

# **ANÁLISE NUMÉRICA DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR TRÁFEGO FERROVIÁRIO NA VIZINHANÇA DE VIAS DE ALTA VELOCIDADE INTEROPERÁVEIS**

**CÉLIA MARIA PARREIRA ANTÃO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA**

---

Orientador: Professor Doutor Rui Artur Bártolo Calçada

JUNHO DE 2010

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais

*A diferença entre o possível e o impossível está na vontade humana.*

*Louis Pasteur*



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de deixar expresso o meu reconhecimento a todas as pessoas que, de alguma forma contribuíram para a realização desta tese, nomeadamente:

- Ao Professor Doutor Rui Calçada, pela orientação e acompanhamento demonstrado ao longo da execução desta dissertação e a transmissão de conhecimentos para uma boa compreensão deste tema;
- Ao Engenheiro Pedro Costa, pela paciência e dedicação demonstrada na explicação do modelo numérico utilizado e pelo tempo despendido no melhoramento de alguns ficheiros MATLAB, adaptando-os ao caso em estudo;
- Ao Professor Doutor José Couto Marques, pelo desenvolvimento e cedência do programa de geração de malhas, GEN2D, e pelas alterações necessárias para que fosse possível a aplicação neste caso específico;
- Ao Engenheiro Nuno Santos, pelo fornecimento de diversa informação e pelo ficheiro em MATLAB, para a obtenção dos gráficos relativos às velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava de frequência;
- Ao meu namorado Bruno, pela interminável paciência que demonstrou ao longo da execução desta dissertação e a ajuda no processo de execução do ficheiro de MATLAB, geração de comboios aleatórios;
- Aos meus colegas e amigos, que me proporcionaram momentos de descontração durante estes 5 anos de trabalho árduo, mas recompensador, o meu muito obrigado;
- À minha família, principalmente aos meus pais, por me proporcionarem todas as condições para a realização dos meus sonhos e pela confiança depositada em mim, apoiando-me nas minhas opções e decisões.



## **RESUMO**

Actualmente, existe um elevado desenvolvimento nas linhas de alta velocidade em toda a Europa. A utilização de comboios de alta velocidade é um meio altamente competitivo, comparativamente com os outros meios de transporte, como é o caso dos automóveis e mesmo dos aviões, visto que os comboios atingem velocidades elevadas e, conseqüentemente, ocorre uma redução do tempo de percurso. Outra vantagem deste meio de transporte é a nível de poluição, pois o índice por passageiro é menos significativo comparativamente com os concorrentes directos.

Com o desenvolvimento das vias de alta velocidade em todo o mundo, a probabilidade de numa dessas vias circularém vários tipos de comboios é elevada. Por isso, a análise dos efeitos de vibração que são provocados pela passagem de vários tipos de comboios é necessária, para que posteriormente se possa proceder à aplicação de medidas de mitigação, caso necessário.

Nos próximos anos, em Portugal, várias centenas de quilómetros de vias de alta velocidade serão construídas. Com a construção destas vias é possível que ocorra um maior desenvolvimento do país, proporcionando aos seus habitantes uma melhor qualidade de vida. Por esta razão, é essencial que não haja pessoas com a sua qualidade de vida a deteriorar-se, devido às questões de vibração que são provocadas em zonas próximas às vias.

Pela razão referida anteriormente, nesta tese vão ser realizados estudos relativamente aos efeitos dinâmicos, que são provocados pelo tráfego ferroviário de alta velocidade, em pontos próximos da via.

Existem determinados solos de fundação, cujas características conduzem a um fenómeno de amplificação dinâmica das deformações, devido à circulação dos comboios de alta velocidade. Neste sentido, o estudo deste problema é fundamental para o conhecimento da influência das diferentes variáveis envolvidas e posteriormente elabora-se, caso necessário, um plano de medidas de mitigação.

Os estudos são levados a cabo utilizando um modelo de cálculo, desenvolvido na FEUP, designado de 2.5D. Este modelo tem carácter tridimensional, simulando as várias estruturas envolvidas, o comboio e a via-férrea. É um modelo numérico cuja simulação é de fácil aplicação, caso as variáveis envolvidas estejam bem caracterizadas.

As análises realizadas vão ser executadas simulando comboios aleatórios articulados, em que os modelos dos comboios e de carga obedecem ao High Speed Load Model (HSLM). Esta análise é realizada obtendo valores das velocidades e deslocamentos. Para uma melhor observação dos acontecimentos relativamente à evolução das frequências, vão ser representadas velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência.

**PALAVRAS-CHAVE:** alta velocidade, linhas interoperáveis, vibração induzida, propagação de vibrações, análise numérica.



## **ABSTRACT**

Currently, there is a large development of high-speed lines across all Europe. The use of high speed trains is highly competitive compared with other means of transport such as cars and even airplanes, as the trains reach high speeds consequently there is a reduction of travel time. Another advantage of this mode of transport is the level of pollution, because the rate per passenger is less significant compared to the direct competitors.

With the development of high-speed routes in the world, the likelihood of these pathways in various types of moving trains is high. Therefore, the analysis of the effects of vibration which are caused by the passage of various types of trains is necessary, so that later we can proceed to the application of mitigation measures, if necessary.

In coming years, in Portugal, several hundred kilometers of high speed roads will be built. With the building of these railways it is possible that occurs a bigger development of the country, giving to its inhabitants a better quality of life. For this reason it is essential that there aren't people with their quality of life deteriorated, due to issues of vibration that are triggered in areas close to railways.

For the reason mentioned above, this thesis will study the dynamic effects, which are caused by high speed rail in places located near the track.

There are certain soils of the foundation, whose characteristics lead to a phenomenon of dynamic amplification of the deformations due to the passage of high-speed trains. In this sense, the study of this problem is fundamental for understanding the influence of different variables involved and then it draws up, if necessary, a plan of mitigation measures.

The studies are carried out using a calculation model developed at FEUP (Faculty of Engineering of the University of Porto), known as 2.5D. This model has three-dimensional character, simulating the various structures involved, the train and the railway. It is a numerical simulation which is easy to apply, if the variables involved are well characterized.

The analysis made will be performed by simulating random jointed trains, where the models of trains and of freight obey to the High Speed Load Model (HSLM). This analysis is carried out by obtaining values of velocities and displacements. For better observation of events about the evolution of frequencies will be represented medium quadratic speeds in bands of third octave frequency.

**KEY WORDS:** high speed, interoperable lines, ground borne vibration, propagation of vibrations, numerical analysis.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. SITUAÇÃO DA ALTA VELOCIDADE EM PORTUGAL .....	4
1.3. OBJECTIVOS .....	5
1.4. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS .....	6
<b>2. A VIBRAÇÃO E OS SEUS EFEITOS</b> .....	7
2.1. INTRODUÇÃO .....	7
2.2. PROPAGAÇÃO DA VIBRAÇÃO INDUZIDA NO TERRENO PELO TRÁFEGO FERROVIÁRIO .....	8
2.2.1. FONTE DE VIBRAÇÃO .....	8
2.2.2. PROPAGAÇÃO .....	13
2.2.3. RECEPTOR .....	15
2.2.3.1. Ser humano .....	16
2.2.3.2. Equipamento sensível .....	17
2.2.3.3. Danos em edifícios .....	18
2.3. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO .....	18
2.3.1. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO JUNTO À FONTE .....	18
2.3.2. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO NO TRAJECTO DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE VIBRAÇÃO .....	19
2.3.3. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO NO RECEPTOR .....	21
<b>3. ANÁLISE NUMÉRICA</b> .....	23
3.1. TIPOS DE ANÁLISE .....	23
3.2. MODELO 2.5D .....	23
3.2.1. METODOLOGIA .....	24
3.2.2. SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS DA VIA .....	27
3.2.3. APLICAÇÃO DAS CARGAS MÓVEIS NO MODELO .....	28
3.2.4. INTERACÇÃO COMBIO-VIA .....	28

<b>4. MODELAÇÃO DA REDE FÉRREA</b> .....	31
<b>4.1. MATERIAL CIRCULANTE EXISTENTE</b> .....	31
4.1.1. COMBOIOS ARTICULADOS .....	31
4.1.1.1. AVG (Automotriz de Grande Velocidade) .....	31
4.1.1.2. Thalys 2 .....	32
4.1.1.3. Eurostar .....	33
4.1.2. COMBOIOS CONVENCIONAIS.....	33
4.1.2.1. ICE ( <i>InterCity Express</i> ).....	33
4.1.2.2. ETR-500 ( <i>Eletro Treno Rapido 500</i> ).....	34
4.1.2.3. Virgin.....	34
4.1.2.4. Zefiro.....	34
4.1.2.5. Alfa Pendular .....	35
4.1.3. COMBOIOS REGULARES .....	35
4.1.3.1. Talgo-200.....	35
<b>4.2. MODELO DE CARGA HSLM</b> .....	36
<b>4.3. MODELOS DOS COMBOIOS E DE CARGA</b> .....	37
<b>4.4. GEOMETRIA</b> .....	38
4.4.1. CARRIL .....	40
4.4.2. TRAVESSAS .....	44
4.4.3. CARACTERÍSTICAS DO SOLO .....	45
4.4.3.1. Aterro .....	45
4.4.3.2. Solo 1.....	46
4.4.3.3. Solo 2.....	47
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	49
<b>5.1. PONTOS ANALISADOS</b> .....	49
<b>5.2. PERFIL DE IRREGULARIDADES</b> .....	50
<b>5.3. A IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DO PERFIL DE IRREGULARIDADES</b> .....	51
5.3.1. PERCENTAGEM DE INFLUÊNCIA DO PERFIL DE IRREGULARIDADES PARA A COTA DE 15 M.....	51
5.3.2. PERCENTAGEM DE INFLUÊNCIA DO PERFIL DE IRREGULARIDADES PARA A COTA DE 16,5 M.....	52
5.3.3. PERCENTAGEM DE INFLUÊNCIA DO PERFIL DE IRREGULARIDADES EM PROFUNDIDADE .....	52
<b>5.4. DESLOCAMENTOS VERTICAIS</b> .....	53
5.4.1. ANÁLISE NO CARRIL PARA OS COMBOIOS EXTREMOS .....	54

5.4.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS DOS COMBOIOS ALEATÓRIOS E OS EXTREMOS .....	54
5.4.2.1. Percentagem de deslocamentos verticais em intervalos .....	54
5.4.2.2. Deslocamentos verticais máximos, mínimos e médios .....	57
5.4.2.3. Variação dos deslocamentos verticais .....	59
<b>5.5. VELOCIDADES .....</b>	<b>60</b>
5.5.1. ANÁLISE DE PONTOS .....	60
5.5.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS DOS COMBOIOS ALEATÓRIOS E OS EXTREMOS .....	62
5.5.2.1. Percentagem de velocidades em intervalos .....	62
5.4.2.2. Velocidades máximas, mínimas e médias .....	64
5.4.2.3. Variação das velocidades .....	66
<b>5.6. VELOCIDADE EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA.....</b>	<b>67</b>
5.6.1. PONTO 1 .....	67
5.6.2. PONTO 2 .....	68
5.6.3. PONTO 3 .....	69
5.6.4. PONTO 4 .....	69
5.6.5. PONTO 5 .....	70
5.6.6. PONTO 6 .....	71
5.6.7. PONTO 7 .....	71
5.6.8. PONTO 8 .....	72
5.6.9. PONTO 9 .....	73
5.6.10. PONTO 10 .....	73
5.6.11. PONTO 11 .....	74
5.6.12. PONTO 12 .....	74
5.6.13. PONTO 13 .....	75
5.6.14. PONTO 14 .....	75
<b>5.7. VELOCIDADES QUADRÁTICAS MÉDIAS EM BANDAS DE 1/3 DE OITAVA DA FREQUÊNCIA .....</b>	<b>76</b>
5.7.1. PONTO 1 .....	76
5.7.2. PONTO 2 .....	77
5.7.3. PONTO 3 .....	77
5.7.4. PONTO 4 .....	78
5.7.5. PONTO 5 .....	78
5.7.6. PONTO 6 .....	79
5.7.7. PONTO 7 .....	80

5.7.8. PONTO 8.....	80
5.7.9. PONTO 9.....	81
5.7.10. PONTO 10 .....	81
5.7.11. PONTO 11 .....	82
5.7.12. PONTO 12 .....	82
5.7.13. PONTO 13 .....	83
5.7.14. PONTO 14 .....	83

<b>6. CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>85</b>
<b>6.1. CONCLUSÕES.....</b>	<b>85</b>
<b>6.2. PERFIL DE IRREGULARIDADES .....</b>	<b>87</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Comboio “Foguete” .....	2
Fig. 1.2 - Comboio Bala, Série 0 .....	2
Fig. 1.3 - Países com Linhas de Alta Velocidade.....	3
Fig. 1.4 - Previsão para alta velocidade na Europa em 2025 .....	3
Fig. 1.5 - Rede Ferroviária de Alta Velocidade .....	4
Fig. 1.6 - Procura estimada das linhas de AV.....	5
Fig. 2.1 – Propagação da vibração em edifícios .....	7
Fig. 2.2 – Geração e propagação das vibrações por linhas de superfície.....	8
Fig.2.3 – Representação esquemática da via férrea .....	8
Fig.2.4 – Esquema representativo do contacto carril/roda numa curva em escala exagerada .....	9
Fig.2.5 – Esquema das vibrações produzidas pelo contacto roda/carril.....	9
Fig.2.6 – Esquema representativo <i>bogies</i> no material articulado .....	10
Fig.2.7 – Partes principais de um <i>bogie</i> de um comboio .....	10
Fig.2.8 – Fontes de geração de vibração e respectivos comprimentos de onda segundo Esveld.....	11
Fig.2.9 – Modos de propagação das vibrações no solo .....	13
Fig.2.10 – Deformação do meio pelo efeito da onda P .....	13
Fig.2.11 – Deformação do meio pelo efeito da onda S.....	13
Fig.2.12 – Deformação do meio pelo efeito da onda R .....	14
Fig.2.13 – O corpo humano e a vibração.....	16
Fig.2.14 – Para averiguar as conseqüências das vibrações para a saúde humana .....	16
Fig.2.15 – Curvas genéricas para equipamentos sensíveis .....	17
Fig.2.16 – Melhoramento do solo de fundação com estacas de brita .....	19
Fig.2.17 – Reforço da plataforma e do aterro .....	19
Fig.2.18 – Trincheiras.....	20
Fig.2.19 – Como se propagam as ondas nas trincheiras .....	20
Fig.2.20 – Colocação de blocos de vibração .....	21
Fig.3.1 – Esquema representativo do procedimento do MEF 2.5D .....	24
Fig.3.2 – Modelo 2.5D .....	25
Fig.3.3 – Elementos infinitos 2.5D: referencial global, à esquerda; referencial local, à direita .....	26
Fig.3.4 – Modelo do carril: real, à esquerda; modelo 2.5D, à direita .....	27
Fig.4.1 - Comboio articulado .....	31

Fig.4.2 - AVG .....	32
Fig.4.3 - Thalys 2 .....	32
Fig.4.4 - Eurostar .....	33
Fig.4.5 - Comboio convencional .....	33
Fig.4.6 - ICE .....	33
Fig.4.7 - ETR-500 .....	34
Fig.4.8 - Virgin .....	34
Fig.4.9 - Zefiro 250+ .....	35
Fig.4.10 - Alfa Pendular .....	35
Fig.4.11 - Comboio regular .....	35
Fig.4.12 - Talgo 200.....	36
Fig.4.13 - Modelo de cargas HSLM-A .....	37
Fig.4.14 - Comboio modelo .....	37
Fig.4.15 – Esquema do caso em estudo .....	39
Fig.4.16 – Simplificação do corte da via.....	39
Fig.4.17 – Geometria do caso em estudo .....	39
Fig.4.18 – Geração da malha .....	40
Fig.4.19 – Equipamento de inspeção do desgaste ondulatório dos carris.....	41
Fig.4.20 – Elemento simples da interação veículo/estrutura .....	41
Fig.4.21 – Carril tipo UIC60 .....	42
Fig.4.22 – Quotas de mercado comparando os anos de 2003 e o previsto para 2030 .....	43
Fig.4.23 – Modelo de ligação do carril à estrutura da via férrea .....	44
Fig.4.24 – Tipos de travessas de betão: monobloco, em cima; e biblocos, em baixo .....	45
Fig.4.25 – Esquema de uma via balastrada em perfil transversal .....	45
Fig.4.26 – Massas suspensas, à esquerda, massas não suspensas, à direita .....	46
Fig.5.1 – Pontos analisados .....	49
Fig.5.2 – Perfil de irregularidades.....	50
Fig.5.3 – Influência da consideração do perfil de irregularidades .....	51
Fig.5.4 – Percentagem de influência das irregularidades nos valores dos deslocamentos a uma cota 15 m.....	51
Fig.5.5 – Percentagem de influência das irregularidades nos valores dos deslocamentos a uma cota 16,5 m.....	52
Fig.5.6 – Percentagem de influência das irregularidades nos valores dos deslocamentos em profundidade.....	53

Fig.5.7 – Representação dos picos de deslocamentos verticais em função do comprimento do comboio.....	53
Fig.5.8 – Deslocamentos verticais em função do tempo, no carril, para o caso dos comboios extremos.....	54
Fig.5.9 – Percentagem de deslocamento vertical que se situam dentro e fora, do intervalo de valores definido pelos comboios extremos .....	56
Fig.5.10 – Deslocamentos verticais à cota 15 m. ....	58
Fig.5.11 – Deslocamentos verticais à cota 15 m, a partir de 4 m de distância do eixo de simetria. ....	58
Fig.5.12 – Deslocamento verticais à cota 16,5 m. ....	59
Fig.5.13 – Deslocamento verticais ao longo da profundidade na linha do carril. ....	59
Fig.5.14 – Velocidades ao longo do tempo, no carril. ....	61
Fig.5.15 – Variação do diagrama de velocidades comparando o ponto no aterro, à esquerda e o ponto mais afastado do eixo de simetria, à direita. ....	61
Fig.5.16 – Percentagem de velocidade que se situam dentro e fora, do intervalo de valores definido pelos comboios extremos .....	63
Fig.5.17 – Velocidades à cota 15 m.....	65
Fig.5.18 – Deslocamentos à cota 15 m, a partir de 4 m de distância do eixo de simetria.....	65
Fig.5.19 – Velocidades à cota 16,5 m.....	66
Fig.5.20 – Velocidades ao longo da profundidade na linha do carril. ....	66
Fig.5.21 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 1.....	67
Fig.5.22 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 2.....	68
Fig.5.23 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 3.....	69
Fig.5.24 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 4.....	69
Fig.5.25 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 5.....	70
Fig.5.26 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 6.....	71
Fig.5.27 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto7.....	71
Fig.5.28 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 8.....	72
Fig.5.29 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 9.....	73

Fig.5.30 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 10. ....	73
Fig.5.31 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 11. ....	74
Fig.5.32 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 12. ....	74
Fig.5.33 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 13. ....	75
Fig.5.34 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 14. ....	75
Fig.5.35 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 1. ....	76
Fig.5.36 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 2. ....	77
Fig.5.37 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 3. ....	77
Fig.5.38 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 4. ....	78
Fig.5.39 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 5. ....	78
Fig.5.40 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 6. ....	79
Fig.5.41 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 7. ....	80
Fig.5.42 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 8. ....	80
Fig.5.43 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 9. ....	81
Fig.5.44 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 10. ....	81
Fig.5.45 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 11. ....	82
Fig.5.46 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 12. ....	82
Fig.5.47 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 13. ....	83
Fig.5.48 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 14. ....	83

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Factores relacionados com a fonte de vibração .....	12
Quadro 2 – Factores relacionados com a propagação de vibração .....	15
Quadro 3 – Características das curvas genéricas de limites de vibração para os equipamentos sensíveis.....	17
Quadro 4 – Características dos comboios com as dimensões extremas .....	37
Quadro 5 – Tipos de bitolas e as suas dimensões .....	43
Quadro 6 – Coordenadas dos pontos analisados .....	49
Quadro 7 – Valores de $\omega$ e $\lambda$ .....	50
Quadro 8 – Valores dos deslocamentos verticais máximos, mínimos e média (relativamente as comboios aleatórios) e deslocamentos para as dimensões máximas e mínimas dos comboios.....	57
Quadro 9 – Valores dos deslocamentos verticais máximos e mínimos e a variação de valores de todos os comboios .....	60
Quadro 10 – Valores das velocidades máximos, mínimos e média (relativamente as comboios aleatórios) e deslocamentos para as dimensões máximas e mínimas dos comboios. ....	64
Quadro 11 – Valores das velocidades máximos e mínimos e a variação de valores de todos os comboios .....	67



## SÍMBOLOS

$G$  - Módulo de distorção

$\rho$  - Massa volúmica

$v$  - Velocidade de circulação

$V_S$  - Velocidade das ondas S

$S$  - Densidade espectral de potência

$\omega$  - Frequência angular

$S(\omega)$  - Função densidade espectral de potência

$\lambda$  - Comprimento de onda

$\theta_n$  - Ângulo de fase

$\Delta\omega$  - Intervalo de frequência

$Z(x)$  - Função de irregularidades

$L$  - Comprimento do comboio

$d$  - Distância entre o eixo dianteiro e traseiro

$d_{BA}$  - Espaçamento entre eixos numa *bogie*

$d_{BS}$  - Distância entre os centros de massa das *bogies* de carruagens contíguas

$D$  - Comprimento da carruagem

$D_{IC}$  - Comprimento da carruagem intermédia em comboios regulares

$e_c$  - Distância entre os centros de massa das *bogies* em carruagens de extremidade de comboios regulares

$E$  - Módulo de Elasticidade

$P$  - Carga por eixo

$P_{WS}$  - Peso por eixo das rodas e suspensões

$N$  - Número de carruagens intermédias

$B$  - Matriz das derivadas das funções de forma

$N$  - Matriz das funções de forma

$p_n$  - Forças nodais

$u_n$  - Deslocamentos nodais

$K$  - Matriz de rigidez

$M$  - Matriz da massa

## **ABREVIATURAS**

AEIF - Associação Europeia para a Interoperabilidade Ferroviária

AGV - Automotriz de Grande Velocidade

AV - Alta Velocidade

EN - Norma Europeia

ETR - Elettro Treno Rapido

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HSLM - High Speed Load Model

ICE - InterCity Express

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

UIC - Union International des Chemins de Fer

RAVE - Rede Ferroviária de Alva velocidade, S.A.

REFER - Rede Ferroviária Nacional, EP

TMEF - Transformada do Método dos Elementos Finitos

MEF - Método dos Elementos Finitos.





# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

O comboio de alta velocidade é uma forte aposta no âmbito dos meios de transporte, tanto de mercadorias, como de pessoas, comparativamente com os outros meios (rodoviário, aéreo ou marítimo). Atinge velocidades consideradas elevadas no transporte de passageiros, associado a um elevado nível de conforto e de segurança de circulação, reduzido tempo de viagem.

O transporte ferroviário é um meio de fácil e rápida movimentação de pessoas e bens entre países, como afirma a RAVE, ‘A Alta Velocidade Ferroviária potencia a coesão territorial, desenvolvimento sócio-económico e equilíbrio energético’ (RAVE, 2008). A escolha deste meio de transporte, tem-se revelado um importante instrumento para o desenvolvimento sustentável dos países, pois este emite menos gases nocivos para a atmosfera, tem um baixo consumo energético e é um meio alternativo ao consumo de petróleo.

Esta necessidade de transportar pessoas e mercadorias entre cidades num espaço curto de tempo, foi a principal causa para a construção da primeira rede de transportes ferroviários, durante a Revolução Industrial. Devido às vantagens deste novo sistema de transportes, houve um forte período de expansão nas redes ferroviárias por todo o mundo. A extensão das linhas férreas, em 1850 era de 32.000 km, estendendo-se a 1.260.000 km passado um século a um nível mundial. A primeira viagem realizada em Portugal data de 28 de Outubro de 1856, viagem de pequena extensão (37 km entre Lisboa e o Carregado). Contudo, a conclusão desta rede ferroviária nacional demorou mais de meio século.

Um dos comboios que marcou a história nacional foi o comboio “Foguete”, que nos anos cinquenta fazia a ligação entre Lisboa e Porto. A sua inauguração foi feita no ano de 1954. Foi considerado um luxo para a época, pois já possuía ar condicionado e um serviço de refeições servidas no lugar. Era constituído por uma automotora Fiat, possuindo apenas carruagens de primeira classe e nele viajava sempre uma brigada de mecânicos, para a resolução de possíveis avarias durante o percurso. A duração desta viagem entre as estações de Santa Apolónia e Campanhã era de quatro horas e trinta minutos (RAVE, 2010a).



Fig.1.1 – Comboio “Foguete”, (REFER, 2010a).

Foi no Japão que surgiu a primeira linha de alta velocidade, a 1 de Outubro de 1964, chamada de Linha Tokaido entre Tóquio e Osaka, numa extensão de 515 km. Houve a necessidade da criação desta linha, pois as infra-estruturas existentes naquela altura já se encontravam inadequadas para o transporte crescente do número de pessoas e mercadorias. Com a construção desta linha era possível fazer a ligação entre as duas cidades em três horas e dez minutos, sensivelmente metade do tempo que era necessário anteriormente. O comboio atingia a velocidade de 210 km/h e este serviço ferroviário foi designado no Ocidente, como ‘Comboio Bala’ (Antunes, 2004). O nome do comboio cristalizou-se, devido ao facto das locomotivas Shinkansen terem um aspecto semelhante a uma bala, devido à sua forma arredondada e por atingir altas velocidades.



Fig.1.2 – Comboio Bala, Série 0, (WAPEDIA, 2010).

A primeira linha de alta velocidade na Europa foi inaugurada no ano de 1981, em França, fazendo a ligação entre as cidades de Paris e Lyon, em duas horas. Os estudos para a construção desta linha começaram a ser feitos no ano 1966, depois do grande sucesso que foi obtido no Japão, com o chamado ‘Comboio Bala’ (Antunes, 2004).

O primeiro comboio de alta velocidade a ser desenvolvido na Europa foi o comboio italiano designado de “Direttissima”, que fazia a ligação entre Roma e Florença, em 1978 sendo a duração da viagem de noventa minutos, num percurso de 254 km, atingindo a velocidade de 250 km/h (RAVE, 2010a).

É possível a incrementação da velocidade de circulação nas vias de alta velocidade, garantindo os critérios de segurança e o conforto aos passageiros, devido ao crescente desenvolvimento tecnológico e um melhor conhecimento dos diferentes domínios que envolvem a alta velocidade.

Nas últimas décadas, na Europa e na Ásia, estão a ser feitos esforços para que a velocidade em serviço atinja os 350 km/h, modernizando as redes ferroviárias e construindo novas linhas de alta velocidade. A Bélgica, Espanha, Holanda e Japão, são exemplo disso mesmo.

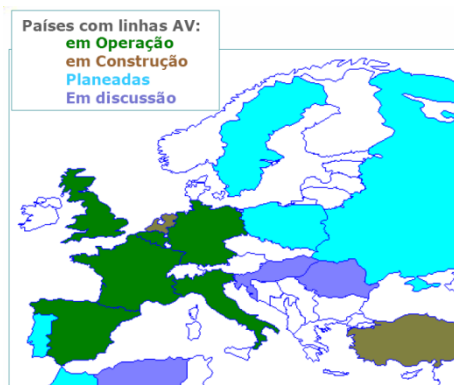


Fig.1.3 – Países com Linhas de Alta Velocidade (Fonte: RAVE, 2008).

Desde a primeira linha de alta velocidade e da execução do primeiro comboio, tem ocorrido um grande desenvolvimento nestas áreas, tornando o mundo mais próximo e, conseqüentemente, aproximando culturas distantes. Na Figura 1.4, encontra-se representada uma previsão para o ano de 2025, da rede de alta velocidade na Europa. Neste âmbito, Portugal tem feito grandes esforços para conseguir modernizar e reabilitar a rede ferroviária existente, para que seja possível a implementação da rede de alta velocidade, fazendo a ligação com Espanha e conseqüentemente à Europa.

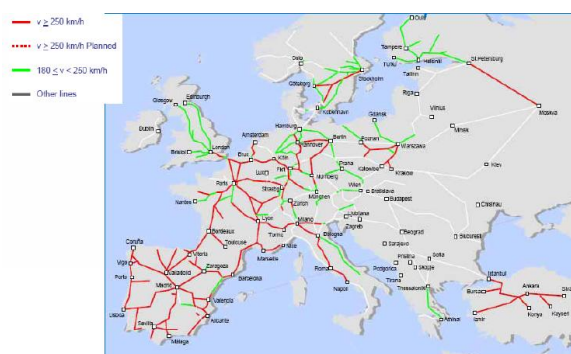


Fig.1.4 – Previsão para alta velocidade na Europa em 2025 (Fonte: RAVE, 2008).

