício. Gupta et al. (2007).	37
Figura 21- Modelo de medição, onde TR corresponde ao carril, TS corresponde à travessa e FF ao campo livre segundo nomenclatura inglesa. A última letra corresponde à direcção de medição. Kogut et al. (2003).	38
Figura 22 - Modelo experimental do caso 1. Takemiya (2007).	40
Figura 23 - Modelo experimental do caso 2. Takemiya (2007).	41
Figura 24 - Fixação para a colocação do acelerómetro no carril. Thrane (2000).	44
Figura 25 – Projecto de ampliação da estação Oriente. Laranjo (2008).	45
Figura 26 – Alinhamento de instrumentação na estrutura da Gare do Oriente.	47
Figura 27 - Estratigrafia no local de campanha. Geocontrole (2009).	48
Figura 28 - Unidade de aquisição no interior de carrinha.	50
Figura 29 – Modelo de instrumentação realizado em planta	51

Figura 30 – Modelo de instrumentação realizado em corte	52
Figura 31 - Tipos de filtros ideais. Santos (2008).	56
Figura 32 – Filtro passa-baixo de grau 2	57
Figura 33 – Filtro passa-baixo de grau 4	58
Figura 34 – Filtro passa-alto de grau 2	58
Figura 35 – Espectros de Fourier	59
Figura 36 – Magnitude de atenuação do Filtro passa-baixo de 500Hz e grau 2.....	59
Figura 37 – Redução da amplitude de Fourier com a aplicação de filtro passa-baixo de 500Hz e grau 4.	60
Figura 38 – Efeito da correcção à base no Espectro de Fourier.....	60
Figura 39 - Magnitude de atenuação da correcção à base em no espectro de frequências.	61
Figura 40 - Espectro de Fourier truncado a 500Hz	61
Figura 41 – Filtragem por truncagem do sinal a 500Hz. Magnitude.....	62
Figura 42 – Espectros de Fourier do sinal original para diversas distâncias ao centro da linha.	64
Figura 43 - Lei de variação das acelerações no método de Newmark. Coelho (1997).....	65
Figura 44 – Distinção das carruagens no sinal.	67
Figura 45 - Definição dos constituintes do comboio	67
Figura 46 - Registo defeituoso no carril	69
Figura 47 - Gráficos comparativos entre registos.....	71
Figura 48 - Valores da frequência respeitantes às amplitudes máximas de Fourier.....	72
Figura 49 - Duração do evento segundo a distância ao centro da via	73
Figura 50 – Resultados de medições de campo realizadas para diversos comboios Europeus	75
Figura 51 – Comboio Alfa Pendular.....	83
Figura 52 - Características do comboio. Marcelino (2005).	83
Figura 53 – Registo CPA 18h08 – 1V (Travessa). Passa-baixo 500Hz.	84
Figura 54 – Resultados Alfa Pendular: aceleração, velocidade e deslocamento.	87
Figura 55 – Resultados Alfa Pendular: espectros de Fourier.....	88
Figura 56 - Resultados comboio de carruagens e locomotiva: aceleração, velocidade e deslocamento.	89
Figura 57 – Resultados comboio de carruagens e locomotiva: espectros de Fourier.....	90
Figura 58 - Resultados Unidade Tripla Eléctrica: aceleração, velocidade e deslocamento.	91
Figura 59 - Resultados Unidade Tripla Eléctrica: espectros de Fourier	92
Figura 60 – Resultados ambiente: aceleração, velocidade e deslocamento.....	93
Figura 61 - Resultados ambiente: espectros de Fourier.....	94

Lista de abreviações

Siglas:

ω_n – Frequência de corte normalizada	n – Ordem do filtro
V/g – Volts por g	Δt – Intervalo de Tempo
mm/s – Milímetros por segundo	a_{rms} – Aceleração <i>root mean square</i>
mm – Milímetros	A – Amplitude de Fourier
f – Frequência	kN – Kilonewton
Hz – Hertz	dB – Decibel
s – Segundo	v – Velocidade
m – Metro	a – Aceleração
m/s – Metro por segundo	d – Deslocamento
m/s^2 – Metro por segundo ao quadrado	l_s – Distância entre travessas
E – Módulo de elasticidade	a – Distância entre eixos dos bogies
I – Módulo de inércia	v_d ou v_{ef} – Velocidade eficaz ou RMS
K – Módulo de reacção no tempo	inch – Polegadas
Km/h – Quilómetros por hora	

Acrónimos:

AVE – Alta Velocidad Española	HST – High Speed Train
ETR – Elettro Treno Rapido	RAVE – Rede Ferroviária de Alta Velocidade
SI – Sistema Internacional	REFER – Rede Ferroviária Nacional
ISO – International Organization for Standardization	DIA – Declaração de Impacte Ambiental
NP – Norma Portuguesa	RECAPE – Relatório de Conformidade Ambiental do Projecto de Execução
TDFF – Transformada Discreta e Finita de Fourier	SPT – Standard Penetration Test
FFT – Transformada Rápida de Fourier	MATLAB - MATrix LABoratory
PPA – Peak Particle Acceleration	CPA – Comboio Alfa Pendular
PPV – Peak Particle Velocity	LOC – Comboio de Carruagens e Locomotiva
PPD – Peak Particle Displacement	UTE – Unidade Tripla Eléctrica
RMS – Root Mean Square	TGV – Train à Grande Vitesse
ICE – Inter City Express	LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

1. Introdução

No dia os seres humanos estão permanentemente expostos a vibrações mecânicas com maior ou menor perturbação do bem-estar, podendo provocar incómodo e em casos mais extremos lesões. As vibrações podem ser indesejáveis e perigosas, estando presentes nos locais de trabalho, nos transportes e até em casa.

Quando não eficazmente controlada, a vibração é um fenómeno difícil de evitar. A produção de vibração está normalmente associada a desequilíbrios ou folgas das diferentes partes constituintes de cada máquina. No caso estudo deste documento está associado ao contacto da máquina vibrante (comboio) com a estrutura (via). As vibrações produzidas no contacto podem excitar as frequências de ressonância das partes do sistema (componentes da via ou do próprio veículo), dando deste modo origem a importantes fontes produtoras de vibrações de maior amplitude e igualmente ruído.

Pelos efeitos negativos das vibrações sobre o homem, equipamentos e estruturas das construções, há todo o interesse em desenvolver técnicas e equipamentos que possam medi-las segundo determinados parâmetros, a fim de avaliar riscos e proceder ao seu controlo. É precisamente esse o âmbito desta dissertação de Mestrado.

Este trabalho pode ser dividido em três partes distintas que procuram responder ao objectivo global de estudo das vibrações resultantes da circulação de veículos ferroviários. Uma primeira que aborda aspectos teóricos e estado da investigação nesta matéria no mundo, seguindo-se uma abordagem da forma de actuação na aquisição de dados em campo e a terminar a análise computacional de processamento dos dados.

O aprofundamento deste tema implica alguns conhecimentos de matérias sobre sinais, conceitos relacionados com engenharia sísmica geotécnica e engenharia ferroviária. A primeira é necessária na medida que à informação recolhida no trabalho de campo é necessário dar uma forma que permita traduzir da melhor maneira esses dados, a segunda entram no estudo da propagação das vibrações nos solos. O conhecimento dos constituintes e resposta deste tipo de via é por fim fundamental para interligar as ideias e perceber todo o fenómeno.

O documento segue com as particularidades deste tipo de transporte, como a influência das cargas exercidas sobre a via, gama de frequências associadas neste tipo de transporte, magnitude de valores admissíveis e possíveis medidas de mitigação.

Em Portugal o estudo das vibrações resultantes da passagem de um comboio encontra-se muito pouco desenvolvido. De facto, no mundo só se começou a dar relevo a esta temática com a introdução da alta velocidade, também porque com esta houve aumento de velocidade, resultando também em maior magnitude de vibração. No presente documento serão abordados alguns estudos levados a cabo na Austrália, Japão e sobretudo Europa, de forma a dar uma visão do ponto em que a investigação se encontra e as conclusões daí resultantes.

Em Portugal, a introdução da alta velocidade mantém-se em debate, mas os estudos sobre o projecto avançam. Nesse contexto surgiu a necessidade de realizar monitorização das vibrações em campo, resultando daí os dados para análise.

O tratamento de dados é realizado em ambiente Matlab, onde as ferramentas disponíveis no programa são exploradas para atingir os objectivos. Pela construção de instruções programáveis é possível realizar a análise do sinal e obter os resultados através da interface gráfica disponível. Neste processo destaca-se o dimensionamento do filtro e a aplicação da correcção à base como os procedimentos mais interessantes em todo o processo de obtenção dos resultados.

O objectivo particular da campanha efectuada procura por um lado obter *know how* de actuação e por outro realizar um inventário da situação resultante da circulação de comboios em termos de vibrações originadas. Procura-se também nesta dissertação de mestrado efectuar comparações entre os resultados para diferentes comboios, verificar aceitabilidade de valores limite sugeridos e comparar também com dados recolhidos nos estudos a apresentar.

O constante desenvolvimento do sector ferroviário deve ser acompanhado de uma forte investigação científica, procurando sempre uma optimização dos recursos e diminuição de perturbações impostas ao ambiente circundante. Por esse motivo esta dissertação procura mostrar em que ponto se encontra o estado de investigação do tema, transmitindo informação e uma nova experiência.

2. Sistemas Vibratórios

2.1 Sinais

A evolução tecnológica do século vinte foi levada a cabo de alguma forma com o contributo dos desenvolvimentos do processamento digital de sinais. Esta situação permitiu desenvolver as telecomunicações, sistemas de localização, processamento áudio, imagem no campo médico ou topográfico, tornando-se presente em muitas das actividades do dia-a-dia (Smith, 1999).

O trabalho com sinais é hoje muito habitual em diversos campos de investigação, pois as ferramentas disponibilizadas e a difusão dos computadores a isso ajuda. Se o processamento digital de sinais não conheceu um avanço mais rápido, foi porque também a revolução dos computadores pessoais não veio mais cedo. Esta é hoje portanto uma área difundida de trabalho para engenheiros e cientistas.

O presente trabalho pretende utilizar este tipo de processamento no campo das vibrações no solo. Neste domínio a prospecção de petróleo a profundidades grandes tem bastante sucesso ainda hoje com a análise dos sinais recolhidos (Smith, 1999). Esta situação parte da utilização de ondas sísmicas de forma a perceber como se encontra constituído o solo. A ideia assenta na análise dos sinais reflectidos pelas diferentes camadas, que são alterados e o processamento digital dos sinais ajuda a interpretar os resultados. O campo da sismologia e geologia receberam muito bem esta ajuda, sendo muito habitual realizar ensaios sísmicos como o *crosshole test* para estimar parâmetros do solo e a sua constituição.

A transmissão de vibrações no solo é um dos efeitos resultante da passagem de um comboio por um determinado local. Esse é o objecto de estudo no presente trabalho, onde se procura utilizar este tipo de processamento de sinais para tratamento dos resultados de campanhas experimentais.

O objectivo da observação experimental é realizar uma caracterização de uma situação existente na realidade ou muitas vezes em laboratório testar modelos. O presente trabalho engloba a primeira situação, onde o material de estudo é a infra-estrutura ferroviária e o campo livre adjacente.

A aquisição de um determinado conjunto de grandezas físicas definidas como alvo é o primeiro passo. Ao conjunto é dado o nome de sinal, sendo definido como “o veículo ou suporte da informação respeitante ao comportamento observável de um qualquer sistema constituindo, portanto a matéria-prima sobre a qual incidem os diversos procedimentos incluídos no que se denominou de tratamento da informação” (Carvalho et al., 2008). Os sinais representam a variação quantitativa de uma determinada grandeza em relação a uma variável independente, que neste caso será o tempo, a frequência ou a distância.

Muitos sinais apresentam uma natureza contínua durante um intervalo de tempo, como é o caso da vibração gerada por um comboio. Contudo a natureza do sinal resultante da circulação deste tipo de transporte não resulta num sinal puramente contínuo, se for avaliado um dia inteiro. Isto porque existem vários eventos espaçados no tempo. Se o evento a estudar for uma única passagem do comboio, aí sim é um evento contínuo e o objectivo do processamento digital é realizar uma aquisição discreta. Esta abordagem é vantajosa pois diminui a quantidade de informação disponível.

Com o processamento digital do sinal é obtido então como que uma amostra de um todo. Esta situação é necessária de forma a obter sinais com dimensão que permita uma análise mais rápida. Contudo a opção por esta via digital leva a falta de informação entre dois pontos consecutivos.

Para perceber o princípio de funcionamento do sistema de aquisição de dados é necessário ter noção da utilização do sistema binário e os bits utilizados no conversor analógico para digital. Em geral os fenómenos ocorrem de uma forma contínua, sendo que a transformação para o sistema digital utiliza conversores. Estes convertem o sinal para a representação binária realizando uma divisão do domínio num número de intervalos que depende do número de bits utilizados. Quanto maior for o número de bits que compõem as frases binárias, maior tende a ser a precisão na conversão do sinal (Tavolaro, 2000). Por exemplo, para um módulo de aquisição de 16 bits existem $2^{16}=65536$ frases binárias possíveis.

A operação de recolha de informação pode ser chamada de amostragem, visto que é feita recolha de um número finito de valores entre uma infinidade possível. Pretende-se recolher uma amostra que seja representativa da "população" em estudo. Desta maneira é feita a obtenção de uma série de N valores espaçados no tempo. No caso em estudo admite-se portanto que a amostragem é periódica, constituída por valores equidistantes no tempo. Ao valor de diferença entre medições, dá-se o nome de intervalo de amostragem, ou mais correntemente passo. A frequência de amostragem da observação não é mais do que o inverso do intervalo de amostragem:

$$f = \frac{1}{\text{passo}} \quad (1)$$

Uma decisão importante a tomar em qualquer aquisição de dados de um fenómeno físico será portanto o passo de amostragem. O critério ideal é aquele em que a partir da amostra seja possível reconstruir de maneira eficaz o sinal contínuo que lhe dá origem. Logo quanto menor for o intervalo pode-se pensar que melhor será essa operação. Contudo o objectivo deve ser o de simultaneamente reduzir o esforço computacional, optimizando todo o processo de tratamento do sinal. Será importante arranjar um compromisso entre estas duas necessidades.

Um critério possível de verificação da adaptabilidade é o chamado Teorema da Amostragem ou de Nyquist. O teorema mencionado permite realizar a reconstrução do sinal contínuo desde que existam pelo menos dois pontos de amostragem relativos à sua componente de maior frequência. O teorema de Nyquist exprime que se amostrarmos um sinal contínuo com no mínimo o dobro da máxima frequência nele contida, então o sinal amostrado contém toda a informação do sinal contínuo e consegue-se recuperar exactamente o sinal original a partir das amostras (Nyquist, 1928). Isto significa que se for usada uma frequência de amostragem de 8000 Hz consegue-se ter toda a informação de um sinal que tenha largura de banda 4000 Hz. Outra possibilidade de reconstrução da série consiste na utilização de interpolação linear (Carvalho et al., 2008).

A análise de sinais pode ser realizada de uma forma digital ou analógica. O termo processamento digital de sinais já foi utilizado na medida que é este o tipo a ser utilizado. A distinção entre as análises é fácil de realizar e depende da natureza contínua ou discreta do sinal. Para um sinal discreto procede-se a uma análise digital, enquanto para um sinal contínuo utiliza-se uma análise analógica.

A aquisição de dados é realizada através da utilização de dispositivos sensores (exemplo: acelerómetros), designados de uma maneira geral por transdutores. Estes convertem uma dada forma de energia numa outra, mais fácil de analisar.

A etapa seguinte à aquisição consiste no tratamento da informação recolhida, sendo um trabalho computacional por vezes moroso que depende da capacidade de processador utilizado. Para isso existe actualmente diversos programas desenvolvidos que ajudam a realizar esta tarefa.

De uma maneira simples e clara, o objectivo do processamento visa a remoção do acessório e representar os resultados de uma forma inteligível. Muitas vezes o sinal vem afectado de ruído resultante do próprio equipamento. Um problema dos sinais resulta do facto de o sistema sensor não ter características perfeitamente neutras (Carvalho et al., 2008). Essa situação é quase inevitável, sendo nesse caso necessário estudar a influência que poderá ter no ensaio. Se não for admissível será necessária a sua substituição, todavia em certos casos a magnitude pode não afectar os resultados.

A medição das grandezas físicas do sistema é feita pela observação das solicitações e das respostas. Sempre que é feita a medição é necessário ter em conta noção de ruído e perturbação, sendo que do ponto de vista dos efeitos a distinção pode não ser evidente. Entende-se por perturbação uma entrada adicional imprevista ou indesejada, sendo que esta não altera a função de transferência do sistema, apenas se verifica a existência de valor adicional (Carvalho et al., 2008).

Já o ruído é encarado como um sinal que aparece adicionado ao sinal de entrada ou de saída. A origem pode ser diversa, tanto do processo de geração inicial do sinal ou no próprio sistema. É possível fazer a remoção do ruído se as suas frequências não se sobrepuserem significativamente às frequências de interesse do sistema quer dos sinais não corrompidos de entrada ou saída. Ainda é possível tratar o ruído se a sua intensidade relativamente à do sinal for fraca. Se o conteúdo energético significativo do ruído se situar numa dada banda limitada de frequências, pode ser possível minimizar os seus efeitos através da escolha ideal da largura de banda do sistema (Carvalho et al., 2008). Esta situação levanta outro apontamento importante. Antes de iniciar um trabalho de campo é muito importante saber os parâmetros que se pretende instrumentar e qual a magnitude esperada. A título de exemplo, na utilização de acelerómetros é necessário escolher correctamente qual a sensibilidade dos mesmos.

2.2 Análise Espectral

No contexto do estudo da propagação de ondas num determinado meio uma das formas de caracterização é através do domínio da frequência. O estudo desta componente é sempre muito interessante no estudo das vibrações. Como é sabido a cada sistema corresponde uma frequência própria de vibração, essa caracterização é feita tanto em edifícios como em investigações com no tema do presente documento. A aquisição do sinal é realizada em geral no domínio do tempo, isto porque com a utilização da transformada de Fourier é possível fazer a alteração para o domínio da frequência facilmente utilizando ferramentas computacionais. Seguem-se algumas considerações sobre a transformada de Fourier e a versão expedita, a transformada rápida de Fourier.

Genericamente a transformada de Fourier de um sinal $f(x)$ com N pontos é calculada por:

$$F(\omega) = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \exp(-i\omega x) \quad (2)$$

Na expressão anterior a frequência (ω) assume os valores:

$$\omega = 2\pi \frac{k}{N}, K = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

No âmbito da análise digital é muito utilizada a transformada discreta e finita de Fourier (TDFF), em grande parte devido à grande eficiência do algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT).

A FFT não é mais do que um instrumento computacional que permite executar a transformada de Fourier de forma rápida e eficiente, com o recurso às propriedades de periodicidade e de simetria das funções trigonométricas. A vantagem da utilização da FFT resulta do facto que actualmente esta está concretizada em variadas linguagens de programação, de fácil utilização. Este algoritmo permite reduzir o número de operações para o cálculo dos coeficientes de Fourier, em comparação com a transformada de Fourier convencional, poupando tempo. A utilização da FFT permite também maior precisão numérica dos resultados obtidos, sendo menores os erros de arredondamento ou de truncadura conhecidos por ruído aritmético (Carvalho et al., 2008). Condição essencial para a utilização da FFT é a amostra ter dimensão 2^n . De alguma forma é possível ultrapassar esta situação, mas pode ser perdida eficiência, cortar a série ou acrescentar zeros são duas possibilidades.

2.3 Descritores da vibração:

Na bibliografia que trata o tema das vibrações é habitual surgir diferentes unidades, dependendo da origem do artigo. Especial diferença se a origem for dos EUA ou Canadá, dadas a diferentes unidades utilizadas em relação ao contexto Europeu. Na tabela 1, a norma ISO 1000 válida para a Europa são propostas as seguintes unidades para os seguintes descritores:

Tabela 1: Unidades SI de vibração (ISO 1000). Norma Europeia ISO 1000

Unidades SI de vibração (ISO 1000)	
Deslocamento	m, mm, μm
Velocidade	m/s, mm/s (ou $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)
Aceleração	m/s^2 (ou $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) - $1g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$

A análise do sinal pode ser descrita em diferentes domínios como tempo, frequência e distância. Ao longo deste trabalho são estes os parâmetros onde os descritores escolhidos são analisados.

O deslocamento é simplesmente a distância que um certo ponto se move a partir de um ponto referência. Já a velocidade representa a taxa de variação do deslocamento de um ponto para um dado instante e a aceleração a taxa de variação dessa velocidade. Devido ao movimento ser apenas oscilatório, a posição inicial é mantida e portanto a média dos descritores é zero (Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005).

Alguns descritores são retirados directamente dos valores obtidos ou por visualização gráfica, como é o caso do PPA (peak particle acceleration), PPV (peak particle velocity) e PPD (peak particle displacement) representam o valor máximo instantâneo positivo ou negativo. Outra forma de caracterizar o sinal é através do valor RMS (root mean square) que é sempre inferior ao valor de pico e positivo, sendo nomeado também de valor efectivo. Este valor RMS é calculado pela expressão presente na secção 6.5, por essa razão não pode ser obtido directamente como os anteriores descritores, sendo também muito utilizado para caracterizar a vibração. A figura 1 pretende mostrar a diferença entre valor de pico e RMS:

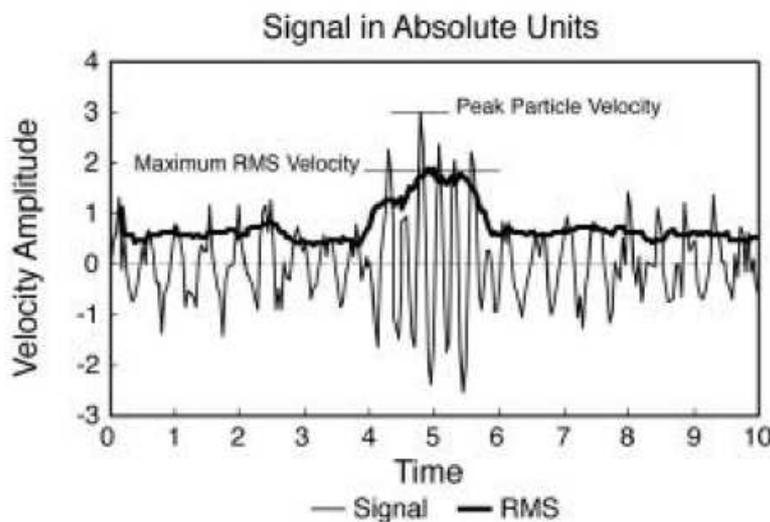


Figura 1 - Descritores de vibração velocidade. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005).

A caracterização da vibração é por vezes apenas realizada tendo em conta o valor de RMS da componente vertical. As componentes transversais e longitudinais podem muitas vezes ser ignoradas, dado que é na componente vertical que usualmente são obtidas maiores amplitudes. Contudo outra razão é apresentada para essa simplificação, a transmissão das vibrações verticais para as fundações dos edifícios são mais eficientes do que nas outras componentes. (Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005)

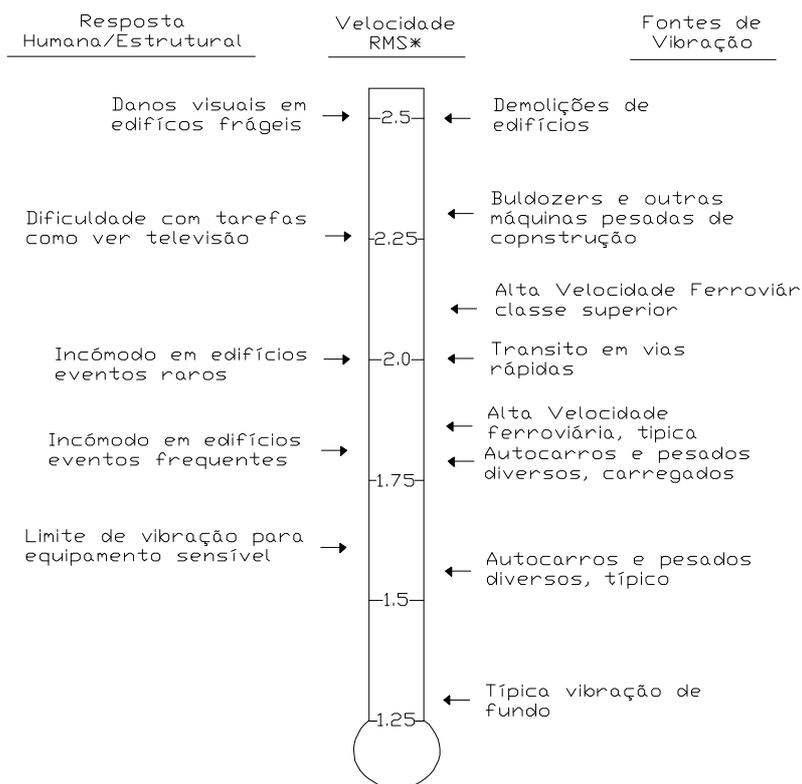
Uma visualização dos estudos a ser apresentados no capítulo 4 permite afirmar que um estudo de vibrações em edifícios, humanos ou equipamento é usualmente descrito em termos de acelerações e velocidade, não sendo usual descrever o fenómeno com deslocamentos.

O domínio da frequência é muito utilizado no processamento digital de sinais, transmitindo outro tipo de informações. Cada sistema em oscilação tem a sua frequência própria, desta forma este domínio permite perceber em que valor de frequência se situa a acção. O nível de energia representado no espectro de frequência tem como descritor de caracterização associado a amplitude. Este valor é uma medida do efeito provocado pelo sinal gerado e analisado.

3. Comboios e as vibrações

3.1 Fenómeno

O movimento de máquinas e estão associados à emissão de vibrações e ruído. Os níveis de vibração resultantes estão dependentes por isso do tipo de fonte. A figura 2 pretende comparar as fontes entre si e as respostas do meio envolvente. Os dados foram recolhidos a cerca de 15 metros da fonte de vibração:



*Nível de velocidade RMS relativa a 10^{-6} m/s

Figura 2 - Fonte de vibração e os seus efeitos no meio envolvente. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005)

Da imagem anterior conclui-se que o estudo da circulação de veículos ferroviários tem bastante interesse em termos de incomodidade e que a essa situação está normalmente associada mais a perturbações com as pessoas. Todavia não são apontados problemas com edifícios devido às vibrações provocadas.

O fenómeno de vibrações por parte de um comboio consiste na criação de vibrações no contacto entre as rodas e os carris. A energia é transferida à infra-estrutura e a magnitude depende da qualidade da via e tipo de comboio. O solo, por conseguinte, recebe a energia que ainda não foi dissipada, podendo então atingir infra-estruturas próximas. A figura 3 retrata o fenómeno:

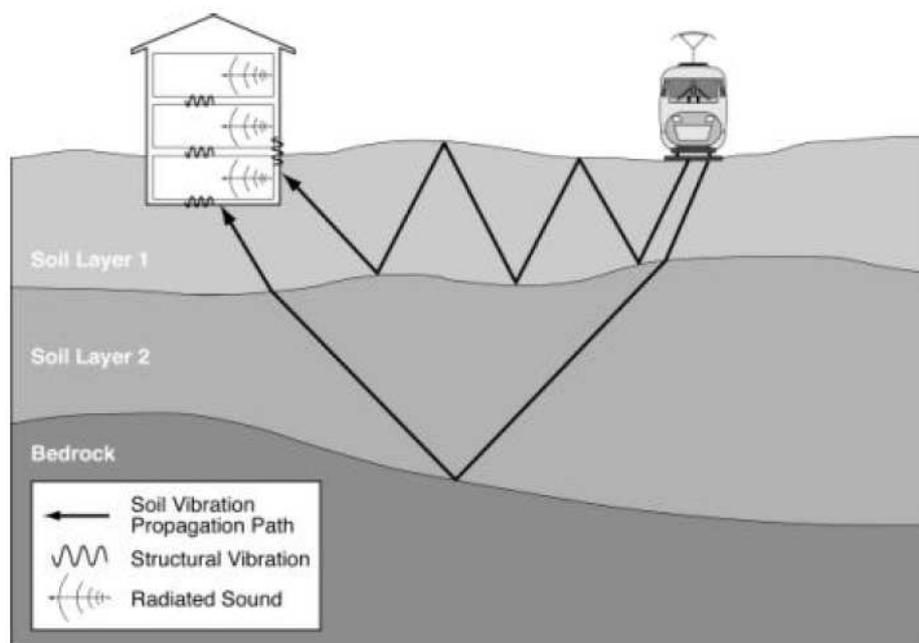


Figura 3 - Propagação das vibrações no solo. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005)

A vibração criada na linha excita o meio adjacente, criando ondas de vibração que se propagam pelos vários estratos do solo ou rocha até às fundações dos edifícios vizinhos. A vibração entra no campo da sensação para os humanos, sendo também perceptível devido a barulhos de janelas, “tilintar” de alguns objectos, ou em casos mais extremos, movimentos de pisos e paredes. As vibrações propagam-se em vários tipos de meios sólidos, como os diferentes tipos de solos, rocha, fundações e estruturas.

A circulação de comboios reflecte-se no ambiente pelo movimento oscilatório do solo ou estruturas. Portanto o estudo desta problemática incide na análise das ondas. A dificuldade resulta do facto de a resposta do meio não ser constante, variando de local para local e com o passar do tempo. A esta situação é preciso adicionar os efeitos causados pelas cargas dinâmicas resultantes do movimento do comboio. A esta situação estão normalmente relacionadas ondas de superfície Rayleigh, sendo que a velocidade de propagação depende do meio onde se encontra (Ekevid et al., 2001).

O conhecimento da situação geológica da zona é de especial interesse quando se pretende estimar a magnitude da vibração. Quando a velocidade de movimento do veículo, a acção, coincide com a gama de velocidade de propagação das ondas no solo, naturalmente ocorre uma amplificação da magnitude destas. A esta velocidade é dada o nome de “velocidade crítica” (Ekevid et al., 2001). Esta situação só foi levantada com o aparecimento da Alta Velocidade. Antes disso os problemas graves de incomodidade com vibrações estavam relacionados com comboios de mercadorias, mas com aumento da velocidade dos comboios levou a que a velocidade crítica de solos fosse igualada ou superada, em casos de solos moles, resultando o aumento da magnitude das vibrações (Ekevid et al., 2001).

Um comboio é constituído por eixos onde se encontram os rodados, sendo através destes que é transmitida a carga do veículo à infra-estrutura. A figura 4 apresenta acelerações no intervalo de tempo de passagem do veículo, onde é perfeitamente perceptível o número de eixos, pois é nesse momento que os valores medidos são superiores. Em contraponto, para uma distância razoável ao centro da via, a vibração sofre atenuação do solo e a distinção referida deixa de ser notada.

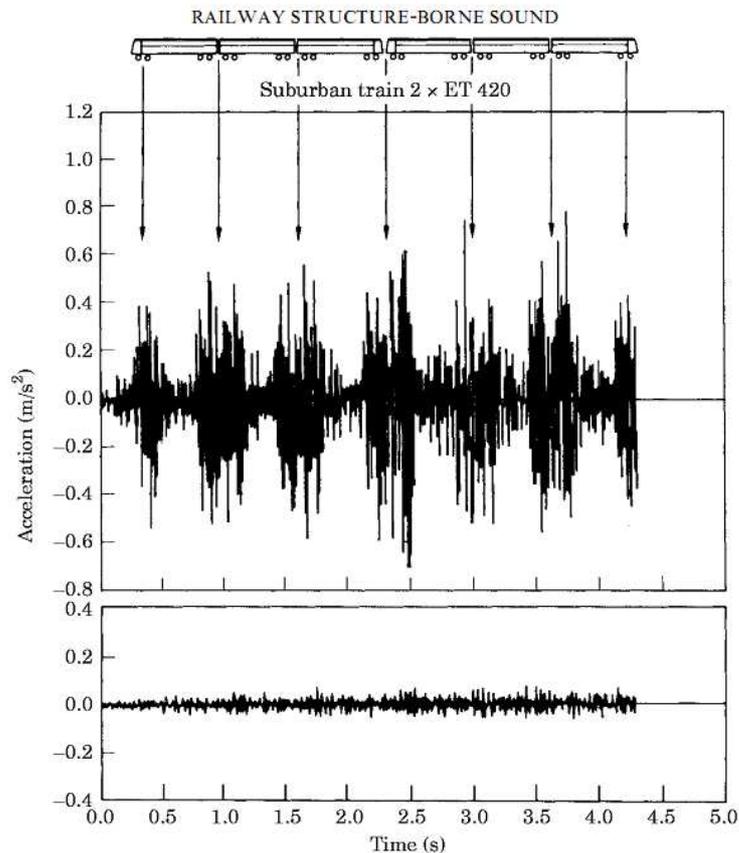


Figura 4 - Aceleração no domínio do tempo em campo livre com a passagem do comboio a 120km/h. Curva superior: distância de 3m ao centro da linha; curva inferior: distância de 32m ao centro da linha. Heckl et al. (1996).

Os factores que influenciam o nível de vibrações são muito variados e de difícil quantificação isolada.

O material circulante influencia na medida que por uma via podem circular diferentes tipos de composições que transmitem acções com diferentes magnitudes. Os vários tipos de comboios existentes podem diferir entre eles nos seguintes aspectos:

1. Peso por eixo
2. Tipo de cargas: estáticas e dinâmicas
3. Velocidade de exploração
4. Suspensões
5. Tipo de tracção: distribuída ou por locomotiva
6. Manutenção dos rodados

Geralmente os comboios de mercadorias são os responsáveis por maiores níveis de vibração em comparação com veículos de passageiros (Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005).

A Infra-estrutura está relacionada com a qualidade da via e os intervalos de manutenção, que interferem no nível de vibração nos seguintes aspectos:

1. Variação da rigidez vertical das camadas constituintes
2. Variação longitudinal da rigidez da via
3. Resistência transversal
4. Impactes do rodado na via devido às irregularidades de nivelamento do carril
5. Irregularidades entre a superfície do rodado e carril
6. Passagem dos eixos dos bogies
7. Massa do carril por metro linear
8. Bitola
9. Escala
10. Tipo e distância entre travessas
11. Imperfeições no carril: desgaste ondulatório
12. Juntas de dilatação dos carris

Nos alinhamentos rectos da via a acção será maioritariamente vertical, em locais de curva passa a existir uma forte componente horizontal de aceleração. A aceleração centrífuga não compensada é um conceito muito importante relativo ao passageiro, influenciando a escala e o raio das curvas a tomar no dimensionamento. Este aspecto da vibração está mais relacionado com o que se passa dentro da caixa do veículo do que com os efeitos em campo livre, contudo o estudo deste tipo de vibrações sai fora do âmbito do presente documento.

O dimensionamento da infra-estrutura procura a homogeneização dos vários constituintes, pois é com irregularidade que as vibrações aumentam de magnitude. Todavia se a via for balastrada o carril está apenas apoiado em parte nas travessas, logo aí uma fonte de vibração devido à transferência não simétrica das cargas. Neste sentido tem sido muito estudada a via sobre plataforma rígida de betão. Neste caso todo o carril está apoiado em estrutura em betão, sendo esta hipótese muito utilizada principalmente em metros ligeiros.

O material de suporte usual a colocar em vias ferroviárias é chamado de balastro e pode ter natureza basáltica ou granítica dependendo da zona onde se encontra a linha. O comportamento deste material tem como função acomodar os esforços gerados e promover o amortecimento, transmitindo as tensões à fundação da infra-estrutura.

A Geologia está implicada nas características da fundação da infra-estrutura ferroviária, por isso tem uma grande influência nos níveis de vibração gerados. Depende da rigidez das camadas, do amortecimento e da profundidade a que se encontra um substrato resistente.

Por experiência chegou-se a conclusão que a propagação de vibrações é mais eficiente em solos de características argilosas e pouco compactos. As ondas tendem também a concentrar-se nas camadas superiores perto da superfície (Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005).

Um dos maiores problemas na caracterização das vibrações surge na medida que para diferentes tipos de solo a comparação entre diferentes ensaios fica condicionada. Especificamente na tentativa de comparar diferentes tipos de comboios, a única solução para realizar a comparação é realizar ensaios na mesma linha.

Medições levadas a cabo em veículos X2000 na Suécia demonstraram haver impacte para distância à linha superior a 90 metros. Utilizando o mesmo veículo X2000 mas em linha do TGV em França, o impacte só era registado até aos 18 metros (Hildebrand, 2001). Esta diferença tem explicação no tipo de solo de cada local associado ao efeito da velocidade crítica.

Quanto aos receptores, o nível de vibrações a admitir está relacionado com o meio em que está inserida a linha, para além de factores de manutenção da infra-estrutura e conforto dos passageiros. Portanto a infra-estrutura deve corresponder às necessidades de edifícios vizinhos onde se encontram as pessoas. Os níveis admissíveis variam e dependem do tipo de propagação na estrutura e das fundações existentes. Em geral quanto maior for a massa da estrutura, menor será a propagação da energia no mesmo (Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005). No exterior as vibrações são sentidas pelas pessoas, mas não criam problemas.

Os factores com influência no problema em estudo estão sumarizados nas duas tabelas seguintes:

Tabela 2 - Factores relacionados com a fonte da vibração. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005).

Factores relacionados com a fonte da vibração	
Factores	Influência
Suspensão do veículo	Se a suspensão é rígida na direcção vertical, a vibração efectiva será maior. Nas composições ferroviárias apenas as cargas não suspensas relacionadas com a suspensão primária afecta o nível de vibrações, a suspensão secundária suporta a caixa do comboio produzindo efeitos insignificantes.
Rodados	A rugosidade e os defeitos constituem uma das maiores causas de vibração no contacto entre a roda e o carril.
Superfície do carril	A irregularidade do carril é também uma das causas das vibrações. Operações de manutenção como a esmerilagem são importantes para regularizar a superfície.

Factores relacionados com a fonte da vibração	
Factores	Influência
Suporte da grelha de via	As vibrações podem ser controladas através de palmilhas de amortecimento no apoio dos carris nas travessas, de espessuras correctas das camadas de balastro e sub-balastro ou por colocação de mantas de amortecimento.
Velocidade	Quanto maior for a velocidade, maiores serão os níveis de vibração.
Estrutura	Em geral, quanto mais pesada for a estrutura da linha ferroviária, menores serão as vibrações resultantes da passagem de um comboio.
Profundidade da fonte	Existem diferenças entre os níveis de vibrações de comboio à superfície ou no subsolo.

Tabela 3 - Factores relacionados com a propagação da vibração. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005).

Factores relacionados com a propagação da vibração	
Factores	Influência
Tipo de solo	Geralmente as vibrações são superiores em solos do tipo argiloso em comparação com solos arenosos. Se os solos são pouco compactos podem originar fenómenos de amplificação das vibrações.
Tipo de rocha	Quando mais perto da superfície o substrato rochoso estiver, maior tende a ser a magnitude das vibrações. Isto porque esta situação influencia a rigidez da infra-estrutura e a propagação das vibrações em rocha resulta em amortecimento mais lento das ondas comparando com solos.
Estratificação	Os estratos podem ter comportamentos dinâmicos muito diferentes entre si, por essa razão o comportamento é difícil de prever.
Nível freático	A sua presença pode implicar interferência com a magnitude das vibrações, mas não é clara a interferência directa.
Gelo	Existe indicação que para um solo gelado a propagação das vibrações é menos eficiente.

3.2 Transmissão de cargas

No dimensionamento de uma via ferroviária é necessário perceber de que formas são transmitidas as cargas à plataforma de via, pois destas depende a magnitude das vibrações geradas.

Este estudo tem sido desenvolvido por diversos autores ao longo dos anos, sendo que as conclusões obtidas nunca foram consensuais. A existência de cargas ditas como estáticas é geral, contudo a forma de cálculo das sobrecargas dinâmicas geradas pelo movimento conheceu diversas evoluções.

As primeiras formulações sugerem a existência de um coeficiente de majoração das cargas estáticas para obter cargas dinâmicas, Winkler (1915) ou Eisenmann (1969), em que a velocidade era o único factor levado em conta. A hipótese avançada por Winkler de teoria de viga sobre fundação elástica para caracterização da resistência vertical do apoio do sistema carril-longarina permitiu obter uma solução interessante, em que para uma dada velocidade de circulação da carga a resposta da viga se torna infinita, propondo:

$$C_{cr} = \sqrt[4]{\frac{4kEI}{m^2}} \quad (4)$$

Onde k representa o módulo de reacção do terreno, E e I o módulo de elasticidade e momento de inércia da viga e m a sua massa por unidade de comprimento. Estas conclusões permitiram idealizar o conceito de velocidade crítica já referido, muito importante no que diz respeito às magnitudes de vibração. Para os casos em que a rigidez da fundação seja reduzida, solos moles, essa velocidade pode ser atingida pelo comboio e portanto ocorrer amplificação dos efeitos.

Contudo foi com a formulação matemática de Prud'homme (1970) e a introdução do conceito de cargas não suspensas que o estudo conheceu nova abordagem. Esta situação levou a separação, descrita na figura 5, do conjunto em sistemas oscilatórios diferentes: roda-carril, massas suspensas e massas não suspensas.

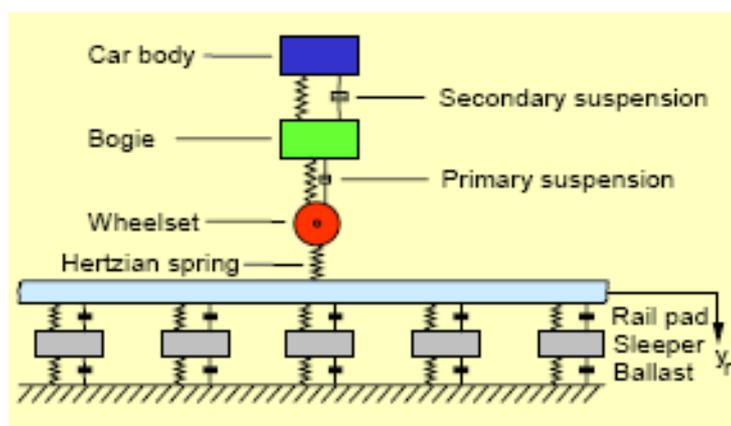


Figura 5 - Modelo dinâmico da interacção via-veículo. Esveld (2001).

Esta formulação para o estudo das vibrações tem especial importância, pois estudos demonstram que as tensões exercidas no solo por massas não suspensas são superiores às das massas suspensas.

Sejam tomados o seguinte quadro de resultados obtidos numa via clássica com circulação de comboios até velocidades de 300 km/h:

Tabela 4 – Efeito das cargas suspensas e não suspensas. Teixeira (2009)

	Qtotal	Qnão suspensas	Qsuspensa	σ não suspensa	σ suspensa	σ total
Locomotiva BB 9100 V=100km/h	10.5	1.6	8.9	1.25	1.35	1.85
Carruagem convencional V= 200km/h	6.3	0.6	5.7	1.35	0.85	1.6
Carruagem TGV V=200km/h	8.15	0.8	7.35	1.7	1.1	2.0
Carruagem TGV V=300km/h	8.15	0.8	7.35	2.6	1.3	2.9

Nota: Cargas por eixo em kN

Vários tipos de conclusões podem ser retiradas destes dados. Contudo salienta-se que apesar de as cargas não suspensas serem menores a tensão transmitida ao solo é de magnitude superior às cargas suspensas. Um das vias de investigação na alta velocidade é precisamente a diminuição das cargas não suspensas, sendo que esta redução se traduz também na redução dos níveis de vibração.

Por último pode ser comparado o efeito da velocidade no valor da tensão exercida, registando-se o aumento como era de esperar, ao que também está associado o aumento da magnitude da vibração.

Em conjunto com a optimização das características óptimas da via e com melhoramento no material circulante, o estudo da propagação das vibrações tem que obrigatoriamente estar atento à forma como as acções são transmitidas e amortecidas tanto no terreno como pelas suspensões do material circulante.

3.3 Análise de frequências

Os sinais de vibração comportam alargado espectro de frequências, sendo que por essa razão a análise das respostas de amplitude não podem ser analisadas apenas em relação ao tempo.

A vibração não é mais do que um movimento oscilatório em relação a um corpo de referência. O número de vezes que um ciclo é completo durante um período de um segundo é chamado de frequência e é medido em Hertz.

Nos casos em que a obtenção do sinal é realizado no tempo, é habitual estudar também o sinal a partir dos espectros no domínio da frequência. Estes relacionam a amplitude do sinal com a respectiva frequência.

Quando se analisa a vibração de um sistema pode ocorrer um grande número de componentes periódicos de frequência que são directamente relacionados com os movimentos fundamentais de cada elemento do sistema. Com a análise da frequência, o objectivo passa por descobrir a qual elemento está relacionado cada fonte de vibração no sistema, mas será sempre um objectivo complicado de atingir. Cada componente do sistema linha ferroviária apresenta uma frequência de vibração natural. Se a frequência da acção, imposta pela passagem do comboio, for próxima da natural, as vibrações podem ser amplificadas, podendo nesse caso danificar a infra-estrutura.

Um aspecto importante a definir será qual o intervalo do espectro de frequências realmente influenciado pela circulação de veículos ferroviários. Segundo Auersch (2004) o intervalo de interesse situa-se entre 0 a 150Hz. Já Hildebrand (2001) sugere que as frequências limites superiores para vibrações na linha de comboio não estão bem definidas, contudo refere-se que há um declínio de importância à medida que essas frequências aumentam, indicando até 200-250Hz o valor limite de importância. Obviamente que este assunto não é fechado e depende das características próprias dos ensaios. Contudo as indicações recolhidas apontam para um valor sempre inferior a 250Hz. Isto porque para as altas-frequências a propagação no solo é amortecida, sendo menos importante a sua obtenção. A este propósito Heckl et al. (1996) indicam através de resultados (figura 6) que as vibrações são reduzidas a partir de 200Hz, acrescentando a existência de frequências observáveis em monitorizações deste género.

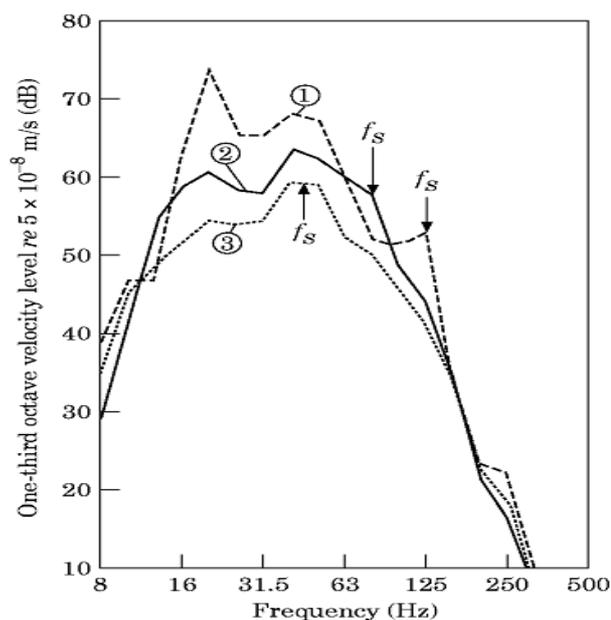


Figura 6 - Níveis de velocidade monitorizados a 8 metros do centro da linha em via balastrada. Curva 1: comboio de passageiros a 250 km/h; curva 2: comboio de passageiros a 160 km/h; comboio de mercadorias a 100 km/h. Heckl et al. (1996).

O mesmo artigo aponta contudo que é o intervalo entre 40Hz e 100Hz o mais rico em energia, muito devido à ressonância provocada pelo contacto entre a roda e a o carril (Heckl, et. al., 1996).

A gama de frequência pode ser dividida em baixas e altas, que no fundo correspondem a uma possível origem. As baixas frequências, $f < 30\text{Hz}$, estão relacionadas com a excitação da infra-estrutura e fundação e as frequências mais elevadas relacionadas com o material circulante.

As baixas frequências obtidas dependem da flexibilidade do balastro bem com da rigidez existente nas camadas inferiores a esta. As frequências estão pois relacionadas com a forma como a via se encontra balastrada, com o objectivo de apresentar bom comportamento em termos de amortecimento das acções (Heckl, et. al., 1996).

Para baixas frequências, as vibrações no solo resultantes da passagem do comboio podem ter impactes negativos para as estruturas edificadas. Essas vibrações podem ainda criar instabilidade no aterro da via, bem como provocar estragos nas fundações de edifícios próximos.

No caso das frequências superiores, estão relacionadas com interferências relacionadas com os ocupantes dos edifícios e com material de precisão utilizado em fábricas ou hospitais (Hildebrand, 2001).

A tentativa de perceber a que gama de frequência corresponde certa parte do sistema é um dos temas muito abordados na literatura deste tema. Parece contudo algo dependente das condições locais onde o teste se realiza, porém foram feitas algumas aproximações que parece importante reter. Destaque para o que é nomeado de *Sleeper Passage Frequency* (f_s) e *Wheel Passing Frequency* (f_A), dadas pelas seguintes expressões:

$$f_s = \left(\frac{V}{3.6 \times l_s} \right) \text{Hz} \quad (5)$$

V – velocidade do comboio em km/h
 l_s – distância das travessas em metros

$$f_A = \left(\frac{V}{3.6 \times a} \right) \text{Hz} \quad (6)$$

V – velocidade do comboio em km/h
a – Distância em metros entre os eixos dos bogies

Heckl et al.(1996)

Será interessante na fase de análise de resultados verificar se ocorrem estas frequências ou não, sendo que é indicado que é mais fácil distinguir a frequência de passagem na travessa.

Importante também ter a noção dos valores das frequências de ressonância correspondentes aos constituintes dos edifícios. Este conhecimento será importante em fase de dimensionamento, tornando essas frequências menos ricas em energia. Sobre este propósito Hildebrand (2001) especifica alguns valores:

- Paredes e pisos: 20 a 30Hz;
- Janelas e portas: 40Hz;
- Fundações: <10Hz.

No capítulo das frequências é necessário ainda referir o Efeito de Doppler. Quando um sinal é emitido apresenta uma determinada frequência, mas dependendo da posição relativa entre o emissor e o receptor a frequência pode aumentar ou diminuir. No caso concreto da passagem do comboio, com a aproximação a frequência das ondas recebida é maior. Depois da passagem pelo local, dá-se o afastamento do veículo e a frequência recebida é menor.

3.4 Valores regulamentares

Os efeitos da vibração provocada por comboios podem afectar de maneira visual construções vizinhas, mas não é normal que os níveis afectem a estabilidade das mesmas. O maior problema resulta na sensação de desconforto dos residentes. Esta situação é de especial importância no contexto em que a linha se desenvolve ou atravessa contextos urbanos durante numerosas vezes ao dia. Nesse sentido, este capítulo pretende relatar os valores admissíveis de acordo com normas nacionais e internacionais.

Em Portugal o contexto das vibrações resultantes de vias ferroviárias não possui regulamentação específica. Portanto, quando é elaborado um projecto é natural estabelecer objectivos, se os limites não existirem ocorre um vazio que leva a situações não reguladas.

A norma ISO 14837-1 de 2005 especifica que é necessário distinguir 4 potenciais efeitos indesejáveis devido à vibração, sendo:

1. Danos nos Edifícios (especialmente em monumentos antigos);
2. Percepção humana da vibração.
3. Incomodidade para as pessoas, subdividindo-se em quatro graus:
 - 2.i) nociva para a saúde, envolvendo geralmente ferramentas vibratórias;
 - 2.ii) inconveniente ou impeditiva da realização normal de trabalho;
 - 2.iii) excessiva, eventualmente tolerável em situações transitórias, como por exemplo, durante uma viagem, ou provocada por obras limitadas no tempo;
 - 2.iv) sensível, no sossego da habitação ou em outros locais de lazer ou repouso.
4. Percepção humana do ruído estrutural;
5. Interferência com equipamentos (hospitais, laboratórios ou em habitações).

Problemas estruturais causados por vibrações são, em geral, tidos em conta durante a fase de construção. Em exploração é usual apenas haver interferência com as pessoas ou equipamentos, pois o nível usual de vibrações não é suficiente para afectar estruturas.

Todos os valores descritos com V_d ou V_{ef} referem-se à velocidade eficaz ou RMS.

3.4.1 Danos nos Edifícios

A norma NP 2074 de 1983 (Avaliação da influência em construções provocadas por explosões ou solicitações similares) dispõe o seguinte, quanto a danos nas edificações:

Tabela 5 - NP 2074 de 1983 – Valores limite da velocidade máxima em módulo $|V|_m$ da vibração na base da edificação.

Tipo de construção	$ V _m$, em mm/s segundo o tipo de solo		
	Incoerentes soltos e coerentes moles $c < 1000$ m/s	Incoerentes compactos e coerentes duros e médios $1000 < c < 2000$ m/s	Coerentes rijos $c > 2000$ m/s
Sensíveis	1,75	3,5	7
Correntes	3,5	7	14
de betão armado	10,5	21	42

O tipo de solo vem em função da velocidade c com que as ondas se propagam no solo, dependendo do seu tipo, módulo de elasticidade (E) e de massa (ρ).

A norma NP 2074 revista baseia-se, não no máximo do módulo do vector velocidade como originalmente, mas sim no maior dos máximos das suas três componentes. É disposto o seguinte, quanto a danos nas edificações:

Tabela 6 - NP 2074 revista – Valores limite da maior componente da velocidade da vibração na base da edificação.

Tipo de construção	$V_{i\text{máx}}$, em mm/s segundo o tipo de solo		
	Incoerentes soltos e coerentes moles $f < 10$ Hz	Incoerentes compactos e coerentes duros e médios $10 < f < 40$ Hz	Coerentes rijos $f > 40$ Hz
Sensíveis	1,3 – 1,8	2,5 – 3,5	5 - 7
Correntes	2,5 – 3,5	5 - 7	10 -14
de betão armado	6,5 – 12,5	12,5 – 17,5	25- 35

Nota: f representa a frequência predominante no espectro de velocidade.

Quanto a danos nas edificações correntes (excluindo monumentos e edifícios sensíveis), o LNEC propõe o seguinte critério:

Tabela 7 – Critério adaptado de Shiappa de Azevedo et al. (2001)

V_{ef} (mm/s)	efeitos
$V_{ef} < 3,5$	Praticamente nulos
$3,5 < V_{ef} < 7$	Possibilidade de danos cosméticos em edifícios antigos
$7 < V_{ef} < 21$	Fendilhação ligeira nos revestimentos
$21 < V_{ef} < 42$	Fendilhação acentuada nos revestimentos e alvenarias
$42 < V_{ef}$	Danos consideráveis; possível fendilhação da estrutura de betão armado

Nota: A velocidade eficaz representa a velocidade RMS para a componente vertical.
Adaptado de Shiappa de Azevedo e tal. (2001)

Shiappa de Azevedo et al. (2001) sugerem um critério mais condicionante que o anterior e que introduz o parâmetro de duração da vibração:

Tabela 8 – Critério de valores admissíveis dependendo do tipo de construção. Shiappa de Azevedo et al. (2001)

V_{ef} (mm/s)	Duração inferior a 1hora/dia	Duração superior a 1hora/dia
Construções sensíveis (e1)	1	0,7
Construções correntes (e2)	2	1,8
Construções reforçadas (e3)	5	5

Nota:
e1 – Monumentos e outros edifícios históricos, hospitais, casas antigas em centros históricos, depósitos de água, chaminés em alvenaria, etc.
e2 – Edifícios de habitação em boa alvenaria, edifícios industriais menos recentes, etc.
e3 – Edifícios com estrutura de betão armado, edifícios industriais de construção recente, etc.

Segundo Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005), são definidos limites de vibração para a fase de construção de infra-estruturas ferroviárias. Os valores expressos no documento em dB (VdB) foram convertidos em mm/s através da seguinte expressão:

$$V_d = 10^{VdB/20} \times 25.4 \times 10^{-6} \quad (7)$$

com 1inch = 25.4mm

Tabela 9 - Critério de valores admissíveis dependendo do tipo de edifício. Harris Miller & Miller Hanson Inc (2005)

Edifícios	V_{pico} , em mm/s	V_d , em mm/s
Extremamente susceptíveis	3	0,8
Sem projecto de engenharia	5	1,3
Com projecto de engenharia	8	2
Reforçados	13	3

3.4.2 Percepção humana da vibração

As vibrações que provocam incomodidade para os seres humanos são definidas como no seguinte critério do LNEC como vibrações continuadas:

Tabela 10 - Critério de valores admissíveis relativo a sensações humanas. Shiappa de Azevedo e tal. (2001)

V_{ef} (mm/s)	Sensação
$V_{ef} < 0,11$	nula
$0,11 < V_{ef} < 0,28$	Perceptível, suportável para pequena duração
$0,28 < V_{ef} < 1,10$	Nítida, incómoda, podendo afectar as condições de trabalho
$1,10 < V_{ef}$	Muito nítida, muito incómoda, reduzindo as condições de trabalho
Nota: A velocidade eficaz representa a velocidade RMS.	

Também no documento produzido por Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005) são propostos limites em relação à incomodidade causada aos humanos:

Tabela 11 - Critério de valores admissíveis para pessoas dependendo do tipo de edifício. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005)

Tipologia	V_d , em mm/s		
	número de eventos por dia		
	$n > 70$	$30 < n < 70$	$n < 30$
Habitacões ou edifícios onde as pessoas usualmente dormem	0,101	0,143	0,254
Zonas com utilização sensível à vibração sobretudo no período diurno	0,145	0,202	0,359
Salas de concerto, estúdios de televisão e estúdios de gravação	0,359		
Auditórios e teatros	0,101	0,254	

3.4.3 Percepção humana do ruído estrutural

Para o ruído estrutural o LNEC especifica um critério que assegura que a vibração de elementos do edifício (piso, tecto, parede) não emita ruído superior a 40 dB, critério traduzido em velocidade eficaz da seguinte forma:

$$v_{ef}(f \geq 63\text{Hz}) < 0.03\text{mm/s} \quad (8)$$

Shiappa de Azevedo et al. (2001)

O documento Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005) também realiza consideração quanto aos limites admissíveis, analisando tendo em conta a frequência de pico:

Tabela 12 - Critério de valores admissíveis por humanos ao ruído estrutural. Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005)

Tipologia	V_d , em mm/s					
	Número de eventos por dia					
	n > 70		30 < n < 70		n < 30	
	f(pico)=30Hz	f(pico)=60Hz	f(pico)=30Hz	f(pico)=60Hz	f(pico)=30Hz	f(pico)=60Hz
Habitações ou edifícios onde as pessoas usualmente dormem	0,1	0,03	0,2	0,04	0,4	0,06
Zonas com utilização sensível à vibração sobretudo no período diurno	0,3	0,05	0,4	0,06	0,6	0,1
Salas de concerto, estúdios de televisão e estúdios de gravação	0,05			0,008		
Auditórios	0,08	0,01	0,2		0,04	
Teatros	0,01	0,03	0,4		0,06	

3.4.4 Interferência com equipamentos

Para os equipamentos sensíveis o LNEC sugere que os níveis de vibração admissíveis devem ser especificados pelos respectivos fabricantes (Shiappa de Azevedo et al., 2001).

No caso de Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005) são especificados alguns valores, destacando os seguintes:

- $V_d < 0,2$ mm/s: adequado para computadores e microscópios ópticos de baixa resolução (20x);
- $V_d < 0,1$ mm/s: adequado para microscópios ópticos de média resolução (100x);
- $V_d < 0,05$ mm/s: adequado para microscópios ópticos de média a alta resolução (400x), microbalanças e balanças ópticas;

- $V_d < 0,025$ mm/s: adequado para equipamento com detalhe de 3 microns;
- $V_d < 0,012$ mm/s: adequado para equipamento com detalhe de 1 microns;
- $V_d < 0,006$ mm/s: adequado para microscópios electrónicos;
- $V_d < 0,002$ mm/s: adequado para equipamentos extremamente sensíveis.

Na discussão de resultados será feita uma análise tomando em conta o valor mais restritivo propostos pelas diversas fontes.

3.5 Mitigação

Com o objectivo de reduzir os impactes provocados pelas vibrações algumas soluções têm vindo a ser desenvolvidas. As opções para a redução dos níveis de vibração passam pelos seguintes aspectos:

1. Manutenção da via ferroviária

A mitigação das irregularidades da via passa pelos intervalos correctos de manutenção de via. Em geral existem dois tipos de avaliação: geométrica e dinâmica (Teixeira, 2009).

Na avaliação geométrica é feita a medição directa dos parâmetros de via: bitola, empeno, nivelamento longitudinal, nivelamento transversal e alinhamento. Em geral para linhas convencionais é feito com intervalos de 6 meses e para linhas de alta velocidade com intervalos de 3 meses.

A avaliação dinâmica é aquela que vai de encontro com o tema do presente texto. O objectivo é recolher acelerações e a partir deste dado construir funções preditivas. A recolha de dados é feita no próprio veículo de auscultação. Uma boa hipótese de controlo de vibrações seria aplicar instrumentação permanente na própria via e zona adjacente.

Verificada a necessidade de manutenção, uma das actuações usuais é a esmerilagem do carril presente na figura 7, com o objectivo de eliminar o desgaste ondulatorio do carril.



Figura 7 - Manutenção de via: esmerilagem.

Uma alternativa será actuar sobre a via, com uma via livre de defeitos e alisada um dos factores apontados como razão das vibrações podem ser mitigados (Auersch, 2004). Assim como uma boa estrada permite um avanço mais constante, a ausência de defeitos no carril, variações de rigidez e juntas de dilatação permite reduzir as vibrações. A natureza do transporte e a tecnologia actual vive com estas situações e é por isso que as linhas de alta velocidade em construção actualmente têm em conta estas situações.

2. Material circulante

Um veículo ideal seria constituído por reduzido peso não suspenso, uma suspensão primária eficiente e rodados perfeitamente circulares. É neste sentido que a tecnologia tem avançado e com o passar dos anos a evolução é notória. Destaca-se a nova geração de veículos de alta velocidade que reduziram em muito a carga não suspensa, transmitindo menores esforços à via e portanto também de vibrações.

Um problema sentido no campo do material circulante resulta do facto de o comboios de mercadorias não utilizarem suspensão secundária. Para um veículo de passageiros (convencional ou alta velocidade) a incorporação de suspensões cada vez mais eficientes reduzem em muito as vibrações produzidas. Dado ser umas das componentes mais dispendiosas e as mercadorias não exigirem conforto, é uma opção a analisar a inclusão de suspensões secundárias.

Os defeitos nas rodas são apontados como uma das maiores causas de vibração, devendo ser dada especial atenção à manutenção desta componente.

3. Sistema de suporte de via

Os sistemas de suporte e fixação dos carris têm sido desenvolvidos de forma a aumentar a estabilidade do conjunto grelha de via. Existe a possibilidade de incluir elementos que buscam a rigidez de via pretendida.

Algumas hipóteses como utilizar apertos de carril elásticos com palmilha sobre o carril (figura 8), tapete elástico sobre o balastro (figura 9) ou granulometria adequada do balastro são algumas possibilidades de actuação neste campo (Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005).



Figura 8 e 9 - Medidas de mitigação actuantes no campo da rigidez de via. Hanson (2000).

4. Tratamento da fundação

O solo sobre o qual a infra-estrutura ferroviária está fundada pode não apresentar as condições de resistência necessárias. Com a realização de ensaios de campo e ensaios laboratoriais já é possível fazer previsão do comportamento do solo, contudo é muitas vezes já durante a fase de exploração que os problemas surgem. Realizar o tratamento da fundação durante a construção ou como medida de mitigação à posteriori pode utilizar algumas das técnicas disponíveis no mercado. Algumas destas técnicas foram desenvolvidas exactamente para resolver problemas em solos moles resultantes da amplificação de vibrações verificada com a exploração da via.

Se em fase de construção o objectivo for acelerar a consolidação do solo, podem ser utilizadas medidas como colocação de colunas de brita ou geodrenos. O objectivo é incluir no terreno uma via mais acessível que permita a drenagem mais rápida e acelere o assentamento. Outra hipótese é a execução de estacas de cal e cimento. Neste caso o efeito é o aumento da rigidez da fundação com a introdução dos novos elementos. No campo dos geossintéticos existe alguma oferta com vista a melhoramento da resistência e deformabilidade. A colocação de geogrelhas é utilizada como medida de reforço de aterro, todavia este tipo de solução é utilizada em fase de construção (Marcelino, 2005).

5. Edifícios vizinhos

Os níveis de vibração admitidos dependem dos edifícios vizinhos, logo se estes estiverem melhor preparados para conviver com uma linha ferroviária melhor. Introdução de elastómeros nas fundações de novos edifícios, assim como em pontes, reduz significativamente os efeitos (Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005).

Se for o caso de existir um hospital ou indústria com material sensível deve ser colocada a hipótese de desvio da linha ferroviária. Se a situação de interferência ocorrer com uma linha ferroviária já existentes há soluções de isolamento de possíveis.

6. Ajustamentos no caminho de transmissão

Assim como existem barreiras sonoras para controlo dos efeitos sonoros, no caso das vibrações é possível realizar trincheiras no solo (Marcelino, 2005). Esta situação apresenta alguns resultados pois as ondas que provocam maior incomodidade situam-se à superfície do terreno, na forma de ondas de Rayleigh. Na América do Norte foi testada esta solução com o enchimento com *isopor* (poliestireno expandido) ou betão pobre. Contudo esta solução não é muito aplicada na prática, pois a profundidade necessária estimada teria de ser no mínimo de 5 metros, o que torna a execução difícil (Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005).

Recorrendo à técnica de *jet-grouting* é possível também construir barreiras inferiormente à plataforma de via. Neste caso sem recorrer a escavação, mas incluindo elementos novos com o objectivo de bloquearem parte da vibração (Marcelino, 2005).