Sendo o objectivo do transporte ferroviário de alta velocidade, o de estabelecer uma rede alargada para facilitar a movimentação de pessoas e bens entre países, é normal que sejam estabelecidas medidas de normalização dos troços e dos materiais circulantes. Estas medidas de normalização são designadas de especificações técnicas de interoperabilidade (*TSIs*), incluindo todas as redes que se encaixam na rede europeia de alta velocidade.

As especificações de interoperabilidade têm em conta, a verificação dos critérios de segurança e conforto nas vias e infra-estruturas e veículos circulantes actuais, e aqueles que possam surgir no futuro. Estas especificações são necessárias, para que os efeitos dinâmicos que possam surgir na via e infra-estrutura, não tenham valores superiores aos estabelecidos como limites, assegurando um bom comportamento da via, independentemente do comboio que circule nela.

Outra das tarefas da Associação Europeia para a Interoperabilidade Ferroviária (AEIF) é garantir a possibilidade de aplicar várias especificações técnicas de interoperabilidade na rede ferroviária convencional, prevendo a circulação de veículos de alta velocidade, em troços que já existam na rede nacional e nos países da Comunidade Europeia. Para que isto aconteça é necessário avaliar a funcionalidade das vias e infra-estruturas que já estão construídas, como determinar a capacidade resistente e o comportamento da via e infra-estrutura perante as solicitações que possam vir a sofrer.

Se o objectivo da expansão das linhas de alta velocidade é a aproximação à Europa e mesmo ao mundo, para que haja uma evolução dos países que decidem implementar a alta velocidade, não é aceitável que esta evolução cause desconforto para os habitantes que residem nas proximidades, nem às próprias estruturas envolventes às linhas. Por esta razão, é necessário determinar os efeitos das vibrações que são induzidas pelo tráfego ferroviário, sendo este o objectivo desta dissertação.

## 1.2. SITUAÇÃO DA ALTA VELOCIDADE EM PORTUGAL

Na XIX Cimeira Ibérica que se realizou a 7 e 8 de Novembro de 2003 foi formalizada a decisão política de implementação da Rede Ferroviária de Alta Velocidade como solução para as necessidades de mobilidade de pessoas e bens dentro e fora do país, podendo destacar-se as seguintes potencialidades:

- Ligações mais rápidas entre as principais cidades portuguesas e ligação à Espanha e consequentemente ao resto da Europa;
- Possibilidade para o Norte do país se tornar uma nova centralidade de transportes;
- Aumento da competitividade dos eixos de mercadorias nacionais para o resto da Europa;
- Benefícios para os aeroportos do Porto e Faro;
- Condições para a possibilidade de uma crescente integração na Europa, permitindo uma maior interoperabilidade ferroviária e a utilização de portos portugueses como “porta de entrada” na Península Ibérica;
- Redução dos custos ambientais dos transportes.

Existem três eixos que estão acordados, são designados eixos prioritários, são eles, Lisboa-Madrid, Lisboa-Porto e Porto-Vigo. Seguem-se mais dois eixos que ainda se encontram em fase de estudos, o Eixo Aveiro-Salamanca e Évora-Faro/Huelva. Estes eixos estão representados na Figura 1.5, no qual se podem ver também as potencialidades que foram referidas anteriormente.

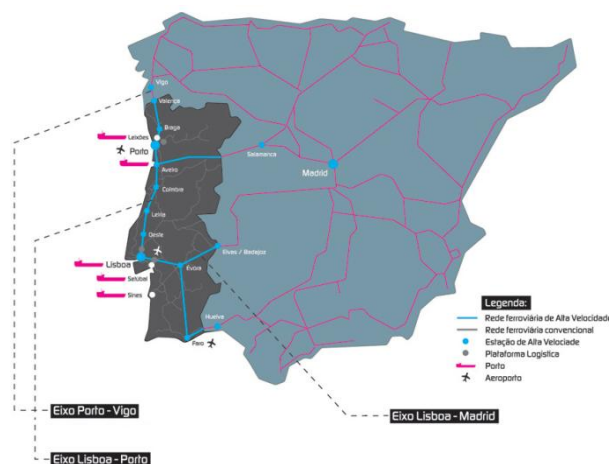


Fig.1.5 – Rede Ferroviária de Alta Velocidade, (REFER, 2010b).

A linha de AV que faz ligação a Lisboa e Madrid é uma das linhas designadas prioritárias para Portugal, isto porque asseguraria ligação da capital portuguesa à rede de AV da Europa, tornando-se um transporte competitivo para a ligação ao país vizinho. Está previsto ligar as duas capitais Ibéricas em duas horas e quarenta e cinco minutos, sem ocorrerem paragens nas estações intermédias, que são Évora, Elvas/Badajoz. A velocidade de projecto é de 350km/h, sendo o seu tráfego de passageiros e mercadorias (RAVE, 2010b).

A linha de AV que liga o Porto e Vigo é outra das ligações prioritárias, que liga as duas cidades numa hora, em vez das actuais três horas e meia, a uma velocidade de 250 km/h, abrangendo o tráfego de passageiros e mercadorias (RAVE, 2010c). Este eixo encontra-se dividido em duas fases, a primeira é constituída pelo troço Braga-Valença, que é a ligação que vai abrir em funcionamento primeiro e o segundo troço faz as ligações Porto-Aeroporto Sá Carneiro-Braga.

A Linha do Norte é considerada como a “coluna vertebral” de toda a rede ferroviária nacional, pois nela circulam cerca de 75% dos serviços de mercadoria e passageiros referentes a percursos de médio e longo prazo do País. Neste momento esta linha encontra-se fortemente congestionada e com a implementação da AV iria libertar-se a capacidade nesta linha, pois era possível transferir os serviços de longo curso e uniformizar a velocidade de circulação dos comboios, permitindo assim que houvesse um crescimento relativo dos serviços suburbanos e de mercadorias na Linha do Norte. Este troço está destinado para transporte exclusivo de passageiros, com uma duração de viagem sem paragens, em uma hora e quinze minutos, a uma velocidade de 300 km/h, numa extensão de 292 km. As paragens intermédias nesta linha vão ser Oeste, Leiria, Coimbra e Aveiro, (Fernandes, 2010).

A rede de AV ao ligar as principais cidades portuguesas, a área de influência irá abranger mais de 80% da população e da actividade económica. A Figura 1.6, representa a movimentação da população prevista para 2030.

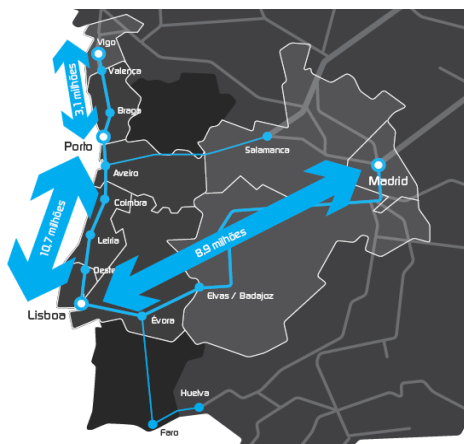


Fig.1.6 – Procura estimada das linhas de AV em 2030, (REFER, 2010c).

### 1.3. OBJECTIVOS

Com o desenvolvimento da alta velocidade em toda a Europa e mesmo em todo o Mundo, as exigências para um bom desempenho da estrutura têm que ser garantidas, com preços cada vez mais competitivos no menor espaço de tempo possível. É por isso necessário estudar o comportamento de toda a estrutura ferroviária para que posteriormente não ocorram gastos e inconvenientes que poderiam ser evitados na fase de construção.

Os Humanos estão expostos permanentemente a vibrações, no trabalho, nos transportes e mesmo em casa, que podem ou não perturbar o bem-estar e a sua própria saúde, tornando-se vibrações indesejáveis e perigosas.

A ocorrência de vibração está associada a desequilíbrios ou folgas das várias partes que constituem a máquina, neste caso está associada ao contacto da máquina vibrante (comboio) com a estrutura (linha). As vibrações que são produzidas neste contacto podem excitar as frequências de ressonância das componentes da via e do veículo, originando fontes produtoras de vibração de elevada amplitude e, conseqüentemente, ruído. Quando a vibração não é controlada na fase de construção, posteriormente pode tornar-se um fenómeno difícil de controlar.

O objectivo deste trabalho é o estudo dos efeitos dinâmicos que a passagem de comboios de alta velocidade originam. Este estudo será realizado utilizando o programa 2.5D, desenvolvido na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade do Porto.

Esta análise vai ser feita calculando valores de deslocamentos e velocidades à superfície, no aterro, na travessa e no carril. Para uma melhor observação dos valores determinados nesta análise, a velocidade vai ser convertida em bandas de 1/3 de oitava da frequência.

#### **1.4. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS**

O primeiro capítulo faz uma breve introdução do desenvolvimento das linhas de alta velocidade no Mundo, na Europa e em Portugal. São referidos também neste capítulo os projectos que estão acordados com a vizinha Espanha, relativamente à alta velocidade e aos benefícios que isso nos poderá trazer.

No segundo capítulo são referidos as causas pelas quais a vibração ferroviária ocorre, do modo como se propagam e de que forma chegam ao receptor, afectando de vários modos. São referidas os tipos de ondas que este tipo de vibração provoca e algumas das suas características. Referem-se também algumas medidas para minimizar ou mesmo eliminar a vibração na fonte, no meio onde as ondas se propagam e no receptor.

No capítulo três referem-se aos vários tipos de programas utilizados, desde a geração da malha, de seguida o programa 2.5D, passando pelas transformadas de Fourier e terminando na execução de gráficos representativos da velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência.

No capítulo que se segue (quarto capítulo) são representados vários tipos de material circulante existente. É referido o modelo de carga e a sua geometria relativos aos comboios que vão ser analisados. É descrita a geometria da via férrea e as suas características, revelando também a sua importância e funcionalidade.

Segue-se o quinto capítulo, no qual são representados os resultados obtidos e aquilo que se pode concluir, relativamente à utilização de irregularidades nos carris neste tipo de modelo, dos deslocamentos em diversos pontos analisados e as suas variações, bem como as velocidades de propagação. Para uma melhor análise estudaram-se também os gráficos representativos da velocidade quadrática média relativamente a 1/3 de oitava da frequência.

O último capítulo é referente às conclusões que foram tiradas ao longo desta dissertação, numa forma mais global. São referidos também alguns dos estudos que podem vir a ser desenvolvidos futuramente, relativos a este tema, para uma melhor consolidação de ideias ou mesmo desenvolver novas conclusões.

# 2

## A VIBRAÇÃO E OS SEUS EFEITOS

### 2.1. INTRODUÇÃO

Os problemas da vibração devido ao tráfego ferroviário são cada vez mais importantes de analisar por várias razões. Existe uma crescente preocupação dos cidadãos relativamente aos problemas ambientais e principalmente relativamente ao incómodo que a vibração pode provocar na vizinhança. Nas áreas urbanas, cada vez mais, a distância que separa a linha de alta velocidade e os edifícios circundantes tem diminuído e com a implementação das linhas de alta velocidade o nível de vibração sentida aumenta.

Pelos efeitos negativos que as vibrações causam ao Homem, aos equipamentos e às próprias estruturas das construções, há todo o interesse em analisar e tentar quantificar deslocamentos e velocidades para avaliar os riscos e seguidamente proceder ao seu controlo. É precisamente esse o âmbito desta dissertação de Mestrado.

São analisadas as vibrações devido ao impacto ambiental que estas provocam. A vibração é analisada como fenómeno ondulatório e propaga-se ao longo de uma sucessão de meios sólidos, como vários tipos de solo, de rocha, de fundações do edifício e de estrutura, até atingir o receptor.

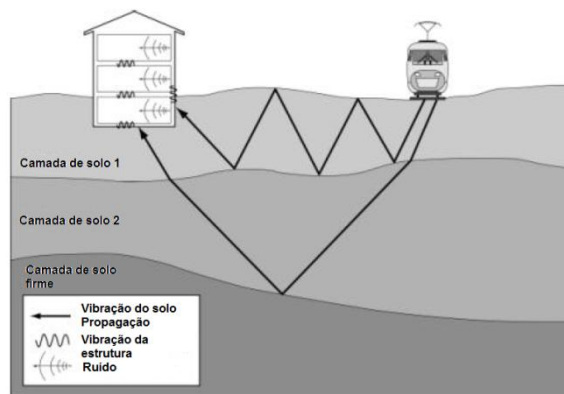


Fig.2.1 – Propagação da vibração em edifícios (Adaptado de Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005).

Os efeitos da vibração no solo incluem todo o movimento que é perceptível nos pisos do edifício, o barulho que as janelas fazem, até mesmo objectos que se encontrem nas prateleiras e que abanem ou mesmo que estejam pendurados nas paredes. Em casos extremos, tais vibrações podem danificar edifícios e estruturas. A sua análise antes da construção da linha é uma mais-valia, porque depois de construída é muito difícil eliminar os danos que foram causados.

## 2.2. PROPAGAÇÃO DA VIBRAÇÃO INDUZIDA NO TERRENO PELO TRÁFEGO FERROVIÁRIO

As vibrações que um comboio em movimento transmite ao solo dependem de muitos factores, sendo considerado por isso um processo muito complexo, mas que pode ser dividido em várias fases distintas. Cada uma destas fases está interligada, pois quando acaba uma começa outra e as variáveis analisadas para a primeira entram na seguinte como dados.

A problemática das vibrações induzidas pelo tráfego ferroviário divide-se em três etapas: a fonte, o caminho e o receptor, como se encontra esquematizado na Figura 2.2. Ao compreendermos o que acontece nestas três fases, é possível prever o problema e posteriormente corrigi-lo ou mesmo eliminá-lo. Por esta razão é que de seguida será feita uma análise mais aprofundada, separando as três etapas que já foram referidas.

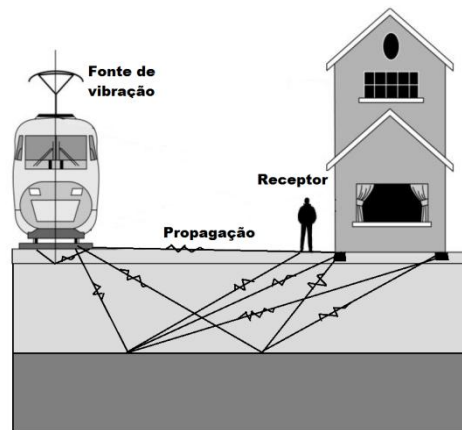


Fig.2.2 – Geração e propagação das vibrações por linhas de superfície (Adaptado de Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005).

### 2.2.1. FONTE DE VIBRAÇÃO

Para entender melhor este fenómeno é necessário saber como é constituída a linha férrea. Na Figura 2.3, pode observar-se que na sua constituição se encontram: o carril, as palmilhas, os sistemas de fixação do carril, as travessas, o balastro e o sub-balastro.

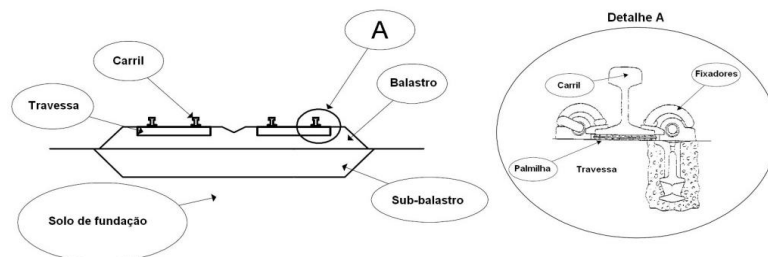


Fig.2.3 – Representação esquemática da via férrea (Fonte: Gonçalves, 2008).

No caso das velocidades reduzidas do comboio, a origem do ruído maioritariamente é no motor, mas para grandes velocidades a principal fonte é a interacção carril/rodas. Esta vibração é provocada por diversos mecanismos:

- Impacto das rodas nas junções dos carris;

- Impacto do verdugo das rodas no carril;
- Movimentos causados por irregularidades dos carris (rugosidade) e das rodas (achatamento);
- Ligeiro contacto do verdugo das rodas no carril, normalmente gerado em curvas apertadas;
- Vibração de toda a estrutura de suporte.

Para se perceber melhor este mecanismo de vibração que acontece entre carril/roda, são representados de seguida, esquemas para uma melhor compreensão destes fenómenos.

Entre o verdugo e a mesa do carril existe uma folga de 5 mm, isto para facilitar a passagem do veículo numa curva, pois se o rodado se deslocar lateralmente para o carril exterior, sendo o rodado constituído por dois cones, o raio efectivo da roda exterior aumenta ligeiramente e conseqüentemente o raio efectivo da roda interior é reduzido no mesmo grau de grandeza, pois as rodas estão ligadas por um eixo. É desta forma que ocorre uma diminuição do atrito entre o verdugo e o carril, mas é limitada.

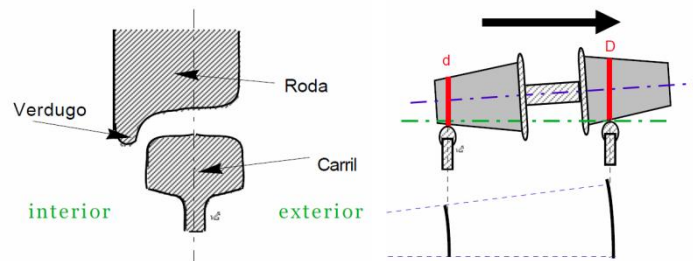


Fig.2.4 – Esquema representativo do contacto carril/roda numa curva em escala exagerada  
(Fonte: Guedes, 2005)

Na Figura 2.5, encontra-se esquematizado todo o mecanismo que provoca vibração relativamente ao contacto carril/roda que se encontra descrito anteriormente.

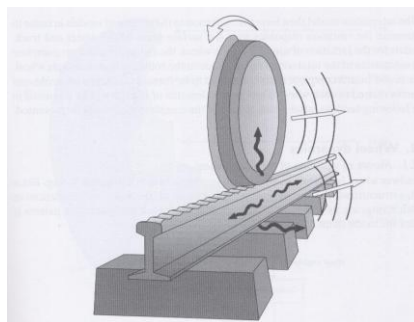


Fig.2.5 – Esquema das vibrações produzidas pelo contacto roda/carril (Fonte: Silva Gonçalves, 2008)

Nas curvas existentes na via férrea, o rodado sendo a sua estrutura rígida, não existe uma adaptação às condições da curva, o resultado, então, é que as rodas rodam sobre o carril e ao mesmo tempo deslizam na mesa do carril. Devido a este acontecimento ocorre o aumento do esforço de tracção nas curvas e o aparecimento de esforços transversais sobre os carris. Existe outro factor que faz com que ocorra um aumento da resistência de tracção, que é o facto de quando o veículo executa o movimento da curva cria uma força centrífuga que empurra o verdugo contra o carril. É por esta razão, que o raio da curva da via férrea tem que ser limitado ao seu valor máximo, impondo restrição também aos veículos longos com rodados ligados ao *chassis* em linhas férreas com curvas apertadas.

Portanto, existe a necessidade de apoiar a caixa dos veículos ferroviários em pequenos carrinhos, com quatro ou seis rodas e ligados à caixa por um *pivot* central, designado os *bogies*.

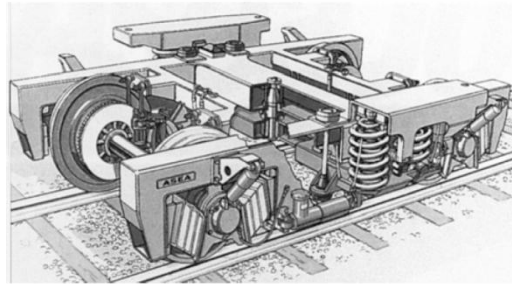


Fig.2.6 – Esquema representativo *bogies* no material articulado (Fonte: Guedes, 2005)

A utilização de *bogies* nos materiais articulados que operam em vias ferroviárias com muitas curvas ou mesmo curvas fechadas data do início do caminho-de-ferro, ano de 1797. Os *bogies* são constituídos pelas seguintes partes:

- Órgãos estruturais – englobam-se todos os elementos destinados a suportar a caixa sobre os rodados, os rodados são formados por rodas destinadas a ter o aro guiado pelos carris por intermédio do verdugo, cada par de rodas guiadas por um eixo;
- Órgãos de suspensão - são formados pelas molas, podendo ser de helicoidais ou em borracha e bolsas pneumáticas;
- Órgãos de frenagem - constituídos pelos travões de calço ou de disco e os sistemas que os fazem actuar;
- Material motor – formado pelos motores eléctricos, está associado um redutor mecânico.

Pode observar-se no esquema que se encontra representado de seguida, que o corpo do comboio se encontra ligado ao *bogie* por uma suspensão secundária. O *bogie* transfere o peso do corpo do comboio para as rodas. Encontra-se ligado às rodas por um sistema de suspensão primário. Por sua vez, as rodas transferem a força aos carris.

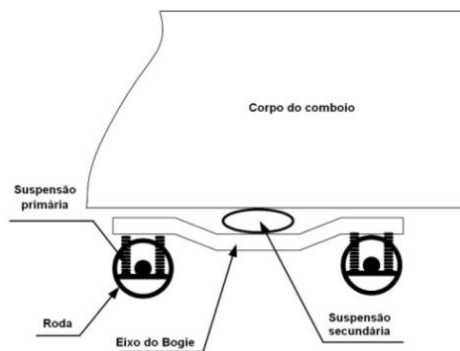


Fig.2.7 – Partes principais do *bogie* de um comboio (Fonte: Gonçalves, 2008).

Esveld (2001) refere que as causas da vibração na fonte são: as forças entre as rodas e o carril, variando com a rugosidade da zona de contacto entre estes elementos, originando uma gama grande de frequências, que dependem do comprimento de onda da rugosidade e velocidade do comboio. Outra causa referida pelo autor é a distribuição dos eixos do comboio, que origina uma força de excitação quando ocorre a passagem do comboio num determinado ponto.

Este autor relaciona as fontes de geração de vibração e os respectivos comprimentos de onda, com se apresenta na Figura 2.8.

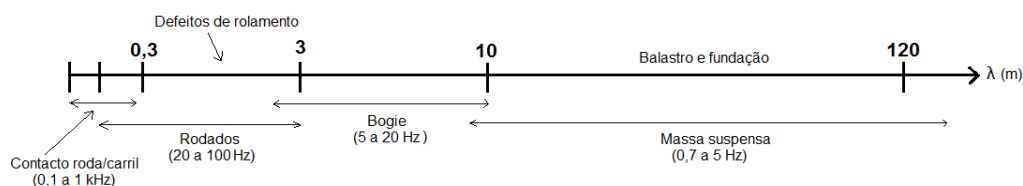


Fig.2.8 – Fontes de geração de vibração e respectivos comprimentos de onda segundo Esveld (Adaptado de Mateus da Silva, 2005).

Existe uma grande vibração, quando a frequência de excitação associada à passagem pelas travessas iguala a frequência natural do sistema. Como a frequência natural do sistema não é dependente da velocidade a que circula o comboio, pode concluir-se que as vibrações não aumentam continuamente com a velocidade, apresentam um pico quando existe uma igualdade de frequências, mas voltam a diminuir com o acréscimo da velocidade.

Segundo Bahrekazemi (2004) a vibração é gerada devido a interacção entre o comboio que se encontra em movimento, com a linha que se encontra sobrejacente ao solo. As principais partes do comboio que geram estas vibrações, encontram-se na Figura 2.7. De acordo com este autor, as vibrações induzidas pelo tráfego ferroviário num edifício são influenciadas por vários factores, entre os quais o atrito entre as rodas e o carril, a não continuidade dos apoios da linha (travessas), a rigidez das travessas, a solução estrutural da linha férrea, o tipo de solo existente e por fim a estrutura do edifício.

O mesmo autor considera as vibrações dinâmicas e quasi-estáticas as causas para que ocorram as vibrações do tráfego ferroviário, pois é onde está a maior parte da energia que é transportada pelas ondas Rayleigh quando esta for medida a distâncias significativas do comboio. Caso o comboio viaje a velocidades superiores à velocidade de propagação da vibração pelo terreno, a onda de choque formada iria afectar bastante os edifícios vizinhos a nível da estrutura.

Em todos os trabalhos realizados, considera-se o sistema usado como elástico linear, o que em quase todos os casos é uma hipótese válida. Mas, no caso da velocidade de circulação do comboio ser mais elevada comparativamente à velocidade de propagação do meio, então os efeitos de não linearidade que afectam o comportamento do solo tornam-se relevante.

Santos (2006) refere que os principais parâmetros que influenciam a vibração do tráfego ferroviário são, o tipo de comboio, a velocidade a que ele circula, as características do aterro, as condições geotécnicas, o tipo de edifício, as fundações do edifício e a distância entre a via e o edifício. Neste estudo também é possível constatar-se que se gera uma onda de choque no solo quando a velocidade de circulação do comboio é superior à velocidade de propagação das vibrações do solo. Este fenómeno torna-se cada vez mais importante analisar, visto que cada vez mais as velocidades de circulação dos comboios são cada vez maiores. Outra conclusão retirada neste relatório foi que há uma amplificação dos movimentos da via quando ocorre a passagem de comboios a velocidades da mesma ordem de grandeza, ou superiores à velocidade de propagação das ondas de Rayleigh no solo.

Hall (2000) realizou um trabalho referindo os principais factores que estão relacionados com a geração da vibração. São estas causas as ondas de tensão induzidas via-estrutura (inclui o peso dos eixos, espaçamento das rodas dos eixos e velocidade do comboio), a fonte de vibração proveniente do contacto carril/roda (instabilidade do comboio em movimento, propriedades dinâmicas do *bogie*, imperfeições das rodas, motores desalinhados, aceleração e travagens do comboio), descontinuidade

da via (imperfeições do carril, espaçamento e intervalo entre as juntas do carril, mudanças de direcção e as curvas) e entre outras causas são referentes à geometria, rigidez e espaçamento das travessas, geometria, rigidez e heterogeneidade do balastro e a rigidez e geometria do solo.

Este autor no seu estudo também menciona que quando o comboio se encontra estático o campo de tensões que é causado pelo seu peso, encontra-se sob e em redor do comboio. No instante em que se impõe movimento ao comboio, o campo de tensões tende a acompanhar o movimento do comboio, apesar de modificado pela propagação das ondas de tensão. Este campo de tensões móvel faz com que a reacção do solo seja variável, que induz ondas de choque em redor, sendo por isso considerada a principal causa de vibração na fonte, para além das imperfeições e irregularidades periódicas do veículo e da via, que existem sempre.

Harris Miller Miller & Hanson Inc. (2005) referem que os factores que influenciam a vibração são os parâmetros físicos inerentes à via, a composição do comboio, a geologia e como é recebida a vibração pela construção.

Depois de todos os estudos realizados, o quadro seguinte representa um resumo de tudo que já foi referido relativamente aos factores que provocam vibração na fonte e a sua influência.

Quadro 1 – Factores relacionados com a fonte de vibração (Adaptado de Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005)

Factores	Influência
Suspensão do veículo	Se na direcção vertical a suspensão for rígida, a vibração efectiva será maior. Nas composições ferroviárias só as cargas não suspensas, que estão relacionadas com a suspensão primária afectam o nível de vibração, a suspensão secundária suporta a caixa do comboio produzindo efeitos que são insignificantes.
Rodados	O contacto entre a roda e o carril é uma das maiores causas de vibração, devido à rugosidade e a defeitos da roda.
Superfície do carril	Uma das causas de vibração é também a irregularidade do carril. As operações de manutenção, como a esmerilagem preventiva da via (consiste na remoção de décimas de milímetro de material dos carris, reduzindo ou mesmo eliminando as ondas de desgaste (desgaste ondulatório) que ocorrem por acções mecânicas de pedras de esmeril), são importantes para uma melhor regularização da superfície do carril.
Suporte da via	Para controlar este tipo de vibrações utiliza-se palmilhas de amortecimento no apoio dos carris nas travessas, adopta-se espessuras correctas nas camadas de balastro e sub-balastro ou coloca-se mantas de amortecimento.
Velocidade	Aumentando a velocidade, os níveis de vibração também aumentam.
Estrutura	Quanto mais peso tiver a estrutura da linha ferroviária, menores serão as vibrações que resultam da passagem do comboio, por regra geral.
Profundidade da fonte	Os níveis de vibração variam caso o comboio circule à superfície ou no subsolo.

### 2.2.2. PROPAGAÇÃO

As vibrações propagam-se no solo através de três tipos de ondas: ondas de corte (ondas S), ondas de compressão (ondas P) e ondas de superfície (ondas Rayleigh). As ondas P e S são consideradas ondas de corpo ou volume, que se propagam no solo, estas apresentam percursos radiais e deformadas devido às variações de densidade e composição o interior da terra. As ondas Rayleigh são consideradas ondas de superfície que se propagam imediatamente abaixo da superfície terrestre, são mais lentas que as ondas de corpo, isto ocorre devido à baixa frequência, longa duração e grande amplitude, são ondas mais destrutivas.