7. Mudanças operacionais

A primeira nota resulta do facto de a via ser reservada para transporte exclusivo de passageiros ou tráfego misto, sabendo de antemão que a circulação de comboios de mercadorias está associada a magnitude de vibração superior.

A redução da velocidade é também uma das possibilidades para a mitigação da vibração desejada, mas dado que o objectivo é ter sempre a melhor velocidade comercial, não parece de todo a melhor via.

Um aspecto importante a ter em conta é a já mencionada velocidade crítica. As ondas no solo têm uma velocidade de propagação, sendo que se a excitação provocada pelo comboio tiver a mesma velocidade a amplificação do efeito será superior. O fenómeno é algo similar ao de ressonância, não sendo provocado por uma determinada frequência mas sim uma dada velocidade. Apesar de esta situação sair fora do documento presente, parece importante este estudo como uma forma de mitigação dos impactes causados pela vibração. Para isso seria sempre necessário um estudo detalhado das características do solo e realização de ensaios sísmicos de caracterização.

Existe ainda a possibilidade de circular com velocidades específicas e equipamentos dependendo da hora do dia. Em zonas habitacionais, será nas horas nocturnas de repouso onde as pessoas se encontram mais sensíveis, que deve ser dada especial atenção.

4. Estudos publicados

4.1 Testes de homologação da linha de Alta Velocidade entre Paris - Bruxelas

O caso estudo apresentado por Degrande et al. (2001) reporta a campanhas de ensaio no ano de 1997 na linha de Alta Velocidade entre Bruxelas e Paris, com a passagem do comboio Thalys HST com velocidades entre os 223 e os 314km/h (de acordo com as velocidades comerciais a operar). Para além da verificação da magnitude das vibrações, este estudo foi utilizado mais tarde para a validação da previsão numérica das vibrações causadas por comboios.

Antes da nova linha de Alta Velocidade ser inaugurada, os testes de homologação foram utilizados para realizar uma campanha de medição de vibrações. Foi efectuada instrumentação para distâncias ao centro da linha de 4 a 72 metros, em campo livre, no carril e na travessa.

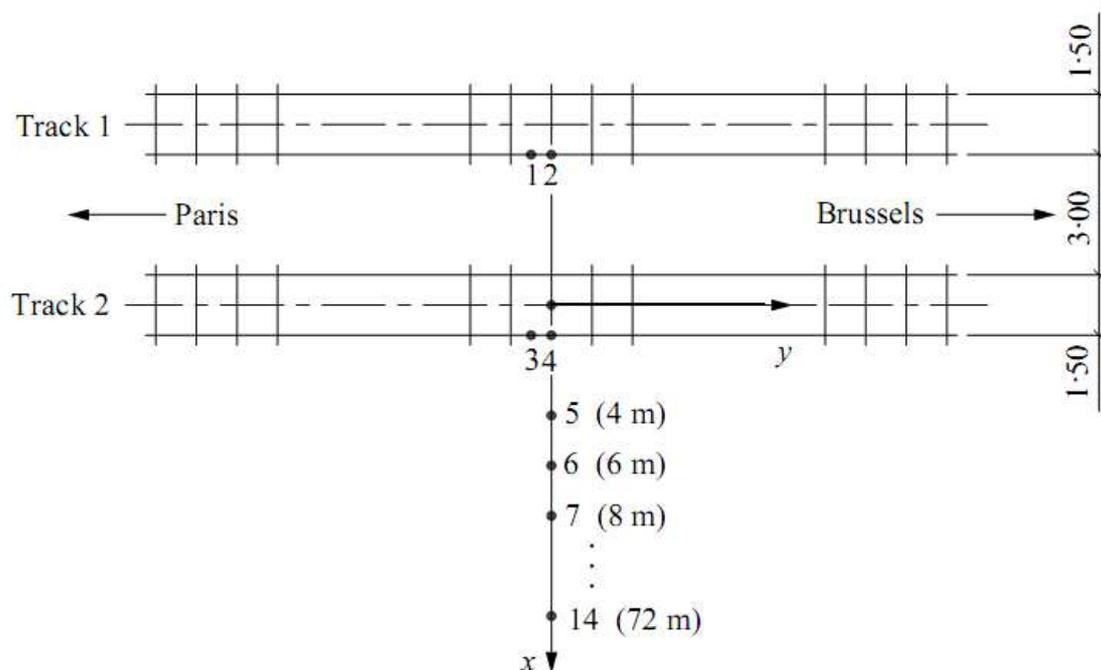


Ilustração 10 - Localização dos pontos de medição. Degrande et al. (2001).

Na campanha de instrumentação foi efectuada medição de vibrações para 14 locais, sendo para isso utilizados dois tipos de acelerómetros. O acelerómetro do tipo piezoeléctrico Dytran tem como função medir as acelerações verticais no carril e na travessa. Já o acelerómetro do tipo sísmico piezoeléctrico PCB foi utilizado em campo livre, com estrutura de suporte auxiliar (montado em estacas de aço ou alumínio com secção cruciforme).



Ilustração 12 - Acelerómetros colocados no carril e na travessa da linha 2 do tipo Dytran.



Ilustração 11 - Acelerómetro montado sobre suporte de alumínio do tipo PCB.

Na aquisição do sinal foi utilizado um filtro passa baixo fixado a 500Hz para medições na linha e a 250Hz para o campo livre.

Os resultados das medições na via mostram que no carril foram registadas acelerações na ordem dos 100 m/s^2 e que tanto no carril como na travessa a passagem dos bogies é bem diferenciado no acelerograma. O valor da amplitude de Fourier é superior no carril em comparação com a travessa.

Para o campo livre os resultados são divulgados em velocidade, ao contrário das acelerações fornecidas para o carril e para a travessa. A integração para a obtenção da velocidade utiliza um filtro digital passa-alto com uma frequência de corte a 3Hz.

As conclusões indicam que para distâncias superiores a seis metros do centro da linha já não é possível distinguir a passagem dos bogies graficamente, apresentando uma velocidade de pico de 2.5 mm/s. À medida que aumenta a distância ao centro da linha em campo livre o efeito do amortecimento do solo reduz o valor registado para 0.2 mm/s (a 40 metros).

Para distâncias superiores a 32 metros os acelerómetros utilizados tinham uma sensibilidade 10 vezes superior (10 V/g em vez de 1 V/g) aos utilizados nas restantes medições de campo livre.

Na apresentação dos resultados existe o cuidado de colocar as mesmas escalas para resultados recolhidos com acelerómetros idênticos, de forma a facilitar a comparação.

Os valores registados no ensaio podem ser encontrados na tabela 13:

Tabela 13 – Resultados obtidos na campanha de medição

Parâmetros: valor de pico	
Aceleração média no carril (m/s ²)	50 - 100
Aceleração média na travessa (m/s ²)	25 - 75
Velocidade média no carril (m/s)	0.2
Velocidade média travessa (m/s)	0.05
Velocidade média a 4m (m/s)	0.003
Velocidade média a 6m (m/s)	0.0025
Velocidade média a 8m (m/s)	0.001
Velocidade média a 12m (m/s)	0.001
Velocidade média a 16m (m/s)	0.0004
Velocidade média a 24m (m/s)	0.0003
Velocidade média a 32m (m/s)	0.00025
Velocidade média a 40m (m/s)	0.0002
Velocidade média a 56m (m/s)	0.0001
Velocidade média a 72m (m/s)	0.0001

4.2 ICE Alta Velocidade Alemã

Este estudo foi realizado por Auersch (2004) tendo por objecto de estudo a linha de alta velocidade Alemã perto de Wurzburg, registando a acção provocada pela passagem do comboio ICE em via balastrada.

Os pontos de medição de vibração no solo foram realizados de 2.5 a 100 metros do centro da linha, sendo o ensaio realizado em três séries de medição em que a velocidade do comboio variou entre 100 e 300km/h.

Os resultados indicam que baixas frequências com energia é mais usual perto da linha e que com a distância desaparecem. Em campo livre a frequência dominante encontra-se entre os 10 a 40 Hz, em resultado do amortecimento das altas frequências característico do comportamento do solo. As componentes de vibração entre 80 a 120Hz são justificadas neste estudo devido à transmissão das cargas pelas travessas ao solo.

As amplitudes mais elevadas foram registadas para a velocidade de 200 km/h, que se justifica pela razão de ser também esta velocidade crítica de vibração do conjunto via/solo. Para velocidades superiores não se regista o aumento da vibração, dado que a acção das cargas dinâmicas estabiliza e a acção de amortecimento do solo aumenta. O efeito da velocidade no nível de vibrações é descrito pelo seguinte:

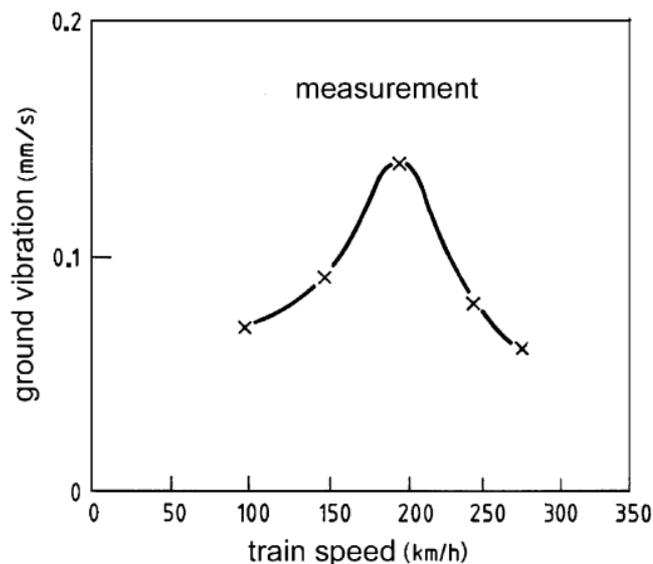


Figura 13 - Variação da vibração no solo para distância de 10-15m da linha.

Novos ensaios foram realizados anos mais tarde, mas desta vez para além do campo livre, foi monitorizado o comportamento do veículo e da própria linha. O objectivo destes trabalhos experimentais é a recolha de valores para justificar trabalhos teóricos de previsão das vibrações, campo difícil e com relativo sucesso.

O estudo mostra que as cargas estáticas são importantes apenas para a proximidade da linha, com o afastamento da linha as vibrações existentes devem-se a cargas dinâmicas. Por esta razão o trabalho de atenuação das irregularidades na via e desenvolvimento de suspensões se avizinha um ponto fulcral.

Na tabela 14 podem ser encontrados os valores de velocidade de pico registados em função da distância ao centro da linha:

Tabela 14 – Dados do ensaio

Parâmetros: valor de pico	200 km/h
Velocidade média a 2.5m (m/s)	0.0024
Velocidade média a 5m (m/s)	0.001
Velocidade média a 10m (m/s)	0.00045
Velocidade média a 20m (m/s)	0.0002

4.3 Estudo de projecto do AVE

Com o desenvolvimento do projecto de Alta Velocidade Espanhola (AVE) surgiu também a necessidade de desenvolver estudos sobre a transmissão de vibrações no terreno, neste caso

utilizados para determinar os parâmetros físicos do terreno que intervêm na transmissão de vibrações. A metodologia utilizada neste estudo com vista ao dimensionamento parece bastante interessante sendo apresentada por Rovira et al. (2003).

A campanha de instrumentação serviu para realizar da melhor forma o dimensionamento da infraestrutura a construir, pois no local de medição escolhido existe uma linha convencional e ao lado seria construída a nova linha do AVE.

A ideia do ensaio foi utilizar os comboios convencionais, que circulavam com velocidades entre 45 e 146km/h, fazendo uma primeira fase de aquisição de sinal. Com este primeiro ensaio foram calculados parâmetros do solo. Os ensaios foram utilizados para calibrar a expressão de Barkan, usada para determinar as características físicas do terreno.

A segunda fase foi realizada em local diferente mas com geologia semelhante. O objectivo neste caso é ter um termo de comparação. No novo local circulam comboios com velocidades comerciais do projecto AVE em estudo para o primeiro local. Com estes dados é possível transpor a informação e efectuar previsões.

Para a realização do novo projecto duas informações era necessário ter conhecimento: características do solo e comportamento do solo devido às vibrações resultantes da velocidade comercial do novo projecto. Este é um bom exemplo do campo de aplicação da teoria das vibrações na fase de projecto de via. Nota importante no documento, que especifica que será interessante ter um sistema que permita conhecer a velocidade de circulação dos comboios com precisão.

Do ponto de vista da realização dos ensaios são dadas indicações quanto à montagem dos instrumentos de medição em campo. Se o terreno é mole podem ser utilizadas estacas com secção em T, se for um solo duro ou até rochoso deve-se furar previamente e depois colocar estacas cilíndricas fixadas com cimento.



Figura 15 - Estacas de suporte em campo livre
Rovira et al. (2003).



Figura 14 - Acelerómetro montado.
Rovira et al. (2003).

4.4 Australia Railway Line Melbourne-Geelong

O estudo desenvolvido pelo Institute of Railway Technologies (IRT) na linha de comboio Australiana segue um objectivo e estratégia diferente dos até aqui apresentados. Um alinhamento transversal à linha não foi montado, mas sim instrumentado um carril longitudinalmente com uma travessa central como alvo principal de estudo.



Figura 16 – Modelo instrumental. Leon (2001).

A investigação desenvolvida por Leon (2008) e colaboradores apresentou um modelo que consiste na montagem de acelerómetros e medidores de extensão distribuídos por aproximadamente 11m de carril, permitindo obter a resposta completa da travessa central à passagem do comboio.

O documento refere um aspecto importante e fácil de executar antes dos ensaios, a inspecção visual das condições da infra-estrutura no local. A verificação das condições do balastro, sistema de drenagem e estado de desgaste do carril podem determinar que o local não é o apropriado para realizar o trabalho de campo.

Do documento é possível retirar apenas informação quanto à aceleração de pico no carril (PPA) registada, dado que só foi realizada monitorização para a grelha de via.

Tabela 15 – Valor registado do descritor aceleração

Parâmetros: valor de pico	
Aceleração média no carril (m/s^2)	391.1

4.5 Alta Velocidade na Suécia

O caso de estudo na Suécia resulta dos problemas com solos moles, sendo provavelmente um dos que tem maior divulgação, cabendo a Hildebrand (2001) boa parte da exposição do caso. A investigação inclui o teste das medidas de mitigação, através da monitorização das vibrações.

O estudo aqui presente foi levado a cabo no sul da Suécia, Ledsgard, em 2000, tendo sido seleccionado um local referenciado por elevadas vibrações. A aquisição foi realizada com a passagem do comboio de Alta Velocidade X2000.

Com a introdução em circulação destes comboios de alta velocidade um fenómeno começou a surgir e que estava até à data desconhecido. Apesar de os passageiros no interior do comboio não sentirem grande nível de vibrações, inspecções realizadas na linha em 1997 revelaram que no solo as vibrações ultrapassavam o admissível, sendo o movimento bem visível. A primeira medida de mitigação foi a redução da velocidade de circulação dos comboios de 200 para 140 km/h como medida temporária. Com esta situação verificaram que a velocidade era o ponto fulcral. Esta situação está relacionada com a velocidade crítica de propagação das ondas no solo, que era superada pela velocidade da acção provocada pela circulação de comboio. Como já abordado o fenómeno ocorre em solos moles, como é o caso na Suécia. Duas medidas de mitigação efectivas foram aplicadas e avaliadas: colocação de estacas e alteração da grelha de via.

Um dos objectivos da campanha de medição foi verificar a eficácia das medidas de mitigação aplicadas na zona, através da estabilização do solo com estacas (0,60m de diâmetro variando entre 5 a 12 metros de comprimento) de cal e cimento injectadas no terreno argiloso da zona. Desta maneira a consolidação é acelerada e o estado de equilíbrio atingido mais rapidamente. A introdução das estacas foi realizada em Julho.

As medições em campo foram divididas em três fases distintas o que levou a resultados, também por isso, diferentes e evolutivos. Primeiro antes da aplicação da medida de estabilização do solo (em Maio) e duas seguintes para avaliar os resultados, em Outubro e Dezembro. Os dois meses de diferença nas campanhas de avaliação foram idealizados para avaliar o estado de maturação das colunas.

Na primeira campanha foram utilizados mais de 30 receptores, depois dessa experiência e em resultado das dificuldades encontradas com alguns deles, as campanhas seguintes foram realizados com menos pontos de medição.

As condições de tempo locais interferiram com a escolha dos transdutores a utilizar, sendo que foram testados vários tipos.

Tabela 16 - Transdutores utilizados em Ledsgard

Geofone	SM 1A-4.5-280-26
Sismógrafo	MARK L-4 ^a
500g Acelerómetro	B&K 8318
11g Acelerómetro	B&K 4371V (charge type)
12g Acelerómetro	B&K 8318 (current type)

Acelerómetro	MWL C13V1G
Piezóresistivo	
Medidores de extensão	Tipo eléctrico

O plano de instrumentação de Maio de 2000 encontra-se representado na figura 17. Destaca-se que foram realizados 3 alinhamentos de aquisição, com transdutores diferentes. Desta forma é possível verificar a fiabilidade dos mesmos. A instrumentação abrangeu a grelha de via e o campo livre até 30 metros.

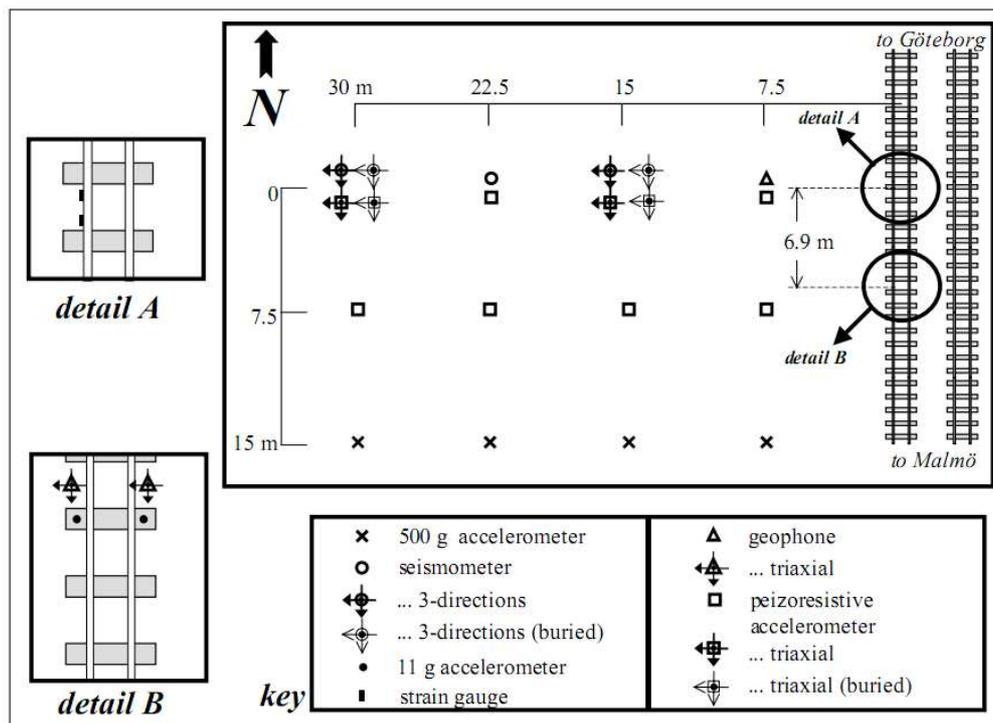


Figura 17 – Modelo de campanha de medição aplicado em Ledsgard em Maio. Hildebrand (2001).

Nas campanhas seguintes o modelo de medição teve a mesma base, mas já só foi realizado um alinhamento de medição.

A colocação de medidores de extensão para obtenção dos carregamentos dos eixos foi realizada aos pares. O objectivo é a obtenção da velocidade do veículo, conhecida a distância entre ambos, o tempo de atraso entre os dois sinais é utilizado para essa estimativa.

Para além de registar a passagem do comboio X2000, as campanhas foram realizadas com a linha em operação normal, portanto outros comboios mais lentos e de mercadorias foram alvo de registo. Como teste foi utilizado também o método de queda de um peso no solo em Maio de 2000.

Um exemplo dos resultados é descrito na imagem 18, onde está exposto a dependência da velocidade e tipo de comboio no nível de vibrações.

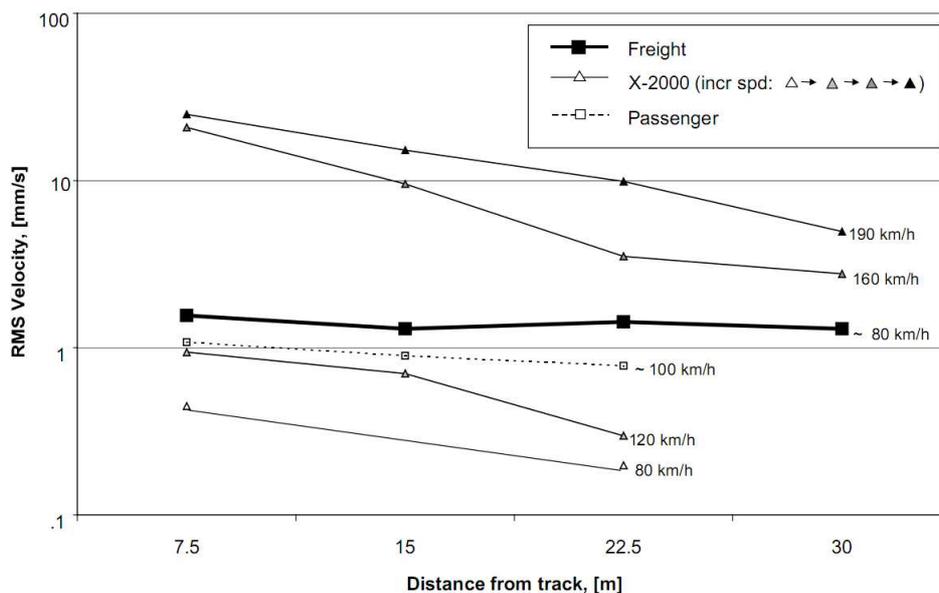


Figura 18 - Ledsgard, Maio de 2000. Velocidade RMS dependente da distância ao centro da linha. Para várias velocidades. Hildebrand (2001).

A explicação sugerida para o aumento substancial das vibrações com a velocidade (comparando veículos X2000) tem a ver com o conceito de velocidade crítica do solo já abordada. Uma das camadas do solo apresenta características lodosas com velocidade de propagação de ondas estimadas de 160 km/h. Desta forma, quando o comboio se aproxima desta velocidade há uma amplificação dos efeitos.

Outra observação que pode ser retirada do gráfico resulta do facto de os veículos modernos de alta velocidade terem menor impacto vibratório que os comboios de passageiros convencionais e de mercadoria, apesar de circularem com velocidades idênticas ou ligeiramente superiores. Esta situação vem fundamentar o facto que a carga por eixo influencia em muito o nível de vibrações e que são os comboios de mercadorias que provocam os maiores níveis de vibração no solo.

Neste estudo é também verificado que é na direcção vertical que são registadas as vibrações superiores. As componentes transversais e longitudinais são menos ricas em energia.

Um outro estudo já tinha sido desenvolvido na Suécia em 1999, em Norrala. Este estava dividido em duas fases e tal como o estudo anteriormente descrito pretendia avaliar uma mudança de condições na via. O primeiro registo foi efectuado em Junho nas condições normais da linha e para o segundo foram alterados 55 metros da via. As alterações foram as seguintes:

- A massa da travessa foi redistribuída, ficando uma porção maior sobre o carril;
- O espaçamento entre as travessas passou a ser de 50 cm, contra os usuais 65-70cm;
- Introdução de palmilhas sobre o carril;
- Sistema de aperto dos carris.

Para este ensaio foi utilizado um alinhamento de medição, descrito no esquema seguinte:

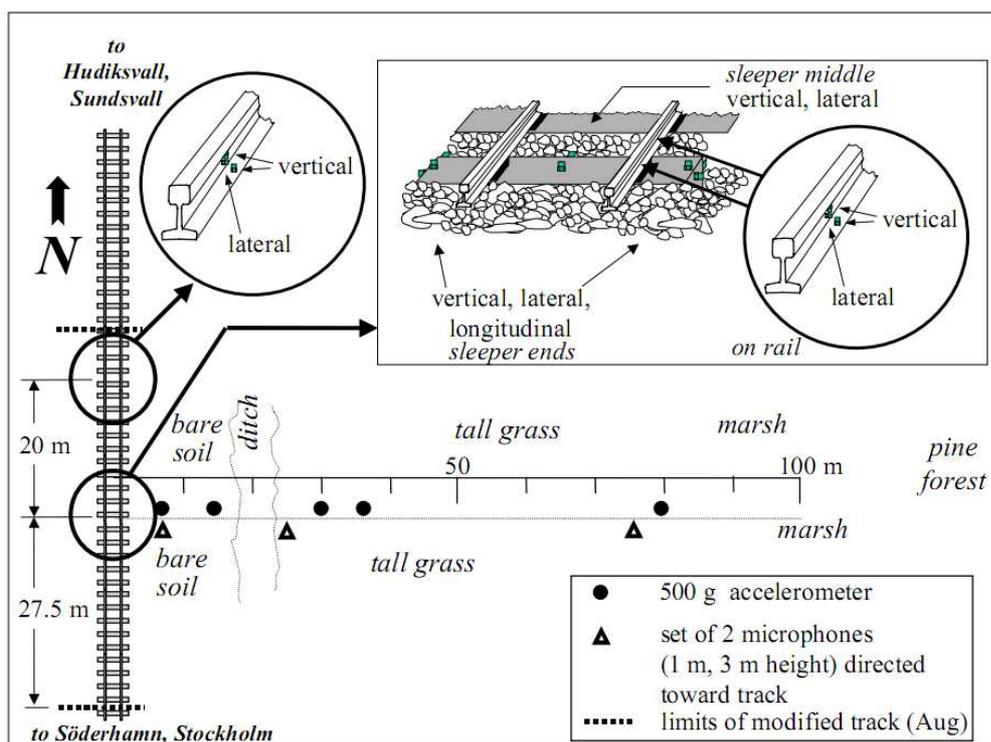


Figura 19 - Setup de medição aplicado em Norrala. Hildebrand (2001).

Os resultados das medições concluíram que as vibrações nos carris aumentaram, mas diminuíram as vibrações registadas nas travessas e no solo.

Neste documento é ainda feito um apontamento interessante. O nível de vibrações tem sido um dos obstáculos à construção de uma nova linha na zona medieval de Estocolmo, *Gamla Stan*. Isto porque com velocidades de pico expectáveis de 2 mm/s, ocorreria acção suficiente para provocar danos nas estruturas históricas.

4.6 Metro de Pequim

A construção da linha 4 do metro de Pequim foi alvo de uma campanha de medição de vibrações provocadas pela passagem das composições, sendo feita uma avaliação dos efeitos da circulação no túnel a norte da estação de Chengfulu. As vibrações a registar tinham como fonte a circulação na linha 1 já existente, sendo o estudo apresentado por Gupta et al. (2007). O objectivo passou por verificar os níveis existentes de vibração, devido à presença próxima do laboratório de física da Universidade de Pequim.

A campanha de medição foi desenvolvida em Dezembro de 2005 no local onde existe a Universidade, sendo colocados sensores à superfície e no interior dos Laboratórios. Dado que a linha do metro se encontra inferiormente a uma estrada, os ensaios foram realizados sem trânsito. O esquema de medição encontra-se descrito na figura 20:

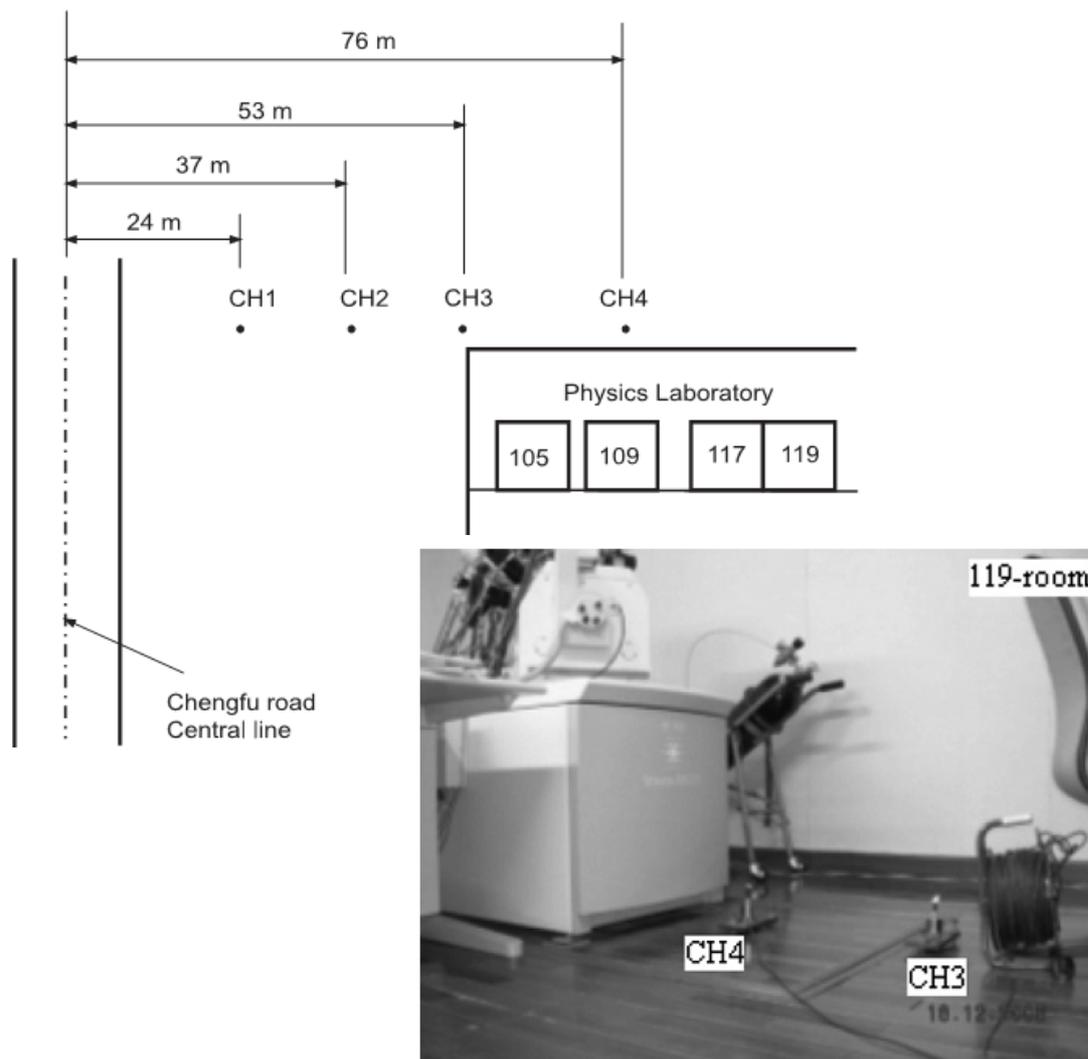


Figura 20 - Locais de medição localizados ao longo da parede do edifício do Laboratório e modelo instalado no interior do edifício. Gupta et al. (2007).

O gabinete 119 teve especial monitorização com acelerómetros colocados no corredor, na zona da porta, no chão e na base do microscópio existente no local.

Para este estudo não são fornecidos resultados da campanha de medição.

4.7 Testes de homologação da linha de Alta Velocidade entre Bruxelas e Colónia

Os testes de homologação da linha de alta velocidade entre Bruxelas e Colónia, por parte da companhia nacional Belga do caminho-de-ferro (NMBS), foram utilizados para realizar campanha de monitorização das vibrações, sendo o relatório dessa experiência disponibilizado por Kogut et al. (2003). Os testes foram realizados com a circulação de comboio de alta velocidade Thallys e comboio IC a velocidade variável. O objectivo final dos resultados visa obter valores para serem utilizados para validar os modelos de previsão até aí desenvolvidos por diversos autores.

As campanhas de medição foram realizadas em dois locais, em Waremme e Lincet. Dois tipos de infra-estrutura foram monitorizadas, em Lincet a típica via balastrada sobre o terreno e em Waremme via balastrada sobre estrutura de betão fundada em pilares de 12 metros. Este segundo caso vai mais de encontro ao local de instrumentação do trabalho de campo do presente documento. A aquisição nas campanhas foi realizada em duas vias, sendo instalados acelerómetros no campo livre e numa habitação localizada a 50 metros da via.

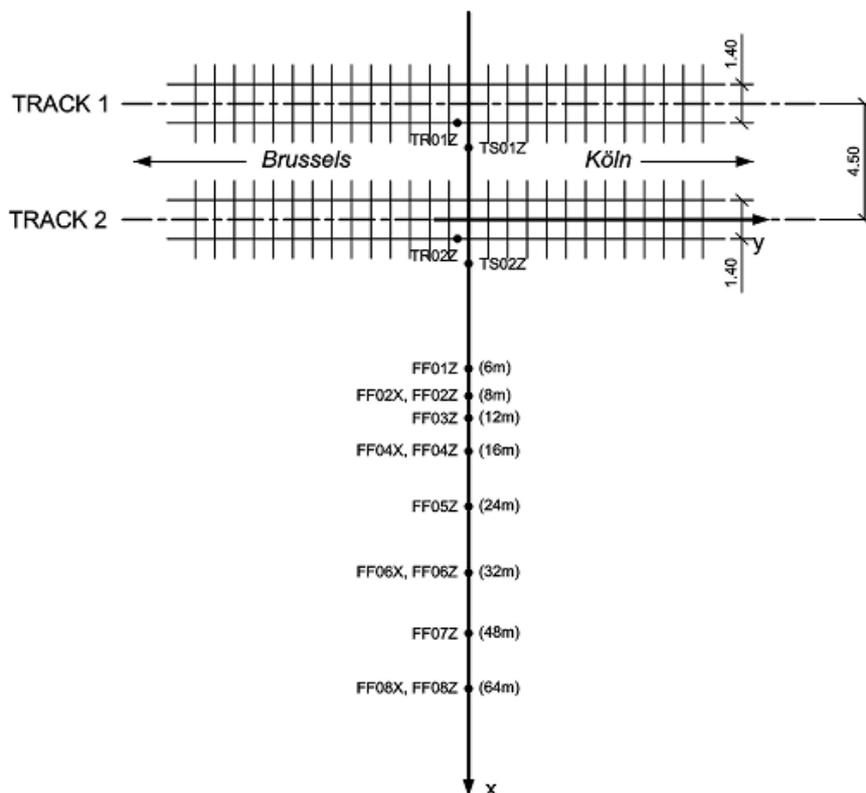


Figura 21- *Setup* de medição, onde TR corresponde ao carril, TS corresponde à travessa e FF ao campo livre segundo nomenclatura inglesa. A última letra corresponde à direcção de medição. Kogut et al. (2003).

Nas medições foram recolhidas as passagens de 11 comboios IC e 11 Thalys HST a velocidade variável entre 156 km/h e 225 km/h.

Quanto aos resultados, as medições realizadas no carril não são representativas pois segundo os autores do estudo os acelerogramas mostram que o sinal está altamente contaminado pelo ruído. Por essa razão não é apresentado os resultados dos acelerómetros TR.

A passagem dos eixos dos comboios é perfeitamente distinguida no ponto de medição na travessa, sendo que conclui-se que a magnitude de vibração é semelhante para os dois tipos de comboio (Thalys e InterCity), mas com diferente espectro de frequência.

Para o campo livre as vibrações registadas são ligeiramente superiores no comboio IC em relação ao Thalys, sendo que na zona de campo livre mais próximo da linha a frequência dominante se situa por volta de 85Hz. Para pontos de medição mais afastados, a frequência dominante passa a ser inferior a 30 Hz, devido à atenuação provocada pelo solo.

Os valores de velocidade de pico (PPV) registados estão sumarizados na tabela 17:

Tabela 17 – Valores tipo registados nos ensaios

Velocidade média na travessa (m/s)	0.045
Velocidade média a 6m (m/s)	0.0073
Velocidade média a 8m (m/s)	0.002
Velocidade média a 32m (m/s)	0.00015
Velocidade média a 64m (m/s)	0.000055

4.8 Shinkansen Alta Velocidade Japonesa

O Japão sempre foi um dos países que apostou forte na rede de alta velocidade ferroviária, nomeadamente com a introdução do Shinkansen (comboio bala). Este projecto implementa a ideia de alta velocidade, mas em meio urbano. Por essa razão o comboio atravessa, em boa parte do percurso, aglomerados populacionais e pólos indústrias sensíveis, ocorrendo interferências. Por essa razão foi efectuada uma campanha de medição de vibrações em dois locais distintos, onde a plataforma de via se encontra elevada em viaduto. As conclusões do estudo são apresentadas por Takemiya (2007).

O primeiro caso reporta a contexto urbano, onde as vibrações são dadas como pequenas, mas dada a proximidade dos habitantes na zona é necessário avaliar a magnitude das mesmas. Sobre o viaduto existe via dupla, sendo a fundação realizada com três estacas por pilar e a via apresenta curvatura de 4000m de raio no local.

As propriedades do solo no local foram estimadas através de teste *borehole*. A importância da execução deste tipo de teste vai além do conhecimento da estratificação do solo no local. No estudo é dada especial importância à estimação da velocidade de propagação das ondas S em cada substrato. A velocidade crítica de propagação das ondas é um dos factores que intervém na magnitude das vibrações.

O comboio Shinkansen tem 400 metros de comprimento, com carruagens de 25 metros e o registo da velocidade estimada no local foi de 83,3 m/s, de acordo com a velocidade comercial prevista de 300 km/h no local.

O procedimento experimental consistiu em realizar o alinhamento transversal à via patente na imagem 22.

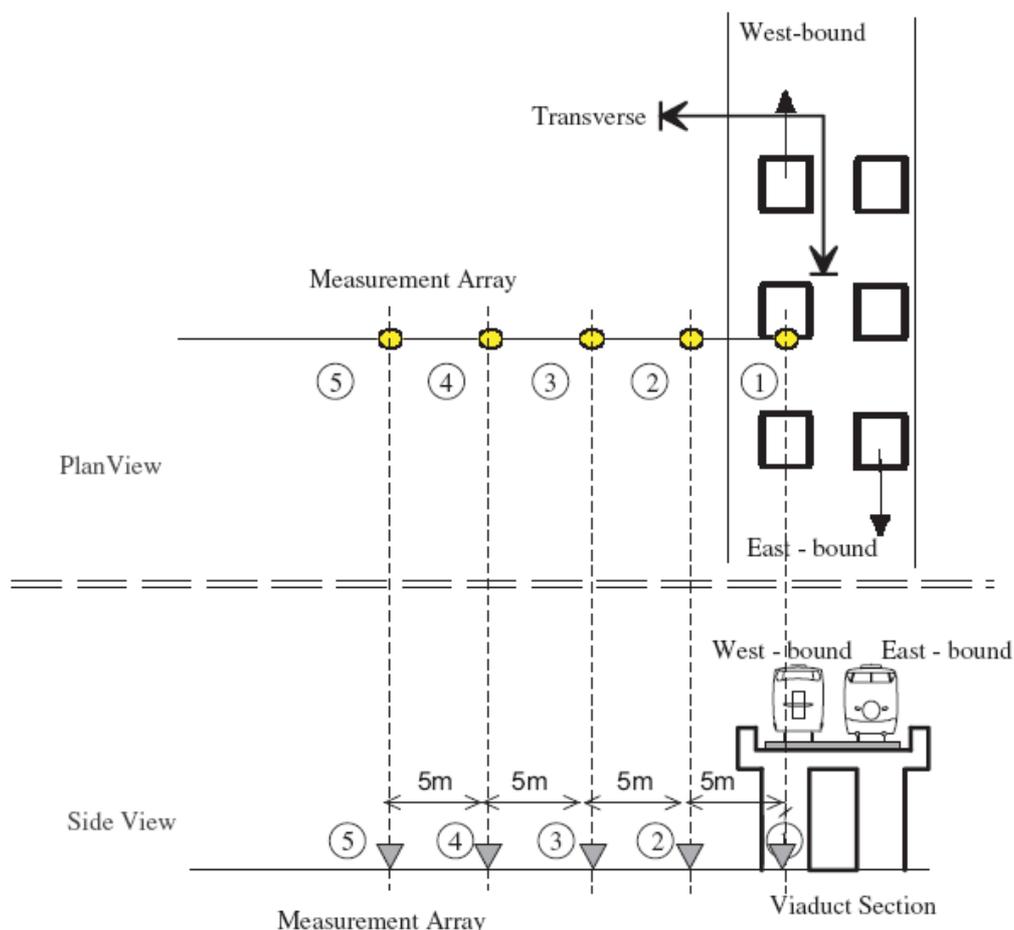


Figura 22 – Modelo experimental do caso 1. Takemiya (2007).

A aquisição foi realizada com incremento de tempo de 0.005s para 4096 pontos.

Os resultados mostram que a resposta no tempo da aceleração tem um intervalo de tempo afectado pela passagem do comboio de curta duração, sendo inferior a 5s. Mas se a comparação for feita entre a componente horizontal e vertical no eixo do viaduto, a primeira componente apresenta duração superior.

Os resultados indicam os seguintes níveis de aceleração registados no tempo:

Tabela 18 – Valores tipo registados na primeira campanha de medição

Valores de pico (PPA)	Vertical	Transversal	Longitudinal
Aceleração a 0m (m/s^2)	0.5	0.5	0.5
Aceleração a 5m (m/s^2)	0.15	0.12	0.12
Aceleração a 10m (m/s^2)	0.15	0.09	0.09
Aceleração a 15m (m/s^2)	0.08	0.04	0.05
Aceleração a 20m (m/s^2)	0.10	0.04	0.05

A conclusão a que o estudo chegou indica que os valores estão abaixo do nível que é tido como máximo, contudo os moradores queixam-se da interferência das vibrações, possivelmente em resultado das baixas frequências. Mesmo com a distância ao centro da via, a vibração emitida

propaga-se pelo solo atingindo os edifícios, onde o efeito de ressonância está relacionado com a amplificação da magnitude e poderá ser esta uma explicação do incómodo sentido.

Abordando agora o segundo caso, em que a magnitude de vibração é à partida assumida como superior em relação ao caso anterior, não ocorrem relatos de problemas relacionados com vibrações. Esta situação deve-se sobretudo ao tipo de solo onde a via se encontra fundada.

As camadas superiores são constituídas por aterros, sendo que Takemiya (2007) sustenta a tese que as vibrações com frequência baixas são amortecidas por esta camada, existindo um fenómeno de corte. Por essa razão a população desta zona não sente incómodo, apesar de a acção ser superior.

A campanha de medição apenas diferenciou da anterior pela instrumentação no tabuleiro do viaduto, constituindo o modelo presente na imagem 23:

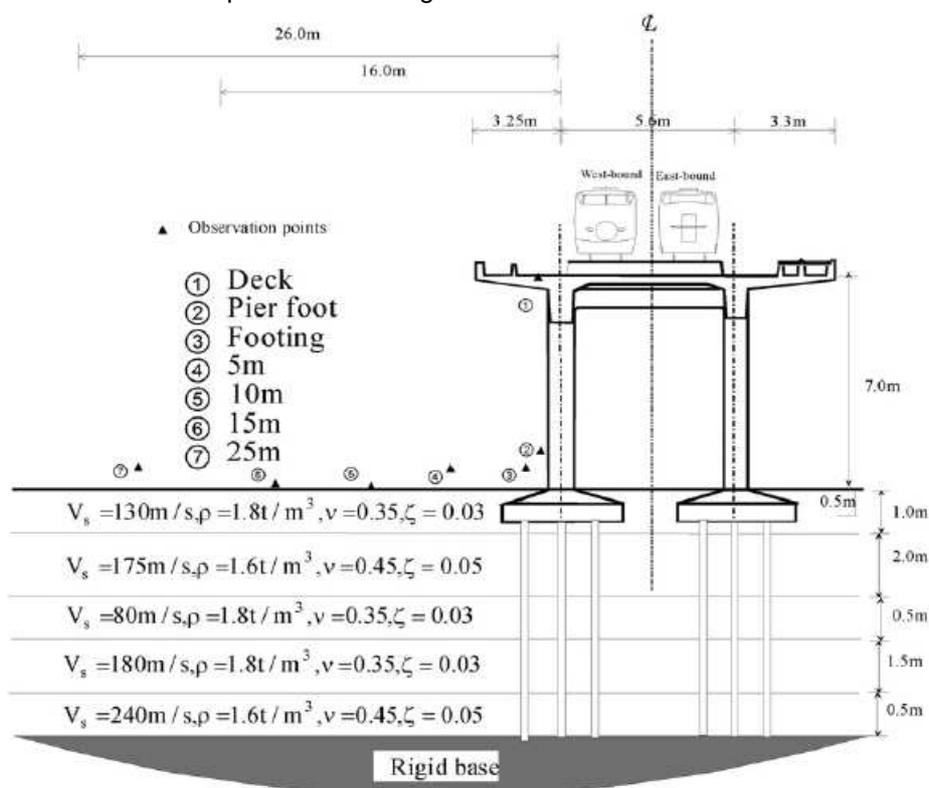


Figura 23 – Modelo experimental do caso 2. Takemiya (2007).

Os valores obtidos da aceleração no tempo são os seguintes:

Tabela 19 – Valores tipo registados na segunda campanha de medição

Valores de pico (PPA)	Vertical	Transversal	Longitudinal
Aceleração na plataforma (m/s^2)	1	0.75	0.6
Aceleração no pé do pilar (m/s^2)	1.2	0.75	0.8
Aceleração a 0m (m/s^2)	1.2	0.6	1.2
Aceleração a 5m (m/s^2)	0.15	0.1	0.6
Aceleração a 10m (m/s^2)	0.5	0.2	0.25
Aceleração a 15m (m/s^2)	0.4	0.3	0.2
Aceleração a 20m (m/s^2)	0.2	0.15	0.1

5. Trabalho de campo

5.1 Metodologia de aplicação teórica do trabalho de campo

O objectivo da aplicação de um trabalho de campo visa obter um inventário da situação actual ou verificar se existe uma situação anómala num determinado local. Com a análise dos resultados define-se possíveis actuações se existir situações anómalas ou apenas se arquiva os dados para futuras comparações.

O processo de instrumentação da linha ferroviária pode ser dividido em várias fases:

1. Definição das condições ao longo da via ferroviária

A linha do comboio deve ser percorrida de maneira a identificar as áreas onde existe potencial para ocorrer impacte com o ambiente circundante. Caso não exista uma situação de impacte directo, como acontece em campo livre, esse local será apenas estudado se for necessária uma análise de propagação das vibrações em campo livre.

2. Fonte de vibração

No caso do presente documento o estudo concentra-se em veículos ferroviários, mas poderia ser um veículo rodoviário, maquinaria ou avião por exemplo. Cada fonte tem uma acção que pode ser contínua ou intervalada, variar o número de eventos ou a magnitude. Alguns destes aspectos são importantes na altura da definição dos limites admissíveis.

3. Propagação da vibração

Na infra-estrutura ferroviária, no solo, nos edifícios, cada tipo de situação e meio tem rigidez e elasticidade específica, implicando por isso diferentes modos de vibração e eficiência de amortecimento das vibrações.

4. Estudo das características da área estudo

Neste ponto insere-se os factores do meio ambiente que podem ter influência no resultado. Como exemplo a existência de uma estrada ou linha do metro. Será importante pois verificar as vibrações já existentes e que não são devidas à circulação ferroviária.

A existência de estudo já realizados no local podem transmitir desde logo a forma como o fenómeno de vibração ocorre na zona em estudo.

Deve ser realizado o inventário dos aparelhos sensíveis na zona, sendo pedida informação quanto aos valores admissíveis para cada caso.

5. Estimação do impacte e inventário

No caso de edifícios próximos é importante verificar o estado de conservação em que se encontra um edifício. A conclusão a retirar pode ser que o nível de vibrações afecta as edificações e nesse caso é necessário efectuar mitigação da propagação da vibração.

O inventário pode ser realizado de maneira a atribuir um grau de impacte a uma zona. A alteração da situação deve ser feita a partir de um determinado grau.

6. Mitigação da vibração

O plano de mitigação será implementado em fase de projecto ou durante a exploração da infraestrutura, podendo seguir algumas das hipóteses abordadas em 3.6.

5.2 Montagem e localização

Um bom plano de medição deve ter em conta que o movimento criado deve ser transmitido da melhor maneira à instrumentação colocada no local. Por isso é bastante importante escolher o melhor método de montagem e qual o aparelho que melhor atinge o objectivo. Também é importante utilizar o mesmo método no campo e na calibração dos tradutores, caso seja feita. Esta consiste em medir o *output* gerado por um *input* conhecido. A calibração deve ser realizada tendo em conta as frequências e amplitudes esperadas no trabalho de campo.

A preparação da superfície onde se coloca os instrumentos deve visar obter uma superfície o mais lisa possível e limpa, para que seja obtida correcta fixação. Uma opção é limpar a superfície com um líquido volátil, já que com água teria que se esperar que a superfície secasse. Esta situação será aplicada nos casos em que o local de medição seja sobre betão ou metal.

O transdutor mais utilizado na captação da vibração é do tipo piezoeléctrico. Os acelerómetros piezoeléctricos não possuem partes móveis e geram um sinal proporcional à aceleração, que pode ser integrado, obtendo-se a velocidade e o deslocamento do sinal. A essência de um acelerómetro piezoeléctrico é o material piezoeléctrico, usualmente uma cerâmica ferro-eléctrica artificialmente polarizada. Quando ela é mecanicamente tensionada, proporcionalmente à força aplicada, gera uma carga eléctrica que polariza as suas faces (Carvalho et al, 2005).

Os transdutores podem ser montados sobre pequenos blocos auxiliares que podem ser fixados através de uma resina epóxi ou outro material fixador. Para o caso de o ponto de medição se encontrar sobre o terreno recorre-se a estacas de madeira ou metálicas onde podem ser acopladas também os pequenos blocos já referidos.

O berílio é tido como o material ideal para os pequenos blocos auxiliares, mas dado que é caro e liberta pó tóxico quando manipulado não é muito utilizado. Também é utilizada uma liga de magnésio,

mas na generalidade dos casos opta-se por alumínio por razões económicas (Harris Miller Miller & Hanson Inc, 1996).

A escolha do transdutor deve ser feita de acordo com o local da colocação, sendo que a escolha de transdutores com diferentes sensibilidades ajuda a obter melhores resultados. Para além desta situação nem sempre os pequenos blocos auxiliares já descritos devem ser utilizados. Na instrumentação do carril pode ser utilizado um dispositivo semelhante àquele demonstrado na figura 24:



Figura 24 - Fixação para a colocação do acelerómetro no carril. Thrane (2000).

Apesar de esta ser a forma usual de actuar é necessário ter em conta que o objecto extra representa uma nova estrutura dinâmica entre a superfície em vibração e o acelerómetro. No fundo pode-se pensar nos pequenos blocos como uma mola que tem a sua função de transferência e portanto afecta os resultados. Ou seja, na realidade é o movimento do suporte auxiliar que se mede e não o da estrutura ou solo.

Adaptadores magnéticos também têm vindo a ser desenvolvidos, contudo a força magnética afecta os sensores condicionando os resultados e por isso não é tão fiável (Harris Miller Miller & Hanson Inc, 1996).

O objectivo desta fase é maximizar a transmissão da vibração entre a estrutura/solo e a instrumentação. O material utilizado para a fixação pode ter influência no resultando, pois uma degradação da transmissão pode-se verificar se a espessura não for a correcta. Por essa razão é aconselhável também utilizar diferentes tipos de materiais fixadores com vista a comparação. Obviamente que esta situação entra num capítulo mais avançado de investigação e nem sempre é possível colocar em prática estas opções.

Em trabalho de campo, no caso medição das vibrações em linha ferroviária, é necessário realizar uma campanha que monitorize as várias possíveis decisões. Obviamente que não é possível monitorizar a linha toda, por essa razão deve-se tentar incluir sempre uma representação dos seguintes tipo de situações (adaptado de Hildebrand, 2001):

- Locais residenciais, longe de vias com trânsito elevado, com o objectivo de caracterizar ambientes com reduzidas vibrações;

- Locais com estradas movimentadas adjacentes ou auto-estradas para caracterizar locais com elevadas vibrações;
- Locais com actividades sensíveis a vibrações;
- Locais perto de fontes de vibração.

Em cada local escolhido deve ser idealizado um alinhamento que contempla a própria infraestrutura ferroviária, edifícios adjacentes e pontos em campo livre a várias distâncias do centro da linha ferroviária.

5.3 Aplicação prática

5.3.1 Objecto de estudo

O caso estudo do presente trabalho inclui uma aplicação prática do tema. O LNEC colabora com a RAVE no âmbito da implementação das directivas da Declaração de Impacte Ambiental (DIA). A colaboração prestada refere-se ao descritor “Vibrações” e consiste em dar apoio à execução dos elementos a entregar na fase de Relatório de Conformidade Ambiental do Projecto de Execução (RECAPE), solicitados pela DIA.

A inclusão da Alta Velocidade em Lisboa implica diversos tipos de obras de remodelação, ampliação do canal existente e novas infra-estruturas, sendo, por essa razão importante realizar uma campanha de caracterização da situação actual.

A primeira campanha de medição centrou-se na Estação Oriente, estando previsto em projecto o alargamento da estação no sentido transversal (para poente) para a criação de mais 3 linhas. Na figura 25 encontra-se a base do projecto de ampliação da estação:



Figura 25 – Projecto de ampliação da estação Oriente. Laranjo (2008).

5.3.2 Material circulante

As linhas ferroviárias Portuguesas oferecem vários tipos de serviços, que vão desde os suburbanos, regionais e entre cidades. Por essa razão existem diferentes comboios a circular, sendo que na estação em questão e dada a sua localização central circulam todos os tipos de comboios.

A aquisição de dados foi realizada com a passagem de comboios na linha 1, sendo apenas monitorizada uma passagem na linha 2. De referir que na zona de aquisição os comboios encontram-se em desaceleração para paragem na estação Oriente e que na linha 1 apenas circulam comboios com sentido Lisboa-Norte.

O trabalho de campo foi desenvolvido no dia 8 de Junho de 2009 tendo consistido na realização de medições de vibração, quer de ruído de fundo, quer das vibrações resultantes da passagem de diversos tipos de comboios.

Tabela 20 - Aquisições realizadas

Registos	Descrição	Legenda	
2009-06-08-14h21m-Ambiente1	Ambiente	UTE	Unidade Tripla Eléctrica (Regional) 
2009-06-08-14h23m-Ambiente2	Ambiente		
2009-06-08-14h50m-Ambiente3	Ambiente		
2009-06-08-14h58m-UTE240	UTE2240		
2009-06-08-15h35m-CB-Linha2	Comboio na Linha 2		
2009-06-08-15h38m-LOC5600	LOC5600		
2009-06-08-15h50m-Ambiente4	Ambiente	CPA	Comboio Alfa Pendular 
2009-06-08-15h57m-UTE2240	UTE2240		
2009-06-08-16h08m-CPA1	CPA		
2009-06-08-16h14m-LOC5600	LOC5600		
2009-06-08-16h27m-UTE2400	UTE2240		
2009-06-08-16h47m-Ambiente5	Ambiente		
2009-06-08-16h56m-UTE2240	UTE2240	LOC5600	Comboio com locomotivas e carruagens (Intercidades) 
2009-06-08-17h02m-Ambiente6	Ambiente		
2009-06-08-17h08m-CPA2	CPA		
2009-06-08-17h26m-UTE2240	UTE2240		
2009-06-08-17h57m-UTE2240	UTE2240		
2009-06-08-18h08m-CPA3	CPA		
2009-06-08-18h10m-Ambiente7	Ambiente	Ambiente	Ruído Ambiente
2009-06-08-18h13m-Ambiente8	Ambiente		
2009-06-08-18h15m-Ambiente9	Ambiente		
2009-06-08-18h16m-Ambiente10	Ambiente		

Como já discutido em capítulos anteriores, a questão das cargas por eixo dos comboios influencia o nível de vibrações. O conhecimento da carga imposta à via por cada veículo é fundamental para realizar comparações entre estes.

Os dados fornecidos pela REFER são os seguintes:

- Massa total dos diversos veículos:
 - UTE 2240 - 165,6 t em carga normal;
 - CPA 4000 - 323,3 t em carga normal;
 - Locomotiva 5600 - 87,3 t.

- Composição dos comboios de locomotiva mais carruagens (período das 14:00 às 19:00):
 - Carruagens tipo 621 – 350 t + locomotiva 5600.

5.3.3 Caracterização do tipo de fundação

A campanha de instrumentação realizou-se em dois tipos de meios diferentes. Por um lado foi realizada a monitorização da estrutura da Estação Oriente e por outro monitorizado o campo livre directamente no solo.

Na zona de medição a estrutura actual da Estação Oriente apresenta-se da seguinte forma:



Figura 26 – Alinhamento de instrumentação na estrutura da Gare do Oriente. Geocontrolo (2009).

O corte longitudinal da Gare Oriente indica a existência de um parque subterrâneo nos dois pisos inferiores à plataforma de via e um terceiro onde funcionam escritórios da REFER (ao nível da cota da rua). A fundação da zona do parque foi realizada recorrendo a estacas. O alinhamento definido situa-se precisamente no alinhamento da fundação e também dos pilares.

A sondagem realizada pela empresa Geocontrolo (2009) na zona em estudo, permite perceber qual a estratigrafia e o tipo de solos existentes na zona da Gare do Oriente.

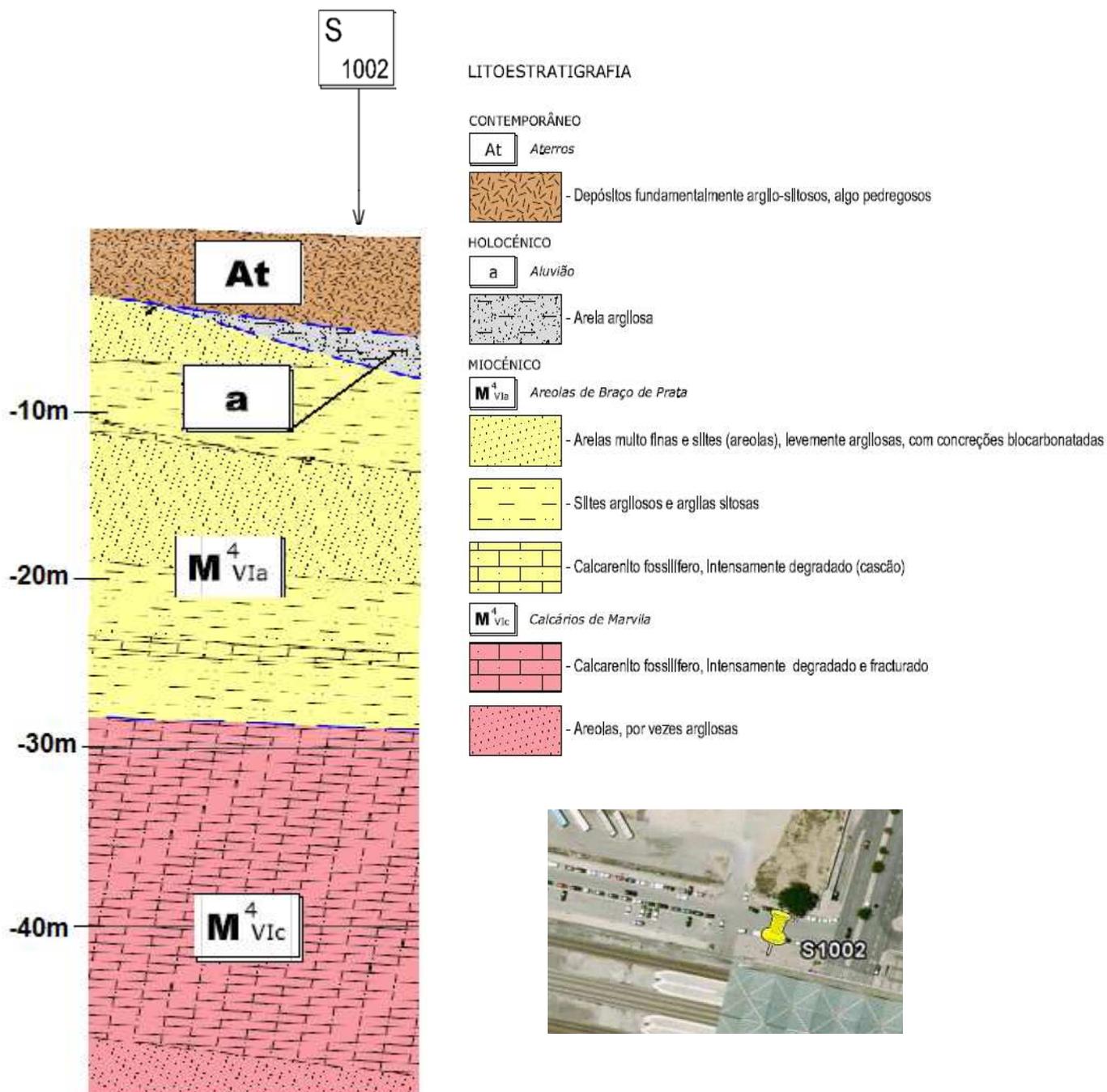


Figura 27 - Estratigrafia no local de campanha. Geocontrole (2009).

Os resultados indicam a existência de depósitos com características argilo-siltosos, com espessura entre 3 a 4 metros. Estes aterros apresentam valores SPT (Standard Penetration Test) inferiores a 5.

Encontra-se no local da campanha de medição aluvião de areia argilosa, situado no local onde se encontra actualmente a Avenida de Berlim. O local do alinhamento de instrumentação escolhido encontra-se sobre este tipo de solo, não estando bem definido qual a espessura do estrato mas será inferior a 2 metros. Os ensaios SPT indicam valores inferiores a 15 pancadas.

Sobre estes substratos mais recentes, o miocénico é constituído pelas Areolas de Braço de Prata e calcários de Marvila comuns na zona em questão. Os substratos referidos apresentam resistência, sendo obtidos em ensaio valores próximos ou iguais a 60 pancadas SPT.

5.3.4 Modelo experimental

O plano de instrumentação consistiu na idealização de um alinhamento aproximadamente recto, perpendicular às linhas existentes (no sentido poente) e a sul da estação.

Foram definidos 11 locais de instrumentação distribuídos pelo alinhamento nos seguintes locais:

- Carril
- Travessa
- Plataforma da Estação Oriente
- Base do edifício da Estação
- Rua da Centieira
- Campo livre (descampado)

A escolha da localização dos instrumentos obedeceu ao seguinte critério: colocação em locais específicos e espaçamento de 20 metros. Em casos condicionados (como a Rua da Centieira), os instrumentos foram colocados onde não interferissem com o meio.

Para a realização do ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais:

- 20 Acelerómetros piezoeléctricos
- Módulo de condicionamento de acelerómetros
- Chassis Modular
- Placa de aquisição de dados
- 3 Sismógrafos
- 20 Cabos
- Tela betuminosa de protecção
- Suporte cúbico de madeira
- Suporte cúbico metálico
- Estaca metálica
- Estaca de madeira
- Cones de sinalização
- Computador
- Acetona pura
- Nível
- Mástique Tenax



Figura 28 - Unidade de aquisição no interior de carrinha.

As características técnicas dos quatro primeiros equipamentos podem ser encontradas no anexo 1.

Cada acelerómetro foi ligado por cabo à unidade de aquisição, já os sismógrafos são dotados de memória própria.

Optou-se também por realizar pontos de medição triaxial. Em todos os casos existe a medição da componente vertical, sendo que em três casos também é registada a aceleração transversal e longitudinal.

Dependendo do tipo de terreno, foi escolhido o melhor tipo de suporte. Na infra-estrutura optou-se por colar suportes cúbicos. No campo livre recorreu-se a estacas metálicas cravadas nos pontos 5 e 6 (sobre pavimento rodoviário betuminoso) com suporte cúbico no topo. Em zonas em que a instrumentação se situava sobre o solo recorreu-se à cravação de estacas de madeira e metálicas.