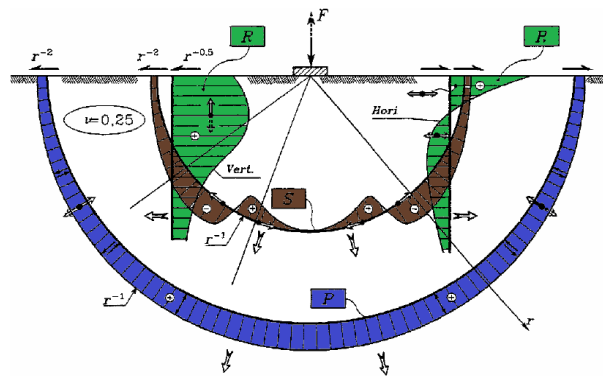


Fig.2.9 – Modos de propagação das vibrações no solo (adaptado de Bahrekazemi, 2004).

Ondas P, ou ondas primárias, são as primeiras ondas a chegar, pois têm uma maior velocidade de propagação. As ondas longitudinais fazem o solo vibrar paralelamente à direcção da onda. Verificam-se amplitudes e períodos baixos impondo aos corpos sólidos elásticos alteração de volume, mas não altera a forma. Valores típicos da velocidade das ondas P, ondas de compressão, são 330 a 340 m/s para o ar, 1450 a 1530 para a água, 160 a 600 para aterros, 1000 a 2500 para argila compacta, 3000 a 3500 para o betão, 1700 a 7000 para o calcário, 4600 a 8400 m/s para rochas duras (granito, basalto entre outras).

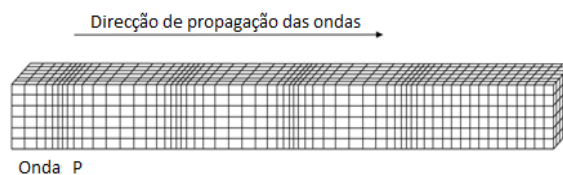


Fig.2.10 – Deformação do meio pelo efeito da onda P (Fonte: Mateus da Silva, 2005).

Ondas S, ou ondas secundárias, são ondas transversais, o solo é deslocado perpendicularmente à direcção de propagação. O solo move-se alternadamente para um e outro lado. São ondas mais lentas que as ondas P. Provocam alterações morfológicas não havendo alteração de volume, só se propagam em corpos sólidos.

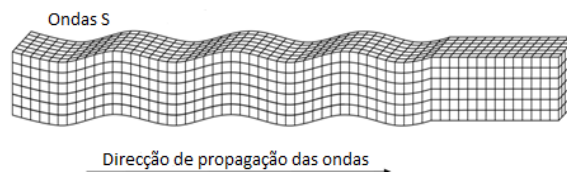


Fig.2.11 – Deformação do meio pelo efeito da onda S (Fonte: Mateus da Silva, 2005).

Ondas Rayleigh são o resultado da interferência das ondas P e S, provocam vibrações no sentido contrário à propagação da onda, ou seja, um movimento de rolamento e a sua amplitude diminui rapidamente com a profundidade. As ondas de Rayleigh, têm velocidades inferiores, logo chegam depois das ondas de compressão, estas duas ondas aproximam-se para rochas mais rijas e para rochas medianas. A relação das velocidades das ondas de corte e das ondas P é cerca de um terço. A velocidade destas ondas depende do coeficiente de Poisson.

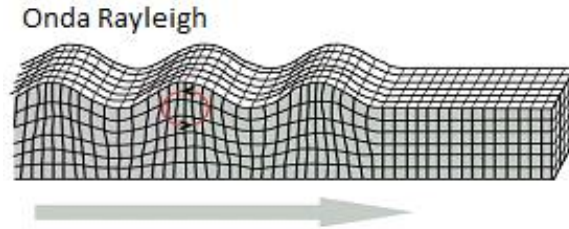


Fig.2.12 – Deformação do meio pelo efeito da onda R (Fonte: Mateus da Silva, 2005).

A maioria das solicitações chegam às construções propagando-se pelos solos. Nestes propagam-se ondas de tensão e deformação de diferentes tipos. A velocidade,  $V_s$ , com que as ondas S se propagam no solo depende do tipo de solo e do módulo de distorção,  $G$ , e da sua massa volúmica,  $\rho$ .

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

Consequentemente, para uma melhor caracterização do solo é necessário saber o valor do módulo de distorção das camadas, que se encontram na fundação onde as ondas se iram propagar, correspondendo a uma  $V_s$ , que é calculado pela seguinte fórmula.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

Resumindo-se portanto a uma fórmula única, representada de seguida.

$$E = 2(1+\nu)\rho V_s^2 \quad (3)$$

São as ondas S cuja velocidade melhor caracteriza o esqueleto do solo, por isso a expressão (3) será usada para caracterizar os materiais de fundação, no exemplo que vai ser analisado nesta dissertação.

A gama de frequências que estão presentes nas ondas que atravessam os solos é da ordem dos 2 aos 100 Hz, dependendo do modo de geração. Nas proximidades, onde ocorrem rebentamento de rochas rijas, a velocidade pode conter frequências superiores a 100 Hz.

Desde a origem da onda até ao receptor, as ondas atenuam-se fundamentalmente por dois mecanismos: o geométrico e o de dissipação. Ondas com frequências mais altas atenuam-se mais rapidamente (a pouca distância da fonte), ondas mais rápidas, em materiais mais coerentes e rijos, propagam-se até maiores distâncias.

Na prática as ondas não se atenuam sempre com a distância. Em meios que sejam estratificados e em que a sua geometria favoreça a onda, esta pode concentrar-se (lembremo-nos das ondas do mar) ou sobrepor-se a outras ondas reflectidas, medindo-se valores de vibração maiores em pontos mais afastados.

Abaixo está representado um quadro resumo sobre os factores e a sua influência relacionados com a propagação da vibração.

Quadro 2 – Factores relacionados com a propagação de vibração  
(Adaptado de Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005)

Factores	Influência
Tipo de solo	Se o solo for do tipo argiloso, então em geral as vibrações são superiores comparativamente com solos arenosos. Podem ocorrer fenómenos de amplificação dinâmica, caso os solos sejam pouco compactados.
Tipo de rocha	Quanto mais próximos a superfície e o substrato rochoso estiverem, maior será a magnitude das vibrações. Isto acontece porque ocorre uma influência na rigidez da infra-estrutura e a propagação das vibrações em rocha resulta num amortecimento mais lento das ondas de vibração comparativamente com solos.
Estratificação	O comportamento é difícil de prever, pois os estratos têm um comportamento dinâmico diferenciado entre eles.
Nível freático	A presença do nível freático tem interferência com a magnitude das vibrações, mas a sua influência directa ainda não é clara.
Gelo	Para um solo gelado, tudo indica, que a propagação das vibrações é menos eficiente

### 2.2.3. RECEPTOR

Podem dividir-se os efeitos que as vibrações provocam no receptor em três grupos. O primeiro grupo é designado pelas vibrações que provocam incomodidade às pessoas, sendo este subdividido em mais quatro graus: nocivo para a saúde, normalmente envolve ferramentas vibratórias; inconveniente ou mesmo impeditiva de realizar normalmente o trabalho; excessiva, normalmente tolerável em situações transitórias, como por exemplo vibrações provocadas por obras limitadas no tempo; sensível, no sossego da habitação ou mesmo noutros locais de repouso ou lazer. O segundo grupo é quando a vibração gera mau funcionamento de equipamentos sensíveis, hospitais, laboratórios técnicos e científicos e até habitações. No último grupo, estão designadas as vibrações que causam danos nos edifícios, em particular nos monumentos antigos.

Para cada grupo referido anteriormente existe a norma ISO 14837-1, que define gamas de frequências para cada um dos fenómenos na qual tem mais probabilidade de se fazer sentir. Pode, então, dizer-se que nas gamas de 1 a 80 Hz se engloba o primeiro grupo, na gama de frequência entre 1 a 200 Hz se

encontra o segundo grupo. No último grupo a gama de frequências que o define é entre 1 a 500 Hz, apesar de na grande maioria os danos surjam entre os 1 e 150 Hz.

### 2.2.3.1. Ser humano

A resposta humana é muito variável, dependendo da amplitude, duração e frequência da vibração e também da idade, sexo da população e questões psicológicas, sendo por isso uma resposta muito subjectiva dependendo de pessoa para pessoa.

Só por uma questão de curiosidade e para mostrar que a vibração sentida depende de muitos factores do receptor, na Figura 2.13 está representada a influência da frequência nas várias partes do corpo de um ser humano.

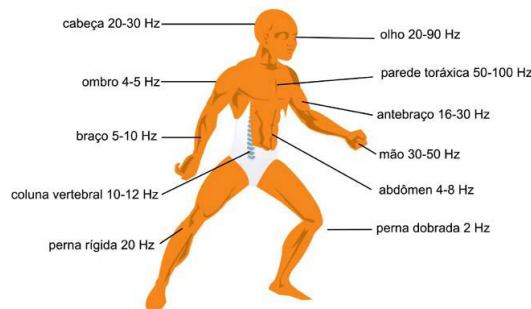


Fig.2.13 – O corpo humano e a vibração (Fonte: Vendrame, 2010).

Como foi referida anteriormente a gama de frequências para um corpo humano é entre 0,5 a 80 Hz, cada membro e órgão tem a sua própria frequência natural, em que o corpo não vibra como uma massa única. Relativamente às vibrações verticais, as frequências mais preocupantes encontram-se entre os 4 e 8 Hz. Quando existem vibrações entre 2,5 e 5 Hz ocorre ressonância nas vértebras, na garganta e na região lombar com amplificação até de 240%. Encontrando-se entre 4 e 6 Hz ocorre ressonância no tronco amplificando até 200%. No caso das vibrações de 20 a 30 Hz geram ressonância entre a cabeça e os ombros com uma amplificação até 350%.

Alguns dos efeitos da acção prolongada da vibração no corpo humano, podem provocar danos nas mãos e braços, como distúrbios vasculares, problemas de circulação (dedos brancos), problemas ósseos, neurológicos e musculares. Também podem ocorrer danos no corpo inteiro, como distúrbios na coluna dorsal, no ombro e pescoço, problemas digestivos, de circulação e problemas no aparelho auditivo.



Fig.2.14 – Para averiguar as consequências das vibrações para a saúde humana (Fonte: Larson Davis Inc,2010).

## 2.2.3.2. Equipamentos sensíveis

Relativamente aos equipamentos sensíveis as normas que analisam essas questões são: a ISO 10811-1 (2000) e a ISO 10811-2 (2000). Na Figura 2.15 e Quadro 3, estão representados os limites para cada classe e as respectivas características. Os limites que são apresentados estão associados a acontecimentos isolados, pondo a hipótese de que a probabilidade de ocorrência de dois eventos em simultâneo é quase nula.

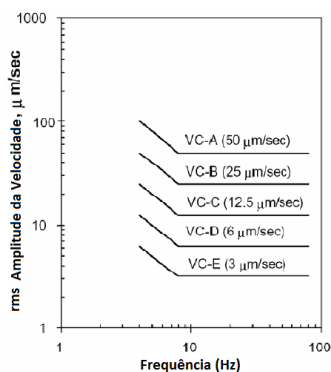


Fig.2.15 – Curvas genéricas para equipamentos sensíveis (Adaptado de Bahrekazemi, 2004).

Quadro 3 – Características das curvas genéricas de limites de vibração para os equipamentos sensíveis (Adaptado de Bahrekazemi, 2004)

Curvas	Amplitude r.m.s $\mu\text{m/s}$ ( $\mu\text{in/s}$ ) <sup>(1)</sup>	Dimensão de detalhe ( $\mu\text{m/s}$ ) <sup>(2)</sup>	Influência
VC-A	50 (2000)	8	Adequado para microscópios até 400X, microbalanças, balanças ópticas, alinhadores de protecção, etc.
VC-B	25 (1000)	3	Apropriado para microscópios ópticos até 100X, equipamento de inspecção e litografia (incluindo processadores) até 3 $\mu\text{m}$ de largura da linha.
VC-C	12,5 (500)	1	Ajustados para a maioria dos equipamentos de inspecção e litografia (incluindo microscópios electrónicos) até 1 $\mu\text{m}$ de dimensão de detalhe.
VC-D	6 (250)	0,3	Apropriado em muitos casos para a generalidade dos equipamentos sensíveis, incluindo microscópios electrónicos e sistemas de feixes de electrões, trabalhando no limite das suas capacidades.
VC-E	3 (125)	0,1	Critério difícil de atingir em muitas situações. Assumindo como sendo adequado para a generalidade das exigências dos equipamentos sensíveis, abrangendo sistemas de alvo (comando à distância, laser, etc) e outros sistemas que requerem uma estabilidade dinâmica extraordinária.

<sup>(1)</sup> Medidas em bandas de frequências de 1/3 de oitava, no intervalo de 1 a 80Hz.

<sup>(2)</sup> As dimensões de detalhe correspondem à largura da linha no caso de fabrico de sistemas micro-eléctricos e ao tamanho das partículas no caso de investigação médica ou farmacêutica.

### 2.2.3.3. Danos em edifícios

Depois de ser gerada a vibração e posteriormente ter-se propagado no meio envolvente, as vibrações são recebidas pelas fundações dos edifícios envolventes, sendo propagadas às outras partes dos edifícios.

Bahrekazemi (2004), fez uma investigação em que explica o processo de transmissão de vibração em solos devidas ao tráfego ferroviário, onde conclui que apenas as vibrações com baixas frequências, intervalo entre 1 e 60 Hz é que são transmitidas às fundações dos edifícios. O mesmo autor demonstra que: para velocidades de partículas até 50 mm/s os danos nas estruturas são de aproximadamente 5%, mas para velocidades inferiores a 15 mm/s não ocorre qualquer tipo de danos na arquitectura do edifício.

Para este caso é usada a norma ISO 4866 (1990) que quantifica a vibração e os seus efeitos. Segundo esta norma, a resposta que a estrutura tem depende da excitação e das propriedades dos mesmos, por isso a força dinâmica e a sua duração é bastante importante para esta análise, bem como a frequência e o intervalo de intensidade de vibração. Factores que influenciam a intensidade de vibração na estrutura são: o tipo de edifício, as frequências naturais, o amortecimento, as dimensões da base e as características do solo onde o edifício se encontra implementado.

Na presente tese não vão ser feitas nenhuma das análises referidas, pois teria que se saber que tipo de edificação encontraria perto da fonte de vibração. O que vai ser executado irá ser retirado dos valores de vários pontos distantes da fonte de vibração, procedendo-se a uma análise comparativa dos vários comboios aleatórios que foram gerados.

## 2.3. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

Para que estas vibrações sentidas pelo tráfego ferroviário sejam minimizadas ou mesmo anuladas, serão analisadas algumas medidas de mitigação nas três fases que a onda segue: fonte, propagação e receptor.

### 2.3.1. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO JUNTO À FONTE

Este tipo de medidas de mitigação tem como objectivo, controlar a geração de vibração, podendo esta geração afectar a circulação ferroviária.

Santos (2006) refere que estas medidas de mitigação são as mais eficientes, pois correspondem a uma combinação de um elemento elástico com um elemento de massa.

Uma maneira de reforçar a fundação é a utilização de jet-grouting, que consiste na injeção de cimento e cal na fundação, estabilizando os solos. Esta aplicação permite que os assentamentos diminuam, pois ocorre uma consolidação dos solos moles. Como com a aplicação desta técnica ocorre um aumento da rigidez de fundação, aumenta a velocidade crítica e consequentemente reduz as vibrações.

Outra medida de conseguir melhorar a fundação, é colocar geodrenos ou mesmo estacas de brita, como se encontra representado na Figura 2.16. Esta técnica permite acelerar a consolidação da fundação, diminuindo o percurso de drenagem dos solos. Também é usado caso o solo de fundação tiver fracas características e assim com esta opção aumenta a resistência da fundação, deformando-se menos do que se se optasse por deixar o solo inicial.

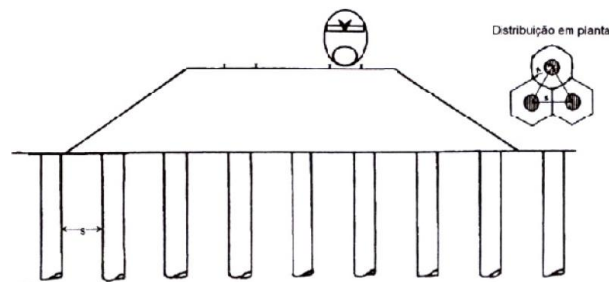


Fig.2.16 – Melhoria do solo de fundação com estacas de brita (Fonte: Mateus da Silva, 2005).

Outra medida é reforçar com geogrelhas, a plataforma e o aterro em que a via se encontra assente, como mostra a Figura 2.17. A utilização de geogrelhas tem como vantagens: a criação de uma plataforma para que as deformações horizontais e verticais sejam minimizadas; aumentar a capacidade de carga da plataforma e conseguir que haja uma melhor distribuição de tensões, diminuindo por isso picos de carga que estejam a ser distribuídos; conferir ao material uma coesão aparente, aumentando assim a rigidez do aterro, pois o geosintético resiste bem à tracção; e aumenta o amortecimento, diminuindo assim a velocidade de vibração que o solo de fundação irá sofrer.

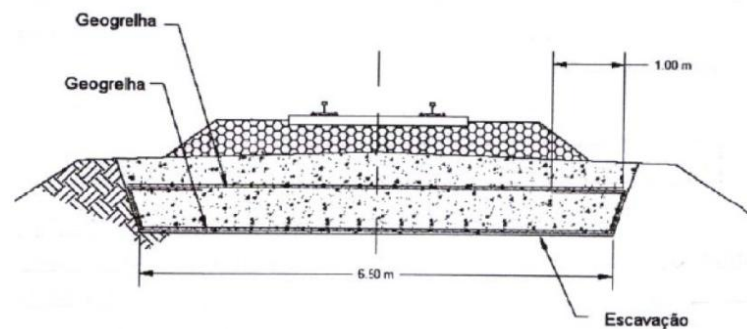


Fig.2.17 – Reforço da plataforma e do aterro (Fonte: Mateus da Silva, 2005).

Outros métodos que podem ajudar na mitigação das vibrações são: utilizar carris soldados, alinhar as rodas, utilizar métodos de esmerilamento do carril, sistemas resilientes de fixação dos carris, introduzir elementos elásticos, utilizar lajes flutuantes ou mesmo vigas flutuantes.

É normal, que para se obter uma solução com melhor eficácia que se utilizem combinações dos métodos referidos acima, como por exemplo alinhamento das rodas com esmerilamento do carril introduzindo também carril soldado e sistemas de fixação resiliente. Cada método actua com mais eficiência para determinadas gamas de frequência. Por isso, é necessário saber a que gamas de frequência as velocidades são mais elevadas para depois podermos reduzir nessa gama.

### 2.3.2. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO NO TRAJECTO DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE VIBRAÇÕES

Apesar de nesta fase a vibração não afectar a circulação ferroviária, pode incomodar a população que se encontra perto e mesmo degradar outras estruturas.

Estas medidas consistem na colocação de elementos no solo que tenham como função reduzir a propagação das vibrações, como é o caso das trincheiras. Este método tem como objectivo diminuir a

propagação das ondas de superfície, ondas de Rayleigh. Estas trincheiras podem encontrar-se vazias ou preenchidas como mostra a Figura 2.18. Apesar da opção de trincheiras vazias ser melhor a sua aplicação traz grandes dificuldades de execução comparativamente às que são preenchidas.

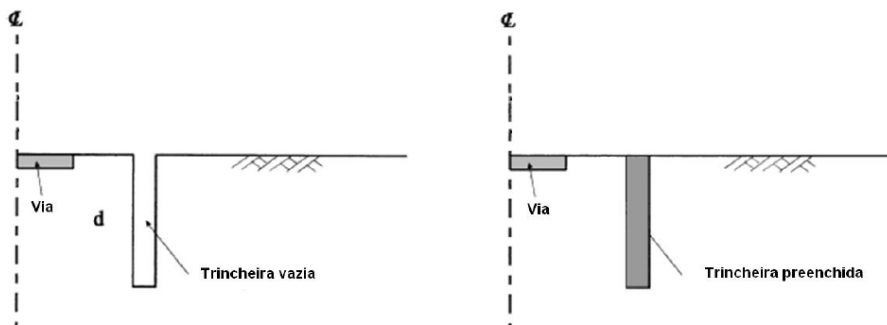


Fig.2.18 – Trincheiras (Fonte: Mateus da Silva, 2008).

A Figura 2.19 mostra como os dois tipos de trincheira reagem à propagação do solo. Como se observa, a trincheira que se encontra vazia consegue diminuir bastante a propagação da onda que o comboio de alta velocidade origina, contrariamente ao outro tipo de trincheira. O tipo de ondas que passa pela trincheira vazia são ondas P e S irradiadas da base, que com a distância se convertem parcialmente em ondas R. Relativamente à trincheira preenchida, a quantidade de vibração que consegue passar por ela é elevada, contrariamente ao caso anterior.

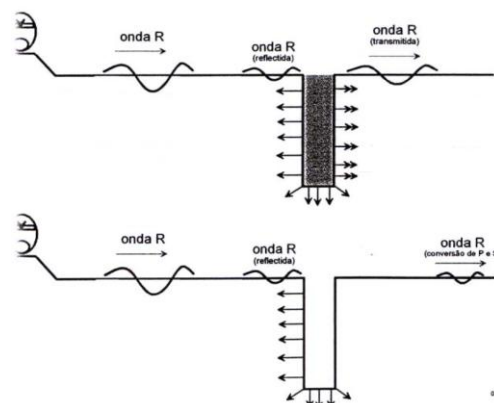


Fig.2.19 – Como se propagam as ondas nas trincheiras (Fonte: Mateus da Silva, 2008).

Seguidamente, são apresentadas várias propostas referentes à profundidade que a trincheira deve atingir, para que a sua aplicação seja eficaz.

Bahrekazemi (2004) afirma que: para baixas frequências e quando estamos perante solos moles a utilização de trincheiras não é viável, pois para ter alguma interferência na propagação da onda a vala teria que atingir profundidades muito elevadas.

Santos (2006) conclui que a profundidade da trincheira é influenciada pelo comprimento de onda das ondas R. Só para frequências médias a altas é que mostra grande eficiência para se considerar que o valor óptimo para a distância da trincheira é de 1,2 vezes o comprimento de onda das ondas R.

Mateus da Silva (2005) verificou que a largura da trincheira não é relevante no caso se escolherem trincheiras vazias, não podendo ter comprimentos baixos, a sua profundidade deve estar na ordem de grandeza do comprimento de onda.

Ahmad et al (1991), refere que a distância a que a trincheira é implementada não tem relevância para tornar as trincheiras eficientes.

Outra medida é a colocação de blocos de controlo de vibração em pontos estratégicos sob a via e as estruturas envolventes. Os blocos funcionam como barreira, pois a onda de propagação quando embate no bloco, diminui a velocidade da onda, não conseguindo alcançar o edifício. Quanto maior for a rigidez dos blocos, maior a capacidade de controlo da vibração que ocorre. Esta rigidez pode ser obtida aumentando a espessura dos blocos ou mesmo a rigidez do material que é composto. Para dimensões normais dos blocos não é possível eliminar totalmente a vibração.

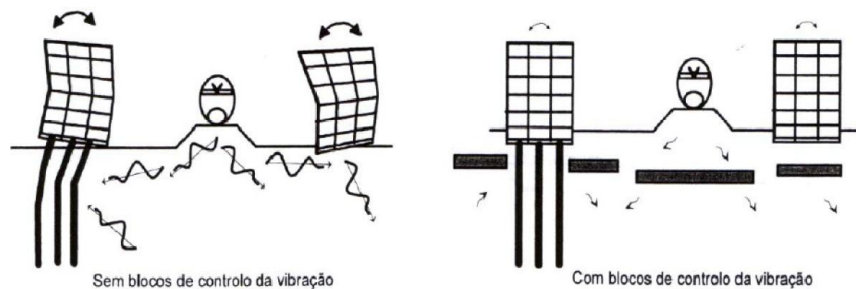


Fig.2.20 – Colocação de blocos de vibração (Fonte: Gonçalves, 2008).

### 2.3.2. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO NO RECEPTOR

Estas medidas só podem ser aplicadas às fundações do edifício, implementando um sistema de apoio elástico que funciona como isolamento entre as fundações e o solo. Esta opção só se torna eficaz se for aplicada a um único ou mesmo a um pequeno grupo de edifícios.



# 3

## ANÁLISE NUMÉRICA

### 3.1. TIPOS DE ANÁLISE

A execução de um bom modelo de previsão é muito útil, para possibilitar a avaliação de alternativas na fase inicial do projecto, na implementação das linhas de AV, evitando que as vibrações induzidas por esta implementação afectem os edifícios próximos e mesmo as pessoas que se encontram no seu interior. Existem vários tipos de modelos de previsão, podendo dividir-se em quatro categorias: analíticos, empíricos, numéricos e medições *in-situ*.

Os modelos empíricos mostram uma estreita relação com um conjunto de dados experimentais, mas a aplicação do modelo é bastante limitada para casos com condições semelhantes. Também estes modelos não são sempre aplicáveis a todo o tipo de análise (parâmetros específicos) que se pretende fazer, sendo outra das limitações.

Os modelos numéricos permitem que todos os parâmetros sejam analisados, mas o modelo só é válido se com os dados experimentais houver uma comparação com o que acontece realmente, e a modelação para a caracterização do meio envolvente for bem executada.

Nesta presente tese vão ser usados modelos numéricos, especificamente o método dos elementos finitos (MEF) e de elementos fronteira, simulando de uma forma mais viável e abrangendo todo o fenómeno que envolve a vibração na AV.

O MEF consiste em transformar um problema que é contínuo em vários elementos finitos, em que os valores nodais desconhecidos são calculados com a utilização de equações, na qual é possível descrever o fenómeno em causa.

A modelação por elementos finitos é hoje uma ferramenta que se torna indispensável para a elaboração de projectos de engenharia, para a definição e análise de estruturas. Também com a evolução computacional que proporciona que os programas numéricos evoluam cada vez com mais detalhes em cada processo até chegar ao resultado final, podendo desta maneira introduzir mais coeficientes para este cálculo numérico, possibilitando que a utilização deste método seja cada vez mais viável.

### 3.2. MODELO 2.5D

Existem vários factores que influenciam a geração e a propagação de vibração, entre eles encontram-se: os vários mecanismos de excitação dinâmica do comboio; a heterogeneidade geométrica e características geotécnicas diferentes.

Irá ser usado no presente trabalho um modelo numérico, baseado no método dos elementos finitos 2.5D, que foi implementado na FEUP, para analisar vibrações induzidas pelo tráfego ferroviário, que pode ser usado no cálculo em túneis e à superfície. É um modelo que tem carácter tridimensional, permitindo a simulação das diversas estruturas que estão envolvidas, isto é, o comboio, a via férrea e o maciço envolvente. Tendo um carácter tridimensional, pode levantar problemas computacionais pelas dimensões dos domínios em estudo, para que a simulação seja o mais realista possível, para ser possível executar uma boa análise do fenómeno que se pretende estudar. Mas, comparativamente aos modelos tridimensionais, este modelo necessita de pouco tempo de computação e de preparação de análise, sendo portanto uma ferramenta versátil e útil, para a análise de fenómenos dinâmicos induzidos pelo tráfego ferroviário.

Sendo este modelo baseado no conceito 2.5D, permite desenvolver um esquema computacional eficiente, utilizando as transformadas de Fourier na coordenada espacial, correspondente à direcção de desenvolvimento da via. Isto significa, que na direcção da via não pode ocorrer variação geométrica nem mecânica do modelo, sendo esta a principal limitação deste tipo de modelo.

### 3.2.1. METODOLOGIA

No que diz respeito à metodologia, este modelo baseia-se no método dos elementos finitos 2.5D, mas como é necessário evitar reflexões de onda nas fronteiras artificiais, que resultam da truncatura do domínio, associam-se assim, elementos infinitos 2.5D. O modelo MEF 2.5D tem agregado um método iterativo, para ser possível uma análise linear elástica equivalente, a fim de obter uma concordância entre as propriedades mecânicas e o nível de deformação induzido.

Seguidamente, são demonstrados os processos que se realizam internamente neste método de análise numérico.