Nas figuras 29 e 30 encontram-se representadas uma visão em planta e outra em corte do alinhamento de monitorização colocado em prática:

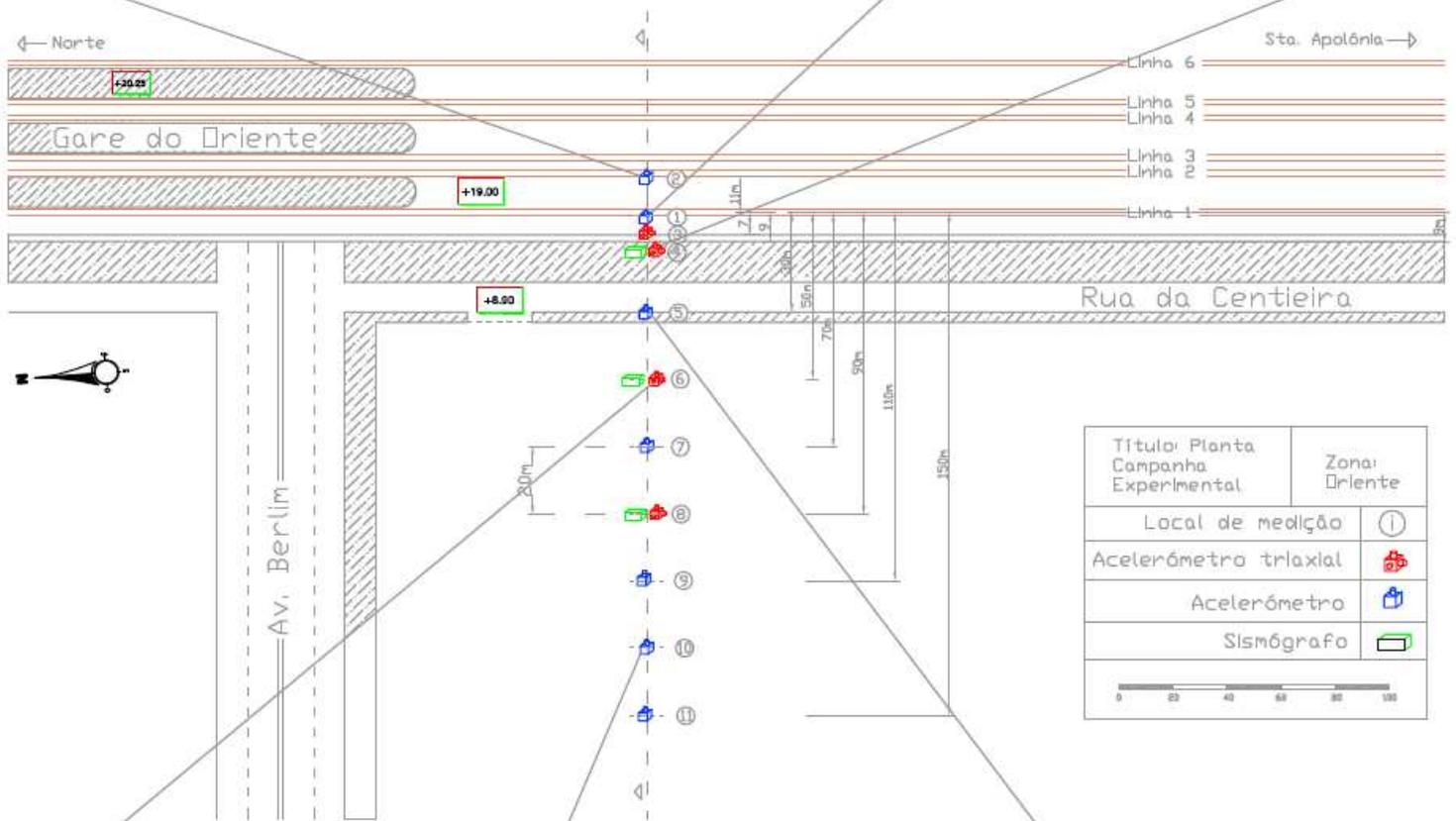


Figura 29 – Modelo de instrumentação realizado em planta

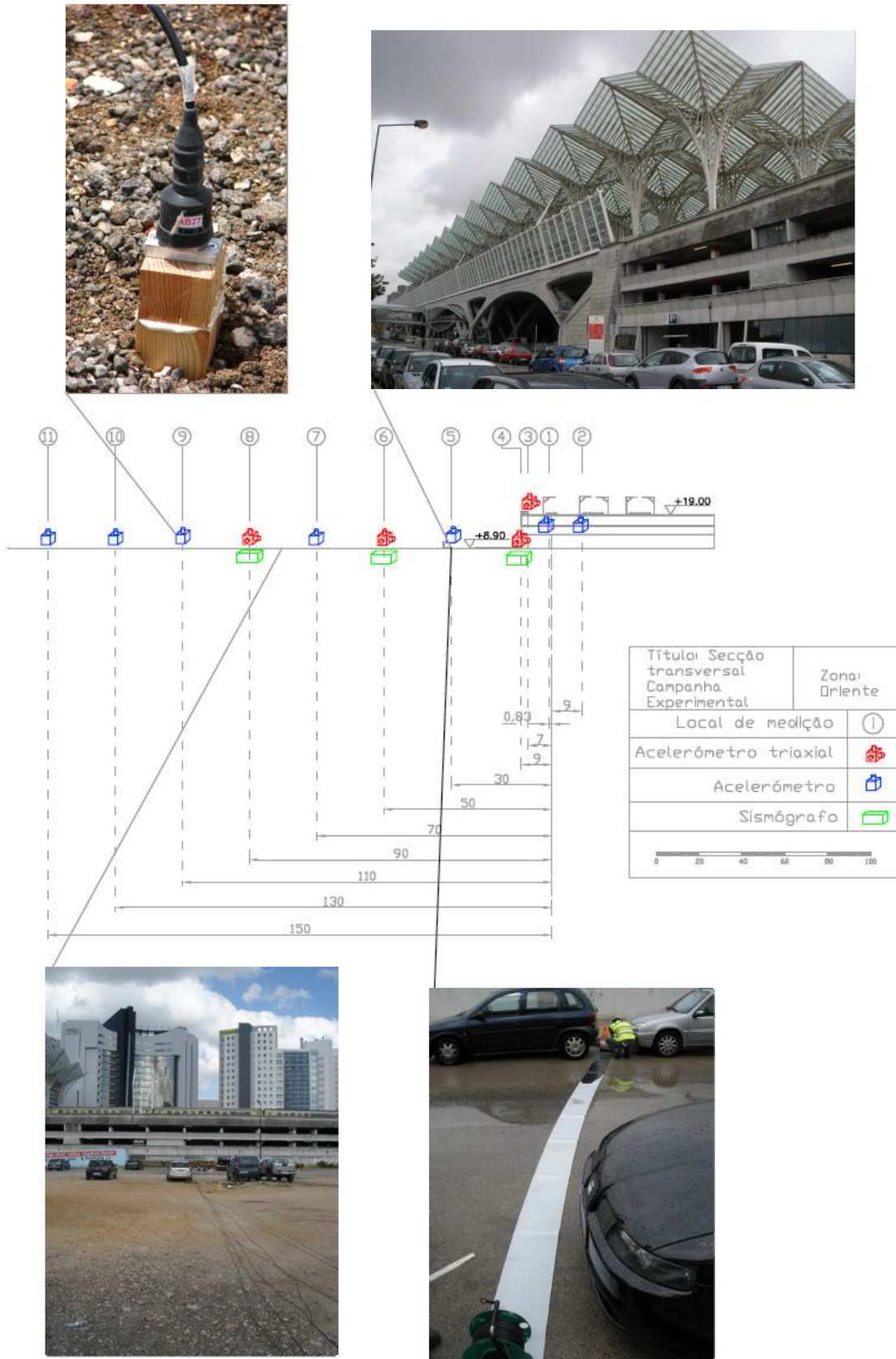


Figura 30 – Modelo de instrumentação realizado em corte

Para a realização do trabalho de campo existiram alguns condicionamentos a ter em conta. Os acessos à linha do comboio foram acompanhados por responsáveis da REFER, por razões de segurança. Foram para o efeito definidos intervalos de tempos em que era possível colocar a instrumentação.

A altura do suporte para o acelerómetro a colocar no carril da linha 1 teve que ser reduzida evitando que o cabo entrasse em contacto com o comboio.

A escolha dos locais de medição na rua da Centieira foram definidos de maneira a não perturbar a zona. Um junto ao edifício da estação Oriente e outro na transição entre o passeio e a estrada. Como os cabos atravessam a rua foi colocada uma tela de protecção.

Ao nível dos resultados, estes podem ser afectados pela circulação automóvel ou pela existência do Metro por baixo da Rua da Centieira.

Quanto à unidade de aquisição dispunha de 20 canais (todos utilizados) e ligado a um computador onde se utilizou o programa LNEC-SPA. A aquisição foi realizada com incrementos de tempo de 0,0005s, correspondendo a uma frequência de amostragem de 2000Hz.

O programa *LNEC-SPA - Signal Processing and Analysis* foi desenvolvido pelo departamento de engenharia sísmica e dinâmica estrutural do Laboratório Nacional de Engenharia Civil tendo por objectivo aumentar a eficiência e as capacidades de análise no estudo experimental (Mendes et al., 2007). Das várias capacidades do programa é de destacar a aquisição de dados e o seu output, o processamento do sinal, ferramentas aplicadas à engenharia e interfaces gráficas. Com este programa, neste caso específico, apenas foi feita a recolha de dados no campo.

O sinal gravado é o produto final fornecido da observação experimental, sendo o resultado de um sistema complexo de aquisição vários subsistemas. Em geral têm-se o sensor, condicionador que transforma as características do sinal para uma forma mais apropriada, o processador para filtragem e unidade de aquisição digital neste caso.

6. Análise computacional

Este capítulo pretende apresentar como foi realizado o tratamento do sinal, descrevendo as escolhas realizadas e as ferramentas do programa utilizado.

O cálculo de parâmetros é realizado em dois domínios: no tempo e na frequência. A análise do sinal teve por objectivo a determinação dos seguintes parâmetros:

- Duração do sinal no domínio do tempo;
- Aceleração de pico do domínio do tempo;
- O valor RMS da aceleração no domínio do tempo;
- Velocidade de pico no domínio do tempo;
- O valor RMS da velocidade no domínio do tempo;
- Deslocamento de pico no domínio do tempo;
- O valor RMS do deslocamento no domínio do tempo;
- Amplitudes de Fourier no domínio da frequência;
- Determinação da velocidade do comboio.

6.1 Princípios de análise

Todo o trabalho de tratamento foi desenvolvido em ambiente MATLAB, sendo utilizadas algumas funções fornecidas, outras já incluídas no programa e programadas novas.

Os dados recolhidos pela instrumentação (acelerómetros) são acelerações, expressas em mg. As unidades a utilizar na análise dos resultados foram as unidades do sistema internacional.

Tendo em consideração a quantidade de dados existente por cada registo (resultante de utilizar um passo de 0.0005 segundos) e em contraponto com a capacidade de cálculo computacional disponível para realizar as análises em tempo útil, foi necessário definir um valor de amostras que pudesse ser considerado representativo. A escolha do intervalo baseou-se na visualização do acelerograma e verificação do intervalo com maior conteúdo de energia. Em resultado, verificou-se que uma amostra com 65536 pontos (32,768 segundos) seria representativa para os diversos exemplos analisados. Recorde-se que a dimensão da amostra obtida deverá ser múltipla de 2, para facilitar a obtenção do espectro de Fourier. Caso não fosse tomada logo essa opção a solução seria preencher a amostra com zeros até obter uma potência inteira de 2, mas dada a quantidade de dados disponíveis tal não é necessário.

Para a escolha do intervalo de tempo a considerar (definido pelo tempo inicial, uma vez que a duração foi considerada fixa) foi desenvolvida uma função de corte do sinal original. Com uma primeira representação é possível verificar em que intervalo de tempo se situa o registo e então definir para cada caso o tempo inicial de corte.

6.2 Correção à linha base

A distorção do eixo base é uma das principais fontes de erro na análise de sinal, por essa razão é necessário realizar uma correção à base. Esta situação pode ocorrer devido a vários factores:

- Qualidade dos dados do sinal a serem recolhidos;
- Não linearidade da fase de resposta do filtro;
- Natureza discreta da transformada de Fourier;
- Instabilidade instrumental.

Alguns problemas de ajuste, podem ser evitados durante a aquisição, através do ajuste dos parâmetros do sinal ou utilizando filtros digitais. Porém, é no pós-processamento do sinal, que se consegue obter a melhor correção das distorções em relação ao eixo base.

Uma hipótese de correção é utilizar um espectro alisado para modelar a linha base, no intervalo onde não existe sinal. Deste modo a linha base final é construída por fragmentos de um espectro alisado em linhas rectas. A vantagem de utilizar um espectro alisado é que este não toma conclusões quanto à forma funcional das distorções na linha base (Fiderecato et al., 2006).

Na prática, foi utilizada uma correção à base, que consistiu na determinação da média móvel com 40 pontos da aceleração no tempo, tendo-se, posteriormente procedido à remoção dessa aceleração média do acelerograma original.

A média móvel é realizada da seguinte forma: para cada ponto é calculada a média de 20 pontos antes e 20 depois, sendo esse valor retirado ao registo inicial. Desta forma é calculada para cada ponto uma média diferente, permitindo um melhor ajustamento à base. No fundo este ajustamento funciona também como filtragem do sinal. Foi testada também a média comum para todos os pontos, mas a média móvel apresenta ajustamento à base melhor.

O efeito da correção à base será analisado, com maior detalhe, mais adiante.

6.3 Projecto de filtros

6.3.1 Conceitos base

O passo seguinte do processamento do sinal passa por realizar a filtragem do sinal para as frequências pretendidas. Os filtros fazem essencialmente uma selecção de frequências deixando passar frequências que estão dentro de uma determinada gama e rejeitando outras fora dessa gama. Do ponto de vista funcional e de acordo com o tipo de filtragem estes podem ser:

- Passa-baixo (atenua frequências acima de determinado limite);
- Passa-alto (atenua frequências abaixo de determinado limite);
- Passa-banda (atenua frequências abaixo e acima de determinados limites);
- Rejeita-banda (atenua frequências entre dois limites).

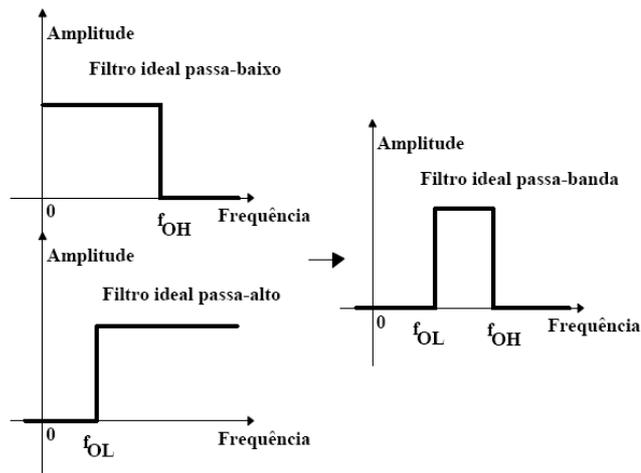


Figura 31 - Tipos de filtros ideais. Adaptado de Santos (2008).

Duas formas de filtragem são analisadas neste documento: aplicação de um filtro existente na base do programa MATLAB e em alternativa realizar truncagem da série de Fourier (filtro ideal passa-baixo).

6.3.2 Filtro Butterworth

As funções de filtros presentes no MATLAB assumem frequência normalizada, que por definição é a frequência em Hz dividida pela frequência de *Nyquist* (metade da frequência de amostragem). Por exemplo, para um sistema que apresente uma frequência de amostragem de 2000Hz (passo igual a 0,0005 segundos), a frequência de 250Hz corresponde à frequência normalizada $250/(2000/2)=0,25$. Estas funções permitem a concepção de filtros de ordem n , com uma frequência de corte normalizada ω_n entre $[0,1]$, sendo que o valor máximo de ω_n corresponde à frequência de Nyquist, ou seja metade da frequência de amostragem (Morais et al. 2006).

No *Signal Processing Toolbox* presente no MATLAB podem ser encontrados diversos filtros digitais como Butterworth, Chebychev I ou Chebychev II. No projecto de análise é utilizado o primeiro destes que se encontra concretizado na função *Butter*, dada por:

$$[b,a] = \text{butter}(n,\omega_n) \tag{9}$$

Onde:

ω_n - Frequência de corte normalizada

n – Ordem do filtro

Com a função principal BUTTER é possível projectar filtros passa baixo, passa alto ou passa banda, conforme as necessidades.

O retorno das funções de filtro é armazenado nos vectores a e b , de tamanho $n+1$, que correspondem aos coeficientes do filtro pretendido. O objectivo do projecto de filtros passa por obter

os coeficientes do numerador e denominador da função transferência, de acordo com o objetivo de corte. A função de transferência dos filtros projectados é definida na forma:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}}{a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}} \quad (10)$$

Veja-se agora como aplicar este filtro no caso em estudo.

A definição do filtro passou por uma análise de sensibilidade cuidada. Dado que alguns autores, como Auersch (2004) e Hildbrand (2001), fazem referência ao intervalo de 0Hz até 250Hz como aquele com importância no estudo das vibrações devidas à passagem de um comboio, foram realizados alguns testes de forma a verificar, para o presente caso, a validade desse intervalo.

Aplicando o filtro *Butterworth* passa baixo a 500 de ordem 2, obtêm-se a função de transferência representada na imagem 32:

Frequência de corte = 500Hz (frequência linear)

$$\omega_n = \frac{500}{2000/2} = 0.5$$

(11)



Figura 32 – Filtro passa-baixo de grau 2

Num processo de filtragem de sinais é sempre importante verificar como o filtro actua, confirmando se o resultado é o pretendido. Neste caso, pode-se concluir que para a frequência teste de corte escolhida (500Hz) ocorre uma redução de 30% da magnitude

Verifique-se agora a influência do grau do filtro utilizado, testando para grau 4. Nestas condições, obtêm-se a função de transferência presente na figura 33:

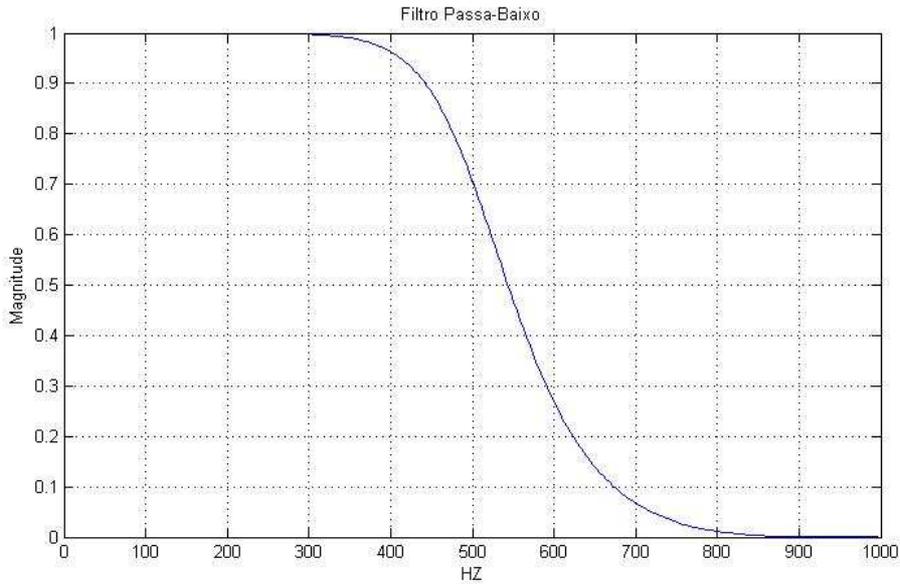


Figura 33 – Filtro passa-baixo de grau 4

Apesar de o valor na frequência de corte ter a mesma redução de magnitude em relação ao grau anterior, é notória a diferença para frequências como 400Hz. No primeiro caso ocorre uma redução superior a 10%, passando no segundo caso para uma redução menor que 5%. Portanto com o aumento do grau do filtro, mais este se aproxima de um filtro ideal, onde o corte deixa de seguir uma curva em “s”.

Analise-se agora o efeito do filtro no caso de ser passa-alto para um único sinal. Resultados preliminares indicaram a existência de algum ruído para muito baixas frequências, portanto é analisada filtragem com frequência de corte a 2Hz e ordem 2 e com a função de transferência na figura 34:

Frequência de corte = 2Hz (frequência linear)

$$\omega_n = \frac{2}{2000 / 2} = 0.002 \quad (12)$$

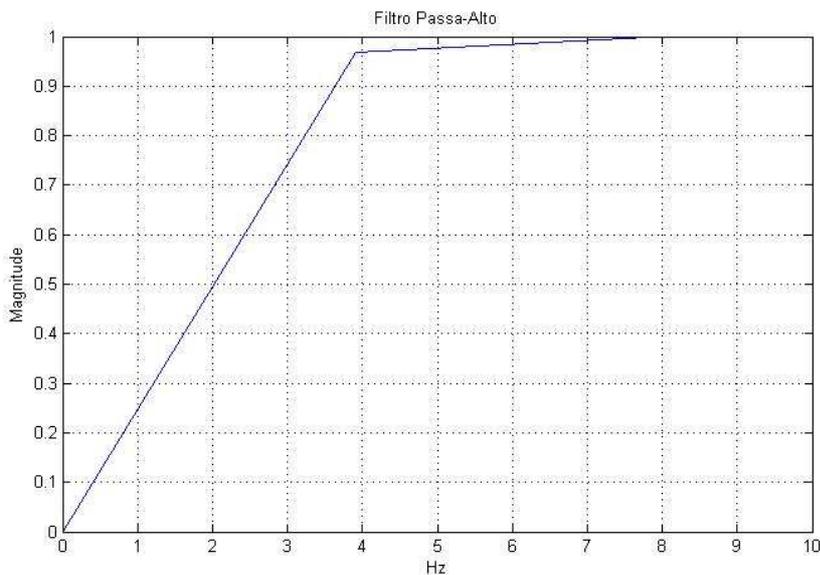


Figura 34 – Filtro passa-alto de grau 2

A conclusão a retirar desta análise, é que a largura de banda do filtro quando aplicado a muito pequenas frequências se reduz, não obtendo o mesmo efeito de filtro em “s”. Verifica-se também que a magnitude do valor da frequência de corte teste é reduzida para metade.

Para finalizar é necessário verificar que a instrução inserida no MATLAB executa o efeito teórico (pretendido) para o filtro. Para isso, a título de exemplo, foi testado para um registo de aceleração na travessa aplicando um filtro passa-baixo a 500Hz de grau 2. A representação do espectro de Fourier da aceleração original (azul) e aceleração filtrada (verde) resulta na figura 35:

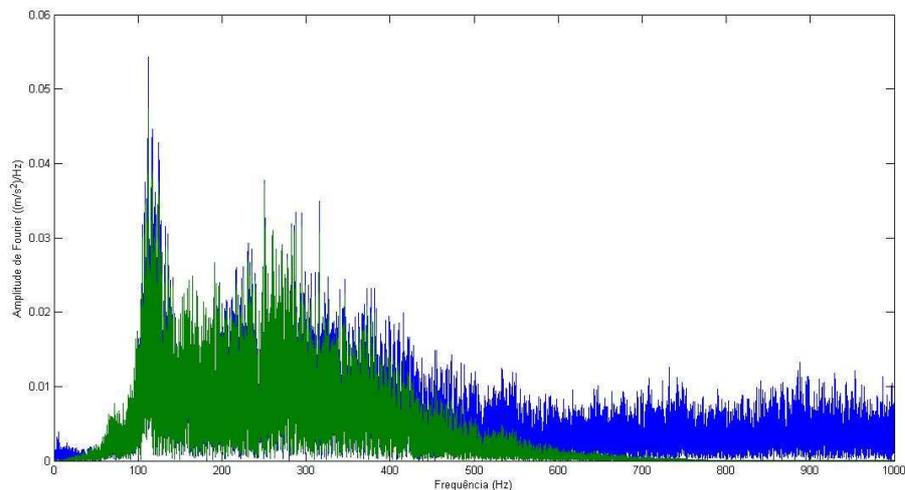


Figura 35 – Espectros de Fourier

Na figura 36 é possível verificar a diferença da magnitude dos valores nas duas situações, através da razão entre o caso filtrado e não filtrado,

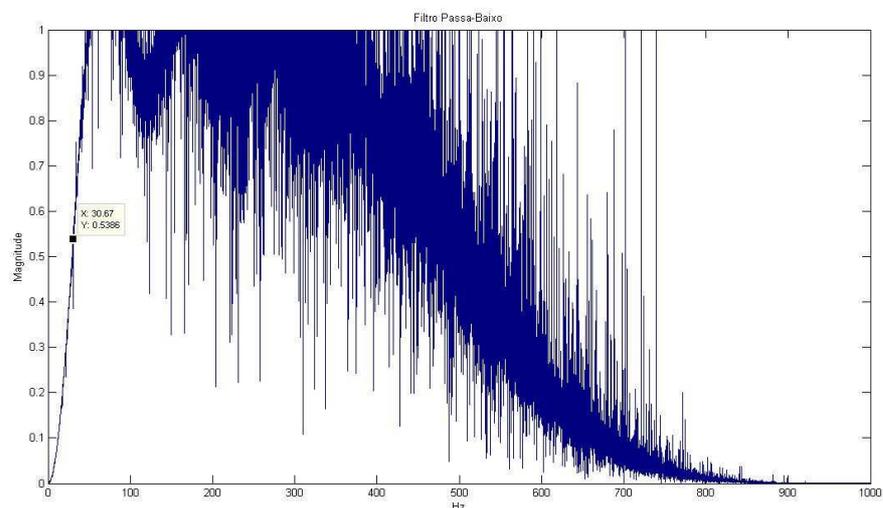


Figura 36 – Magnitude de atenuação do Filtro passa-baixo de 500Hz e grau 2.

Comparando a ilustração 31 e 35, verifica-se que a filtragem na frequência de corte de 500Hz se verifica, de acordo com o pretendido. A única diferença resulta para baixas frequências, onde ocorre também filtragem. Por exemplo para uma frequência de 30Hz verifica-se uma redução de 5% aproximadamente, o que não é esperado em teoria. Esta situação está relacionada com a correcção à base que foi aplicada, funcionando também como um filtro.

Verifique-se agora para o mesmo caso, mas para grau 4 na figura 37:

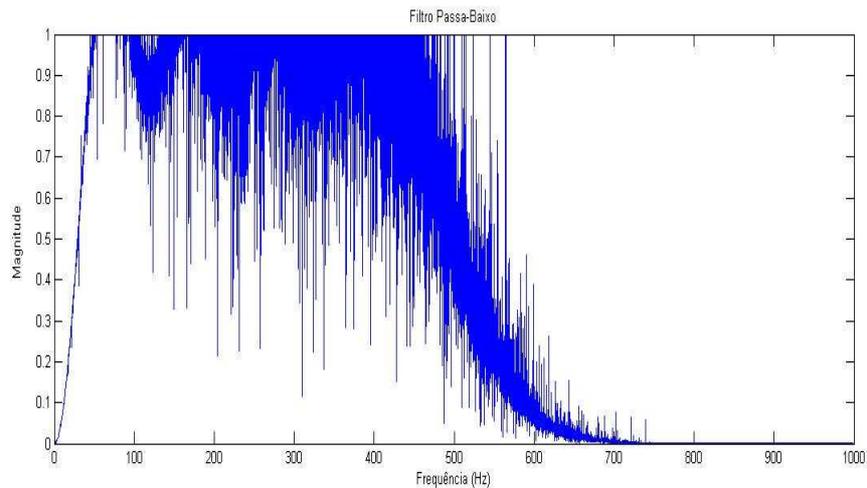


Figura 37 – Redução da amplitude de Fourier com a aplicação de filtro passa-baixo de 500Hz e grau 4.

O resultado da função de transferência mostra que o sinal apresenta algum ruído, por essa razão foi efectuado o teste sem a aplicação da correcção à base, concluindo-se o aspecto do sinal se mantém.

Assim como no modelo teórico, o aumento do grau do filtro faz com que este se torne um filtro ideal no limite. Contudo a filtragem das baixas frequências continua presente como era de esperar, em resultado da correcção à base.

6.3.3 Efeito de filtragem com a correcção à base

A forma como o sinal é filtrado para baixas frequências coincide no facto de a magnitude para 30Hz ser reduzida na mesma percentagem para os dois graus do filtro apresentado. É então importante verificar essa situação comparando o sinal original com o sinal depois de efectuada a correcção à base.

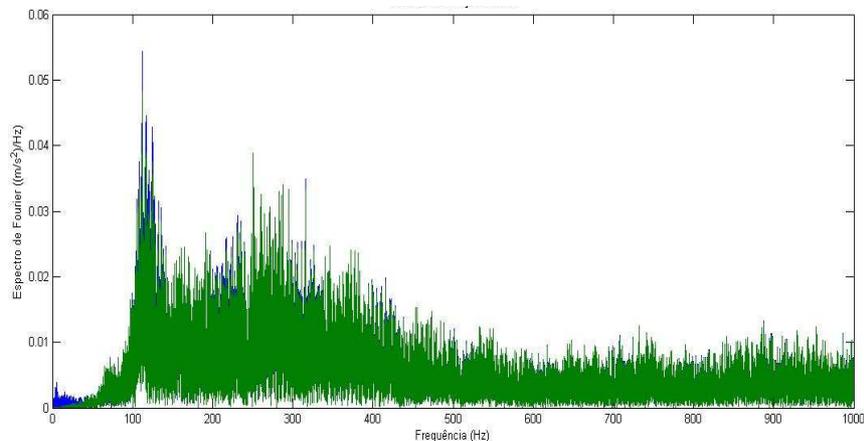


Figura 38 – Efeito da correcção à base no Espectro de Fourier

Efectuando a razão entre os espectros de Fourier das acelerações presentes na ilustração 38, obtêm-se a função de transferência presente na figura 39:

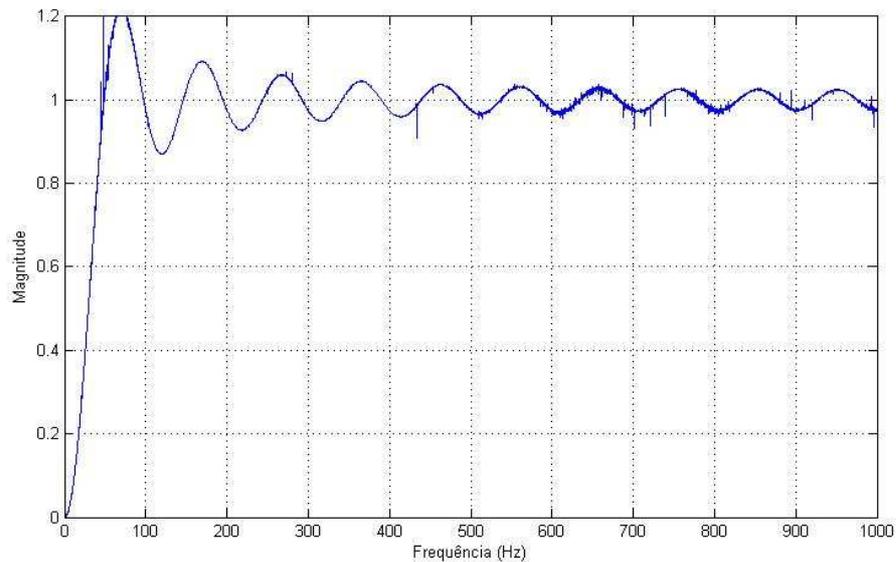


Figura 39 - Magnitude de atenuação da correcção à base no espectro de frequências.

Como esperado, é efectivamente a implementação da correcção à base que efectua o filtro para baixas frequências.

Depois de verificado o funcionamento do filtro de Butterworth, avalie-se então a outra metodologia de filtragem.

6.3.4 Filtragem por truncagem

A ideia da truncagem de frequências a retirar no sinal efectua-se tornando iguais a zero os valores do vector resultante da aplicação da *fft* para a banda desejada.

Tome-se o seguinte caso teste para uma frequência de corte de 500Hz, verificando o efeito no espectro de Fourier:

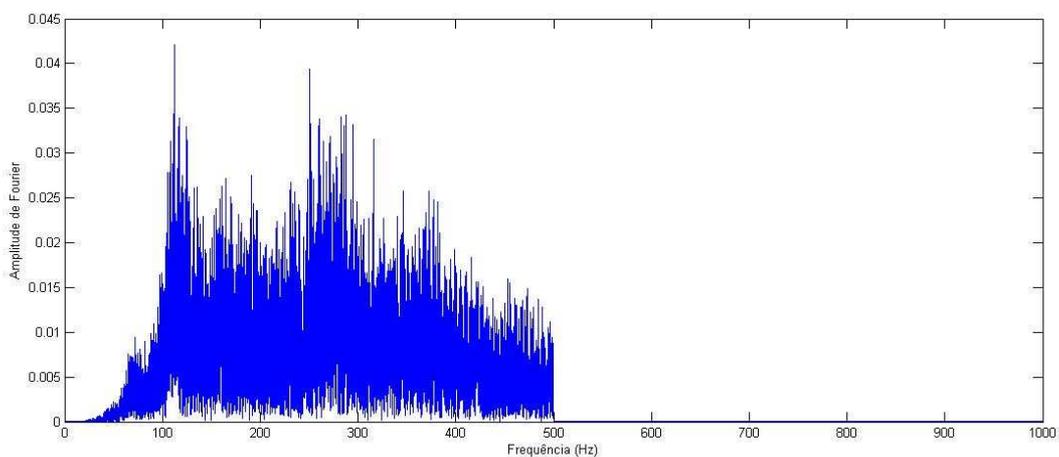


Figura 40 - Espectro de Fourier truncado a 500Hz

O efeito de filtragem do filtro pode ser interpretado pela figura 41:

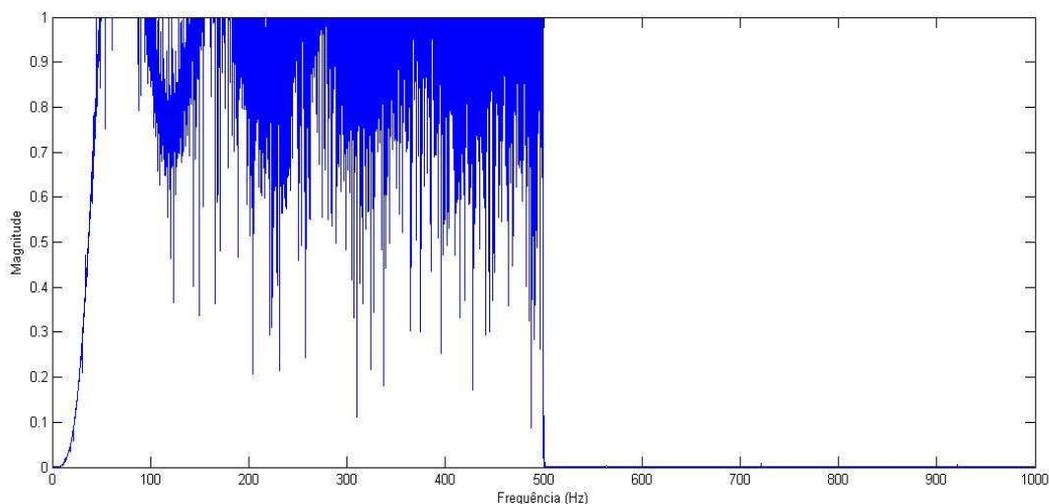


Figura 41 – Filtragem por truncagem do sinal a 500Hz. Magnitude

O resultado vai de encontro ao esperado, sendo que as frequências superiores à de corte anulam-se. A flutuação que ocorre na banda passante resulta da aplicação da correcção à base como já explicitado.