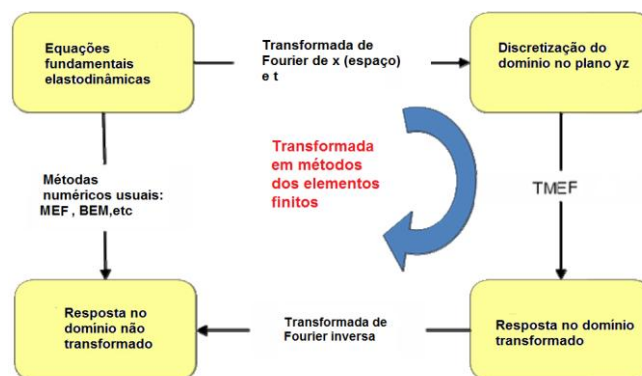


Fig.3.1 – Esquema representativo do procedimento do MEF 2.5D (Adaptado de Alves Costa, et al., 2009a).

O modelo 2.5D só é válido, se esta estrutura estiver bloqueada em pelo menos uma direcção, significando isso, que nessa direcção as características têm que se mantêm constantes. A estrutura é quase bidimensional e o carregamento tridimensional, sendo por isso necessário usar metodologia intermédia entre o bidimensional e o tridimensional. Supondo que a resposta da estrutura é linear, a análise efectuada pode ser executada no domínio do número de onda/frequência, sendo posteriormente aplicadas as transformadas de Fourier em relação ao tempo e ao espaço, na direcção do desenvolvimento da via. As grandezas transformadas (acção e resposta) são função das imagens de Fourier na direcção espacial  $x$  e no tempo  $t$ .

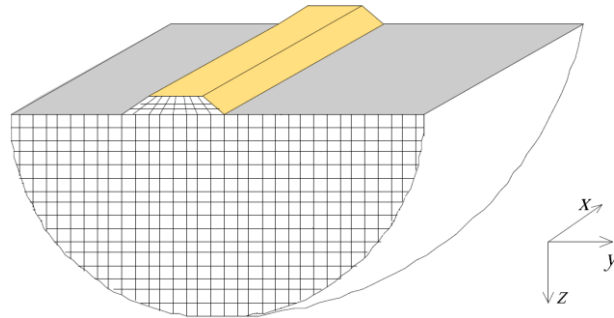


Fig.3.2 – Modelo 2.5D (Adaptado de Alves Costa et al., 2010a).

No caso representado anteriormente é possível observar, que ao longo do eixo do  $x$ , as características dos materiais não se alteram, estando confinado o sistema nessa direção, possibilitando a utilização deste método, não havendo necessidade de utilização de métodos tridimensionais, que tornariam o trabalho mais complexo, devido a serem programas pesados e demorosos para obter resultados. Encontram-se, portanto, apenas duas das direções que caracterizam o meio tridimensional, no domínio não transformado, sendo o plano que contém essas direções discretizado por elementos finitos

A formulação de um modelo por elementos finitos bidimensional, é semelhante a este modelo de elementos finitos 2.5D, exceptuando que cada nó tem três graus de liberdade e das entidades envolvidas estarem no domínio transformado.

Para cada elemento finito existe uma equação de equilíbrio, que só é possível ser obtida, quando se procede à transformada das variáveis e discretização do plano  $yz$ .

$$\left( \int \int_{z \ y} B^T(-k_1) D B(k_1) dy dz - \omega^2 \int \int_{z \ y} N^T \rho N dy dz \right) u_n(k_1, \omega) = p_n(k_1, \omega) \quad (4)$$

sendo  $B$  representativa da matriz das derivadas das funções de forma;  $N$  é a matriz das funções de forma;  $D$  representa a matriz de elasticidade;  $\rho$  é a massa volumica;  $p_n$  representa as forças nodais; e  $u_n$  representa os deslocamentos nodais.

Fazendo uma simplificação na expressão (4), obtém-se a expressão (5), que se encontra no domínio da frequência, dependendo das matrizes de rigidez e de massa.

$$([K] - \omega^2 [M]) u_n(k_1, \omega) = p_n(k_1, \omega) \quad (5)$$

Seguidamente, são apresentadas as matrizes relativas à rigidez e à massa, respectivamente:

$$[K] = \int \int_{z \ y} B^T(-k_1) D B(k_1) dy dz \quad (6)$$

$$[M] = \int \int_z \int_y N^T \rho N dy dz \quad (7)$$

O sistema global só se encontra completamente definido, quando são colocadas as condições fronteira e a assemblagem das matrizes de rigidez dinâmica. Posteriormente, os resultados obtidos após a resolução do sistema de equações encontram-se no domínio transformado, exigindo por isso uma dupla transformada de Fourier inversa, para a solução ser apresentada no domínio do espaço/tempo.

Existe uma dificuldade de simulação das fronteiras causadas pela truncatura do domínio, pois o MEF é um método utilizado para sistemas confinados, em que as condições fronteira se encontram completamente definidas. Para situações estáticas esta dificuldade pode facilmente ser contornada, considerando as fronteiras a uma distância suficientemente afastada da zona de análise do problema, para o caso da análise dinâmica esta possibilidade não é válida. A solução para contornar este problema é a utilização de procedimentos especiais para o tratamento das fronteiras artificiais.

Nas fronteiras artificiais tem que ser cumpridas condições de radiação, existindo diferentes métodos para esta condição. Nesta tese, a formulação foi executada recorrendo a elementos infinitos de carácter 2.5D, pois é um método bastante simples e eficiente na execução numérica. A utilização de elementos infinitos, para a simulação nas zonas mais distantes da fonte de vibração, recorre a funções de forma similares às que aproximam o campo de deslocamentos no interior dos elementos infinitos. Mas neste caso têm de ser funções de forma mais elaboradas, devido a ser representativa a evolução da variável até ao infinito.

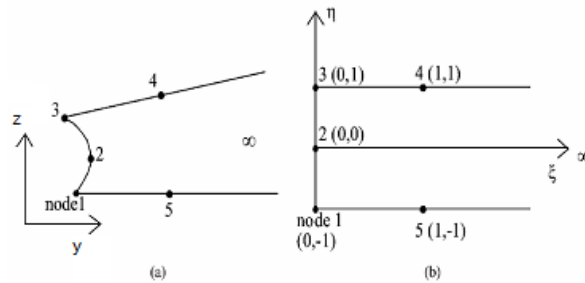


Fig.3.3 – Elementos infinitos 2.5D: referencial global, à esquerda; referencial local, à direita  
(Fonte: Alves Costa et al., 2010a).

São representadas em seguida funções de forma destes elementos, em que  $\eta_i$  representa a ordenada do ponto nodal no referencial local.

$$M_1 = M_3 = -\frac{1}{2}(\xi - 1)(\eta + \eta_i)\eta \quad (8)$$

$$M_2 = (\xi - 1)(\eta - 1)(\eta + 1) \quad (9)$$

$$M_4 = M_5 = \frac{1}{2} \xi (\eta + \eta_i) \quad (10)$$

Seguidamente, apresentam-se as funções de interpolação dos deslocamentos nodais:

$$N_1 = \frac{1}{2} \eta (\eta - 1) e^{-\alpha \xi} e^{ik' \xi} \quad (11)$$

$$N_2 = -(\eta - 1)(\eta + 1) e^{-\alpha \xi} e^{ik' \xi} \quad (12)$$

$$N_3 = \frac{1}{2} \eta (\eta + 1) e^{-\alpha \xi} e^{ik' \xi} \quad (13)$$

em que,  $e^{-\alpha \xi}$  é o amortecimento geométrico e  $k'$  representa o número de onda, das ondas que se propagam na direcção do infinito. A expressão de  $k'$  é dada pela expressão que se encontra representada em seguida, na qual  $j$  é representativo do tipo de onda em questão, ondas P, R ou S.

$$k'_j = \sqrt{\left(\frac{\omega}{C_j}\right)^2 - \left(\frac{\omega - \omega_0}{C}\right)^2} \quad (14)$$

### 3.2.2. SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS DA VIA

No que diz respeito à simulação das travessas, foi desenvolvido pelos autores um modelo em que a rigidez das travessas no plano transversal à via é simulada com base numa formulação ortotrópica.

Para o caso da simulação dos carris, o modelo baseou-se na viga de Bernoulli-Euler, ligado à estrutura através de um conjunto mola-amortecedor, simulando a palmilha. Encontra-se esquematizado este sistema na Figura 3.4.

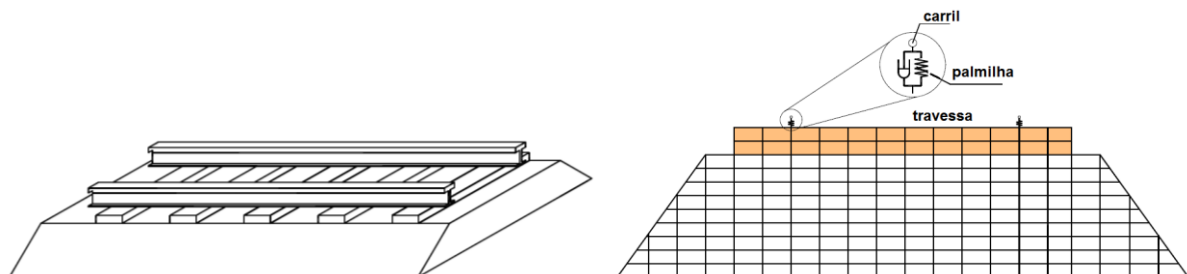


Fig.3.4 – Modelo do carril: real, à esquerda; modelo 2.5D, à direita (Adaptado de Alves Costa et al., 2009a).

A equação da viga de Bernoulli-Euler, simula o comportamento de uma viga, sendo um modelo físico e matemático, tendo como base uma equação diferencial parcial linear de quarta ordem, obtendo uma representação do movimento transversal da viga em função do tempo.

Este modelo, considera o amortecimento do material, recorrendo a um modelo de amortecimento histerético, sendo consideradas as propriedades mecânicas como entidades complexas.

### 3.2.3. APLICAÇÃO DAS CARGAS MÓVEIS NO MODELO

Usando as transformadas de Fourier é possível a aplicação de cargas móveis neste modelo, sendo uma aplicação simples, tendo em conta que é um carregamento móvel, não simulando os efeitos paramétricos resultantes da diferença de rigidez das descontinuidades das travessas.

Considera-se que a carga se movimenta na direcção  $x$ , com velocidade  $v$ , e a amplitude é variável ao longo do tempo:

$$p(x, y, z, t) = p_x(x - vt)p_y(y)p_z(z)p_t(t) \quad (15)$$

Seguidamente, transforma-se a variável espacial  $x$  para o domínio do número de onda, ficando:

$$p(k_1, y, z, t) = p_x(k_1)e^{-ik_1vt} p_y(y)p_z(z)p_t(t) \quad (16)$$

Aplica-se em seguida a transformada de Fourier à variável  $t$ , ficando a expressão seguinte:

$$p(k_1, y, z, \omega) = p_x(k_1)p_y(y)p_z(z)p_t(\omega) \quad (17)$$

Por último, para serem consideradas as cargas móveis, na equação anterior é substituída a frequência angular,  $\omega$ , por  $\omega = \Omega - k_1v$  em que  $\Omega$  representa a frequência de oscilação da carga. Caso não ocorra a oscilação da carga, a frequência tem relação directa com a expressão anterior, mas neste caso, a frequência angular tem a seguinte forma  $\omega = -k_1v$ . Estas expressões só são válidas quando as cargas se movem na direcção  $x$ .

### 3.2.4. INTERACÇÃO COMBOIO-VIA

Como já foi referido no capítulo anterior, são diversos os mecanismos que provocam a geração de vibração nas zonas vizinhas. Esses mecanismos são geralmente divididos em mecanismos de excitação quasi-estática e de excitação dinâmica. Relativamente à excitação quasi-estática, esta é devida ao movimento das cargas que representam o peso próprio do comboio por eixo. Este mecanismo de excitação, apresenta magnitude constante ao longo do tempo e a parte dinâmica é apenas induzida pela vibração temporal dos campos de tensão e deformação, relativos a um ponto fixo no domínio. Em contrapartida, a excitação dinâmica é devida a forças verticais de inércia que se geram no veículo. Este

mecanismo tem diferentes causas, sendo as mais habituais as irregularidades geométricas, a rigidez da via e as imperfeições das rodas dos comboios.

Quando é considerado o mecanismo quasi-estático, o mecanismo de aplicação torna-se mais facilitado, pois não ocorre nenhuma ligação dinâmica entre o comboio e a via. Mas, quando a excitação dinâmica é considerada, esse mecanismo de ligação dinâmica já ocorre, sendo um tipo de excitação muito complexo, pois para além de ter que se considerar essa interação, uma delas tem uma posição geométrica móvel (comboio). Admitindo um sistema linear e atendendo somente às imperfeições geométricas, a compatibilidade de deslocamentos entre o comboio e a via é estabelecida através da seguinte equação:

$$u_{rodai}(t) = u_{carril}(x = vt + a_i, t) + \Delta u \left( t + \frac{a_i}{v} \right) \forall i = 1 \dots n \quad (18)$$

Na expressão (18),  $v$  representa a velocidade de circulação,  $a_i$  é a posição geométrica da roda  $i$  no instante  $t=0$  e  $\Delta u$  representa a irregularidade geométrica que existe na via identificada pela roda  $i$ , quando se encontra no instante temporal  $t$ .

Segue-se a transformação das irregularidades para o domínio do número de onda, não esquecendo as características geométricas do comboio e a velocidade de circulação. Assim sendo, as forças de interação dinâmica no domínio da frequência, encontram-se representadas em seguida:

$$N(\Omega)_n = \left( [k_v]_{n,n}^{-1} + [A]_{n,n} \right)^{-1} \Delta u_n(\Omega) \quad (20)$$

sendo  $N$  um vector das forças de interação que estão associadas a cada eixo do comboio e à irregularidade com o comprimento de onda  $\lambda = 2\pi v / \Omega$ .

A matriz  $A$  representa a resposta dinâmica da via face à força dinâmica que é gerada pela irregularidade, sendo a matriz representada em seguida.

$$A_{ij}(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} u_{G\_carril}(k_1, \omega = \Omega - ck_1) e^{i(a_i - a_j)k_1} dk_1 \quad (21)$$

O  $u_{G\_carril}$  representa, o deslocamento do carril no domínio transformado, perante uma acção unitária que se move a uma velocidade,  $v$ , e oscila em torno da frequência,  $\Omega$ .

A matriz  $k_v$  é representativa da matriz de rigidez dinâmica do veículo, encontrando-se o mais simplificada possível, tendo em conta os graus de liberdade que se encontram em contacto com a via (as rodas ou eixos, no caso do modelo plano). Caso o modelo do comboio seja muito elaborado, esta matriz torna-se mais complexa, por isso pode-se dizer que a complexidade desta matriz depende do modelo do comboio escolhido. Para tornar o sistema mais simples pode optar-se por considerar apenas as massas não suspensas do veículo, pois é suficiente para ser representativa da totalidade da força

dinâmica da interação veículo-via. Sendo assim, a matriz  $k_v$  tem configuração diagonal e os seus termos são dados por:

$$k_{v_i,i} = k_h - \Omega^2 m_v \quad (22)$$

em que,  $k_h$  é representativa da rigidez Hertziana do contacto roda/carril e  $m_v$  corresponde à massa não suspensa do veículo por eixo.

## 4

## MODELAÇÃO DA VIA FÉRREA

## 4.1. MATERIAL CIRCULANTE EXISTENTE

É designado material circulante da rede ferroviária os comboios de passageiros, mercadorias ou de manutenção. Ao variar os comboios de passageiros de alta velocidade, também ocorre uma variação relativamente à linha convencional, por isso existe o interesse de descrever os comboios existentes na rede europeia.

Tendo em conta a interoperabilidade, os modelos de comboio e de cargas serão definidos obedecendo ao High Speed Load Model (*HSLM*). Estes modelos têm como objectivo, garantir que os efeitos dinâmicos, que são provocados pela circulação de diferentes comboios (que existem e que possam surgir no futuro), estejam previstos, garantindo que com o aparecimento de novos modelos de comboio esses efeitos dinâmicos já são valores determinados.

Os comboios de alta velocidade que existem actualmente podem-se dividir-se nestas categorias:

- Articulados;
- Convencionais;
- Regulares.

## 4.1.1. COMBOIOS ARTICULADOS

As suas carruagens dividem os *bogies* com as carruagens que estão adjacentes e estes são apoiados em dois eixos, implicando que no modelo de carga estejam aplicadas duas cargas de eixo por carruagem.

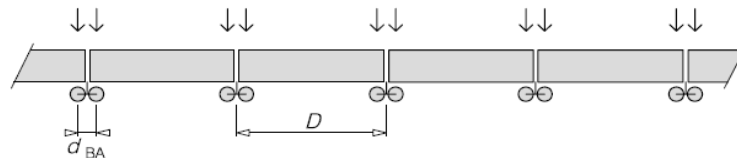


Fig.4.1 – Comboio articulado (Fonte: EN 1991-2, 2003).

## 4.1.1.1. AGV (Automotriz de Grande Velocidade)

O AGV foi apresentado em Paris a 5 de Fevereiro de 2008, foi concebido para circular a 360 km/h. A 3 de Abril de 2007, um comboio TGV que continha um motor AGV, fez um novo recorde do mundo ao atingir 574,8 km/m, em Le Chemin, num teste de velocidade feito na linha que liga Paris a

Estrasburgo. Está prevista a circulação deste comboio no ano 2011 na Itália e 2014 na França (RTP, 2010).

É o primeiro comboio que combina arquitectura articulada com um sistema de tracção distribuída, eliminando assim grande parte do ruído que é causado dentro das carruagens devido à rodagem dos comboios nos carris. Com este sistema ocorre um amortecimento entre as carruagens. Tem carruagens auto-alimentadas electricamente, consumindo menos 15% de energia, ficando os passageiros com um espaço útil maior. Só por curiosidade, o AGV é concebido com cerca de 98 % de matéria reciclável ou reutilizável (alumínio, aço, cobre e vidro), emite apenas 13 vezes menos dióxido de carbono que um autocarro, 50 vezes menos que um carro e 70 vezes menos que um avião. Relativamente ao consumo de petróleo, o AVG consome 0.4 l/100 passageiros/km, o que significa 3 vezes menos que um autocarro, 8 vezes menos que um carro e 15 vezes menos que um avião (RTP, 2010).



Fig.4.2 – AVG (Fonte: WIKIMEDIA, 2010a).

#### 4.1.1.2. Thalys 2

O Thalys PBKA (Thalys 2) é um comboio que derivou do TGV Francês, com pequenas modificações. A sua entrada em serviço data de 1996, numa linha de alta velocidade que opera entre Paris, Bruxelas, Colónia (Köln) e Amesterdão, daí o seu nome. O problema que surge nos comboios internacionais é que, para diferentes países exigem padrões e regulamentos distintos, como por exemplo o fornecimento de electricidade, o tamanho dos túneis ou a distância entre as linhas. A sua velocidade máxima em serviço é de 300 km/h, atingindo o valor máximo de 320 km/h. O seu comprimento é 400 m, aproximadamente.



Fig.4.3 – Thalys 2 (Fonte: FLICKR, 2010).

#### 4.1.1.3. Eurostar

O Eurostar Class 373 ou TGV TMS foi inaugurado em 1993, que liga a França ao Reino Unido, pelo canal da Mancha, em três horas. Faz parte da família TGV, sendo a sua secção menor, para ser compatível com as dimensões dos túneis britânicos. A velocidade em serviço e em o valor máximo de 300 km/h, possuindo um comprimento de 390 m.



Fig.4.4 – Eurostar (Fonte: SMH, 2010).

#### 4.1.2. COMBOIOS CONVENCIONAIS

Cada carruagem possui dois *bogies* assentes num par de eixos, o que implica que no modelo de carga existam quatro cargas de eixo por carruagem.

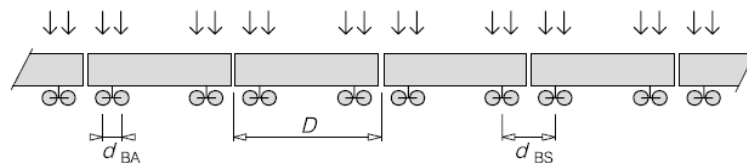


Fig.4.5 – Comboio convencional (Fonte: EN 1991-2, 2003).

##### 4.1.2.1. ICE (*InterCity Express*)

Esta gama de comboios opera na Alemanha e nos países vizinhos, ao serviço da Deutsche Bahn (DB). Foi em 2003 que foi inaugurada a Linha Colónia - Frankfurt, na qual os comboios ICE circulavam a uma velocidade que atingia os 330 km/h. Países como a Rússia, China e Espanha, tem modelos baseado no ICE-3 utilizados nas suas linhas de alta velocidade, são eles o Velaro RUS, CRH 3 e Velaro E, respectivamente. Foi registada uma velocidade máxima do Velaro E de 403 km/h, sendo a sua velocidade de serviço de 350 km/h. O seu comprimento é de 350 m.



Fig.4.6 – ICE (Fonte: BIOCRAWLER, 2010).

#### 4.1.2.2. ETR-500 (*Elettro Treno Rapido 500*)

Foi o primeiro comboio de alta velocidade não pendular, foi construído na Itália, operando actualmente ao serviço da *Trenitalia*. O fabricante deste comboio é FIAT Ferroviária, sendo responsável pela construção do ALFA Pendular português. A velocidade máxima em serviço é de 300 km/h.



Fig.4.7 – ETR-500 (Fonte: 4RAIL, 2010).

#### 4.1.2.3. Virgin

O Pendolino (Virgin Class 390) é um comboio pendular inglês construído pela FIAT Ferroviária, opera desde o sul Inglaterra até à Escócia, ao serviço da Virgin Trains. A sua velocidade em serviço é de 225 km/h, e tem um comprimento de 250 m.



Fig.4.8 – Virgin (Fonte: UKTRAINPHOTOS, 2010).

#### 4.1.2.4. Zefiro

Existem dois modelos, Zefiro 250+ e Zefiro 300+, fabricados pela Bombardier, o número do modelo indica a velocidade máxima a que circula. O governo chinês adquiriu 40 unidades do primeiro modelo, cada unidade pode atingir 400 m de comprimento, sendo constituído por 14 carruagens.



Fig.4.9 – Zefiro 250+, (Adaptado de FIRETRENCH, 2010).

#### 4.1.2.5. Alfa Pendular

É o comboio que opera em Portugal com maior velocidade, 220 km/h, tendo 151,2 m de comprimento, possuindo uma tecnologia que lhe permite circular nas curvas a velocidades elevadas, essa tecnologia curiosamente deu o nome ao comboio. O Alfa Pendular, deriva do comboio de alta velocidade Italiano ETR, e circula em Portugal desde 1999.



Fig.4.10 – Alfa Pendular (Fonte: WIKIMEDIA, 2010b).

#### 4.1.3. COMBOIOS REGULARES

Estes comboios têm a particularidade de as carruagens dividirem um eixo com as carruagens adjacentes. Podem duas composições estar unidas por magnetos, em que a distância entre os *bogies* de extremidade é igual a  $e_c$ .

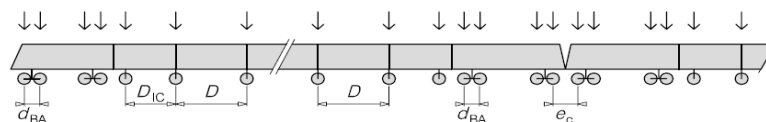


Fig.4.11 – Comboio regular (Fonte: EN 1991-2, 2003).

#### 4.1.3.1. TALGO 200 (Tren Articulado Ligeiro Goicoechea Oriol)

Esteve em circulação nos anos de 1992 até 2007, operando no corredor espanhol Málaga-Córdoba-Madrid, o fabricante foi Alstom, sendo substituído por unidades AV da série 102 e 103. A Velocidade máxima em serviço é de 350 km/h, possuindo um comprimento de 350 m.



Fig.4.12 – Talgo 200 (Fonte: RAILWAYMANIA, 2010).

## 4.2. MODELO DE CARGA HSLM

Esta classe de modelo, corresponde aos dois tipos de comboio universais que foram criados no âmbito da interoperabilidade da rede europeia de alta velocidade: HSLM-A e HSLM-B.

Como se sabe, numa rede ferroviária nem sempre a sua composição é constituída por um único material circulante. É por esta razão, que nesta tese se optou por realizar estudos de vibração relativamente a materiais que possam vir a surgir, garantindo os limites *HSLM*, que estão em seguida especificados. Ao ser realizado este estudo, a possibilidade de não verificação dos limites com o aparecimento de novos comboios é muito reduzida, casos os novos comboios se encontrem nos limites *HSLM*.

Só irão ser analisados casos de comboios aleatórios articulados, por isso, segundo o modelo de carga *HSLM*, as variáveis envolventes variam da seguinte maneira:

- Carga máxima por eixo:  $P_{máx}=170$  kN;
- Somatório de todas as cargas por eixo, aplicadas ao comboio:  $\sum P \leq 10000$  kN;
- Comprimento da carruagem:  $18 \text{ m} \leq D \leq 27 \text{ m}$ ;
- Distância entre o eixo dianteiro e traseiro:  $2,5 \text{ m} \leq d \leq 3,5 \text{ m}$ ;
- Comprimento máximo do comboio:  $L_{máx} \leq 400$  m;
- Peso por eixo das rodas e suspensão:  $P_{ws} \leq 2$  ton.

Para a realização da análise dinâmica, o modelo base do comboio de alta velocidade de passageiros, para linhas interoperáveis, foi baseado no modelo que se encontra proposto no EN 1991-2, 2003. O modelo *HSLM-A* (Figura 4.13) é composto por duas carruagens de alimentação eléctrica (1), duas carruagens terminais (2) e  $N$  carruagens intermédias (3). Cada carruagem tem dois eixos de carga, simulando dois eixos de rodas, um dianteiro e outro traseiro, à semelhança de um comboio articulado em que cada eixo de rodas é uma carga pontual.

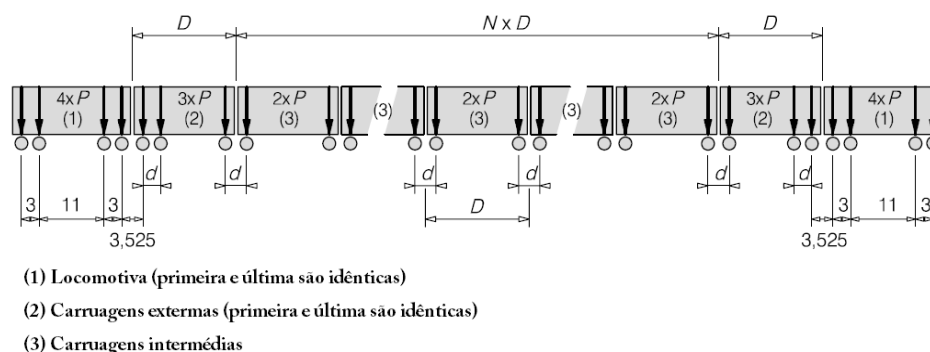


Fig.4.13 – Modelo de cargas HSLM-A (Adaptado de EN 1991-2, 2003).

### 4.3. MODELOS DOS COMBOIOS E DE CARGA

Depois de tudo que foi referido anteriormente e respeitando as medidas que garantem a interoperabilidade, irão ser estudados modelos aleatórios de comboio articulados, que se encontrem nos limites admissíveis. O modelo do comboio utilizado encontra-se esquematicamente na Figura 4.14.



Fig.4.14 – Comboio modelo (Adaptado de Lombaert, 2006).

A velocidade de circulação considerada tem o valor de 300 km/h, que corresponde a 83,33 m/s, a primeira locomotiva tem as mesmas dimensões que a última. O que varia nos comboios aleatórios são, os valores de  $D$  e  $d$ . Serão gerados 50 comboios aleatórios, mais dois comboios com as dimensões extremas, um deles possui as dimensões mínimas de  $D$  e  $d$  admissíveis e outro as dimensões máximas.

Quadro 4 – Características dos comboios com as dimensões extremos.

Características	$P$ (N)	$d$ (m)	$D$ (m)	$P_{WS}$ (kg)	$L$ (m)	$\sum P$ (kN)	N (carruagens)
Comboio com as dimensões mínimas	170000	2,5	18	2000	385,55	8160	17
Comboio com as dimensões máximas	170000	3,5	27	2000	395,55	6120	11

No Quadro 4, é possível observar que o número de carruagens intermédias pode variar entre as 11 e as 17 carruagens, dependendo das dimensões de  $D$  e  $d$ .