6.3.5 Avaliação e selecção do filtro mais adequado

Para esta análise optou-se por utilizar um registo com uma gama relativamente larga, contendo também altas frequências de forma a verificar o efeito dos filtros. Um registo com estas características corresponde à aquisição de sinal realizada na travessa, sendo escolhida a passagem do comboio Alfa Pendular às 18h08.

De forma a obter boa comparação foram obtidos valores e gráficos do sinal original, com a aplicação do filtro de Butterworth e truncagem do sinal. No anexo 3 e tabela 21 podem ser encontrados os gráficos e valores relativos à aceleração, espectro de Fourier do acelerograma, velocidade e deslocamento.

Como é natural, a aplicação dos filtros reduz a magnitude dos valores, sendo por isso necessário perceber a influência dessas reduções. O sinal original contém bastante energia até à frequência de corte teste de 500Hz, sendo que a partir desse valor, o nível estabiliza. A filtragem do sinal implica uma redução do valor de pico da aceleração, mas em termos de valor RMS a diferença é relativamente pequena. Ainda analisando o descritor aceleração, a filtragem do sinal com o filtro *butter* reduz a magnitude ligeiramente mais que no caso de filtro por truncagem. Esta situação compreende-se pela tipologia do filtro já exposta, sendo que um realiza uma filtragem suave enquanto o outro se aproxima mais de um filtro ideal.

Tabela 21 – Teste de Filtros: Registo CPA 18h08 – 1V. Passa-baixo a 500Hz.

		Comboio Alfa Pendular das 18h08 - Acelerómetro na Travessa		
		Frequência de corte 500 Hz		
		Original	Filtro de Butterworth de grau 4	Filtro por truncagem
Parâmetros do acelerograma no domínio do tempo	Duração do sinal (s)	11,1870	11,2780	11,1115
	Aceleração de pico (m/s ²)	64,1873	48,3400	50,2500
	Aceleração RMS (m/s ²)	1,8804	1,6865	1,7034
Parâmetros do acelerograma no domínio da frequência	Amplitude máxima ((m/s ²)/Hz)	0,04746	0,04746	0,04212
	Frequência da Amáx (Hz)	112,2	112,2	112,2
Parâmetros da velocidade no domínio do tempo	Duração do sinal (s)	11,4880	11,4900	11,4995
	Velocidade de pico (m/s)	0,04225	0,04000	0,04115
	Velocidade RMS (m/s)	0,00140	0,00140	0,00136
Parâmetros do deslocamento no domínio do tempo	Duração do sinal (s)	11,4995	11,4990	11,4610
	Deslocamento de pico (m)	0,0000302	0,0000300	0,0000318

Os espectros de Fourier que se encontram no anexo 3, permitem retirar as seguintes conclusões. Para o valor de pico da amplitude a aplicação do filtro têm influência muito reduzida nos valores obtidos. Isto também porque foi escolhida uma frequência de corte de 500Hz, sendo a frequência respectiva ao valor de pico da amplitude de 112,2Hz para todos os casos. Quanto à comparação entre os dois tipos de filtragem, a truncagem mostra ser um método bastante agressivo para o sinal na zona da frequência de corte. Por outro lado o filtro *butter* apresenta características que suavizam o corte, resultando um sinal mais coerente na zona da frequência de corte.

Para os descritores velocidade e deslocamento, a utilização dos filtros mostram também que a diferença é ligeira.

Tanto um tipo de filtro como outro apresentam as características necessárias para a obtenção dos resultados. Contudo a opção escolhida é o filtro de Butterworth de 4 grau, na medida que se considera de valorizar o facto de efectuar um corte mais suave do sinal.

Falta agora definir qual a frequência de corte a utilizar. Dado que a correcção à base já efectua filtragem do sinal para baixas frequências, não vai ser realizada novamente. Portando, o filtro *butter* a utilizar será apenas passa-baixo.

Uma boa opção é utilizar uma frequência de corte para locais muito próximos da grelha de via e outra para locais distribuídos em campo livre, como realizado no caso estudo na linha Paris-Bruxelas por Degrande et al. (2001).

Na figura 41 encontram-se os espectros de Fourier do sinal original sem filtragem para várias distâncias ao centro da linha, com o objectivo de validar essa situação. Recorde-se que os pontos 1 e 2 se encontram ao nível da plataforma de via, os pontos 4 e 5 na Rua da Centeira e os 8 e 10 no descampado existente na zona.

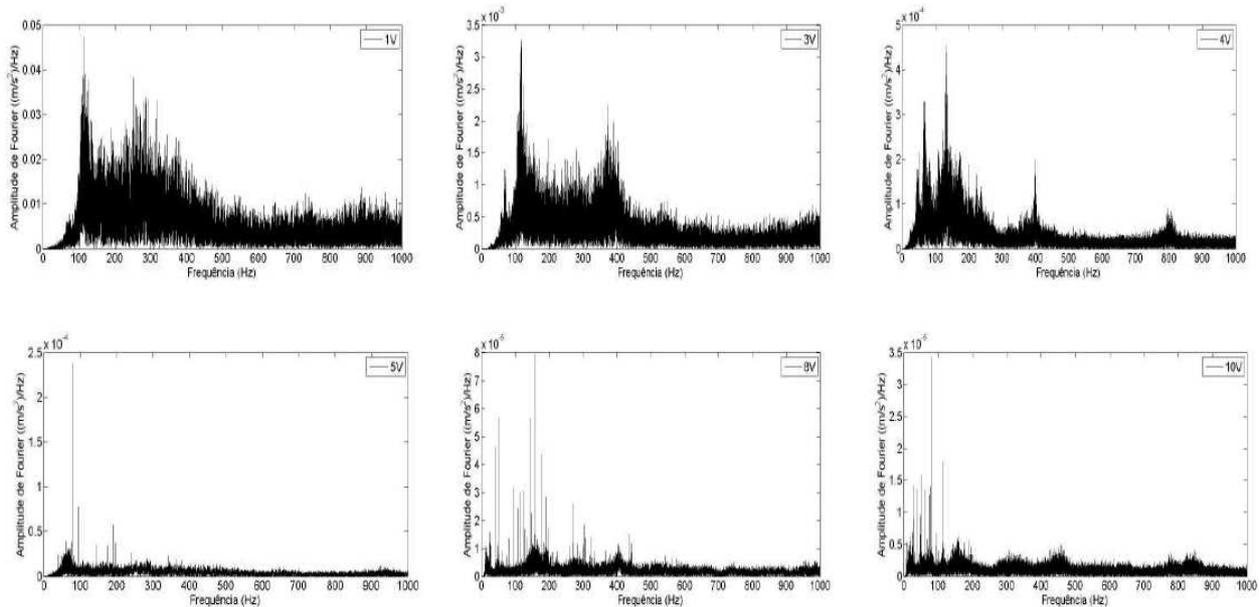


Figura 42 – Espectros de Fourier do sinal original para diversas distâncias ao centro da linha.

As medições realizadas mais perto da via apresentam grande conteúdo energético para altas frequências, enquanto essa situação não se verifica com o afastamento do centro da linha.

Tendo em conta que diversos autores sugerem que a gama de interesse do espectro tem como limite os 250Hz, o caso estudo confirma que para campo livre esse valor é válido.

Os locais 1V e 2V representam a resposta de acelerómetros que se encontram colocados no edifício da gare do Oriente. Para estes casos a frequência de corte adoptada deve ser de 500Hz, dada a quantidade de energia para altas frequências. Na posição 4V, dada a existência do pico a 400Hz considerou-se, de forma conservativa, adequado aplicar filtro a 500Hz também. Na verdade este ponto de medição encontra-se na zona de influência do edifício, podendo ser essa a razão do pico observado.

Esta análise vai de encontro ao método utilizado por Degrande et al. (2001), em que, na campanha de medição efectuada na linha de alta velocidade Paris-Bruxelas, foi utilizado filtro de 500Hz para registos próximos da linha e filtro de 250 Hz para registos afastados do centro de linha.

6.4 Integração do sinal

Depois de dimensionado o filtro a aceleração já se encontra corrigida à base e filtrada. Será com estes dados que todos os cálculos subsequentes devem ser feitos, nomeadamente, integrações e transformadas de Fourier.

Para o processo de integração do sinal foi utilizado o algoritmo temporal de Newmark, que faz uma abordagem passo a passo do registo. O método é uma generalização do método da aceleração linear e admite por isso a hipótese de uma variação linear das acelerações dentro dos intervalos de tempo Δt .

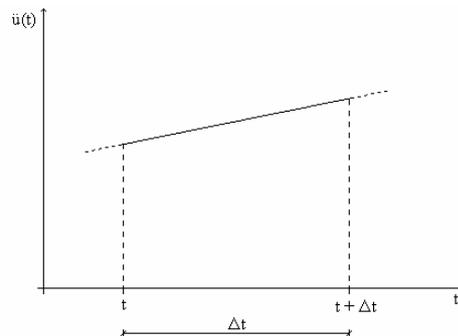


Figura 43 - Lei de variação das acelerações no método de Newmark. Coelho (1997).

Através da integração é possível obter então a lei de variação das velocidades e dos deslocamentos, dados pelas equações:

$$\dot{u}(t + \Delta) = \dot{u}(t) + \left[(1 - \delta) \cdot \ddot{u}(t) + \delta \cdot \ddot{u}(t + \Delta t) \right] \cdot \Delta t \quad (13)$$

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \dot{u}(t) \cdot \Delta t + \left[(0.5 - \alpha) \cdot \ddot{u}(t) + \alpha \cdot \ddot{u}(t + \Delta t) \right] \cdot \Delta t^2 \quad (14)$$

Adaptado de Coelho (1997)

Os parâmetros presentes nas equações devem ser calibrados de forma a obter melhores resultados nas integrações. Nos casos de variação linear da aceleração, Newmark propôs:

$$\delta = \frac{1}{2}; \alpha = \frac{1}{6} \quad (15)$$

Análises de teste permitiram concluir que é necessário recorrer a nova correcção à base depois de efectuar as integrações. Ou seja, depois de obtida a velocidade por integração da aceleração corrigida, é necessário aplicar novamente a correcção à base. A mesma ideia se aplica para se obter os deslocamentos. Os testes preliminares de verificação do funcionamento do código utilizado mostram ainda que se não for efectuada a correcção à base, a integração de sinais não corrigidos resulta em resultados incorrectos. Por essa razão é necessário aplicar sempre nova correcção depois de realizada a integração.

6.5 Descritores de sinal

No campo dos parâmetros a determinar, a duração do sinal permite perceber o intervalo de tempo onde a aceleração se concentra. Para isso foi efectuada o cálculo da energia no domínio do tempo e para a amostra de 65536, sendo depois calculado para o intervalo de tempo onde 90% desta energia

se situa (com margem de 5% no início e 5% no fim). Quando esse intervalo de tempo se aproxima dos 32,768 segundos significa que o registo deixa de contar com picos elevados, tomando valores mais constantes até atingir valores de aceleração ambientais.

Os valores de pico da aceleração, velocidade e deslocamento são retirados directamente do gráfico, constituindo por isso no indicador mais directo dos níveis de vibração.

No caso da aceleração RMS é obtida por integração, sendo utilizado para caracterizar a severidade das vibrações, pois reflecte o potencial destrutivo da vibração. O cálculo é feito segundo a seguinte expressão:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt} \quad (16)$$

A análise no domínio da frequência foi aplicada apenas ao acelerograma. Recorrendo à ferramenta FFT presente no MATLAB obtém-se o espectro de Fourier a partir do sinal no tempo. A função *fft* do *Signal Processing Toolbox* presente no MATLAB vem descrita como:

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (17)$$

$$\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$$

O resultado da aplicação da transformada rápida de Fourier tem uma frequência de amostragem que é definida pelo passo de aquisição utilizado. Logo para um passo de 0,0005 obtém-se:

$$f = \frac{1}{0.0005} = 2000\text{Hz} \quad (18)$$

Ao espectro de Fourier está associado também o cálculo da amplitude de Fourier, sendo calculada da seguinte forma:

$$\text{Amplitude} = \frac{\text{abs}(\text{fft}(\text{acel}))}{n^\circ \text{ pontos}} \quad (19)$$

6.6 Cálculo da velocidade do comboio

A informação relativa à velocidade do comboio é importante para realizar uma boa caracterização da magnitude das vibrações. Este conhecimento tem especial interesse devido ao incremento das vibrações com a superação da velocidade crítica, mas também no caso da realização de comparações entre diferentes campanhas.

A forma mais directa de obtenção da velocidade é pela instalação de radares ou sensores ópticos como foi no caso estudo apresentado do AVE, outra hipótese revelada na apresentação de estudos utiliza os registos dos medidores de extensão para esse cálculo. A teoria utilizada para o cálculo tem o mesmo fundamento utilizado no segundo caso, tendo sido aplicado por Leon (2008).

Para registos efectuados próximo da linha, a passagem dos eixos no local de medição resulta em valores de pico superiores, sendo a partir dessa informação que é calculada a velocidade. Para o registo da figura 44 do comboio Alfa Pendular é possível aferir:

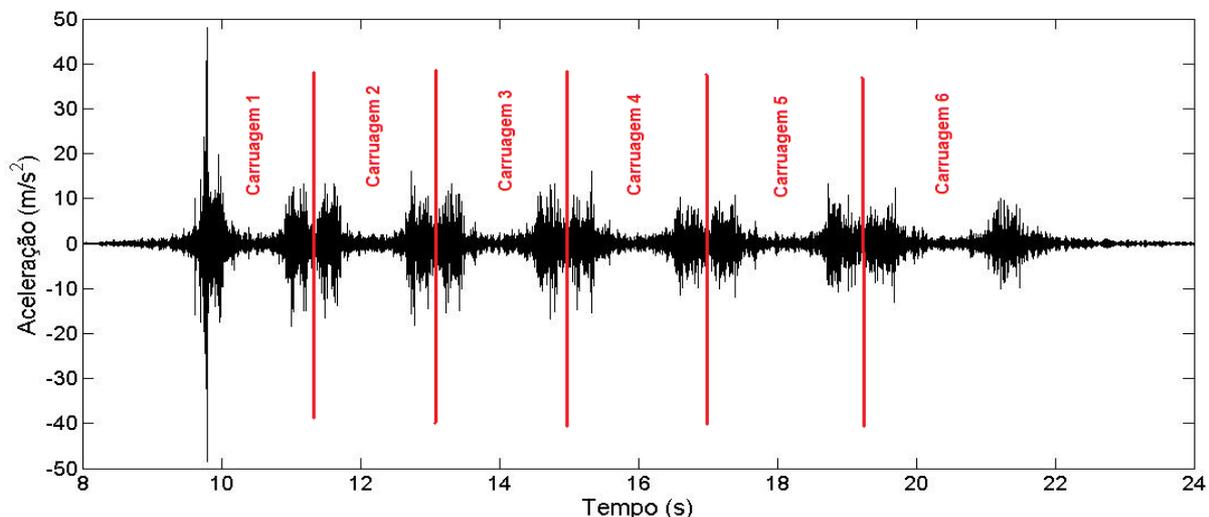


Figura 44 – Distinção das carruagens no sinal.

As características do comboio Alfa Pendular podem ser encontradas no anexo 2, onde se verifica aquilo que é aparente no registo, isto é, que o comboio tem seis carruagens.

O comboio tem também 12 bogies com 2 eixos cada, resultando graficamente nos picos do acelerograma. É com estes picos e a geometria do comboio que se pode estimar a velocidade.

Tabela 22 – Geometria do comboio Alfa Pendular

Alfa Pendular	Distância (m)
Entre eixos dos Bogies (A)	2,7
Entre eixos de carruagens diferentes (B)	4,28
Entre os Bogies da mesma carruagem (C)	16,3

Para se perceber melhor como é feita a análise do sinal para a estimativa da velocidade, a figura 45 indica graficamente as distâncias discriminadas na tabela 22:

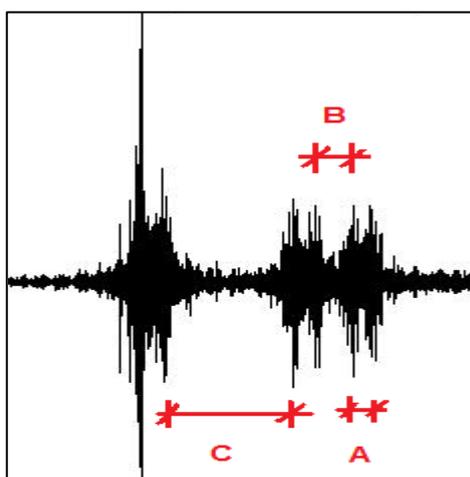


Figura 45 - Definição dos constituintes do comboio

Uma limitação do estudo apresentado resulta da informação da geometria exacta dos restantes comboios ser desconhecida, estando de momento apenas disponível a informação do tipo de comboio já referido. Sendo que para os registos do comboio Alfa Pendular na travessa alguns ainda apresentarem defeito. Acrescentando a esta situação, nem todos os registos dos diferentes comboios Alfa Pendular podem ser utilizados, pois apresentam andamento anómalo.

Para realizar este cálculo acresce ainda o facto de na zona de medição o comboio se encontrar em desaceleração. Essa situação é notória na ilustração anterior, onde, à medida que as carruagens avançam os tempos entre passagens de bogies estarem a aumentar. Por essa razão, no cálculo da estimativa da velocidade foi tomada a simplificação de não tomar em conta os picos da carruagem 5 e 6.

Portanto utilizando apenas informação relativa a 4 carruagens estimou-se:

Tabela 23 - Estimativa da velocidade

	Número médio de pontos do sinal	Tempo (s)	Distância (m)	Velocidade estimada	
				(m/s)	(km/h)
Entre eixos dos Bogies	377	0,188	2,70	14,3	51,6
Entre carruagens	605	0,303	4,28	14,1	50,9
Entre os Bogies da mesma carruagem	2419	1,209	16,30	13,5	48,5

Velocidade estimada do comboio:

50 km/h

7. Discussão de resultados

A compilação dos resultados pode ser encontrada nos anexos 4 a 8, onde podem ser consultadas tabelas de valores e representações gráficas produzidas em Matlab.

7.1 Comentários iniciais

Dada a quantidade de informação recolhida e o âmbito desta dissertação de mestrado, foi necessário definir quais os registos a tratar. A aquisição dos sinais foi realizada para três tipos diferentes de composições de passageiros em circulação na linha 1 da Gare do Orientes. No tratamento dos sinais, foi realizado o estudo de uma passagem para cada tipo de comboio. Durante a campanha de medição foram obtidos também registos ambientais no local, sendo também possível encontrar o tratamento de um desses casos em anexo.

Um dos aspectos a ter em conta na análise de resultados resulta da localização dos acelerómetros e as características de fundação onde se encontram instalados. Enquanto os locais de medição 1, 2 e 3 estão colocados na plataforma superior onde se encontra a via, os locais 6, 7, 8, 9, 10 e 11 encontram-se sobre o terreno existente no local. Os dois pontos que falta referir, 4 e 5, têm a particularidade de estarem situados na Rua da Centieira.

A aquisição dos sinais foi realizada sem condicionamentos de trânsito à superfície, o que pode interferir nos resultados das medições realizadas nos pontos 4 e 5 principalmente.

De todos os 11 locais foram escolhidos apenas 4 destes. A selecção procurou facilitar a análise e responder da melhor maneira a várias questões. Por isso foi escolhido o ponto 1V na travessa como um registo muito rico em energia, em detrimento do registo efectuado no carril. A forma de instrumentação do carril revelou-se inapropriada, sendo isso visualizado na figura 46:

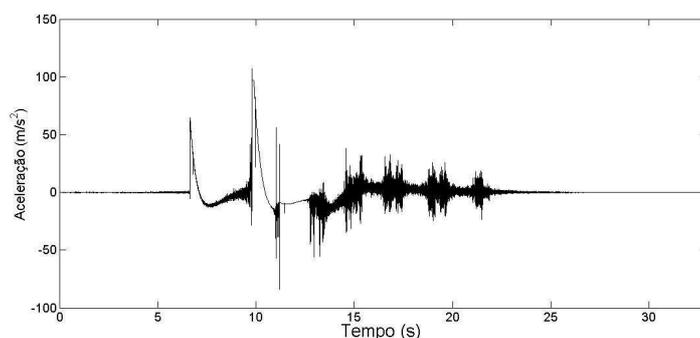


Figura 46 - Registo defeituoso no carril

Também na travessa alguns registos apresentam defeito, como foi o caso para os registos LOC. A acrescentar a isto, para um dos dois registos LOC (15h38) verificou-se que no instante inicial de gravação do sinal o evento já tinha iniciado. Por estas razões nos resultados em anexo não existe valores e gráficos para este tipo de comboio no ponto de medição 1V. Contudo foi decidido apresentar a restante informação, de forma a dar também uma visão acerca deste tipo de composição.

O problema da obtenção de registos defeituosos resulta do facto de terem sido utilizados acelerómetros iguais para todos os locais. O tipo de fixação utilizada no carril revelou-se não ajustado, sendo uma boa hipótese apresentada na secção 5.2, em detrimento das peças cúbicas auxiliares utilizadas.

Outro local de medição escolhido para a análise situa-se na base da estação (4V) já na rua da Centieira, permitindo desta forma ter a noção dos resultados na iminência de a instrumentação deixar de estar sobre a influência do edifício. Em análises preliminares verificou que seria a transição entre a posição 4 e 5 que deveria ser comparada com os resultados ambientes, isto para definir uma distância até à qual se observa o efeito da vibração. Este ponto de medição 5 ainda se encontra no limite da rua da Centieira, sendo que o último local de medição escolhido se encontra em campo livre, a posição 8.

Com a análise deste conjunto de pontos é possível ter uma noção real de como se processa o fenómeno das vibrações, incluindo a resposta da grelha de via e propagação no solo.

Uma situação verificada na análise dos sinais e na escolha dos locais de medição, com vista a melhorar em possíveis campanhas futuras, tem em conta a escolha da sensibilidade dos transdutores. Seria interessante utilizar acelerómetros com sensibilidade diferente perto e longe do centro da via, dado que a energia do sinal também é diferente, situação não prevista nesta campanha realizada. Um modelo bom de instrumentação exige também a utilização de transdutores de diferentes tipos, por exemplo de geofones, que permitam comparar resultados e validar as integrações efectuadas.

7.2 Resultados Globais

Os resultados presentes no anexo 4 foram compilados em forma de gráfico de forma a ser possível retirar melhores ilações. Na ilustração 47 encontram-se então representados as acelerações, velocidades e deslocamentos em várias formas, para os diferentes comboios e para um registo ambiente. O eixo vertical encontra-se em escala logarítmica dado que a amplitude em certos casos é elevada.

A tendência geral dos gráficos mostra que com o aumento da distância ao centro da linha ocorre um amortecimento da magnitude das vibrações. É possível dividir os valores obtidos em dois conjuntos, aqueles que estão influenciados pela estrutura da estação e aqueles que se encontram em campo livre. Essa distinção é perfeitamente notória com ajuda interpretativa do registo ambiente.

Para a distância ao centro da linha de 9 metros (posição de medição 4V) verifica-se que os valores registados para os comboios e o registo ambiente se começam a aproximar. Para a referência de medição seguinte a correspondência entre os valores é notória. Apesar de os valores de pico e RMS mostrarem que os valores se aproximam, graficamente os registos no tempo mostram que existe ainda vestígio da influência da acção provocada pelo comboio. Com isto sugere-se a consulta dos anexos, dado que a passagem do comboio influi no aspecto dos registos gráficos mesmo para a posição de medição 8V (90 metros), basta para isso comparar um registo de um comboio com o registo ambiental para essa posição.

Os gráficos de resultados para os valores de pico dos descritores mostram uma situação que não era de esperar para o registo ambiente. Para a distância de 9 metros ao centro da linha (ponto 4) os valores de pico registados são bastante superiores em comparação com os outros locais. Consultando os resultados em anexo para a posição 4V esta situação é visualizada sob a forma de picos, uma explicação possível para este facto é a circulação automóvel no local. Contudo dada esta situação, foi verificado para os restantes registos ambiente este resultado, sendo confirmado este efeito para todos.

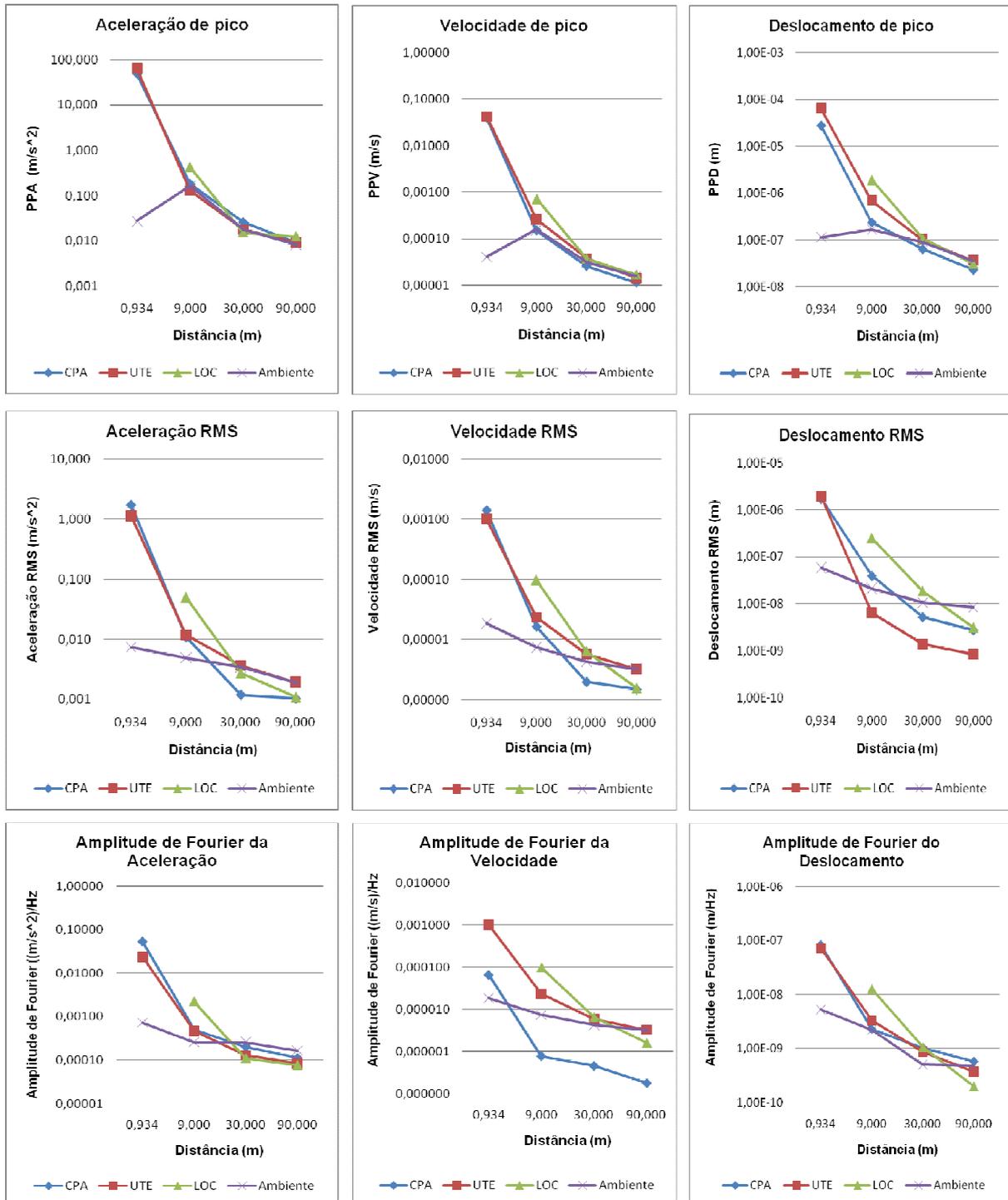


Figura 47 - Gráficos comparativos entre registos

Para realizar a comparação entre comboios deve-se ter bem presente a massa do veículo, na medida que é dos principais factores de influência na magnitude das vibrações. A ideia que se pode transmitir neste momento é que a massa superior corresponde aos comboios LOC, seguindo-se CPA e por fim UTE. O número de carruagens do comboio LOC analisado é desconhecido, para o comboio CPA de seis e para o comboio UTE de três, sendo esse número perfeitamente identificável nos registos realizados na travessa. Utilizando o ponto a 9 metros, que tem disponível valores para todos os comboios, conclui-se que o facto de o comboio LOC apresentar maior massa resulta também num nível de vibração superior.

Verifica-se também que é importante utilizar acelerómetros com maior sensibilidade (foram utilizados com 1 V/g) para distâncias superiores a 30 metros do centro da via. Isto porque o sinal obtido coincide com o ruído ambiente.

7.3 Análise das frequências

Recorde-se que o tratamento dos sinais foi realizado com a aplicação de um filtro de Butterworth passa baixo a 500Hz para os pontos de monitorização 1V e 4V, e passa baixo a 250Hz para os pontos 5V e 8V. Os espectros de Fourier para os diferentes descritores da vibração podem ser encontrados em anexo.

Na figura 48 encontram-se sumarizados os valores da frequência correspondentes às amplitudes máximas de Fourier do espectro da velocidade. É bastante notório que à medida que o registo da vibração é realizado mais afastadamente do centro da linha a frequência com maior energia diminui o seu valor. Como já tinha sido estudado para dimensionar o filtro, na proximidade da linha são geradas altas frequências que são amortecidas em campo livre pelo solo, por essa razão os registos ambiente apresentam as frequências associadas ao valor máximo da amplitude mais baixas.

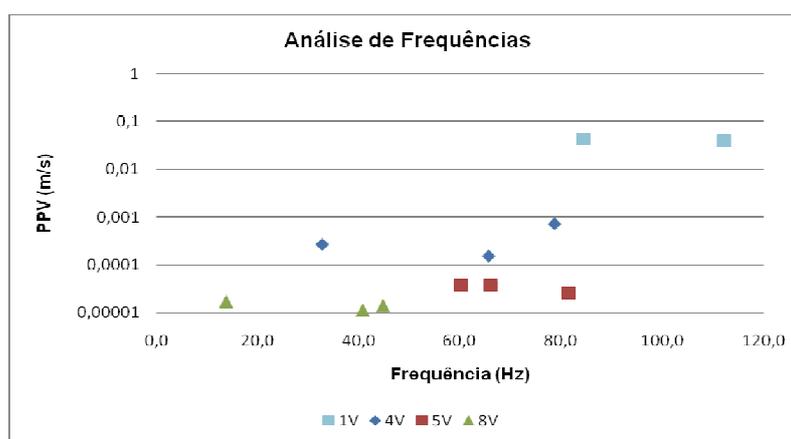


Figura 48 - Valores da frequência respeitantes às amplitudes máximas de Fourier

Uma análise mais atenta dos espectros de Fourier presentes em anexo mostra que para a posição de medição 1V existe grande conteúdo energético para gamas superiores a 250 Hz que se reduzem para os outros pontos de medição.

Facto a assinalar, para o espectro de Fourier do sinal ambiental regista-se geralmente um pico aproximadamente a 50HZ, sendo provavelmente resultado da corrente eléctrica utilizada para realizar a campanha de medição.

7.4 Análise de duração do sinal

A duração do evento, calculada de acordo com o procedimento descrito em 6.5, é uma forma simples de perceber a magnitude da vibração. No intervalo de tempo da amostra escolhido (32,768 segundos), o fenómeno ocorre de uma forma rápida e energética (perto da via) ou prolongada e menos energética.