Para gerar os comboios aleatórios, é necessário gerar inicialmente vectores que correspondem às coordenadas à posição dos pontos onde a carga é aplicada, os eixos, as condições impostas para a formação desses vectores foram:

- Inicialmente, geram-se valores de  $D$  e  $d$  aleatórios, dentro dos limites que foram referidos anteriormente.
- O segundo passo é fixar os valores da primeira locomotiva, que tem valores fixos dos eixos; Vector coluna [3;14 (11+3);17 (14+3);20,525 (17+3.525)]. Encontra-se esquematizado na Figura 4.14;
- O terceiro passo é somar ao valor anterior (20,525 m) o valor de  $d$  ( $20,525 + d$ ) e a esse valor obtido soma-se  $D - d$ , somando novamente o valor de  $d$  e assim sucessivamente, tornando-se um processo repetitivo;
- O processo anterior tem duas condições finais: uma delas é que a soma do passo anterior, tem que terminar sempre com a soma do valor de  $d$  (para ser possível fazer a ligação à última locomotiva); a outra condição é que o processo repetitivo, do ponto anterior, acaba quando o valor final destes somatórios for superior a 379,475 m (400 m menos os valores que são fixos da última locomotiva, 20,525 m);
- Último passo, é somar os valores da última locomotiva (que tem as mesmas dimensões que a primeira locomotiva) ao somatório executado anteriormente.

Criaram-se vectores coluna, porque os processos que se seguem a esta geração de comboios, funcionam internamente com este tipo de vectores. Depois da geração de um comboio aleatório, procede-se ao cálculo das velocidades e dos deslocamentos, os resultados obtidos saem num vector linha. Como se trata da geração de vários comboios aleatórios, o que se vai obter é uma matriz, em que o número de linhas corresponde ao número de comboios aleatórios. Os valores que se encontram na primeira linha das matrizes dos deslocamentos e velocidade, correspondem aos resultados obtidos para o primeiro comboio aleatório gerado, a segunda linha representa os valores correspondentes ao segundo comboio aleatório e assim sucessivamente.

#### 4.4. GEOMETRIA

O esquema seguinte é representativo do caso em estudo. Observa-se que o comboio circula sobre um aterro. No caso em estudo o aterro tem uma altura de 1,5 m. O objectivo, é analisar o que acontece em pontos à superfície, quando o comboio circula a uma velocidade de 300 km/h.

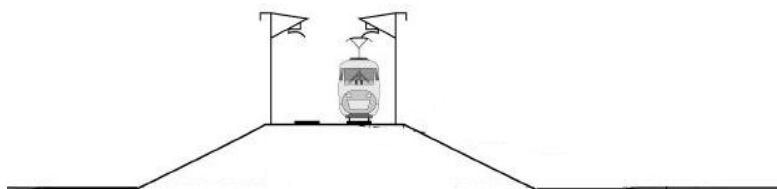


Fig.4.15 – Esquema do caso em estudo (Adaptado de Harris Miller Miller & Hanson Inc, 2005)

Para facilitar a introdução dos dados correspondentes à geometria, foi necessário efectuar simplificações do modelo, utilizando eixos de simetria, simulando que no lado oposto ocorre

exactamente o mesmo que no lado que está a ser analisado. Esta simplificação do modelo reduz o tempo de cálculo dos resultados. Os eixos de simetria estão representados na Figura 4.16.

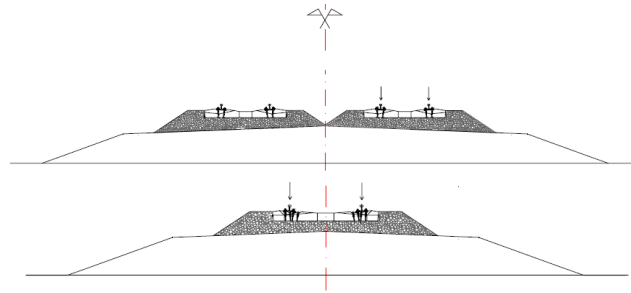


Fig.4.16 – Simplificação do corte da via (Fonte: Alves Costa, et al., 2009a).

A geometria considerada, para introduzir os dados no programa, que foi descrito no Capítulo 3, está representada na Figura 4.17. É constituída por dois tipos de solos distintos (solo 1 e solo 2), por um aterro, uma travessa e o carril que é simulado com a aplicação de cargas num ponto, que se encontra a 0,75 m do eixo de simetria, sobre a travessa.

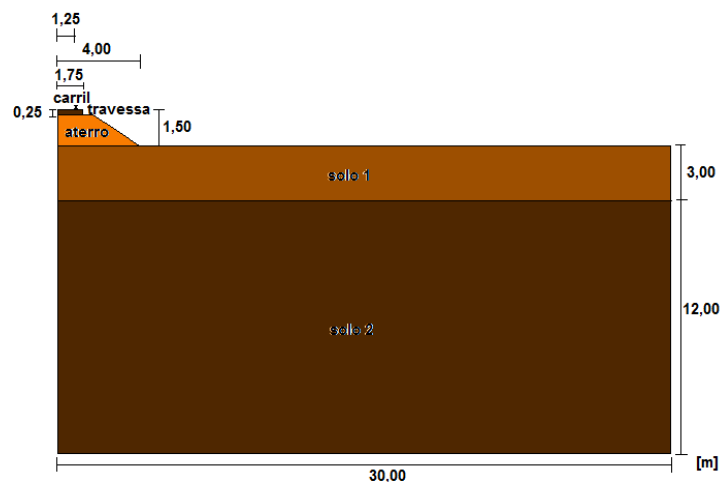


Fig.4.17 – Geometria do caso em estudo

A travessa tem 0,25 m de altura e 1,25 m de comprimento. Relativamente ao aterro tem uma forma trapezoidal, tendo a base 4 m de comprimento e o topo 1,75 m, com uma altura de 1,5 m. O solo de fundação é constituído por dois tipos de materiais, com diferentes velocidades de ondas S, o primeiro solo encontra-se nos primeiros 3 m de profundidade e o segundo material situa-se nos 12 m seguintes. Todo o esquema da geometria da malha encontra-se representado na Figura 4.17.

Segue-se a execução de geração da malha, que é um processo importante, pois para obter resultados satisfatórios, a malha não deve ser muito apertada, se não o processo de cálculo torna-se muito lento, nem pode ser muito afastada, se não, não é possível fazer uma análise contínua das ondas mais curtas (frequências elevadas). Quando se gera uma malha é importante ocorrer uma boa relação tempo/eficácia no cálculo. O programa utilizado para a geração da malha foi o programa GEN2D.

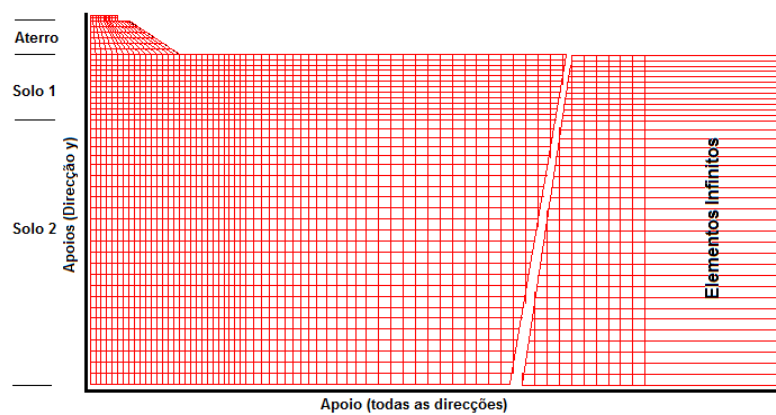


Fig.4.18 – Geração da malha

Optou-se por uma discretização mais apertada da malha na zona onde é aplicada a carga dinâmica, no carril, sendo o seu espaçamento entre nós alargado progressivamente à medida que nos afastamos do carril.

Os apoios que são considerados ao longo do eixo de simetria são apoios simples, sendo o movimento impedido na direcção horizontal, podendo movendo-se livremente na direcção vertical. Relativamente aos apoios colocados abaixo da segunda camada, são apoios duplos, que impedem o movimento em todas as direcções, simulando uma camada muito rígida que não se deforma, existindo a possibilidade das ondas serem reflectidas quando entram em contacto com essa camada rígida. Para ser possível simular a continuidade horizontal do meio, para além dos 30 m, são considerados elementos infinitos, para que as ondas possam propagar, não sofrendo reflexão na direcção perpendicular à propagação, simulando assim casos reais.

#### 4.4.1. CARRIL

‘O carril é o elemento principal do sistema’ (Fortunato, 2005). Os carris são feitos de aço e a sua função é de suportar e transferir para as travessas, as cargas que os veículos exercem sobre elas e impor a direcção num plano às rodas dos comboios. Estes elementos funcionam como uma viga, tendo que ter bastante rigidez, para ser possível transferir as cargas que se concentram nas rodas para as travessas, funcionando como apoios afastados com um determinado comprimento, não podendo ter uma flexão elevada.

É consensual, que uma carga rolante provoque vibrações transversais no carril, na qual fazem variar o grau de aderência e de pressão no contacto roda/carril. Consequente a isto, são produzidas variações da velocidade angular da roda e deslizamentos elementares, que progressivamente se vai agravando, originando o desgaste ondulatorio, este desgaste manifesta-se longitudinalmente ao longo do carril.

Este desgaste no carril é causado em função do tráfego existente, pois nos troços em que as composições arrancam e travam repentinamente conjugada com as ligações dos carris (ligação feita com juntas) existindo imperfeições, ocorre uma ampliação das forças que originam as oscilações, produzindo assim vibrações no carril.

É evidente, que a longo prazo este desgaste ondulatorio provoca efeitos negativos na infra-estrutura, como a degradação da geometria da viga, a ocorrência de fadiga nos carris ocorrendo um desenvolvimento e propagação dos defeitos que são internos, o desgaste das fixações e a ocorrência de

fissuras nas travessas. Com a ocorrência destes efeitos todos, ainda causam o desgaste da suspensão do material circulante, provocando uma maior poluição sonora tanto no interior do veículo, como no exterior. O desgaste ondulatorio não coloca directamente em risco a infra-estrutura ferroviária, faz com que a manutenção da via e do material circulante seja feita com maior frequência.

Pelas razões referidas anteriormente é normal que se tente prolongar a vida útil do carril. Isto é possível, com medidas preventivas que devem ser implementadas, para que os danos na via férrea sejam minimizados. Para além da conservação dos parâmetros geométricos da via, é necessário recorrer à esmerilagem da mesa de rolamento da face de encosto do verdugo, resolvendo então algumas anomalias. O processo de esmerilagem está descrito no Quadro 1, mas para além da regularizar a superfície do carril, a esmerilagem elimina também pequenas situações de fadiga pontual, que são provocadas pelo esmagamento à passagem das rodas dos veículos.

Está representada na Figura 4.19, um equipamento capaz de medir as irregularidades da mesa rolante do carril com grande precisão, na ordem dos 0,01 mm.



Fig.4.19 – Equipamento de inspecção do desgaste ondulatorio dos carris (REFER, 2010d).

Encontra-se representado um esquema, onde é possível observar as irregularidades da via e o seu contacto com o veículo.

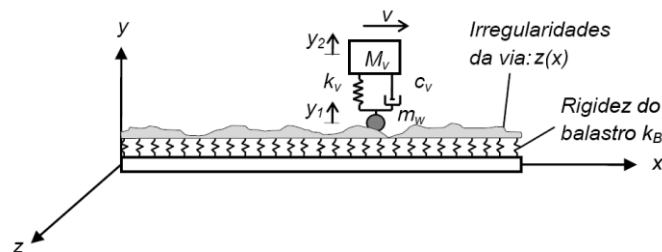


Fig.4.20 – Elemento simples da interacção veículo/estrutura (Fonte: Pereira, 2008)

Como já foi referido anteriormente, o contacto entre carril/roda não é liso, contendo rugosidades de pequena amplitude. A Fórmula (23) caracteriza este fenómeno entre o carril e a roda. Esta proposta foi realizada por Yang, em 1986.

$$Z(x) = \sum_{n=1}^N \sqrt{2S(\omega)\Delta\omega} \times \cos(\omega x - \theta_n) \quad (23)$$

O que se encontra em raiz, representa a amplitude das irregularidades e a função cosseno atende ao desfaseamento de fase das irregularidades, para vários comprimentos de onda.

Utilizou-se a Fórmula (24), função densidade espectral de potência (Lombaert et al., 2006), pois apesar de existirem várias propostas para a definição desta variável, muitas delas dependem de variáveis que são difíceis de quantificar.

$$S(\omega) = S(\omega_0) \times \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-n} \quad (24)$$

Efectuando-se várias medições, constatou-se que os comprimentos de onda das imperfeições nos carris eram restringidos a valores próximos de 20 ou 30 metros. Mas, esta expressão foi aplicada a gamas de valores mais elevadas obtendo-se valores satisfatórios, como é o caso desta análise (comprimento de onda máximo tem o valor de 32 metros).

Apesar das cargas que circulam nas linhas de alta velocidade serem relativamente baixas, ao aplicar as cargas repetitivamente, torna-se necessário que o carril tenha uma inércia vertical elevada, que a qualidade do aço seja também elevada e que tenha uma boa qualidade de acabamentos, principalmente na superfície rolante.

Pelas razões referidas anteriormente e porque neste caso prático a velocidade de circulação é elevada, escolheu-se os carris do tipo *UIC60* (60 kgf/m).

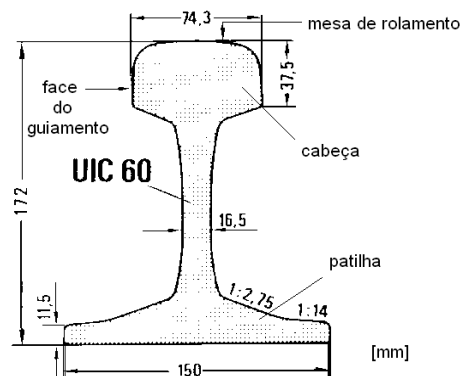


Fig.4.21 – Carril tipo *UIC60*, (Adaptado de SPUR1, 2010 )

Após as invasões francesas da Península Ibérica, no século XIX, a Espanha decidiu, no ano 1844, construir uma rede ferroviária com linhas de bitola (distância entre carris medida em alinhamento recto) diferente da bitola francesa para se defenderem das invasões, pois assim, os comboios não conseguiriam circular entre os dois países.

Quadro 5 – Tipos de bitolas e as suas dimensões

Via	Bitola	Medida (mm)
Larga portuguesa e espanhola	Ibérica	1668
Estreita portuguesa e europeia	Métrica	1000
Normal europeia	Europeia	1435

Esta escolha tem prejudicado a Península Ibérica principalmente, as exportações e importações de produtos que circulam na Europa, pois os comboios de mercadoria não podem movimentar-se livremente. Por esta razão, os operadores europeus evitam o transporte de mercadorias por Espanha e Portugal, escolhendo os portos Italianos ou mesmo os de outros países da Europa. Pode-se então concluir que a ferrovia não tem capacidade competitivas comparativamente à rodoviária, enquanto esta situação não se alterar. Por isso, está a optar-se pela mudança da bitola ibérica para a bitola europeia, e pouco a pouco este processo vai sendo conseguido. Nas linhas que vão ser construídas de raiz a bitola que vai ser usada é a bitola europeia, bitola que vai ser usada nas ligações estudadas de AV para Portugal.

Na Figura 4.22 é possível observar que com as ligações a Espanha, pelas linhas de AV, o mercado ferroviário torna-se mais competitivo comparativamente ao ano de 2003, pois gradualmente irá ocorrer uma transferência de passageiros e mercadorias do transporte aéreo e rodoviário para o ferroviário, ocorrendo ganhos energéticos, ambientais e uma diminuição da sinistralidade.

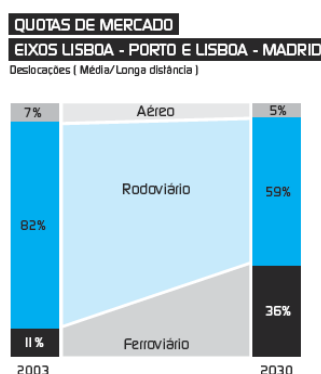


Fig.4.22 – Quotas de mercado comparando os anos de 2003 e o previsto para 2030 (Fonte: REFER, 2010 e).

As características utilizadas no modelo para caracterização do carril, são as seguintes:

- $EI = 6,3 \times 10^6 \text{ N.m}^2$ ;
- $m = 60 \text{ kg/m}$ .

Internamente no ficheiro correspondente ao carril, são introduzidas características das palmilhas, um dos elementos que constitui a via férrea. As palmilhas, como está representado na Figura 2.3, fazem a ligação entre o carril e a travessa. Este elemento tem que absorver vibrações e impactos. A palmilha deve ter boa aderência à travessa, para que quando o comboio passe não ocorra nenhum deslocamento

da palmilha. As palmilhas também têm que ter características resistentes aos agentes atmosféricos, e a alguns derivados de petróleo.

As características das palmilhas que são introduzidas no modelo vão ser:

- $k = 255,7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ;
- $c = 22,5 \times 10^3 \text{ Ns/m}^2$ .

A Figura 4.23 esquematiza os valores de variáveis que são introduzidas no modelo, relativamente ao carril e à palmilha e o modo de ligação do carril à estrutura da via férrea.

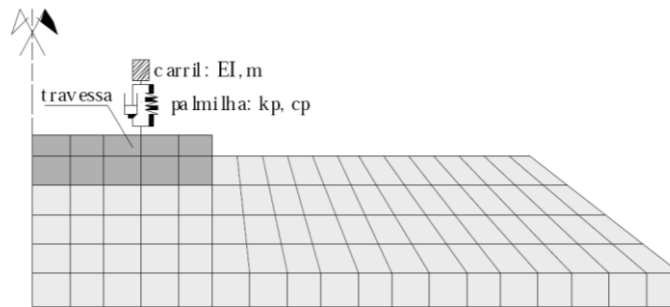


Fig.4.23 – Modelo de ligação do carril à estrutura da via férrea (Fonte: Costa Lopes, et al., 2010)

#### 4.4.2. TRAVESSAS

As travessas são colocadas entre os carris e o balastro, sendo elementos com elevada rigidez. A sua aplicação tem como objectivo, garantir a estabilidade da via férrea na direcção vertical e na horizontal, transmitindo as forças verticais e horizontais para as camadas de balastro, forças estas que lhe foram transmitidas pelos carris. São um suporte para os carris, mantendo constante a distância entre os eixos e a inclinação do carril.

Inicialmente as travessas eram de madeira, sendo um material muito leve e fácil de manusear, mas a resistência lateral que conferida à via era muito baixa e a sua vida útil muito curta, por esta razão foram substituídas por betão e aço, materiais que reagem melhor às acções ambientais e materiais mais pesados.

Relativamente às travessas de aço, a sua aplicação torna-se mais difícil, devido à dificuldade de uma correcta colocação na via, e têm que ter uma atenção especial no isolamento eléctrico entre os carris. Outras desvantagens na utilização deste tipo de travessas são, que não conferem grande resistência às acções ambientais, necessitando de um tratamento especial e provocam mais ruído do que outro tipo de travessas.

As travessas de betão têm as dimensões superiores às anteriores e são mais pesadas, melhorando o comportamento da via em serviço e diminuindo as tensões instaladas no balastro. São travessas que têm boas características perante as acções ambientais, originando uma diminuição dos gastos relativos à conservação da via. Este tipo de travessas é bastante utilizado na rede ferroviária de alta velocidade, devido as suas boas características. Existem dois tipos de travessas de betão: monobloco e bibloco. É possível observar que na zona central existe uma diminuição da secção, isto porque, o diagrama de pressões tem valores máximos nas zonas próximas do extremo, apresentando valores mais reduzidos nas secções que são intermédias.

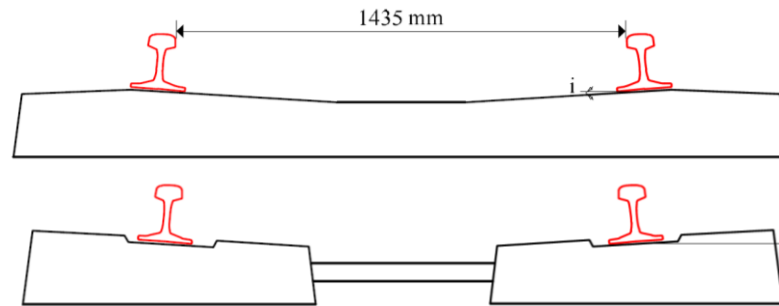


Fig.4.24 – Tipos de travessas de betão: monobloco, em cima; e bibloco, em baixo (Fonte: Rigueiro, 2007)

As características das travessas que são introduzidas no modelo são:

- $E = 17200 \text{ MPa}$ ;
- $\nu = 0,2$
- $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$

#### 4.4.3. CARACTERÍSTICAS DO SOLO

##### 4.4.3.1. Aterro

As características do aterro que são introduzidas no modelo são:

- $E = 130 \text{ MPa}$ ;
- $\nu = 0,3$ ;
- $\xi = 4\%$
- $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$

Como é possível observar na Figura 4.17, não existe uma divisão entre o aterro e o balastro, pois considerou-se que as características do aterro, apesar de diferentes, são muito semelhantes às do balastro, não se justificando uma diferenciação entre o aterro e o balastro. Normalmente as vias balastradas têm uma espessura de 0,6 metros, com 0,3 metros de balastro e 0,3 m de sub-balastro.

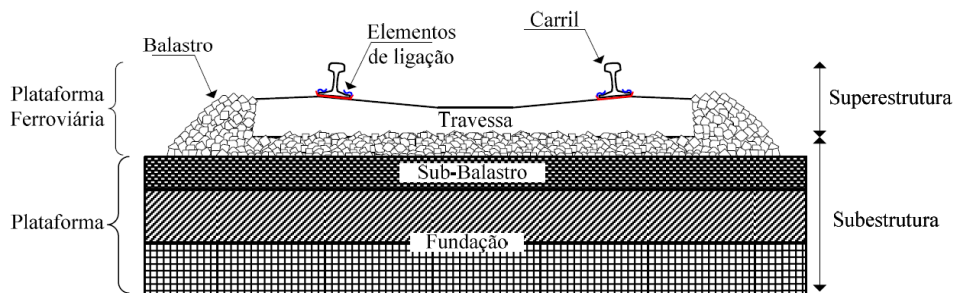


Fig.4.25 – Esquema de uma via balastrada em perfil transversal (Fonte: Rigueiro, 2007)

A via balastrada tem um bom comportamento dinâmico perante os esforços que são provocados pelas massas suspensas (veículos que estão apoiados directamente no eixo de suspensão primária que serve para isolar elevadas massas e promover a dissipação de energia) e as massas não suspensas (são as que

constituem as rodas, o eixo e todas as peças ou equipamentos que lhe estão ligados, o seu comportamento depende das características mecânicas da via).

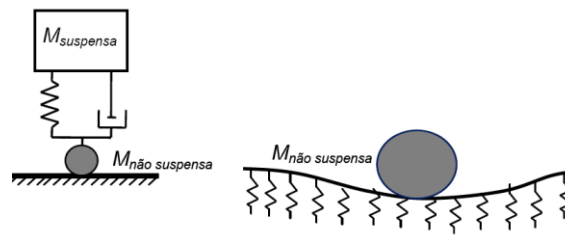


Fig.4.26 – Massas suspensas, à esquerda, massas não suspensas, à direita (Adaptado de Pereira, 2008).

Esta opção de via garante os requisitos de qualidade geométrica de uma forma económica, pois as degradações na geometria que vão ocorrendo podem ser corrigidas com o auxílio de equipamentos mecânicos automáticos. Quando os estudos começaram a aparecer relativamente à alta velocidade na Europa, pensou-se sempre usar via balastrada, pois fornece boas características de rigidez e amortecimento. Mesmo com velocidades na ordem dos 300 km/h, é garantida a resistência da via aos esforços laterais.

A composição do balastro e do sub-balastro é feita com material granular, conferindo resistência à compressão vertical que é característica destas camadas. Esta resistência é garantida, devido à capacidade de fricção que as partículas conseguem ter na interacção e resistência entre elas.

Existem dois factores que modificam o comportamento das camadas balastradas, que são: características mecânicas, que inclui a resistência e a deformabilidade; a permeabilidade, devendo ser controlada, para que a quantidade de água que se encontra no interior da via se manter constante ao longo do tempo. Isto é possível colocando material granular com dimensões de partículas inferiores a 63 mm, o que à primeira vista parece uma escolha errada, pois com estas partículas a camada diminui a capacidade de carga e a própria estabilidade na via, mas sem esta camada essa estabilidade estaria ainda mais em causa, por isso esta opção é a usada.

#### 4.4.3.2. Solo 1

Este solo faz parte da fundação na qual o aterro se encontra assente, tem um papel determinante da forma como a via se vai comportar, quando é sujeita a cargas repetitivas devido à circulação do comboio. Caso os solos tenham más características, pode proceder-se ao tratamento do solo melhorando as suas características e em casos extremos, proceder à substituição do solo para que a fundação tenha um melhor desempenho.

A fundação tem como funções: apoiar a estrutura e as camadas de apoio da via, garantindo que sob as acções de cargas repetitivas não deixam que se deforme excessivamente, mantendo-se longe da rotura, conferir estabilidade da estrutura ao longo do tempo, não sendo afectada pelas acções ambientais; com o passar do tempo ocorre atrito e desgaste nas camadas superiores e a fundação tem como função garantir que esta acção não provoque assentamentos ao nível da camada; permite uma boa compactação na colocação das camadas de estrutura ferroviária, essencialmente do sub-balastro.

As características do aterro usadas no modelo vão ser:

- $E = 111,15 \text{ MPa}$  (valor que origina por considerar  $V_s=150 \text{ m/s}$ , utilizando a equação (3));
- $\nu = 0,3$ ;

- $\xi = 4\%$
- $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$

#### 4.4.3.3. Solo 2

As características do aterro que são introduzidas no modelo são:

- $E = 308,75 \text{ MPa}$  (valor que origina por considerar  $V_s = 250 \text{ m/s}$ , utilizando a equação 3);
- $\nu = 0,3$ ;
- $\xi = 4\%$
- $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$



# 5

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. PONTOS ANALISADOS

No total são 14 os pontos para os quais foram retirados os resultados dos deslocamentos e velocidades. Nove pontos situam-se sobre a camada 1, pontos à superfície do terreno, quatro pontos estão colocados sobre o aterro e o último ponto corresponde ao carril. Na Figura 5.1 representa-se um esquema da posição dos pontos que vão ser analisados.

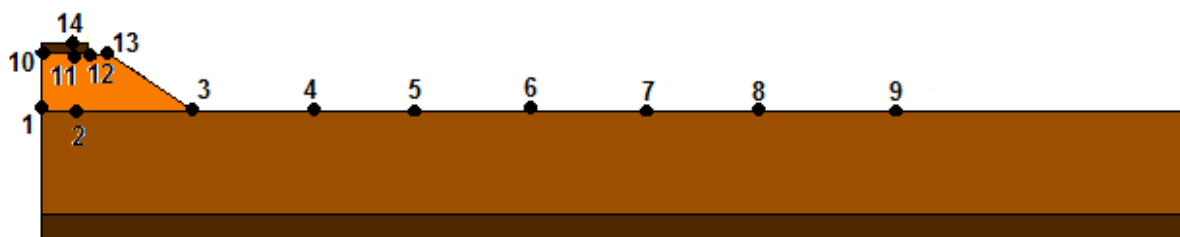


Fig.5.1 – Pontos analisados.

Considerando o referencial (0,0) situado no canto inferior esquerdo da malha, então os pontos que se encontram representado na Figura 5.1, têm as seguintes coordenadas:

Quadro 6 – Coordenadas dos pontos analisados

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
x	0,00	0,75	4,00	6,00	8,05	12,175	16,25	20,10	24,50	0,00	0,75	1,25	1,75	0,75
y	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	16,50	16,50	16,50	16,50	16,50

Como o objectivo da tese é analisar os efeitos da vibração na superfície, a escolha destes pontos já se torna representativa do que se passa à superfície. Não se escolheram pontos a uma distância superior a 25 m, pois acima desse valor os resultados obtidos não são muito viáveis. Também é possível analisar o que acontece no aterro, visto que existem pontos acima e abaixo do aterro. O que acontece ao longo de uma linha vertical que passa no carril, também se pode tornar uma análise interessante.

### 5.2. PERFIL DE IRREGULARIDADES

Juntando as expressões (23) e (24) e considerando,  $\omega_0=1$  rad/m e  $n=3,5$ , que são valores normalmente usados para irregularidades do transporte ferroviário e o  $S(\omega_0)=1,36 \times 10^{-8} \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ , origina a expressão (25):

$$Z(x) = \sum_{n=1}^N \sqrt{2 \times 1,36 \times 10^{-8} \times \omega^{-3,5} \times \Delta\omega} \times \cos(\omega x - \theta_n) \quad (25)$$

O ângulo de fase,  $\theta_n$  utilizado vai ser um valor aleatório, pois as irregularidades do carril também o são.

No Quadro 7, representa a frequência angular para cada comprimento de onda, para o cálculo das várias curvas de irregularidades.

Quadro 7 – Valores de  $\omega$  e  $\lambda$

Curvas	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda$ (m)	0,5	1	2	4	8	16	32
$\omega$ (Hz)	12,5664	6,2832	3,1416	1,5708	0,7854	0,3927	0,1963

O perfil de irregularidades obtém-se, usando a fórmula (25) e somando as curvas de irregularidades que foram criadas para diferentes  $\omega$ .

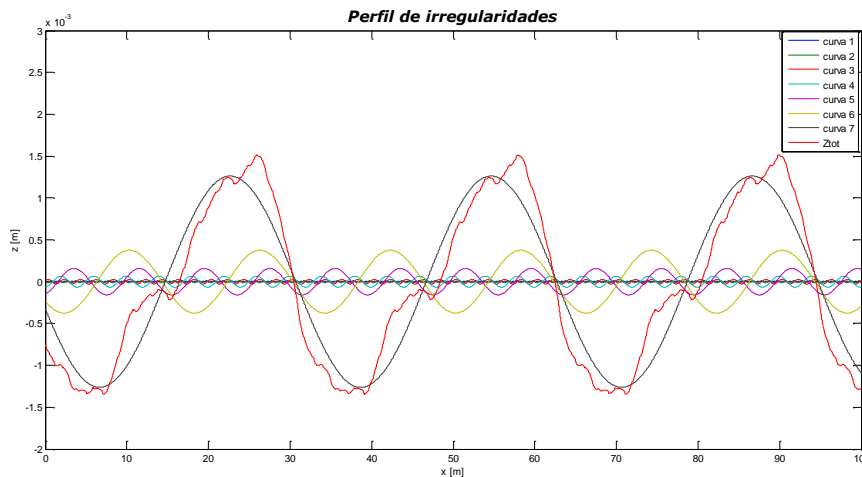


Fig.5.2 – Perfil de irregularidades

Existe uma grande influência no perfil de irregularidades, da curva que corresponde ao comprimento de onda de 32 metros, sendo a forma da irregularidade bastante larga. Ocorre uma repetição das irregularidades de 32 em 32 metros, como é visível.

Comparando os valores de pico, obtidos neste perfil de irregularidades e os valores medidos *in situ*, a sua ordem de grandeza é bastante semelhante.

### 5.3. A IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DO PERFIL DE IRREGULARIDADES

Na Figura 5.3, encontram-se representados os diagramas dos deslocamentos em função do tempo, observando a influência da utilização do perfil de irregularidades, neste estudo.

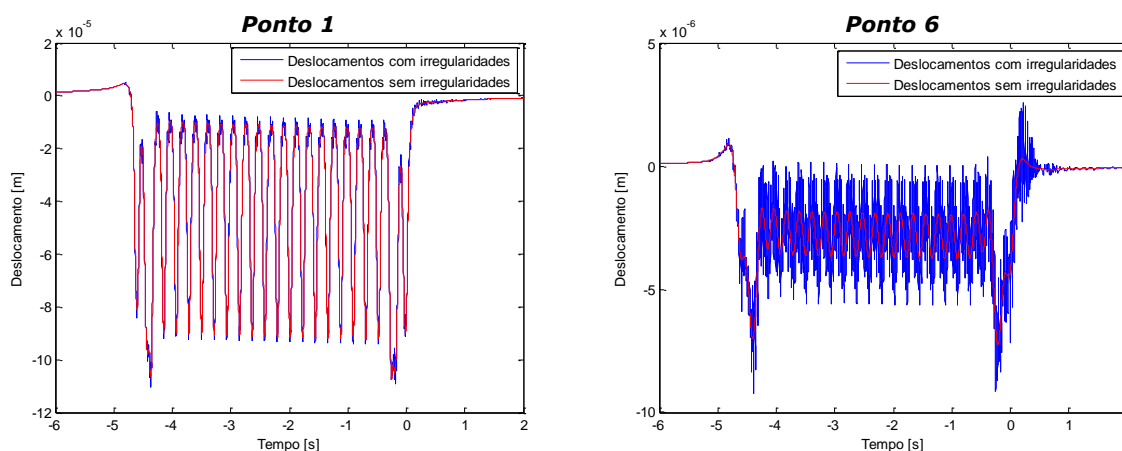


Fig.5.3 – Influência da consideração do perfil de irregularidades

No ponto 1, os dois gráficos encontram-se quase sobrepostos, não havendo grande diferença de diagramas. Contrariamente no ponto 6, o diagrama correspondente aos deslocamentos sem considerar o perfil de irregularidades é mais reduzido do que o deslocamento em que se considera o perfil de irregularidades.

O ponto 1 situa-se no eixo de simetria sob o aterro, encontra-se próximo do ponto de geração de vibração, enquanto, o ponto 6 encontra-se afastado 12,175 m do eixo de simetria à superfície. Conclui-se portanto, que à medida que nos afastamos do carril a influência das irregularidades é maior, por isso é que a sua consideração tem de ser feita neste modelo de previsão.

Outra forma de representar este acontecimento é em percentagem de influência das irregularidades no deslocamento total para cada ponto, como se encontra esquematizado nas figuras seguintes. Esta análise é realizada para os comboios extremos, visto a sua análise ser de mais fácil execução.

#### 5.3.1. PERCENTAGEM DE INFLUÊNCIA DO PERFIL DE IRREGULARIDADES PARA A COTA DE 15 M

A cota 15 m representa todos os pontos que se encontram à superfície do solo, sobre o solo 1.

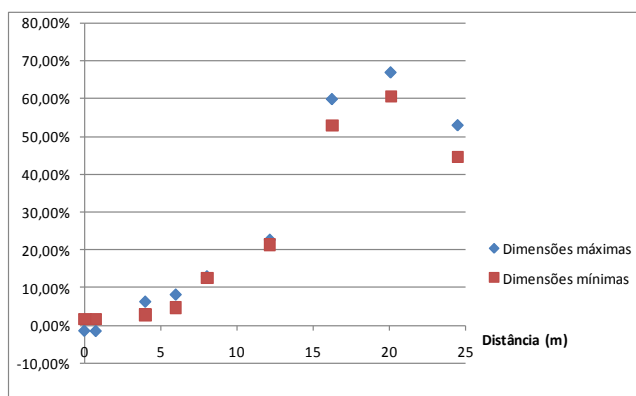


Fig.5.4 – Percentagem de influência das irregularidades nos valores dos deslocamentos a uma cota 15 m.

Observa-se que na zona do aterro, nos dois primeiros pontos a influência das irregularidades ronda os 6%, aumentando progressivamente à medida que nos vamos afastando do ponto de geração da vibração. Até aos 10 m a percentagem de influência das irregularidades não ultrapassa os 13%. Entre os 12,175 m e os 16,55 m existe um crescimento de quase o triplo da percentagem, como é visível, passando de 21,39% para 52,85%. O valor máximo obtido foi de aproximadamente 67% aos 20,10 m de distância ao eixo de simetria

### 5.3.2. PERCENTAGEM DE INFLUÊNCIA DO PERFIL DE IRREGULARIDADES PARA A COTA DE 16,5 M

Para perceber o que se passa junto à fonte, realizou-se a Figura 5.5 à cota 16,5 m, pontos que se situam acima do aterro.

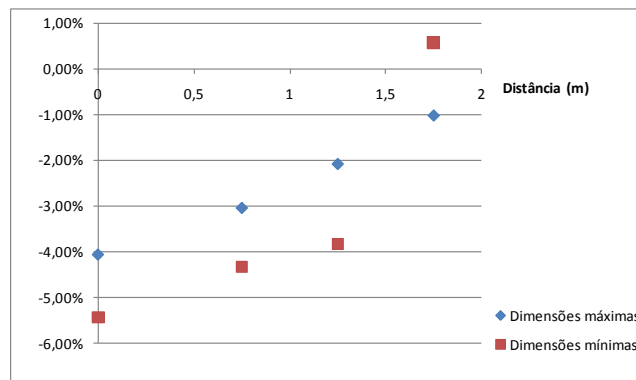


Fig.5.5 – Percentagem de influência das irregularidades nos valores dos deslocamentos a uma cota 16,5 m.

À cota 16,5 m, observa-se que existem valores negativos, isto ocorre porque a irregularidade do carril, para  $x=0$  m, que foi o considerado, está a 'favor' do deslocamento, significando isto que, em vez de a irregularidade agravar o deslocamento acontece o contrário. Significa portanto que o deslocamento só com o peso do comboio é maior, do que quando são introduzidas as irregularidades relativas à interação roda/carril.

Como se observou na Figura 5.4, a distâncias próximas do carril a influência das irregularidades é muito baixa, não ultrapassando os 6%, o que se conclui também nesta análise. Não se tornando tão significativa, a influência das irregularidades quando estamos a analisar o aterro, zona próxima da fonte de vibração.

### 5.3.3. PERCENTAGEM DE INFLUÊNCIA DO PERFIL DE IRREGULARIDADES EM PROFUNDIDADE

Seguidamente, realiza-se uma análise em profundidade, considerando os pontos 2, 11 e 14, situados ao longo de linha vertical que passa pelo carril.

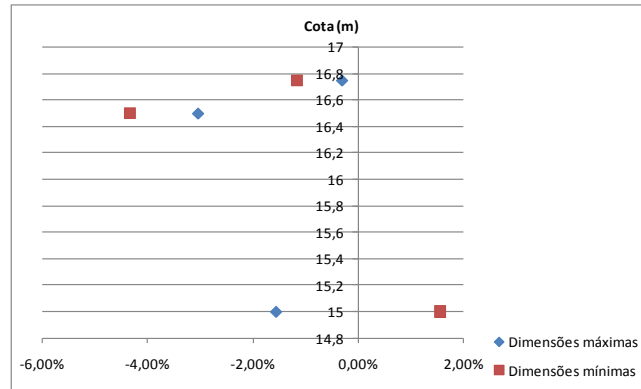


Fig.5.6 – Percentagem de influência das irregularidades nos valores dos deslocamentos em profundidade.

Em profundidade esta análise não se torna interessante, visto não haver nenhuma relação entre os deslocamentos e a influência das irregularidades. Pois, para o caso do ponto do carril, cota de 16,75 m, a percentagem de influência é muito baixa em ambos os casos dos comboios extremos, aumentando essa influência quando descemos para a cota 16,5 m, sobre o aterro, voltando a diminuir à cota 15 m, sob o aterro, por esta razão a nível da profundidade, a influência dos deslocamentos não é conclusiva.

Conclui-se por isso, que a utilização das irregularidades do carril é importante e necessária, principalmente se a análise for específica de um receptor que se encontre afastado da geração da vibração, para além dos 16 m, aproximadamente.

#### 5.4. DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Na Figura 5.7 é possível notar-se nitidamente a correspondência dos picos dos deslocamentos verticais, em função do comprimento do comboio. Esta observação só pode ser realizada para os deslocamentos no carril, é onde este deslocamento se torna mais nítido. É de notar, que o deslocamento tem vários picos de 0 aos 400 metros, aproximadamente, na qual a figura à direita é representativa do que os picos correspondem, quando ocorre a passagem das rodas no carril, provocando um deslocamento vertical bastante acentuado.

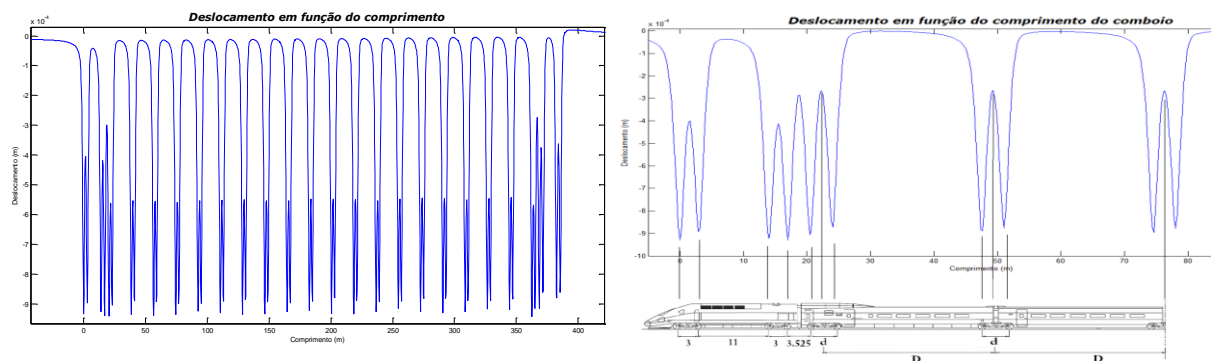


Fig.5.7 – Representação dos picos de deslocamentos verticais em função do comprimento do comboio.

#### 5.4.1. ANÁLISE NO CARRIL PARA OS COMBOIOS EXTREMOS

Nestas análises, o instante zero corresponde ao momento exacto em que o comboio passa a última roda, por isso é que na Figura 5.8, o tempo apresenta valores negativos.

Na análise de deslocamentos, só é interesse analisar os deslocamentos verticais em função do tempo, em pontos muito próximos do carril. O ponto que tem maior interesse em observar é ponto correspondente ao carril, que está representado Figura 5.8.

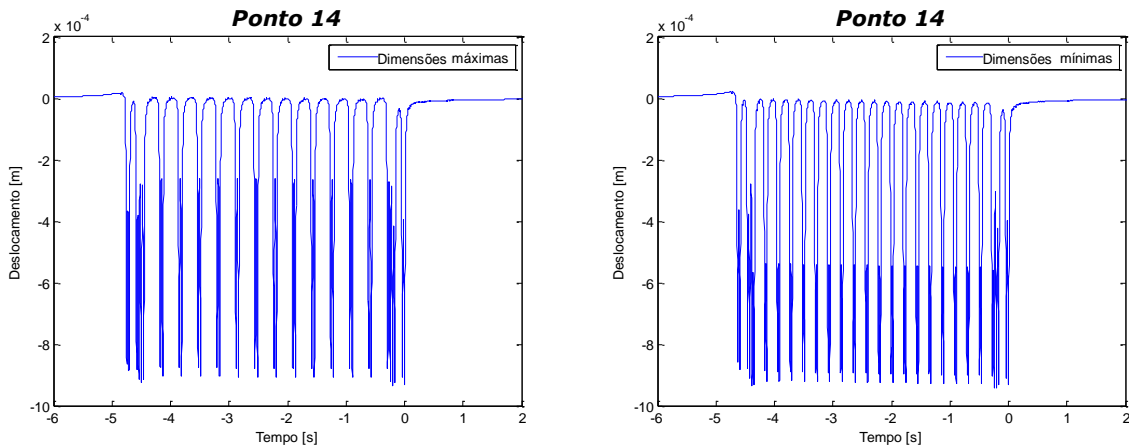


Fig.5.8 – Deslocamentos verticais em função do tempo, no carril, para o caso dos comboios extremos.

Comparando os dois registos temporais é conclusivo que o gráfico que representa o comboio com as dimensões maiores tem menos picos, pois tem menos carruagens comparativamente com o caso do comboio com as dimensões mínimas. É no carril que ocorre um maior pico do deslocamento vertical, pois é o ponto onde é aplicada a carga dinâmica, vindo esse deslocamento a diminuir à medida que analisamos os pontos mais afastamos.

Também é possível determinar o tempo que os comboios demoram a passar, pela expressão seguinte:

$$t(s) = \frac{\text{comprimento}(m)}{v(m/s)} \quad (26)$$

Então o comboio com as dimensões menores, mede 385,55 m e circula a uma velocidade de 83,33 m/s, passa em 4,63 s, enquanto, o comboio com dimensões máximas, mede 395,545 m circulando a mesma velocidade, o tempo que ele demora a passar num mesmo ponto é de 4,75 s, valores muito próximos.

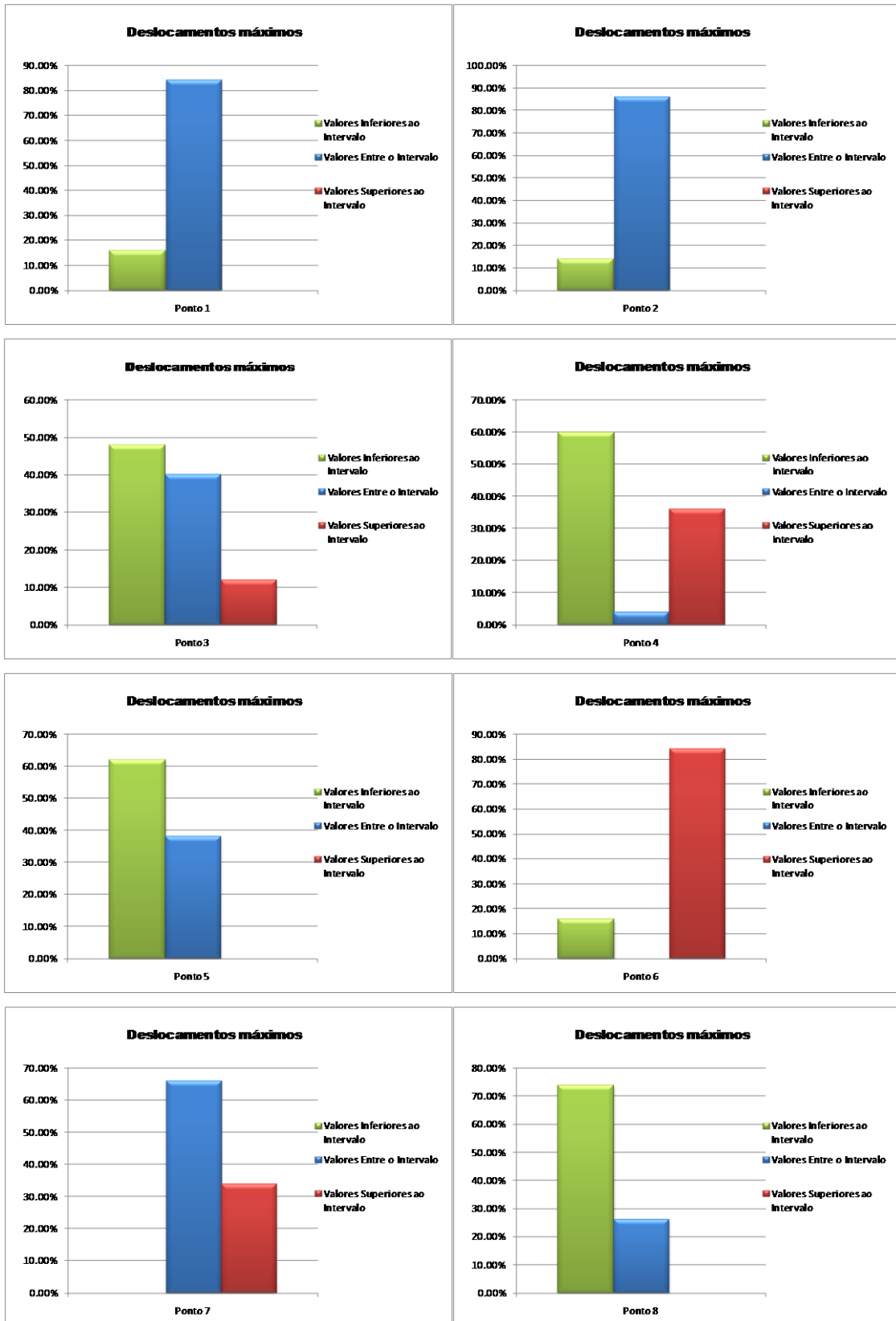
#### 5.4.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS DOS COMBOIOS ALEATÓRIOS E OS EXTREMOS

##### 5.4.2.1. Percentagem de deslocamentos verticais em intervalos

Estão representados vários gráficos, no qual é possível observar a percentagem de deslocamentos verticais que se encontra no intervalo definido pelas dimensões máximas e mínimas e a percentagem que não é abrangida por esse intervalo. Estes gráficos tem como função saber se a análise dos

comboios com as dimensões máximas e/ou mínimas basta, para se conseguir saber o funcionamento do solo relativamente aos deslocamentos provocado pela passagem de comboios de alta velocidade.

Esta análise vai ser feita para todos os pontos de que foram retirados os valores.



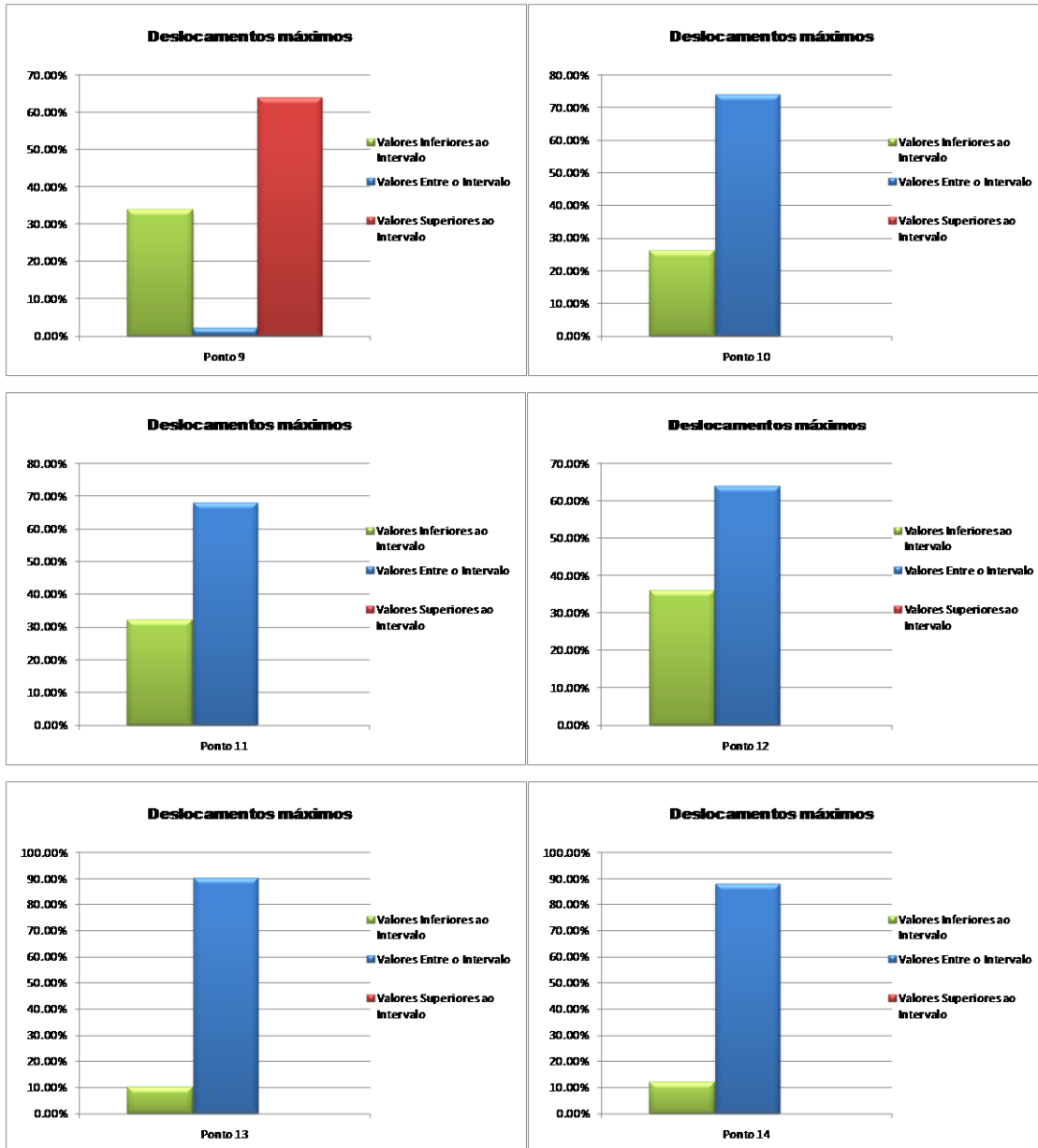


Fig.5.9 – Percentagem de deslocamento vertical que se situam dentro e fora, do intervalo de valores definido pelos comboios extremos

Conclui-se portanto que, relativamente aos deslocamentos, nem sempre a escolha de valores extremos para os comboios, se revelam a situação mais gravosa. Mas também é possível observar que, nos pontos que pertencem ao aterro, pontos 1, 2, 10, 11, 12 e 13 e o carril, ponto 14, considerando somente os comboios com as dimensões extremas, é possível obter os deslocamentos verticais máximos provocados para cada ponto.

O pontos 6, ponto que se situa à superfície, a uma distância de 12,175 m, é o ponto em que os deslocamentos máximos verticais obtidos pelos comboios aleatórios, ultrapassam os 80% dos deslocamentos, definidos pelo intervalo dos comboios extremos.

Existem valores de deslocamentos que nem se encontram no intervalo definido pelos comboios com as dimensões máximas e mínimas, como é o caso do ponto 6, referido anteriormente.

#### 5.4.2.2. Deslocamentos verticais máximos mínimos e médios

Seguidamente, é apresentada o Quadro 8, onde é possível comparar deslocamentos máximos, mínimos e a média relativamente aos comboios aleatórios comparando-os com valores obtidos dos comboios com as dimensões máximas e mínimas.

Quadro 8 – Valores dos deslocamentos verticais máximos, mínimos e média (relativamente as comboios aleatórios) e deslocamentos para as dimensões máximas e mínimas dos comboios.

DESLOCAMENTOS (mm)	máximo	mínimo	média	dimensões máximas	dimensões mínimas
Ponto 1	0,4460	0,4041	0,4134	0,4049	0,4489
Ponto 2	0,4211	0,3816	0,3907	0,3823	0,4236
Ponto 3	0,1121	0,1077	0,1095	0,1093	0,1105
Ponto 4	0,0496	0,0469	0,0478	0,0478	0,0479
Ponto 5	0,0283	0,0260	0,0272	0,0275	0,0284
Ponto 6	0,0105	0,0087	0,0096	0,0093	0,0093
Ponto 7	0,0034	0,0025	0,0029	0,0031	0,0023
Ponto 8	0,0032	0,0023	0,0029	0,0033	0,0030
Ponto 9	0,0028	0,0019	0,0023	0,0022	0,0021
Ponto 10	0,6811	0,6662	0,6704	0,6689	0,6829
Ponto 11	0,6910	0,6755	0,6802	0,6786	0,6931
Ponto 12	0,6469	0,6316	0,6365	0,6351	0,6497
Ponto 13	0,3696	0,3431	0,3493	0,3443	0,3712
Ponto 14	0,9416	0,9329	0,9368	0,9337	0,9434

Observando somente o valor dos deslocamentos para os casos dos comboios com as dimensões máximas e mínimas, é possível concluir que em zonas perto da linha, até a uma distância de 12,175 m do eixo de simetria, os valores máximos são obtidos para o caso de utilizar o comboio com as dimensões mínimas, comboios que possui mais eixos do comboio. A partir dessa distância acontece o contrário, o caso que provoca maiores deslocamentos é o comboio com as dimensões máximas, comboio com menos eixos.

Para uma melhor observação dos resultados, apresentados no Quadro 8, encontram-se em seguida figuras representativas dos deslocamentos verticais nos pontos e a sua evolução com a distância e a profundidade.

A Figura 5.10 representa a evolução dos deslocamentos, à cota de 15 m, pontos que se situam sobre a camada de solo 1, zona à superfície.

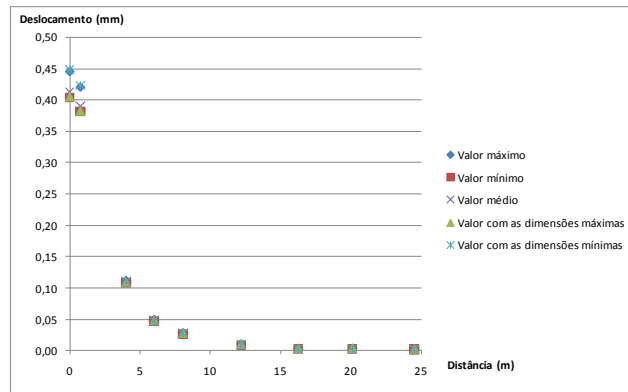


Fig.5.10 – Deslocamentos verticais à cota 15 m.

É bem notório que quando analisamos os pontos que se situam no interior do aterro, a ordem dos deslocamentos encontra-se com valores muito próximos de 0,4 mm. Relativamente ao ponto que se situa na parte extrema do aterro (a uma distância de 4 m do eixo de simetria), o seu deslocamento é bastante inferior comparativamente aos deslocamentos obtidos no aterro, na ordem dos 0,1 mm. À medida que nos afastamos do eixo de simetria, ocorre uma diminuição progressiva dos deslocamentos.

Para ser mais perceptível o que acontece nas zonas exteriores do aterro, é necessário observar a Figura 5.11.