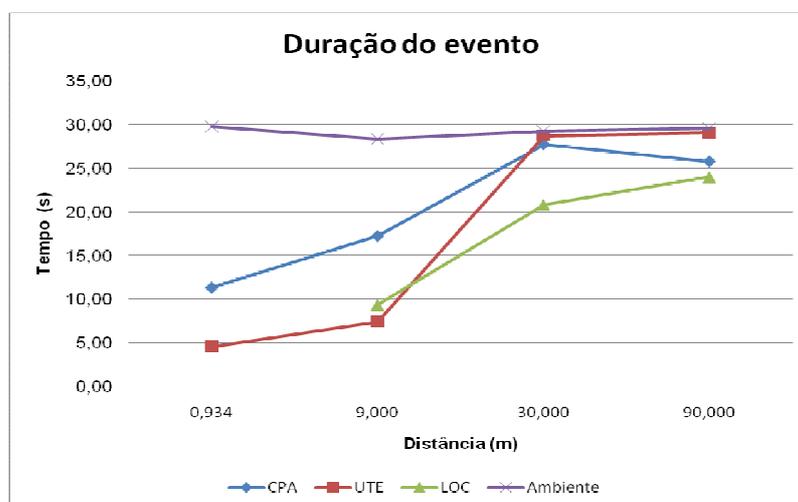


Figura 49 - Duração do evento segundo a distância ao centro da via

Para o registo ambiente a duração do sinal aproxima-se em muito do intervalo da amostra, sendo que para os registos dos comboios a duração do sinal começa a aproximar-se da vibração ambiental para o ponto de medição a 30 metros (local 5).

A duração do sinal também está muito dependente do comboio e da velocidade deste. Assumindo que as composições têm uma velocidade média próxima entre elas no local de medição, pois todas realizam paragem na Gare do Oriente. Comparando dois tipos de comboios, destaca-se que o comboio CPA tem uma duração do evento superior ao comboio UTE para o ponto mais próximo da linha. A razão é simples, enquanto o comboio CPA tem 6 carruagens o comboio UTE tem 3, logo tem comprimentos muito diferentes.

7.5 Avaliação dos limites da vibração

Na medida que não existe legislação que trate exclusivamente as vibrações resultantes da circulação ferroviária foram já apresentados neste documento valores limite por diversas entidades e normas. Sendo este um campo onde as comparações devem ser realizadas com cuidado, é necessário ter em

conta as varias variáveis para definir a situação, optou-se por uma avaliação simples. Para isso é utilizado o primeiro local de medição fora da Gare do Oriente, portanto o registo 4V. O objectivo é comparar este com a situação mais desfavorável para a qual existe valores sugeridos pelo LNEC, NP ou no estudo desenvolvido por Harris Miller Miller & Hanson Inc.

Tabela 24 – Avaliação da vibração

	Danos em edifícios	Velocidade (mm/s)	Velocidade RMS (mm/s)	Avaliação
NP	Limite mais desfavorável na base da edificação	1,300	-	
LNEC	Limite mais desfavorável em edifícios	-	3,500	
Harris Miller & Miller & Hanson Inc.	Limite mais desfavorável em edifícios	3,000	0,800	
	Percepção humana da vibração	Velocidade (mm/s)	Velocidade RMS (mm/s)	Avaliação
LNEC	Perceptível e suportável	-	0,240	
Harris Miller & Miller & Hanson Inc.	Limite mais desfavorável de sensação no interior de edifícios	-	0,101	
	Percepção humana do ruído estrutural	Velocidade (mm/s)	Velocidade RMS (mm/s)	Avaliação
LNEC	Limite	-	0,030	
Harris Miller & Miller & Hanson Inc.	Limite mais desfavorável em edifícios	-	0,04	
	Interferências com equipamentos	Velocidade (mm/s)	Velocidade RMS (mm/s)	Avaliação
Harris Miller & Miller & Hanson Inc.	Equipamentos extremamente sensíveis	-	0,002	
Resultados	Valor máximo registado no ponto 4V	0,720	0,024	
NOTA: A posição 4V é referência pois é o primeiro local que não se encontra sobre o edifício da Gare do Oriente.				

A situação que não passou na avaliação tem contudo uma explicação. O valor dado para interferências com equipamentos, é meramente indicativo, pois cada qual tem a sua especificação que deve ser comunicada pelo fabricante. Estes valores fornecidos devem ser tomados em conta em laboratórios, hospitais ou em equipamentos industriais com tecnologia de precisão.

7.6 Comparação de resultados com casos de estudo

Com a leitura de diversos artigos sobre o tema em estudo nesta dissertação, foi possível recolher uma série de dados para possibilitar uma comparação com o trabalho de campo realizado.

Para facilitar foi apenas colocado no gráfico o comboio Alfa Pendular, também porque este é o que tem características mais próximas dos comboios de alta velocidade Europeus no contexto dos comboios Portugueses.

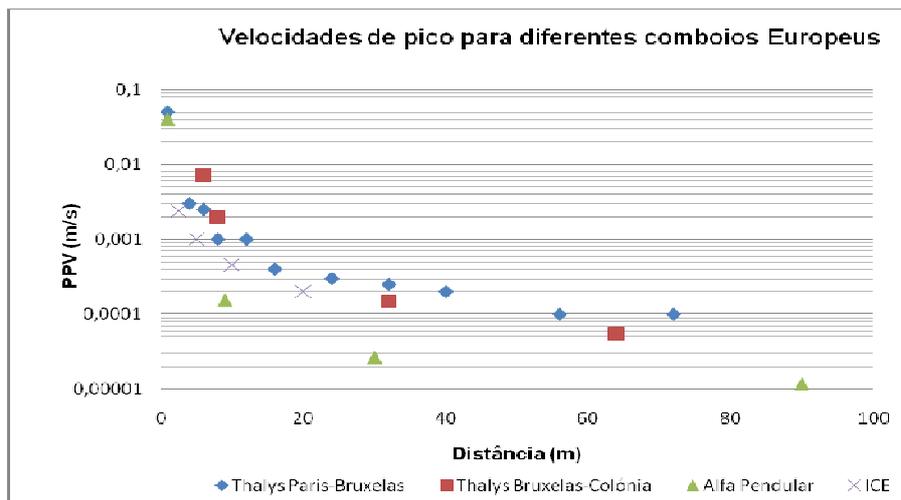


Figura 50 – Resultados de medições de campo realizadas para diversos comboios Europeus

Os dados recolhidos para comboios Europeus de alta velocidade Thalys e ICE, foram obtidos para velocidades de circulação bem superiores ao do caso estudo deste documento e de acordo com as velocidades comerciais de operação nessas linhas. Contudo é necessário ter em atenção a realização de comparações pois a velocidade de circulação é um dos factores de aumento da magnitude das vibrações. De qualquer forma é interessante verificar como seguem amortecimento de valores os resultados obtidos da campanha de medição realizada na Gare do Oriente.

8. Conclusões

A investigação em Portugal sobre o tema das vibrações induzidas pela circulação de comboios na linha ferroviária encontra-se ainda pouco desenvolvido, com este trabalho pretendeu-se dar um contributo no sentido de melhorar essa situação.

O estudo levado a cabo para desenvolver este tema passou por fases distintas e de complexidade diferente. A recolha de informação em artigos variados permitiu conhecer qual o estado da arte, transmitindo conhecimentos base que permitiram perceber o fenómeno das vibrações. Isto porque a parte fundamental deste trabalho centrou-se na campanha de medição em campo e análise dos sinais obtidos.

A experiência no terreno foi importante no sentido de ter a noção de como o trabalho de campo é realizado e em que condições ambientais se desenrola, permitindo efectuar uma discussão de resultados mais atenta.

A fase de análise de dados em ambiente Matlab foi aquela mais difícil e onde foi necessário realizar muitos testes de maneira a cumprir os objectivos propostos. A utilização do programa Matlab e o desenvolvimento dos códigos das funções foi o ponto mais complicado dada a pouca experiência de utilização do programa até à data. Porém com o auxílio dos orientadores todos os pequenos e grandes problemas foram ultrapassados.

Os danos causados por fenómenos de vibração estão normalmente associados apenas ao incómodo causado a pessoas situadas próximo da via, em habitações ou escritórios. Para os edifícios, os níveis de vibração gerados não apresentam energia suficiente para causar danos estruturais, apenas há a possibilidade de ocorrer danos cosméticos. Seria importante contudo a elaboração de uma norma Europeia que regula-se este fenómeno, pois actualmente não existe nenhum mecanismo legal, apenas indicações.

No sentido de responder ao problema, foram apresentadas neste documento diversas medidas de mitigação, sendo descritas no capítulo dos casos estudo apresentados. Hildebrand (2001) expõe precisamente as metodologias de mitigação utilizadas na Suécia, em resultado da existência dos níveis de vibração percebidos (bem visível a olho a movimentação do terreno). O conceito de velocidade crítica apresenta-se muito importante, e constitui um grande desafio para a mitigação das vibrações em solos moles. Contudo em Portugal os solos têm consistência boa, sendo que apenas pontualmente poderá surgir este tipo de problemas.

O trabalho de campo desenvolvido com o LNEC tinha como objectivo duas situações, obtenção de *know how* para campanhas de medição futuras e caracterização situação actual das vibrações no local. Dado que esta campanha foi a primeira realizada nestes moldes, os objectivos foram cumpridos. Todavia com a análise do quadro global podem ser feitos alguns comentários.

Em primeiro lugar numa campanha de medição futura seria importante diversificar o tipo de instrumentação utilizada, bem como efectuar mais do que um alinhamento de instrumentação.

O problema mais grave sentido verifica-se na instrumentação da grelha de via. O conjunto, instrumento de monitorização e fixação realizada revelou-se inapropriado, não sendo por isso possível apresentar resultados para as medições realizadas no carril.

Apesar de ter sido efectuada aquisição de sinal para 11 locais distintos esta parece uma boa opção. Todavia nesta dissertação foi necessário reduzir a análise no número de pontos dada a quantidade de informação.

Com a análise computacional foi realizado todo o processo de análise de sinais. Os dados recolhidos pela instrumentação apresentam informação que é considerada de ruído, sendo que a análise permitiu definir qual a informação realmente importante no estudo da vibração originada pela circulação de comboios. Primeiramente foi realizado uma correcção à base com o auxílio da média móvel, sendo que com este procedimento é realizada desde já filtragem para muito baixas frequências. A filtragem principal foi realizada com o auxílio de um filtro Butterworth, em que o dimensionamento deste merece especial atenção nesta dissertação. A opção recaiu pelo filtro de Butterworth, contudo foi realizada filtragem por truncagem, constituindo assim duas possibilidades de tratamento de sinal.

Os descritores de vibração foram escolhidos por consulta de estudos nesta área de investigação, de forma a transmitir da melhor maneira os resultados obtidos. Foi para isso utilizado o domínio do tempo, frequência e espacial, sendo que a aquisição foi realizada no tempo.

Os resultados da campanha de medição de Julho de 2009 para os 3 tipos de composições e registos ambientes mostram algumas conclusões interessantes.

Primeiro que os níveis obtidos se enquadram com os resultados de outros estudos expostos neste documento, sendo logo aí feita uma validação dos resultados obtidos.

Confirmou-se também a gama de vibrações de interesse indicada por diversos autores, sendo que se pode afirmar que para o campo livre é de interesse estudar o fenómeno de até 250Hz. Para locais perto da via onde foram registados níveis de energia mais elevados foi definida para frequência de corte do sinal para 500Hz, por essa razão esses pontos devem ter uma análise no espectro das frequências alargada. No seguimento desta conclusão, os resultados dos descritores mostraram isso mesmo. Para um local de via já mais afastado do centro de via, as vibrações resultantes da passagem do comboio aproximam-se do registo ambiente. Utilizando os resultados gráficos dos descritores para aquisições realizadas na travessa é também possível realizar uma estimativa da velocidade do comboio num determinado local bem como o número de carruagens deste.

Nota ainda para a avaliação realizada, onde se conclui que os níveis de vibração são percebidos pela população, mas longe de causar danos estruturais a possíveis edifícios vizinhos.

Esta dissertação de mestrado integrado em engenharia civil, procurou atingir o objectivo de mostrar o estado da investigação nesta matéria e adicionar um novo estudo. Os resultados foram bastantes satisfatórios, sabendo contudo que a engenharia ferroviária com a ajuda de estudos deste género tem margem de progressão na tentativa de mitigar ao máximo os efeitos da vibração.

9. Referências bibliográficas

- [1] Carvalhal, F.; Costa, C.; Azevedo, F.; Elementos de sistemas e de análise e processamento de sinais; LNEC; 2008.
- [2] Tavolaro, M.; *Cuidados na utilização e sistemas de aquisição de dados no ensino de física*; Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, no. 2, Junho, 2000.
- [3] Harris Miller Miller & Hanson Inc; *High speed ground transportation noise and vibration impact assessment*; U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration; Outubro de 2005.
- [4] Smith, S.; *The scientist and engineer's guide to Digital Signal Processing*; California technical publishing; Second edition, 1999.
- [5] Ekevid, T.; Li, M.; Wiberg, N.; *Adaptive FEA of wave propagation induced by high-speed trains*; Computers & Structures; Pergamon; Março de 2001.
- [6] Heckl, M.; Hauck, G.; Wettschureck, R.; *Structure-borne sound and vibration from rail traffic*; Journal of Sound and Vibration; 1996.
- [7] Esveld, C.; *Modern Railway track*; Delft University of Technology; 2001.
- [8] Teixeira, P.; *Sebenta de Engenharia Ferroviária*; IST; 2009.
- [9] Auersch, L.; *The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle-track-soil interaction and measurements*; Journal of Sound and Vibration; Novembro de 2004.
- [10] Hildebrand, R.; *Countermeasures against railway ground and track vibrations*; Royal Institute of Technology Department of Vehicle Engineering; Estocolmo 2001.
- [11] Rosão, V.; *Variante da Solum (1.161 km) – Sistema de mobilidade do Mondego – Projecto de medidas de redução de Vibração*; SCHIU, Engenharia de vibração e ruído; Maio de 2009
- [12] Shiappa de Azevedo, F.; Patrício, J.; *Vibrações ambientes. Critérios de danos e incomodidade. Actualidade e perspectivas futuras*; TecniAcustica; 2001.
- [13] Hanson, C.; Singleton, H.; *Noise and vibration measurements of the ACELA*; Presentation to 79th annual meeting of transportation research; 2000.
- [14] Geocontrole; Estação Oriente, prospecção geotécnica complementar; Fevereiro de 2009.
- [15] Degrande, G.; Schillemans, L.; *Free field vibrations during the passage of the Thalys high-speed train at variable speed*; Journal of Sound and Vibration; Março de 2001.
- [16] Rovira, G.; Bosquet, J.; Garbi, J.; Genescà, M.; *Predicción e ensayo de transmisión de vibraciones en el terreno provocadas por trenes AVE*; TecniAcustica; Bilbao 2003.
- [17] Leon, J.; *Benchmark tests for models of railway track dynamic behaviour*; Queensland University of Technology; Brisbane Australia.
- [18] Gupta, S.; Liu, W.F.; Degrande, G.; Lombaert, G.; Liu, W.N.; *Predition of vibrations induced by underground railway traffic in Beijing*; Journal of Sound and Vibration; Agosto de 2007.
- [19] Kogut, J.; Degrande, G.; Haegeman, W.; Karl, L.; *In situ vibration measurements on the high speed track L2 Brussels-Koln*; 2003.
- [20] Takemiya, H.; *Analyses of wave field from high-speed train on viaduct at shallow/deep soft grounds*; Journal of Sound and Vibration; Dezembro de 2007.

- [21] Thrane, H.; *Prediction of noise and vibration transmission from the citytunnel in Malmo*; Odegaard & Danneskiold-Samsøe - News; Spring 2000.
- [22] Laranjo, A.; Sessão pública: *Plano de urbanização da área envolvente à estação Oriente*; RAVE e REFER; Setembro de 2008.
- [23] Mendes, L.; Costa, A.; *LNEC-SPA, signal processing and analysis tools for civil engineers*; LNEC; Fevereiro de 2007.
- [24] Fidecaro, F.; Licitra, G.; Bertolini, A.; Maccioni, E.; Paviotti, M.; *Interferometric rail roughness measurement at train operational speed*; Journal of Sound and Vibration; Fevereiro de 2006.
- [25] Coelho, C.; *Análise sísmica de estruturas tridimensionais de edifícios de betão armado*; Universidade do Porto Faculdade de Engenharia; Porto 1997.
- [26] Santos, M.; *Filtros*; Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra; Maio de 2008
- [27] Pereira, J.; *Processamento e transmissão de Sinais I – Apontamentos das aulas teóricas – Capítulo 4*; 2006.
- [28] Marcelino, J.; *Propagação e mitigação de vibrações de baixa frequência geradas por comboios de alta velocidade*; Teses e programas de Investigação LNEC; 2005.
- [29] Harris Miller Miller & Hanson Inc; *Summary of European high-speed rail noise and vibration measurements*; Abril de 1996.
- [30] Lombaert, G.; Degrae, G.; *Ground-borne vibration due to static and dynamic axle loads of InterCity and high-speed trains*; Journal of Sound and Vibration; Julho de 2008.
- [31] Morais, V.; Vieira, C.; *Matlab 7 & 6 – Curso completo*; FCA – Editora de informática; Abril de 2006.
- [32] Carvalho, C.; Martins, C.; Nunes, M.; *Circuitos, sensores e actuadores para detecção remota de comboios*; 2005.

Anexos

Anexo 1 - Especificações técnicas do equipamento de medição

Tabela 25 – Equipamento utilizados em campanha de medição

Equipamento	Características Técnicas
Acelerômetros	<p>Tipo: Acelerómetro piezoelétrico ICP</p> <p>Modelo: 393A03</p> <p>Fabricante: PCB PIEZOTRONICS (www.pcb.com)</p> <p>Sensibilidade: ($\pm 5\%$) 1000 mV/g (102 mV/(m/s²))</p> <p>Campo de medição: ± 5 g pk (± 49 m/s² pk)</p> <p>Gama de frequências: ($\pm 5\%$) 0.5-2000 Hz; ($\pm 10\%$) 0.3-4000 Hz; (± 3 dB) 0.2-6000 Hz</p> <p>Resolução de banda larga: (1 a 10000 Hz) 10 μg rms (0.0001 m/s² rms)</p> <p>Ruído espectral:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 Hz – 2 μg/$\sqrt{\text{Hz}}$ 10 Hz – 0.5 μg/$\sqrt{\text{Hz}}$ 100 Hz – 0.2 μg/$\sqrt{\text{Hz}}$ 1000 Hz – 0.1 μg/$\sqrt{\text{Hz}}$ <p>Frequência de ressonância: ≥ 10 kHz</p> <p>Não-linearidade: $\leq 1\%$</p> <p>Sensibilidade transversal: $\leq 7\%$</p> <p>Peso: 210 g</p>
Módulo de condicionamento de acelerômetros	<p>Tipo: Módulo de condicionamento de acelerômetros para chassis SCXI</p> <p>Modelo: SCXI 1530 e SCXI 1531</p> <p>Fabricante: NATIONAL INSTRUMENTS (www.ni.com)</p> <p>Campo de medição: ± 10 V</p> <p>Número de canais: 4 SCXI-1530; 8 SCXI-1531</p> <p>Ganhos programáveis:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ganho 1 - 0 dB Ganho 10 - 20 dB Ganho 100 - 40 dB <p>Desvio: ± 10 ppm/$^{\circ}\text{C}$ maximum</p> <p>Precisão: $\pm 0.5\%$ (antes de calibração), 0.03% (depois de calibração)</p> <p>DC offset: ± 30 mV máximo</p> <p>Desvio do DC offset: ± 20 μV/$^{\circ}\text{C}$ máximo</p> <p>Filtro programável:</p> <ul style="list-style-type: none"> Tipo: 4-pole Bessel lowpass Frequência de corte: 2.5, 5, 10, 20 kHz (programável) <p>Filtro fixo:</p> <ul style="list-style-type: none"> Tipo: 2-pole 0.2 Hz RC highpass

	<p>Condicionamento:</p> <p>Intensidade da excitação dos acelerómetros: 4 mA \pm10%, 24 V compliant</p> <p>Desvio da intensidade de excitação: - 2.5 μA/$^{\circ}$C máximo</p> <p>Ruído da intensidade de excitação: 22 μArms, 80 μApp máximo</p>
Chassis Modular	<p>Tipo: Chassis modular para condicionamento de sinais com baixo ruído</p> <p>Modelo: SCXI 1000 DC</p> <p>Fabricante: NATIONAL INSTRUMENTS (www.ni.com)</p> <p>Número de slots: 4</p> <p>Alimentação: AC ou DC</p>
Placa de aquisição de dados	<p>Tipo: Placa de aquisição de dados - PCMCIA</p> <p>Modelo: DAQ Card -AI - 16XE - 50</p> <p>Fabricante: NATIONAL INSTRUMENTS (www.ni.com)</p> <p>Número de canais: 16 single -ended ou 8 diferencial (programável)</p> <p>Resolução: 16 bits (65536 níveis)</p> <p>Frequência máxima de amostragem: 200 kS/s (1 canal); 17 -20kS/s (garantidos)</p> <p>Ganhos programáveis:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 – Campo de medida: \pm10 V (Bipolar) e 0-10 V (Unipolar) 2 – Campo de medida: \pm5 V (Bipolar) e 0-5 V (Unipolar) 10 – Campo de medida: \pm1 V (Bipolar) e 0-1 V (Unipolar) 100 – Campo de medida: \pm0.1 V (Bipolar) e 0-0.1 V (Unipolar) <p>Erro: \pm27650 ppm da máxima leitura (antes calibração, ganho=1); \pm7.6 ppm (depois da calibração)</p>

Anexo 2 – Características do comboio Alfa Pendular – ETR 460



Figura 51 – Comboio Alfa Pendular

Configuração normal: seis carruagens incluindo duas de tracção.

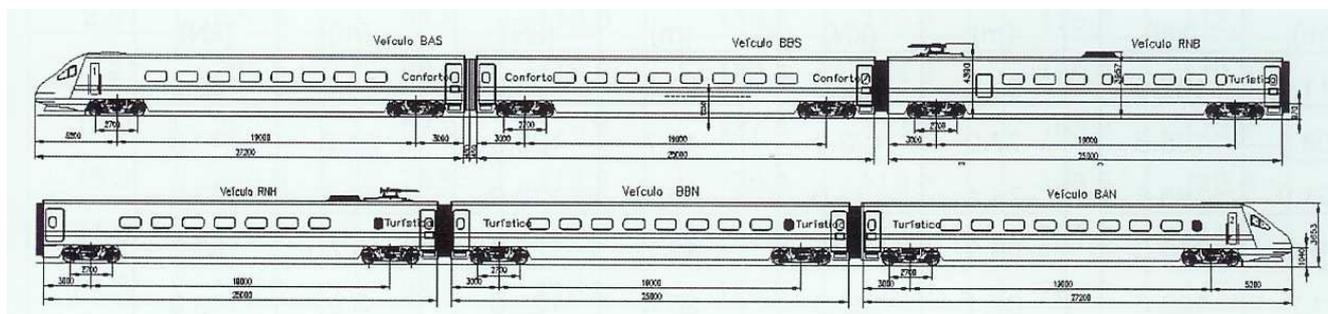


Figura 52 - Características do comboio. Adaptado de Marcelino (2005).

Posição dos eixos e cargas para o comboio Alfa Pendular:

X	F	X	F	X	F	X	F
(m)	(kN)	(m)	(kN)	(m)	(kN)	(m)	(kN)
3.9	139.2	47.9	127.4	78.9	129.4	122.9	134.3
6.6	137.2	50.6	126.4	81.6	127.4	125.6	134.3
22.9	124.5	53.9	140.1	97.9	125.4	128.9	125.4
25.6	123.5	56.6	139.2	100.6	136.2	131.6	126.4
28.9	129.4	72.9	130.3	103.9	128.4	147.9	140.1
31.6	130.3	75.6	131.3	106.6	132.3	150.6	140.1

Anexo 3 – Teste de Filtros

Teste de Filtros: Registo CPA 18h08 — 1V (travessa). Passa-Baixo 500Hz

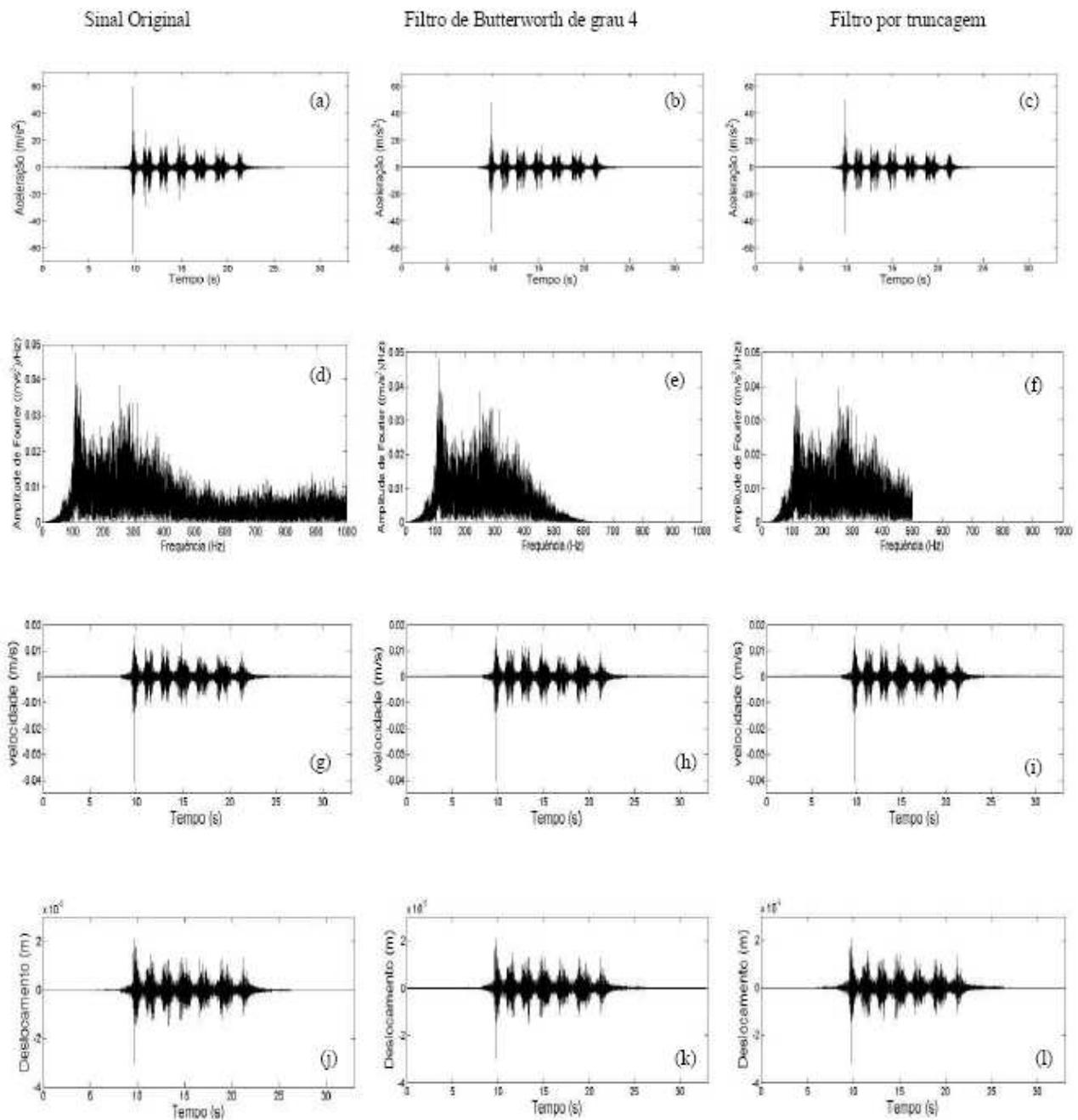


Figura 53 – Registo CPA 18h08 – 1V (Travessa). Passa-baixo 500Hz.

Anexo 4 – Quadro de resultados para cada tipo de comboio e registo ambiente

Tabela 26 – Descritores de vibração: Resultados - Parte I

		Comboio Alfa Pendular das 18h08 (CPA3)				Comboio UTE 14h58 (UTE1)			
		1V	4V	5V	8V	1V	4V	5V	8V
Parâmetros do acelerograma no domínio do tempo	Duração do sinal (s)	11,34	17,26	27,75	25,80	4,60	7,49	28,69	29,03
	Aceleração de pico (m/s ²)	48,06000	0,17960	0,02605	0,00908	63,85000	0,12730	0,01752	0,00898
	Aceleração RMS (m/s ²)	1,722040	0,010966	0,001200	0,001042	1,135159	0,011805	0,003643	0,001909
Parâmetros do acelerograma no domínio da frequência	Amplitude máxima ((m/s ²)/Hz)	5,35E-02	4,98E-04	2,04E-04	1,14E-04	2,35E-02	4,68E-04	1,29E-04	8,35E-05
	Frequência da Amáx (Hz)	112,2	132,9	81,5	11,8	264,7	97,7	154,1	10,3
Parâmetros da velocidade no domínio do tempo	Duração do sinal (s)	11,50	14,06	27,13	24,18	4,53	6,24	26,71	29,08
	Velocidade de pico (m/s)	0,03999	0,00015	0,00003	0,00001	0,04263	0,00027	0,00004	0,00001
	Velocidade RMS (m/s)	1,44E-03	1,65E-05	1,98E-06	1,49E-06	1,02E-03	2,38E-05	5,87E-06	3,26E-06
Parâmetros da velocidade no domínio da frequência	Amplitude máxima ((m/s)/Hz)	6,66E-05	7,91E-07	4,62E-07	1,81E-07	3,38E-05	1,14E-06	3,00E-07	1,16E-07
	Frequência da Amáx (Hz)	112,2	65,6	81,5	40,7	84,5	32,7	66,01	44,8
Parâmetros do deslocamento no domínio do tempo	Duração do sinal (s)	11,50	14,10	26,74	26,62	3,84	6,18	24,68	29,20
	Deslocamento de pico (m)	2,80E-05	2,38E-07	6,37E-08	2,31E-08	6,46E-05	7,03E-07	1,01E-07	3,61E-08
	Deslocamento RMS (m)	1,72E-06	3,96E-08	5,28E-09	2,78E-09	1,94E-06	6,44E-09	1,40E-09	8,35E-10
Parâmetros do deslocamento no domínio da frequência	Amplitude máxima (m/Hz)	8,30E-08	2,31E-09	1,04E-09	5,85E-10	7,21E-08	3,29E-09	8,71E-10	3,76E-10
	Frequência da Amáx (Hz)	112,2	65,6	81,5	50,0	84,5	32,7	66,0	44,8
	Distância ao centro da linha 1	0,934	9,000	30,000	90,000	0,934	9,000	30,000	90,000

Tabela 27 - Descritores de vibração: Resultados - Parte II

		Comboio LOC 16h14 (LOC2)				Ambiente 14h50 (Ambiente 2)			
		1V	4V	5V	8V	1V	4V	5V	8V
Parâmetros do acelerograma no domínio do tempo	Duração do sinal (s)	*	9,35	20,81	24,02	29,79	28,33	29,27	29,62
	Aceleração de pico (m/s ²)	*	0,42450	0,01551	0,01247	0,02738	0,16090	0,01816	0,00821
	Aceleração RMS (m/s ²)	*	0,049812	0,002725	0,001093	0,007450	0,004929	0,003418	0,001886
Parâmetros do acelerograma no domínio da frequência	Amplitude máxima ((m/s ²)/Hz)	*	2,24E-03	1,11E-04	7,76E-05	7,27E-04	2,58E-04	2,62E-04	1,67E-04
	Frequência da Amáx (Hz)	*	78,7	60,1	10,5	0,3	49,4	0,3	0,1
Parâmetros da velocidade no domínio do tempo	Duração do sinal (s)	*	9,54	15,13	19,44	29,49	29,28	27,81	29,41
	Velocidade de pico (m/s)	*	7,22E-04	3,72E-05	1,70E-05	4,11E-05	1,58E-04	3,18E-05	1,58E-05
	Velocidade RMS (m/s)	*	1,00E-04	6,50E-06	1,60E-06	1,88E-05	7,46E-06	4,34E-06	3,28E-06
Parâmetros da velocidade no domínio da frequência	Amplitude máxima ((m/s)/Hz)	*	5,35E-06	3,44E-07	9,51E-08	1,65E-06	6,78E-07	1,56E-07	1,47E-07
	Frequência da Amáx (Hz)	*	78,7	60,1	13,7	55,3	49,4	48,0	52,0
Parâmetros do deslocamento no domínio do tempo	Duração do sinal (s)	*	9,64	13,52	17,45	29,46	29,41	27,46	29,09
	Deslocamento de pico (m)	*	1,93E-06	1,07E-07	3,10E-08	1,14E-07	1,68E-07	9,11E-08	3,63E-08
	Deslocamento RMS (m)	*	2,54E-07	1,88E-08	3,17E-09	5,84E-08	2,08E-08	1,05E-08	8,40E-09
Parâmetros do deslocamento no domínio da frequência	Amplitude máxima (m/Hz)	*	1,28E-08	1,07E-09	2,00E-10	5,28E-09	2,21E-09	5,07E-10	4,77E-10
	Frequência da Amáx (Hz)	*	78,7	60,1	24,9	55,3	49,4	48,0	52,0
	Distância ao centro da linha 1	0,934	9,000	30,000	90,000	0,934	9,000	30,000	90,000

*	Registo defeituoso na travessa
---	--------------------------------

Anexo 5 - Resultados gráficos comboio Alfa Pendular

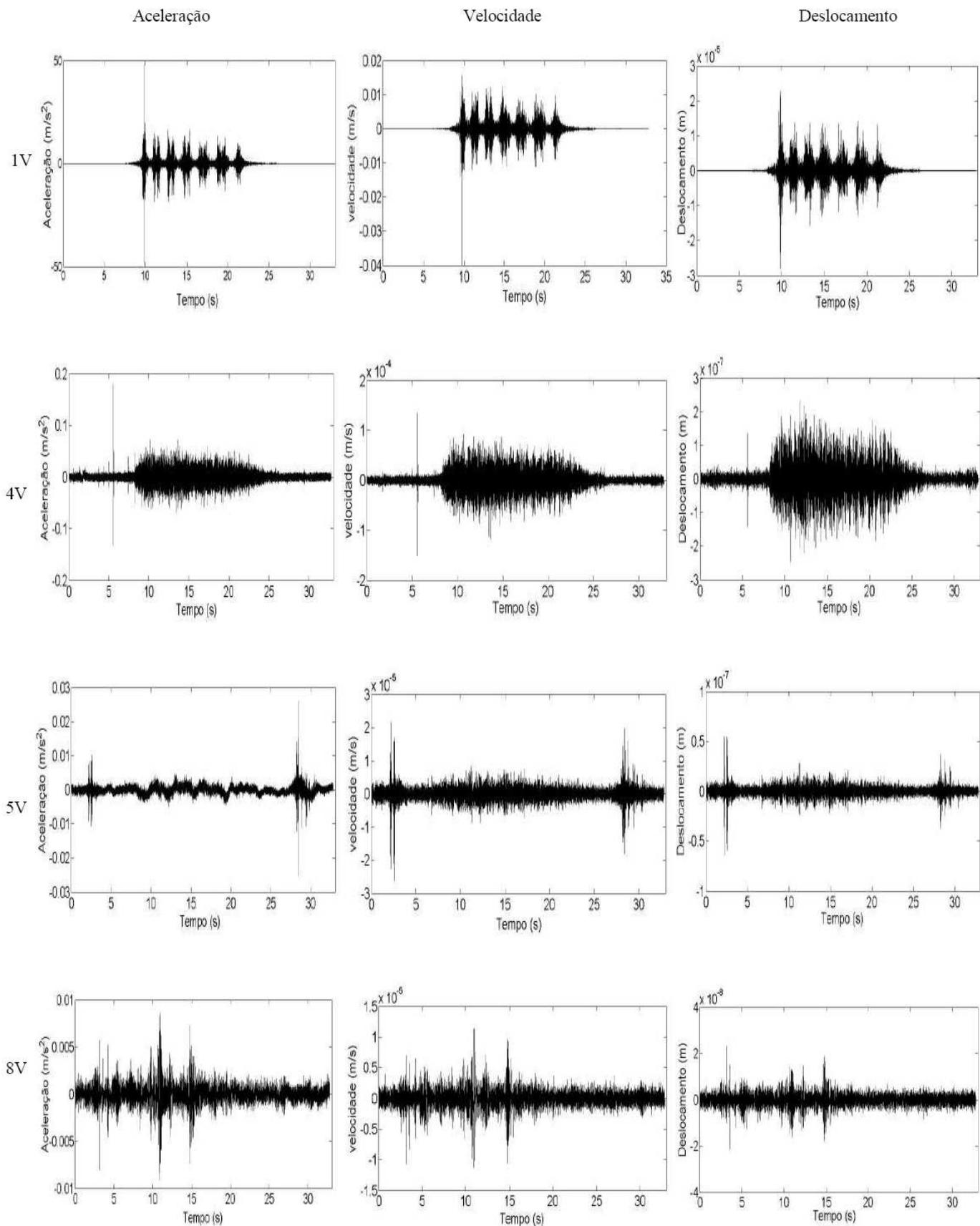


Figura 54 – Resultados Alfa Pendular: aceleração, velocidade e deslocamento.