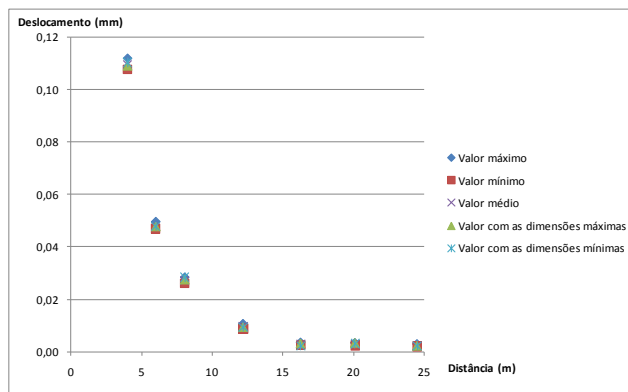


Fig.5.11 – Deslocamentos verticais à cota 15 m, a partir de 4 m de distância do eixo de simetria.

Os deslocamentos nos pontos situados à superfície, tem valores inferiores a 0,12 mm, diminuindo progressivamente à medida que a distância ao eixo de simetria aumenta. É perceptível que a uma distância superior a 15 m, os deslocamentos sentidos são quase nulos, abaixo dos 0,005 mm.

Na Figura 5.12, são representados os deslocamentos obtidos à cota 16,5 m, pontos localizados sobre o aterro.

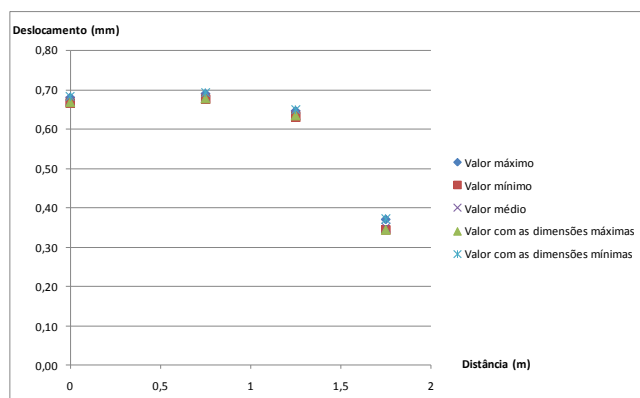


Fig.5.12 – Deslocamento verticais à cota 16,5 m.

Os deslocamentos nos pontos que pertencem à travessa, os três primeiros pontos, têm deslocamentos muito próximos de 0,70 mm, descendo até ao ponto extremo do aterro para 0,4 mm.

O que acontece ao longo da profundidade na direcção do carril é o que vai ser analisado em seguida.

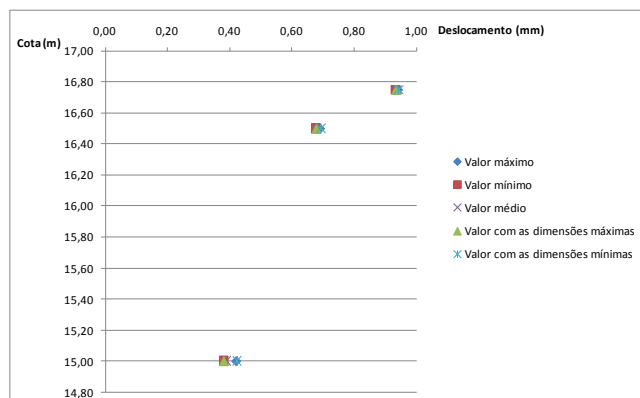


Fig.5.13 – Deslocamento verticais ao longo da profundidade na linha do carril.

É conclusivo que à medida que nos afastamos do ponto de aplicação da carga o deslocamento diminui.

De uma forma geral, pode-se concluir que, à medida que nos afastamos do ponto de geração de vibração, o deslocamento sentido vai diminuindo. Quando nos afastamos do eixo de simetria é notória uma quebra brusca nos deslocamentos, quando a análise é feita nos pontos localizados à superfície, sendo o valor máximo do deslocamento no carril.

#### 5.4.2.3. Variação dos deslocamentos verticais

De seguida, encontra-se representado no Quadro 9, a variação dos valores dos deslocamentos verticais máximos e mínimos, para saber em que ponto é que essa variação é mais pronunciada.

Quadro 9 – Valores dos deslocamentos verticais máximos e mínimos e a variação de valores de todos os comboios

DESLOCAMENTOS (mm)	máximo	mínimo	variação
Ponto 1	0,4489	0,4041	0,0448
Ponto 2	0,4236	0,3816	0,0420
Ponto 3	0,1121	0,1077	0,0044
Ponto 4	0,0496	0,0469	0,0027
Ponto 5	0,0284	0,0260	0,0024
Ponto 6	0,0105	0,0087	0,0018
Ponto 7	0,0034	0,0023	0,0011
Ponto 8	0,0033	0,0023	0,0010
Ponto 9	0,0028	0,0019	0,0009
Ponto 10	0,6829	0,6662	0,0167
Ponto 11	0,6931	0,6755	0,0176
Ponto 12	0,6497	0,6316	0,0181
Ponto 13	0,3712	0,3431	0,0281
Ponto 14	0,9434	0,9329	0,0106

O ponto que tem uma maior variação da gama dos deslocamentos, é o ponto 1, com valores próximos encontra-se também o ponto 2, estes pontos situam-se em baixo do aterro, junto ao eixo de simetria e no alinhamento do carril, respectivamente.

De uma forma geral, o que se observa, é que as maiores variações dos deslocamentos verticais encontram-se no aterro, sendo os pontos situados sob o aterro com valores superiores. O carril, ponto 14, é o ponto que depois do aterro tem a variação mais elevada. E à medida que os pontos se encontram afastados do eixo de simetria, ocorre uma diminuição da variação dos deslocamentos.

## 5.5. VELOCIDADES

A análise de velocidades tem grande interesse, pois é mais fácil a sua medição *in situ*, do que os deslocamentos, tornando-se possível realizar uma comparação, com o que é medido em campo e o que é obtida na análise numérica executada para cada caso.

### 5.5.1. ANÁLISE DE PONTOS

Em relação à velocidade, como no caso dos deslocamentos, é igualmente interessante ser feita esta análise no ponto que caracteriza o carril.

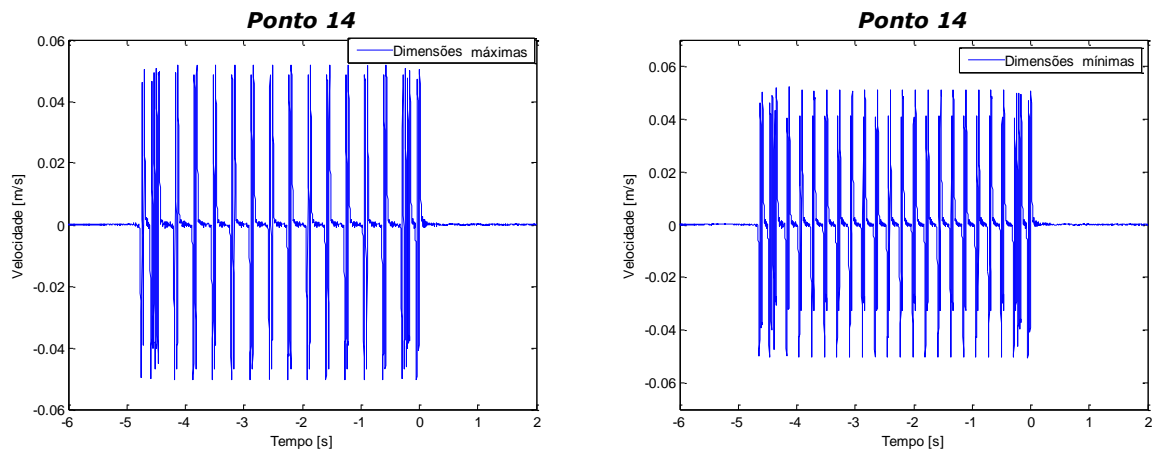


Fig.5.14 – Velocidades ao longo do tempo, no carril.

Como acontece com os deslocamentos, para o comboio com as dimensões maiores tem menos picos de velocidades do que para o outro comboio extremo, pois pela mesma razão tem um menor número de carruagens, possuindo um menor número de pontos de aplicação de carga.

Comparando os pontos situados próximos no carril, ponto 11, a sua caracterização é bastante nítida à passagem do comboio, enquanto nas zonas mais afastadas perde-se a nitidez, nem é possível perceber quando a roda do comboio passa. À medida que ocorre um afastamento da fonte de geração de vibração, é notório que os diagramas das velocidades tornam-se menos nítidos, como se encontra demonstrado na Figura 5.15.

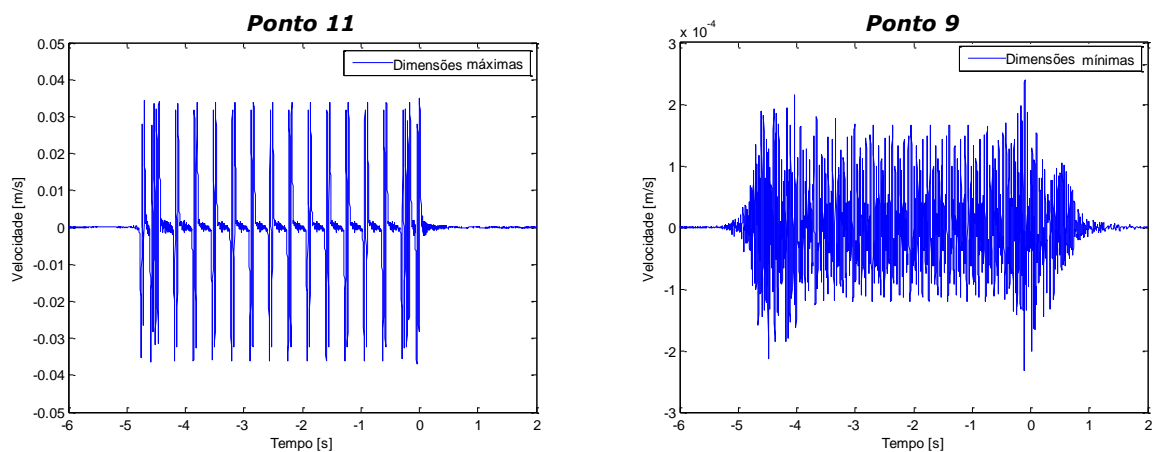
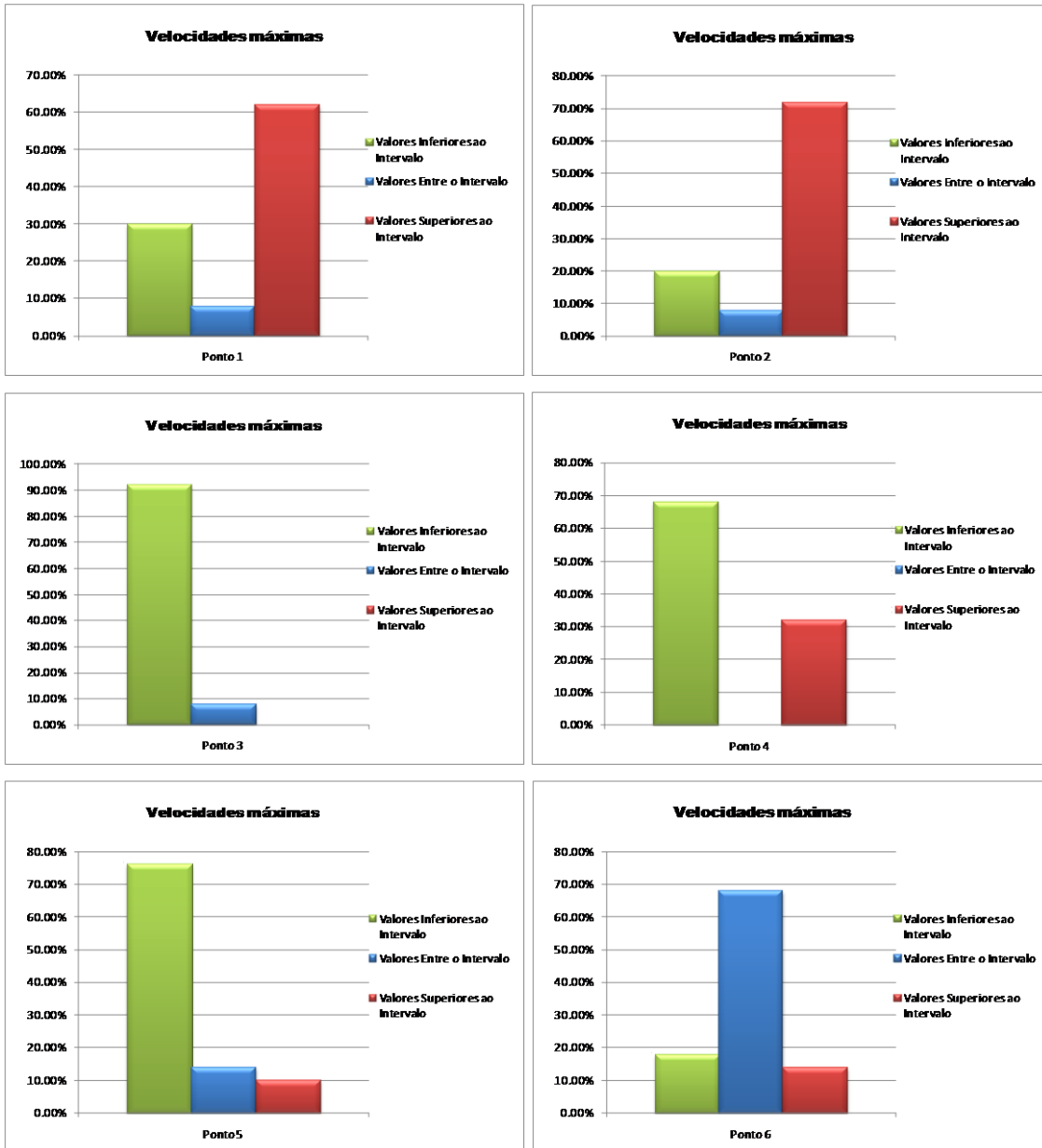


Fig.5.15 – Variação do diagrama de velocidades comparando o ponto no aterro, à esquerda e o ponto mais afastado do eixo de simetria, à direita.

5.5.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS DOS COMBOIOS ALEATÓRIOS E OS EXTREMOS

5.5.2.1. Percentagem de velocidades em intervalos

Analisando o caso das velocidades, da mesma maneira que foi analisado o caso dos deslocamentos, em seguida são representados resultados, em termos de percentagem de velocidades que se encontram no intervalo entre as dimensões mínimas e máximas, e a percentagem que não se encontra neste intervalo.



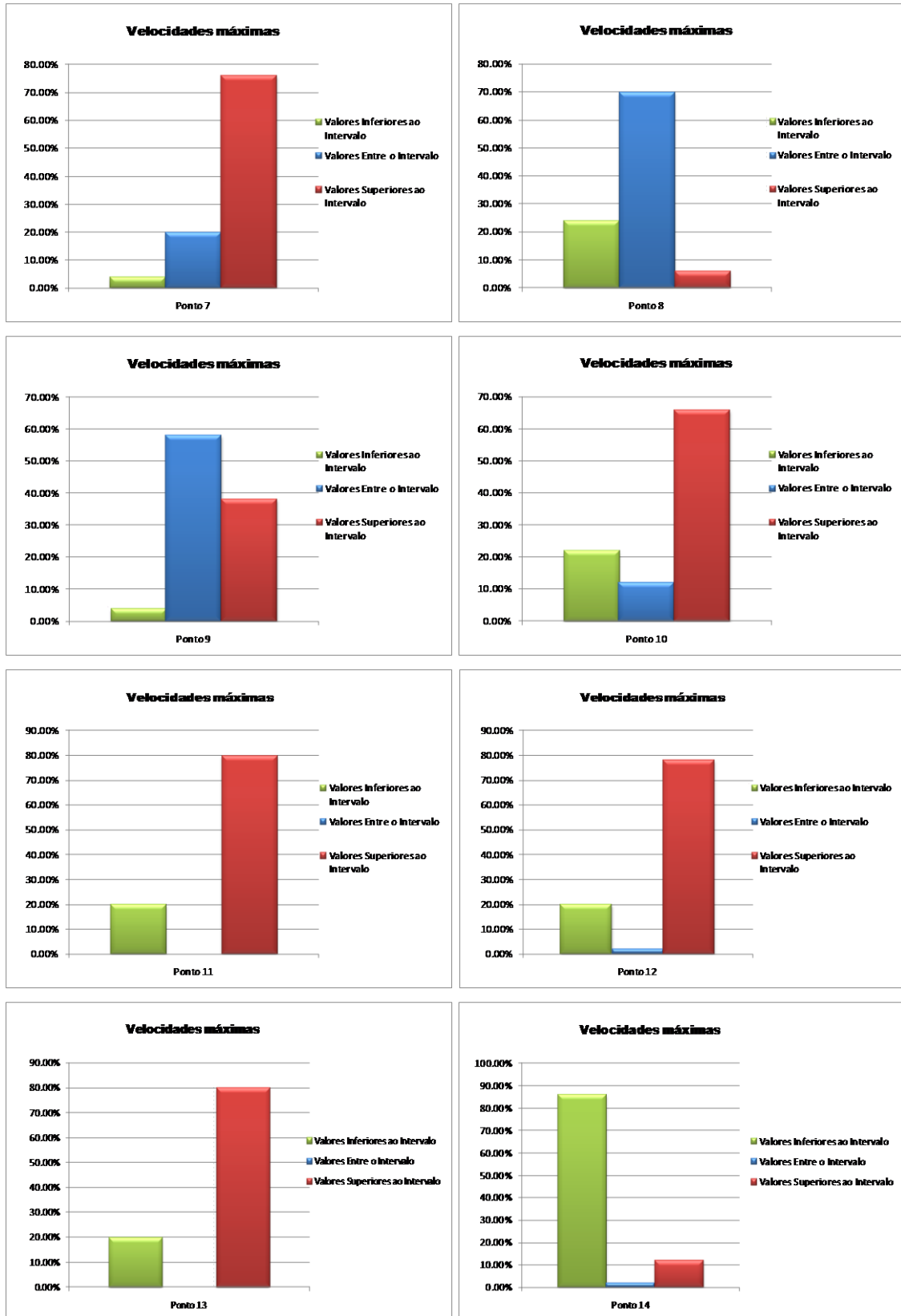


Fig.5.16 – Percentagem de velocidade que se situam dentro e fora, do intervalo de valores definido pelos comboios extremos

Ao contrário dos deslocamentos, que nos pontos que pertenciam ao aterro era possível ter os deslocamentos máximos para o comboio com as dimensões mínimas, o mesmo não acontece com as velocidades, pois a maior parte das vezes esses valores são superiores quando se analisam os comboios aleatórios. Por isso, quando estamos a tratar de análise de velocidades, a análise dos comboios extremos não se torna significativamente expressiva do que realmente acontece numa linha interoperável, podendo não ser demonstrativos esses resultados.

#### 5.5.2.2. Velocidades máximas mínimas e médias

Em seguida encontra-se o Quadro 10, na qual é possível comparar os valores da velocidade máximos, mínimos e a média relativamente aos comboios aleatórios gerados e fazer uma comparação com valores obtidos dos comboios com as dimensões máximas e mínimas, relativas às velocidades.

Quadro 10 – Valores das velocidades máximos, mínimos e média (relativamente as comboios aleatórios) e deslocamentos para as dimensões máximas e mínimas dos comboios.

VELOCIDADES (mm/s)	máximo	mínimo	média	dimensões máximas	dimensões mínimas
Ponto 1	16,871	16,221	16,440	16,352	16,302
Ponto 2	14,978	14,018	14,417	14,183	14,342
Ponto 3	3,561	2,889	3,196	3,446	3,624
Ponto 4	3,209	1,702	2,065	2,094	2,068
Ponto 5	2,184	1,237	1,478	1,690	1,607
Ponto 6	1,142	0,878	0,982	0,910	1,047
Ponto 7	0,785	0,506	0,610	0,554	0,511
Ponto 8	0,620	0,333	0,488	0,589	0,452
Ponto 9	0,435	0,237	0,330	0,352	0,251
Ponto 10	37,821	36,786	37,403	37,119	37,352
Ponto 11	37,783	36,852	37,331	37,094	37,071
Ponto 12	35,042	33,923	34,456	34,188	34,203
Ponto 13	14,343	13,241	13,715	13,368	13,483
Ponto 14	52,715	50,649	51,348	51,853	52,272

Ao contrário do que acontece nos deslocamentos, que até uma certa distância o que provoca maiores deslocamentos é a passagem dos comboios extremos e a partir desse ponto é o outro comboio o mais gravoso, no caso das velocidades isso não ocorre, variando a sua influência de ponto para ponto.

Conclui-se que a velocidade máxima encontra-se no carril, diminuindo bastante para os restantes pontos.

Observando o Quadro 10, não se encontram conclusões significativas, por isso em seguidas encontram-se representadas figuras das velocidades nos pontos e a sua evolução com a distância e profundidade.

A primeira análise vai ser realizada para a cota 15 m, cota onde os pontos se encontram sobre a camada de solo 1.

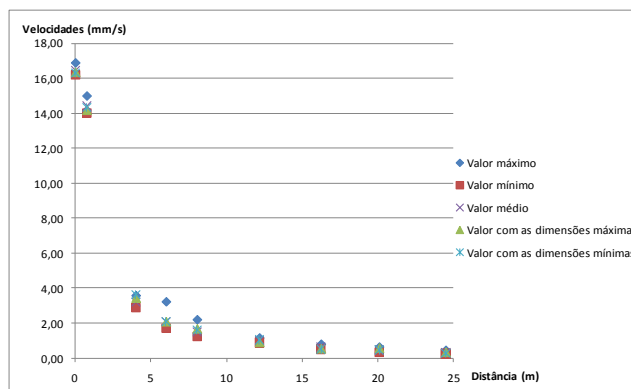


Fig.5.17 – Velocidades à cota 15 m.

Tal como foi concluído para os deslocamentos, que à medida que nos vamos afastando da geração de vibração as velocidades diminuem, no caso das velocidades acontece o mesmo. As velocidades no aterro encontram-se na ordem dos 14 e 16 mm/s, ocorrendo um decréscimo brusco quando se passa para pontos exteriores do aterro, que tem valores de velocidades inferiores a 4 mm/s.

Como não é bem explícito o que acontece nos pontos à superfície, a Figura 5.18 representa melhor a variação desses valores.

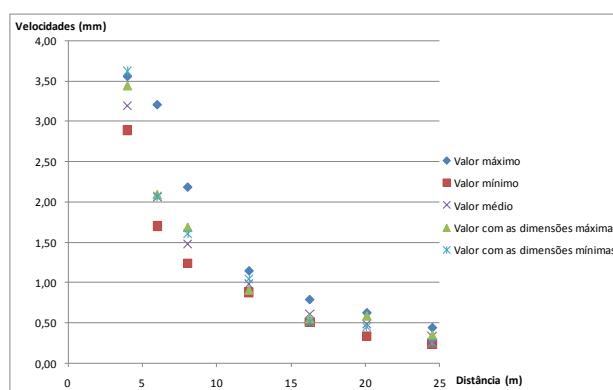


Fig.5.18 – Deslocamentos à cota 15 m, a partir de 4 m de distância do eixo de simetria.

Existe uma redução progressiva da velocidade à medida que nos afastamos da fonte, e observa-se uma aproximação dos valores correspondentes a todos os comboios analisados, ao longo desse afastamento. O valor mínimo obtido encontra-se no ponto mais afastado, obtendo valores de velocidades próximos de 0,4 mm/s.

A análise seguinte é feita à cota 16,5 m, observando o que acontece às velocidades na superfície do aterro.

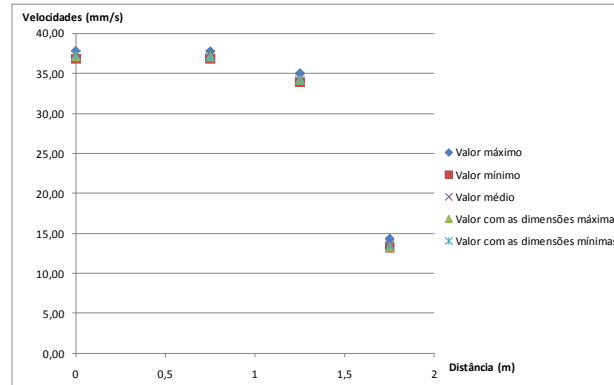


Fig.5.19 – Velocidades à cota 16,5 m.

Os três primeiros pontos encontram-se por baixo da travessa, sendo visível que não existe grande variação de velocidades nesses pontos, encontrando-se entre os 33 e 38 mm/s. Ocorre um decréscimo significativo quando a análise é feita no exterior da travessa, obtendo velocidades de propagação com valores próximos de 14 mm/s.

Em última análise, é observado o que acontece a nível do carril, em profundidade.

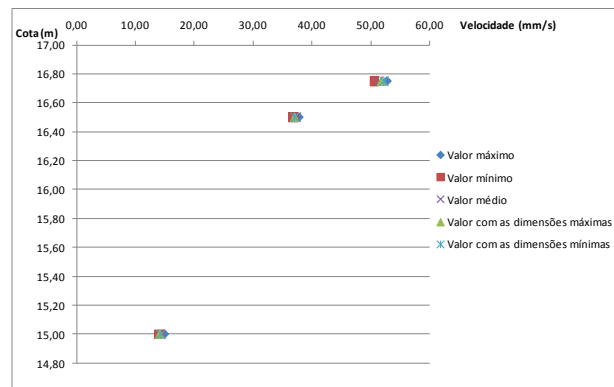


Fig.5.20 – Velocidades ao longo da profundidade na linha do carril.

A variação de velocidade na travessa é reduzida variando 15 mm/s, comparativamente à variação que ocorre ao longo do aterro que tem o valor de 25 mm/s.

### 5.5.2.3. Variação das velocidades

Para cada ponto, vai ser determinado o valor da variação referentes às velocidades verticais, para saber o que acontece de ponto para ponto.

Observando o Quadro 11 conclui-se então, que o ponto que tem a maior variação da velocidade é o ponto correspondente ao carril, e que o ponto mais afastado, ponto 9, tem a variação de velocidade menor.

Quadro 11 – Valores das velocidades máximos e mínimos e a variação de valores de todos os comboios

VELOCIDADES (mm/s)	máximo	mínimo	variação
Ponto 1	16,871	16,221	0,650
Ponto 2	14,978	14,018	0,961
Ponto 3	3,624	2,889	0,735
Ponto 4	3,209	1,702	1,507
Ponto 5	2,184	1,237	0,947
Ponto 6	1,142	0,878	0,264
Ponto 7	0,785	0,506	0,278
Ponto 8	0,620	0,333	0,288
Ponto 9	0,435	0,237	0,198
Ponto 10	37,821	36,786	1,035
Ponto 11	37,783	36,852	0,931
Ponto 12	35,042	33,923	1,120
Ponto 13	14,343	13,241	1,102
Ponto 14	52,715	50,649	2,065

## 5.6. VELOCIDADE EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA

Seguidamente irá analisar-se, para cada ponto, o que acontece às velocidades em função das frequências, os seus valores máximos e os picos que se obtêm. O principal factor desta análise, é perceber para que frequência os valores das velocidades são mais elevados.

### 5.6.1. PONTO 1

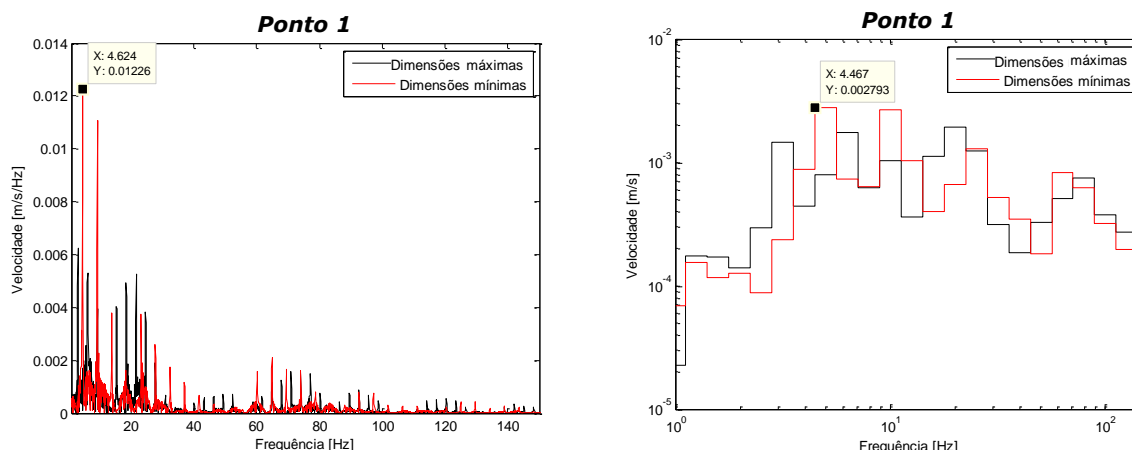


Fig.5.21 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 1.