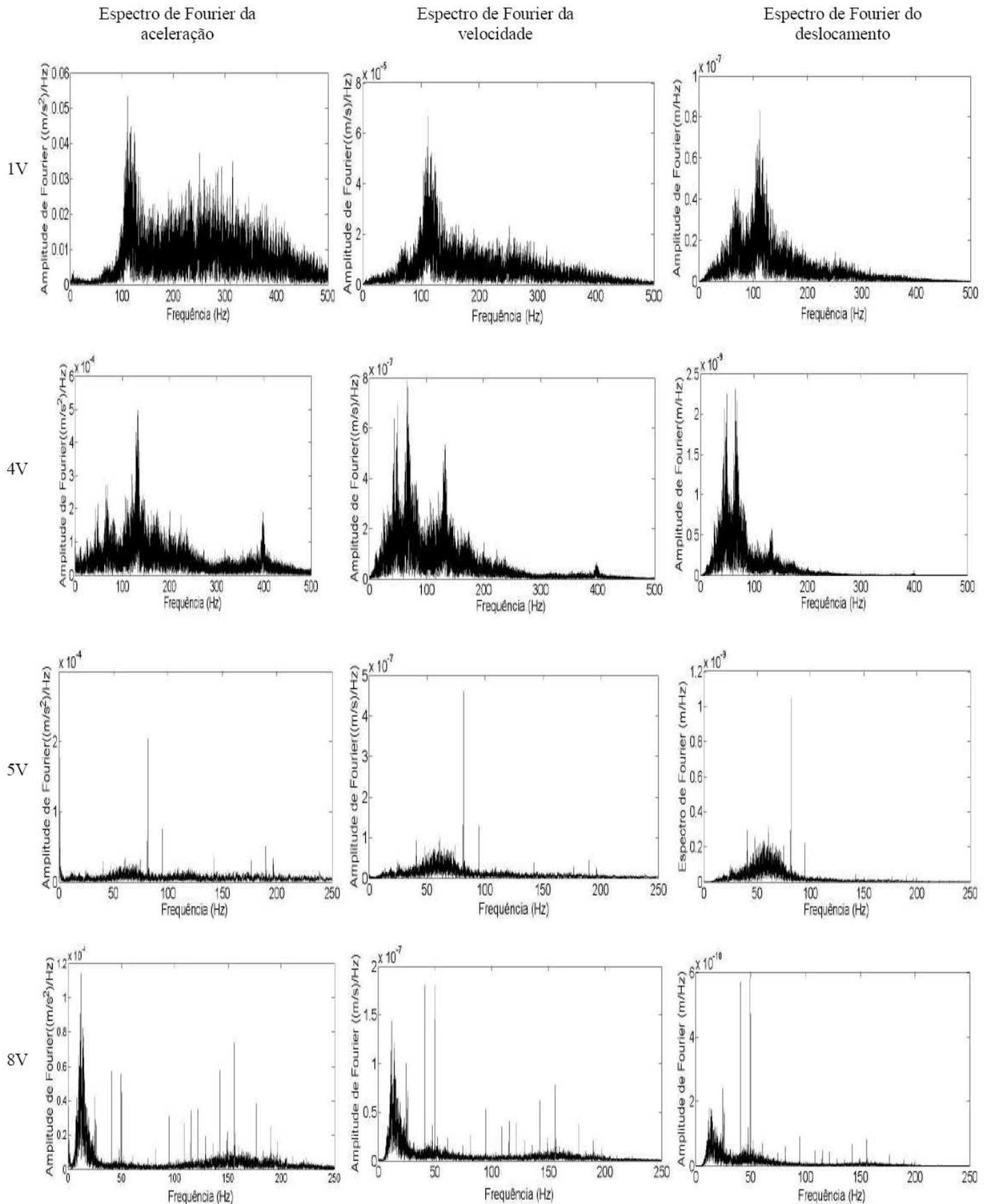


Figura 55 – Resultados Alfa Pendular: espectros de Fourier

Anexo 6 - Resultados gráficos comboio de carruagens e locomotiva

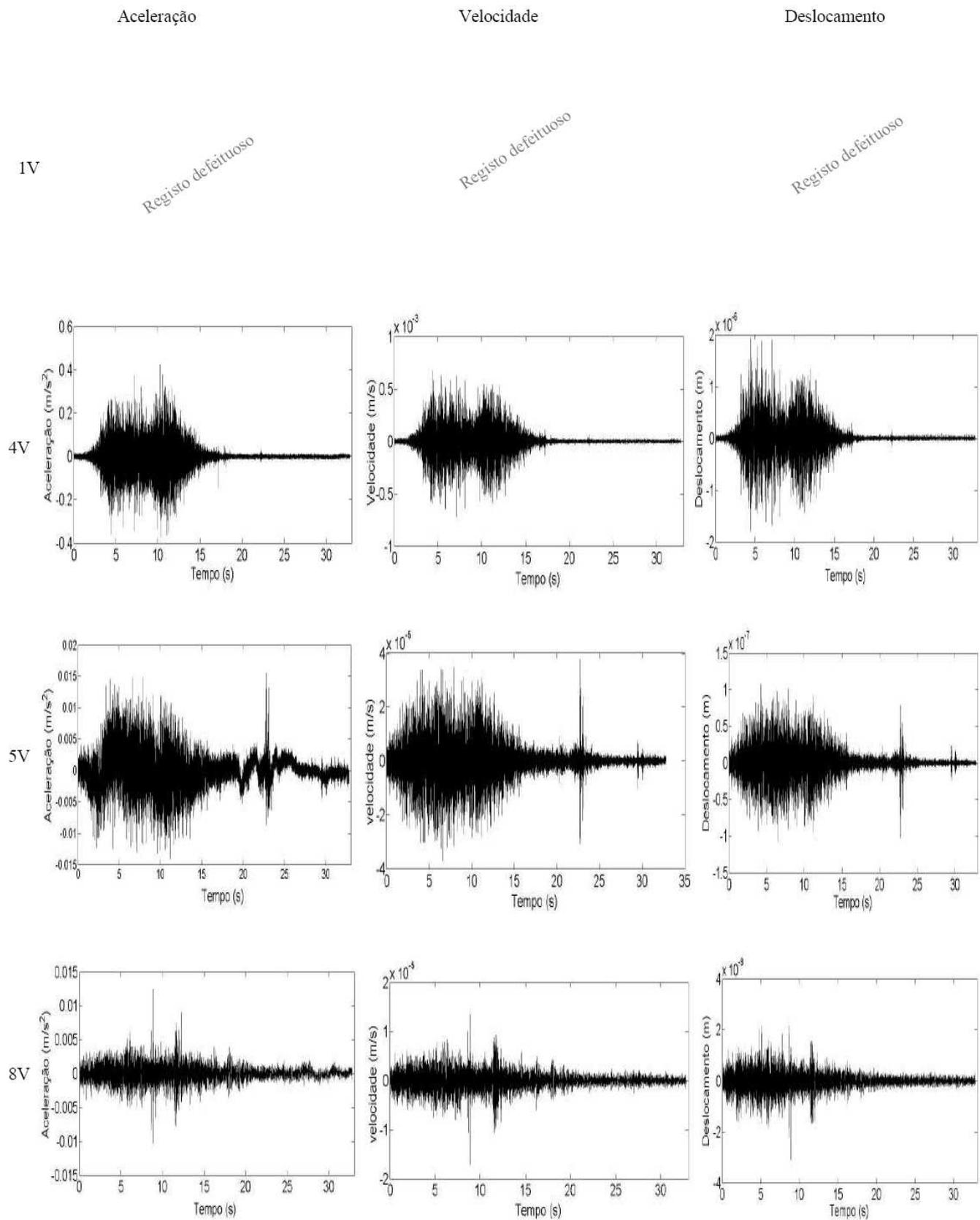


Figura 56 - Resultados comboio de carruagens e locomotiva: aceleração, velocidade e deslocamento.

Espectro de Fourier da
aceleração

Espectro de Fourier da
velocidade

Espectro de Fourier do
deslocamento

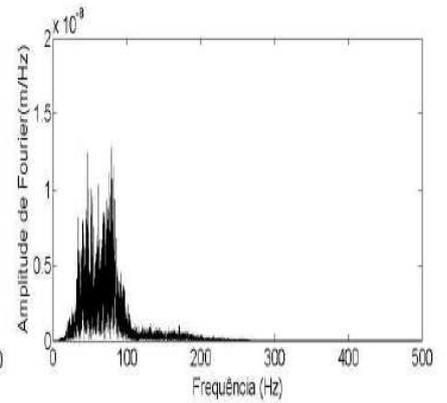
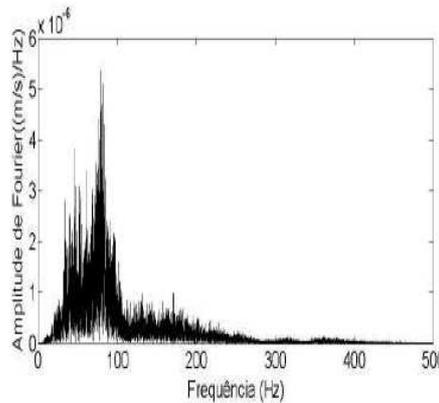
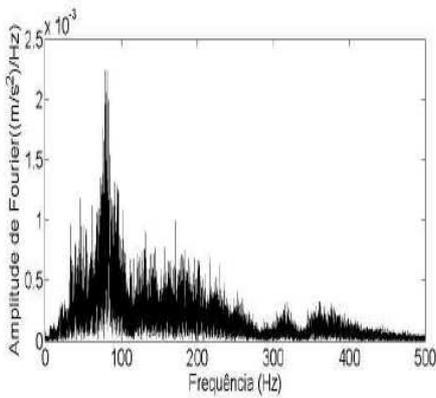
1V

Registro defeituoso

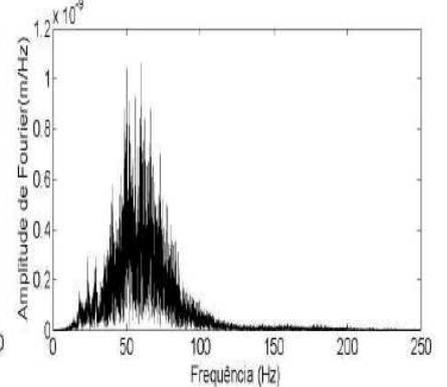
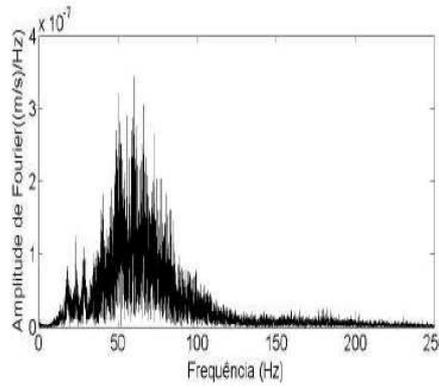
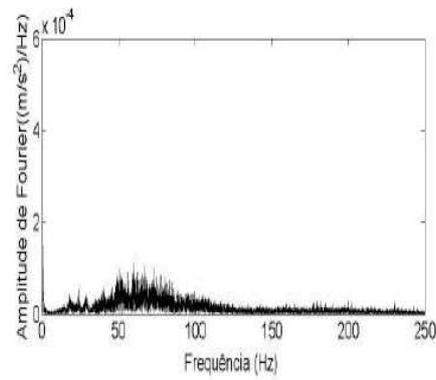
Registro defeituoso

Registro defeituoso

4V



5V



8V

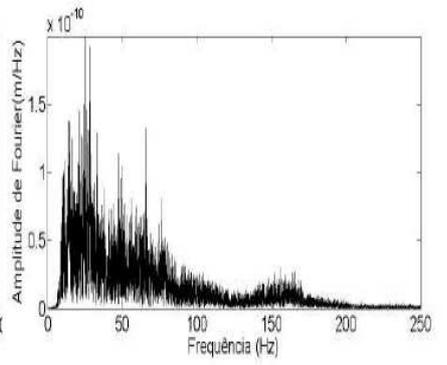
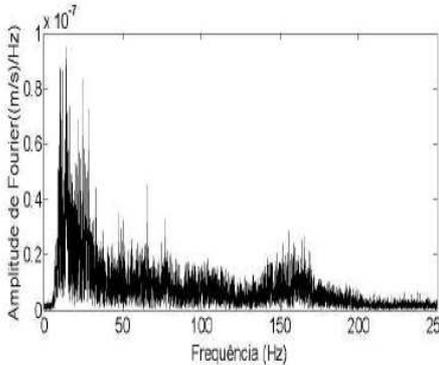
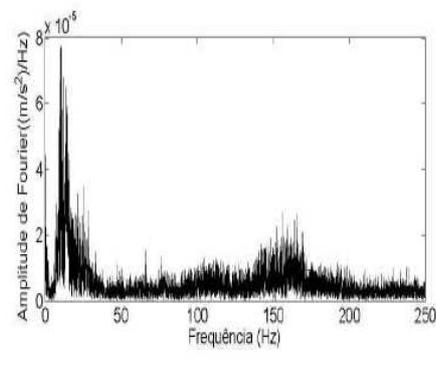


Figura 57 – Resultados comboio de carruagens e locomotiva: espectros de Fourier

Anexo 7 - Resultados gráficos comboio Unidade Tripla Eléctrica

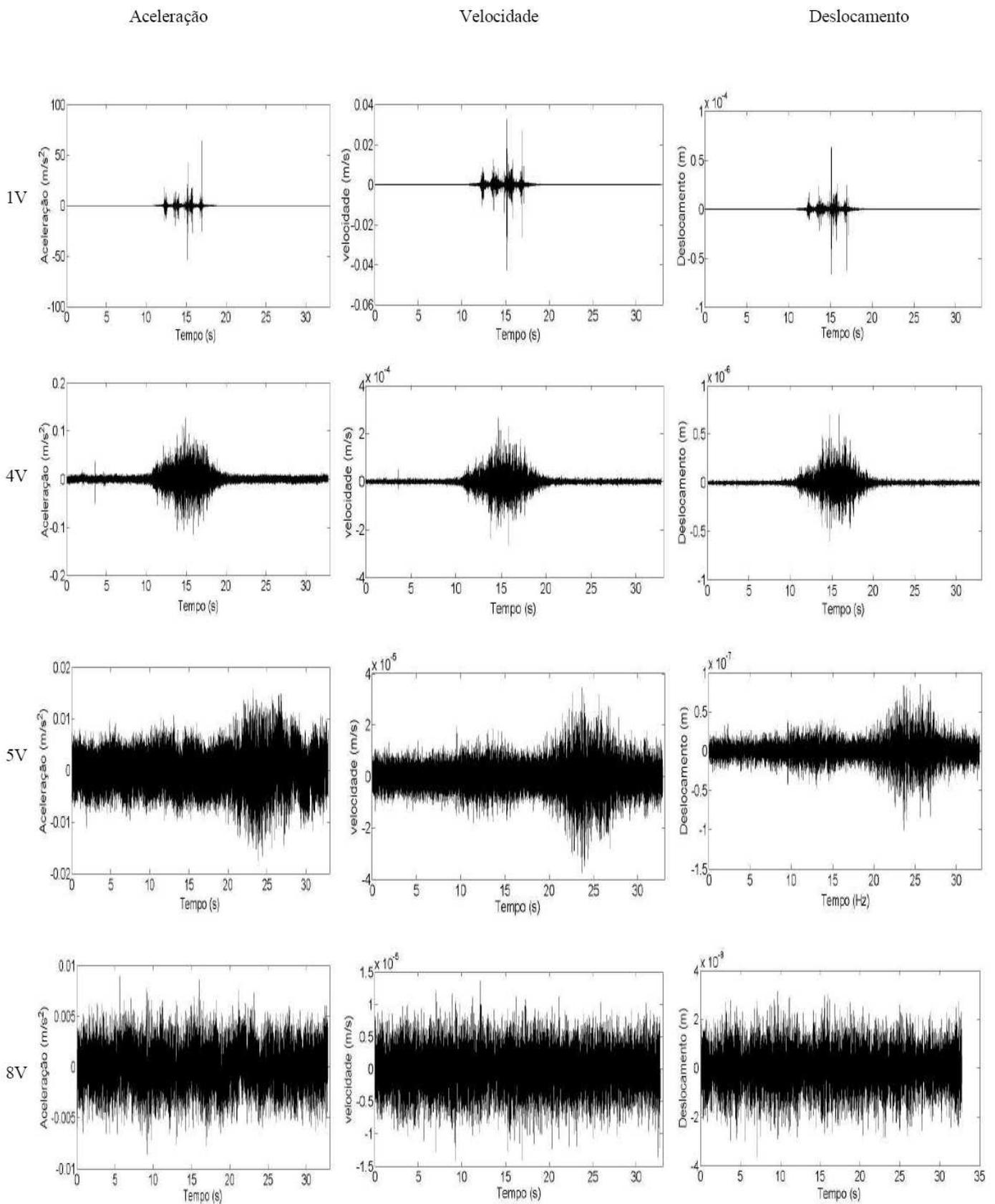


Figura 58 - Resultados Unidade Tripla Eléctrica: aceleração, velocidade e deslocamento.

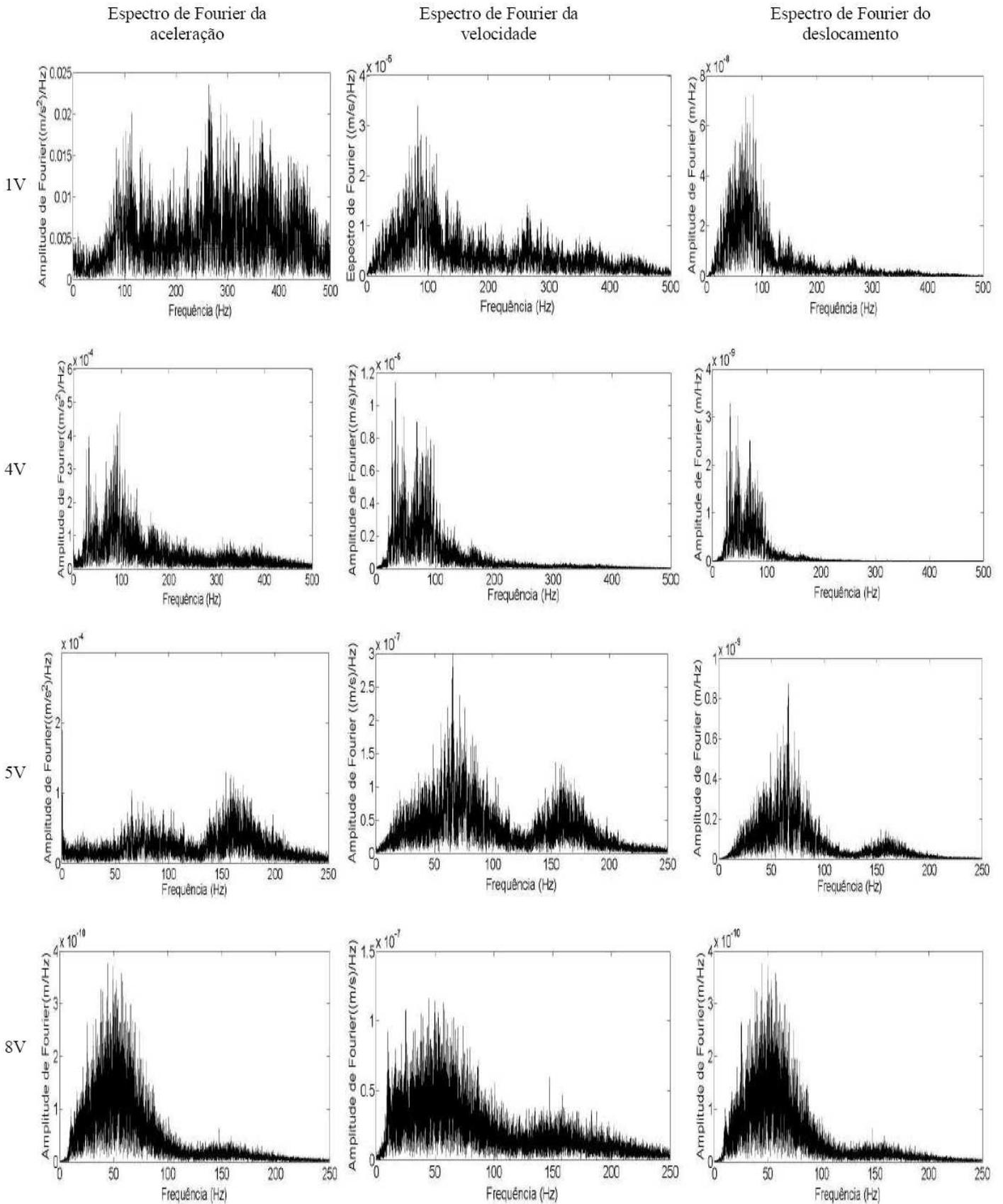


Figura 59 - Resultados Unidade Tripla Eléctrica: espectros de Fourier

Anexo 8 - Resultados gráficos de registo ambiente

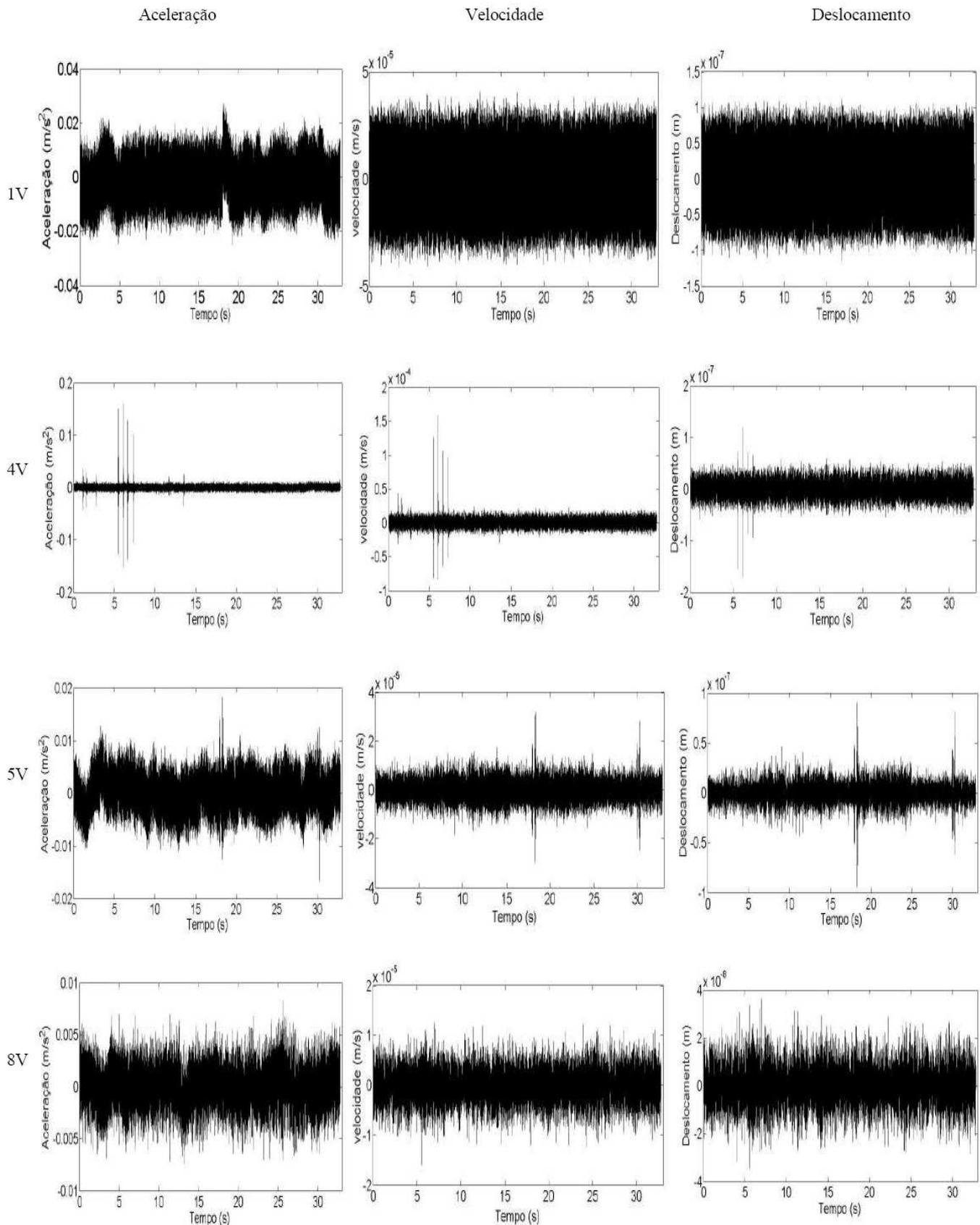


Figura 60 – Resultados ambiente: aceleração, velocidade e deslocamento.

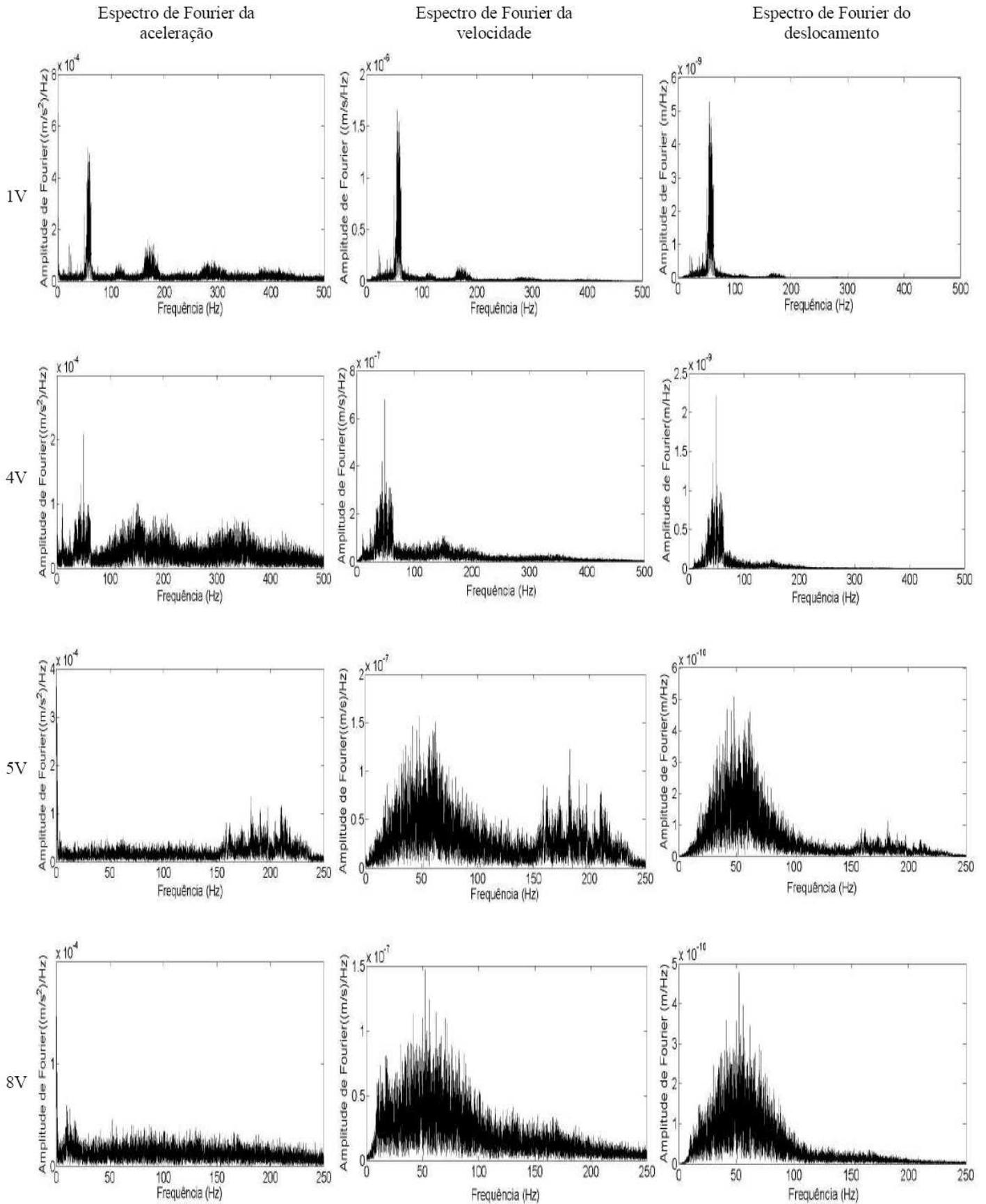


Figura 61 - Resultados ambiente: espectros de Fourier.