É de notar que a velocidade em função da frequência, tem o maior pico, maior velocidade, atingindo o valor de 12,26 mm/s/Hz para uma frequência de 4,624 Hz. Este valor máximo foi atingido devido ao comboio com as dimensões mínimas. O mesmo se observa na Figura 5.21, da direita, em que a banda com o mesmo valor da frequência já referida, têm a velocidade máxima 2,793 mm/s.

Os picos observados na Figura 5.21, da esquerda, a sua análise é mais nítida quando esta representação se faz em bandas de 1/3 de oitava da frequência, principalmente para perceber o que acontece nas frequências baixas, pois a sua representação não se torna clara no primeiro gráfico.

Relativamente ao ponto 1, conclui-se que os picos com maior velocidades estão situados para baixas frequências, nos 5 Hz e nos 10 Hz, aproximadamente. E estes picos ocorrem para o comboio com as dimensões menores. Até ao valor destas frequências dos picos máximos, a velocidade quadrática média cresce ao longo da frequência. Na gama dos 20 Hz encontram-se novos picos, desta vez o comboio que tem maior influência, é o que possui dimensões maiores. Ocorrendo um decréscimo da velocidade até aos 60 Hz, ocorrendo novos picos entre os 60 e 80 Hz. A partir dessa frequência o valor da velocidade decresce.

A maior variação da velocidade quadrática média encontra-se entre os 3 e 4 Hz.

### 5.6.2. PONTO 2

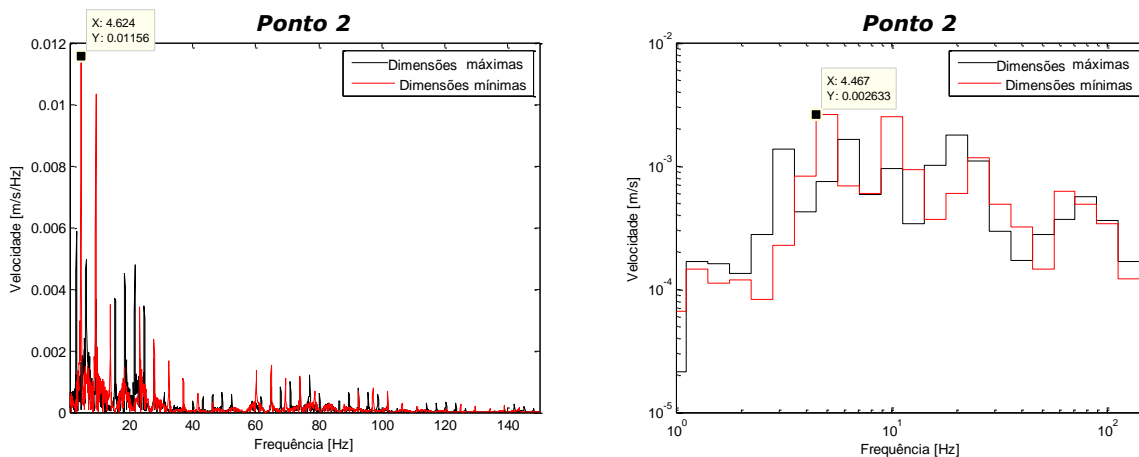


Fig.5.22 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 2.

Relativamente ao ponto 2 o que acontece às velocidades em função das frequências, é semelhante ao que foi comentado no ponto 1, como se pode verificar na Figura 5.22. A 4,624 Hz, obtém-se o valor máximo das velocidades, 11,56 m/s/Hz e 2,633 m/s, verificando-se um pequeno decréscimo destas velocidades comparativamente com o ponto anterior. Isto acontece porque o ponto 1 encontra-se no eixo de simetria, o que significa que é influenciado pelos dois carris, enquanto que o ponto 2, que se situa na linha do carril, só é influenciado principalmente por um carril.

### 5.6.3. PONTO 3

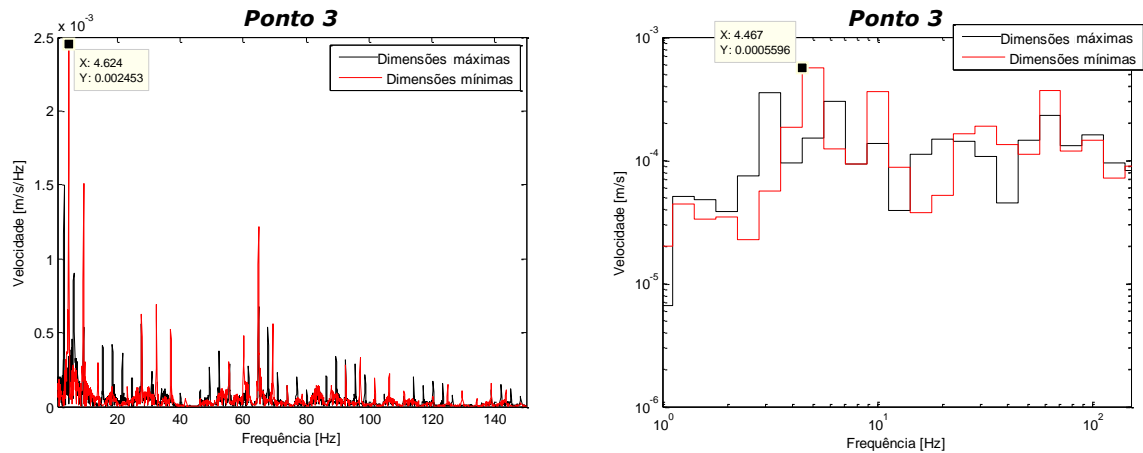


Fig.5.23 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 3.

Relativamente ao ponto 3, ponto que se situa na base do aterro, no ponto extremo, já são observados várias modificações nas frequências comparativamente, com o que acontece nos dois pontos anteriores. Verificam-se picos de velocidades, nas frequências mais elevadas de 5 Hz e 10 Hz, ocorrendo um crescimento das velocidades aos 70 Hz, aproximadamente. Mas o máximo valor é igualmente obtido para a frequência de 4,624 Hz, com valores de 2,453 mm/s/Hz e 0,5596 mm/s.

A maior variação das velocidades encontra-se no mesmo intervalo que os dois pontos anteriores, 3 a 4 Hz

### 5.6.4. PONTO 4

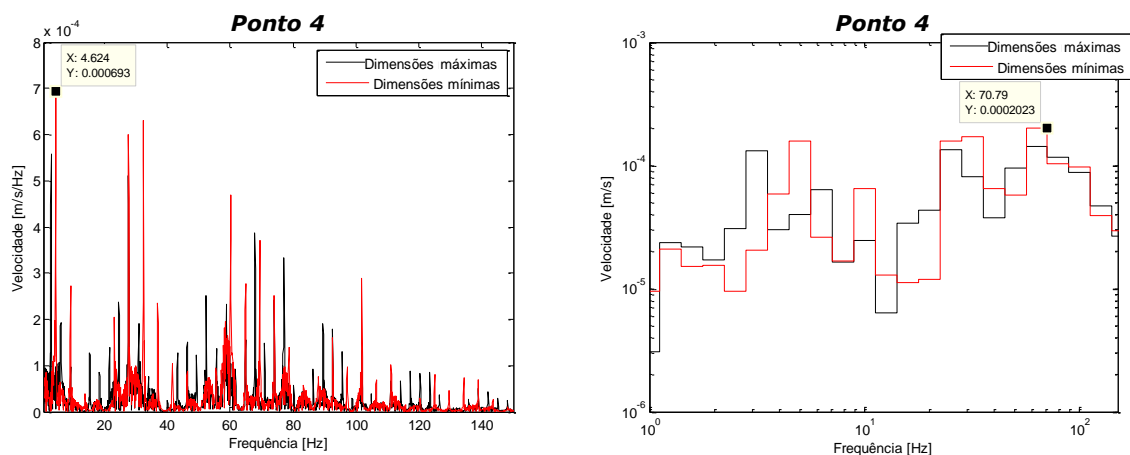


Fig.5.24 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 4.

Neste ponto existem muitos picos ao longo da frequência, como é visível. Todos os valores de picos que são observados são valores muito elevados, muito próximos do valor máximo da velocidade.

Os dois gráficos referentes ao ponto 4, não têm os seus valores máximos no mesmo nível de frequência, no primeiro caso encontra-se a 4,624 Hz, com o valor de 0,693 mm/s/Hz e no segundo situa-se ente os 56,23 Hz e os 70,79 Hz, com 0,2023 mm/s.

### 5.6.5. PONTO 5

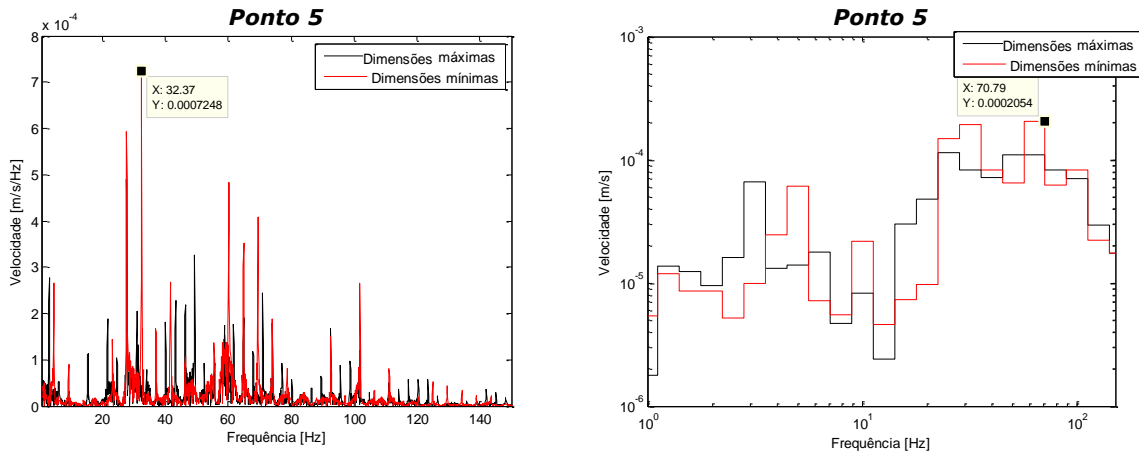


Fig.5.25 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 5.

Para este ponto observa-se, que os picos das velocidades situam-se nas frequências da ordem dos 30 Hz, os 60 Hz e os 70 Hz. Como no caso anterior os valores máximos das velocidades não se encontram na mesma frequência, para o caso, a velocidade em função da frequência, tem o seu pico aos 32,37 Hz, com o valor de 0,7248 mm/s/Hz e relativamente à velocidade quadrática média o seu pico é aos 70,79 Hz, com 0,2054 mm/s. Ocorrendo neste ponto um aumento destas velocidades em comparação como ponto 4. Isto acontece, porque a fundação não é homogénea, a propagação da onda não é contínua, pois quando encontra outro estrato, a onda pode ser reflectida mudando a sua direcção, não se sabe o que acontece no solo de fundação.

5.6.6. PONTO 6

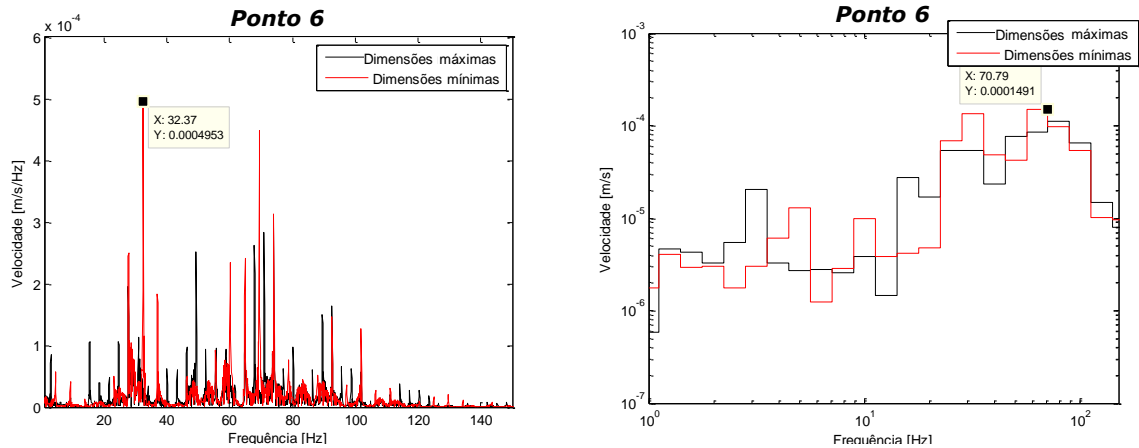


Fig.5.26 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 6.

Neste ponto, tal como acontece com o ponto 5, as velocidades máximas são obtidas para as mesmas frequências referidas anteriormente, mas neste caso a velocidade máxima em função da frequência tem o valor de 0,4953 mm/s/Hz e a velocidade quadrática média tem o valor de 0,1491 mm/s, valores inferiores aos obtidos nos pontos anteriormente referidos. A forma dos gráficos é muito semelhante ao que representa o ponto 5, mas neste caso para a velocidade em função da frequência, o pico dos 70 Hz ganha maior intensidade, do que no ponto anterior.

A partir deste ponto não se verifica em nenhuma frequência uma gama de variação de velocidade quadrática média muito diferenciadas umas das outras.

5.6.7. PONTO 7

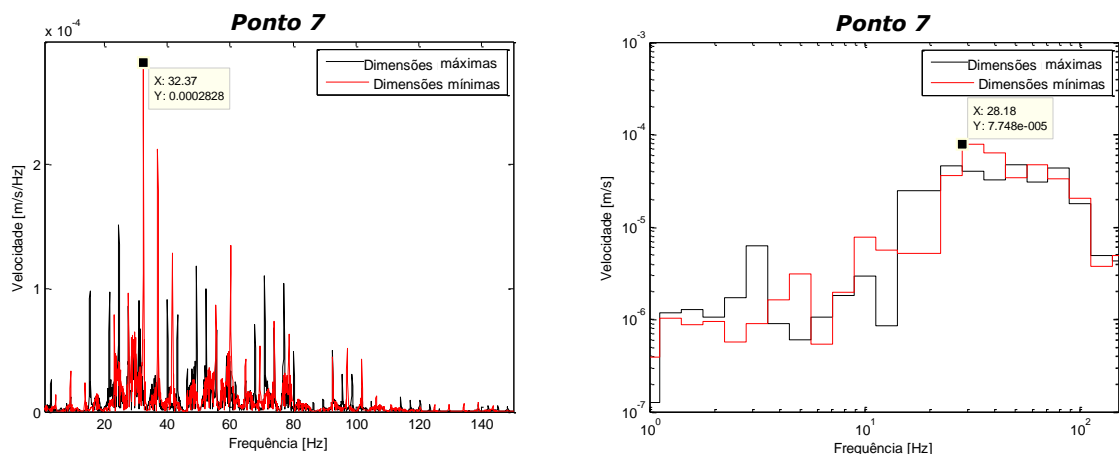


Fig.5.27 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto7.

No ponto 7, em relação ao gráfico obtido da esquerda, observa-se um crescimento da velocidade até ao pico máximo que tem um valor de 32,37 Hz e decresce suavemente até aos 100 Hz, o mesmo se

verifica no gráfico à direita, que as velocidades obtidas nesse intervalo de frequências são muito semelhantes. Olhando para o gráfico à direita parece que existem dois patamares, um patamar que vai até aos 10 Hz, com velocidades na mesma ordem de grandeza e outro que vai dos 12 Hz até ao 100 Hz que se encontra uma ordem de grandeza superior ao patamar anterior.

A velocidade máxima obtida, no primeiro caso é de 0,2828 mm/s/Hz aos 32,37 Hz, e no segundo caso é de 0,07748 mm/s na banda dos 28,18 Hz.

### 5.6.8. PONTO 8

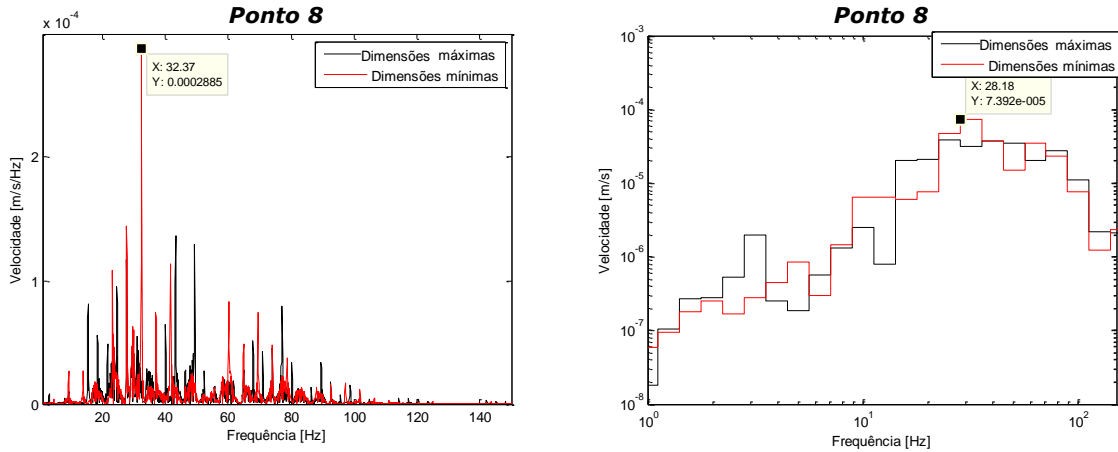


Fig.5.28 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 8.

A configuração destes gráficos é muito próxima ao obtido no ponto 7, onde as velocidades máximas foram atingidas para as mesmas frequências referidas no anterior ponto, sendo os valores das velocidades de 0,2885 mm/s/Hz e 0,07392 mm/s. A variação das gamas de velocidade quadrática média, que correspondem a uma frequência específica, tem pouca variação.

5.6.9. PONTO 9

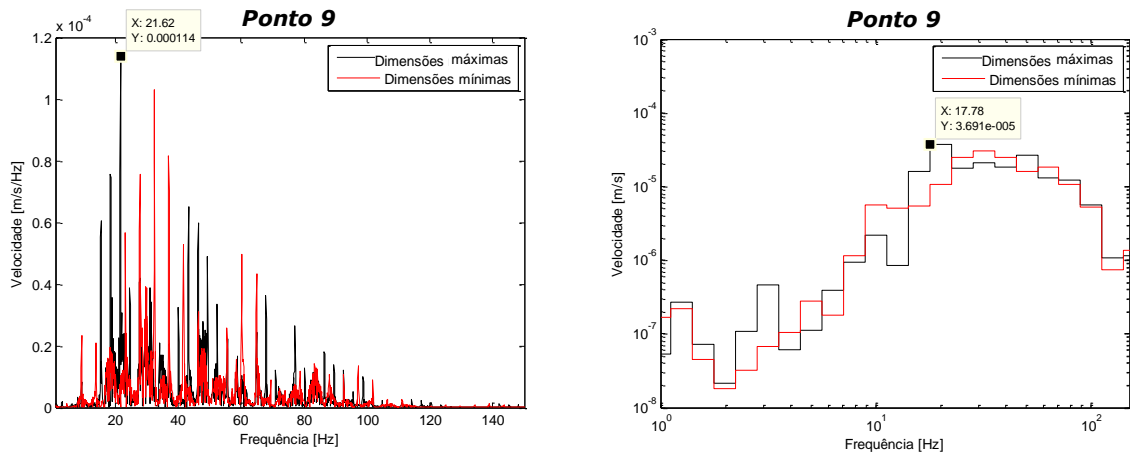


Fig.5.29 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 9.

No ponto mais afastado observa-se que a suavidade que as velocidades crescem e decrescem ainda se encontra mais acentuada, do que nos casos dos pontos anteriores, observando-se em ambos os gráficos. As velocidades obtidas, para o primeiro caso tem o valor de 0,114 mm/s/Hz que corresponde a uma frequência de 21,62 Hz, e no outro caso a velocidade tem um valor de 0,0369 mm/s aos 17,78 Hz, velocidades inferiores aos pontos anteriores, pois também é o ponto que se encontra mais afastado da fonte de vibração.

5.6.10. PONTO 10

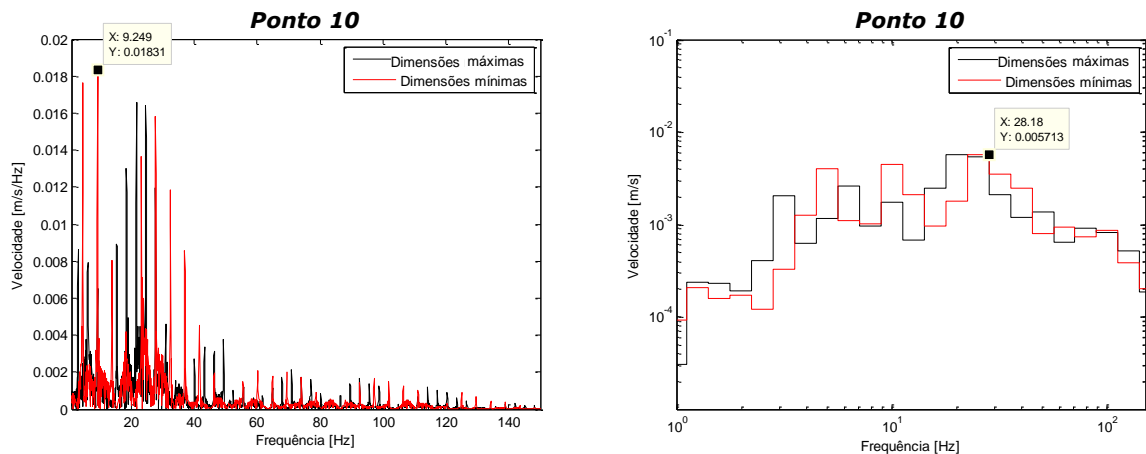


Fig.5.30 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 10.

O ponto 10 situa-se no eixo de simetria em cima do aterro, e é bem visível que até frequências na ordem dos 30 Hz, existe uma uniformidade nos picos da velocidade, decrescendo a partir dessa frequência. Os valores máximos obtidos para as velocidades são de 18,31 mm/s/Hz aos 9,249 Hz e 5,713 mm/s na banda dos 28,18 Hz, comparativamente ao ponto 1 que se situa em baixo deste ponto,

as velocidades são consideravelmente maiores, também se encontra mais próximo da geração de vibração.

### 5.6.11. PONTO 11

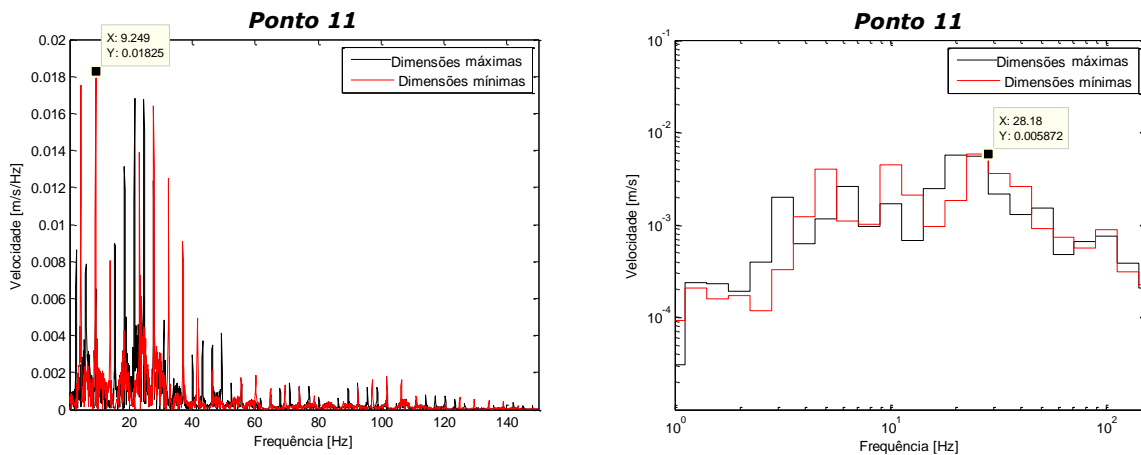


Fig.5.31 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 11.

O ponto 11 tem a forma dos gráficos muito semelhante ao ponto 10, situando-se os pontos máximos nas mesmas frequências referidas anteriormente. Sendo os valores das velocidades iguais a 18,25 mm/s/Hz e 5,872 mm/s, valores inferiores comparativamente ao ponto 10, pela mesma situação que foi referida para o ponto 2 relativamente ao ponto 1.

### 5.6.12. PONTO 12

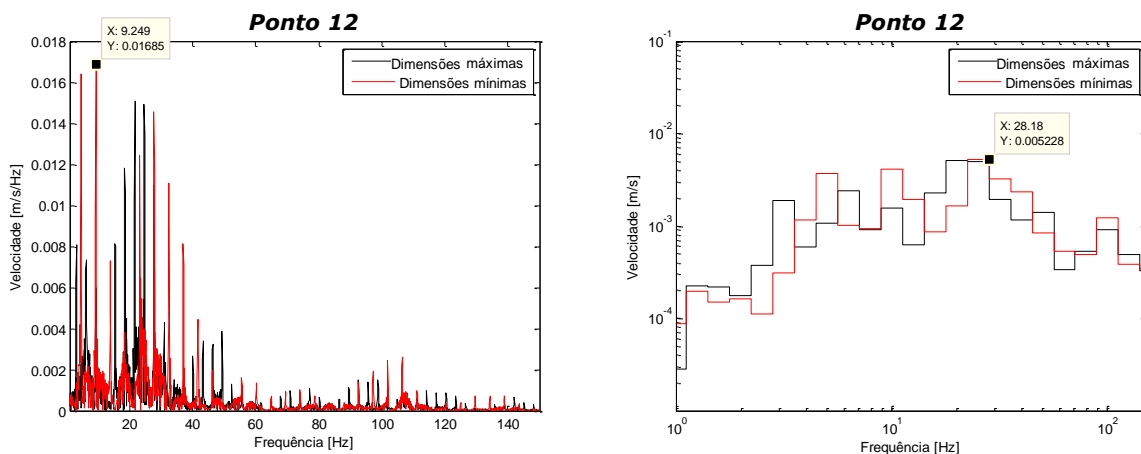


Fig.5.32 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 12.

Gráficos semelhantes aos obtidos no ponto 11, encontrando-se estes dois pontos bastante próximos, as frequências onde as velocidades máximas se encontram são as mesmas, 9,249 Hz no primeiro gráfico,

e na banda que contém a frequência de 28,18 Hz no segundo gráfico, sendo os valores das velocidades máximas de 16,85 mm/s/Hz e 5,228 mm/s.

### 5.6.13. PONTO 13

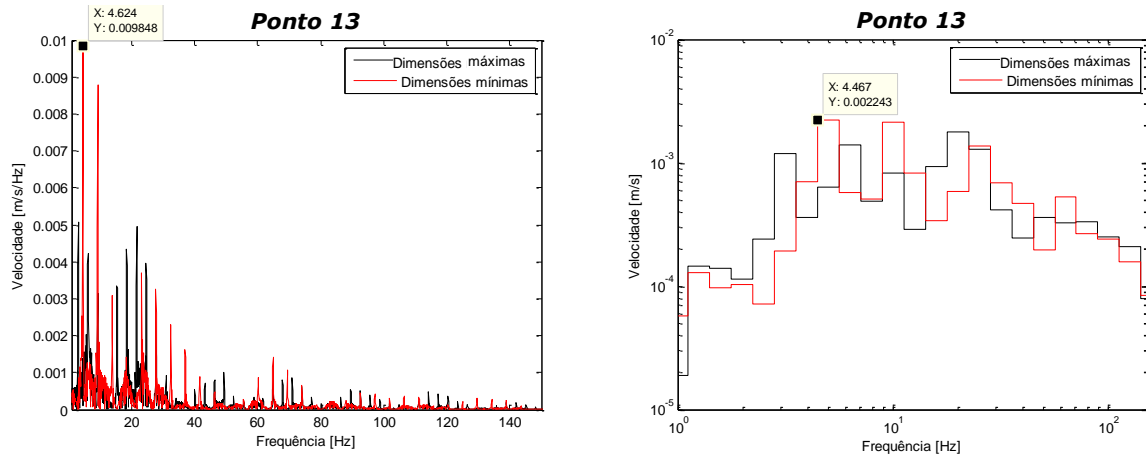


Fig.5.33 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 13.

Ponto que se situa sobre o aterro, onde a variação das bandas é mais notória. Encontra-se o valor do pico máximo, a uma frequência menor do que ponto 12, a 4,624 Hz, sendo este valor obtido para a mesma frequência que os pontos que correspondem ao aterro, pontos 1, 2 e 3. As velocidades máximas são portanto, 9,848 mm/s/Hz e 2,243 mm/s.

### 5.6.14. PONTO 14

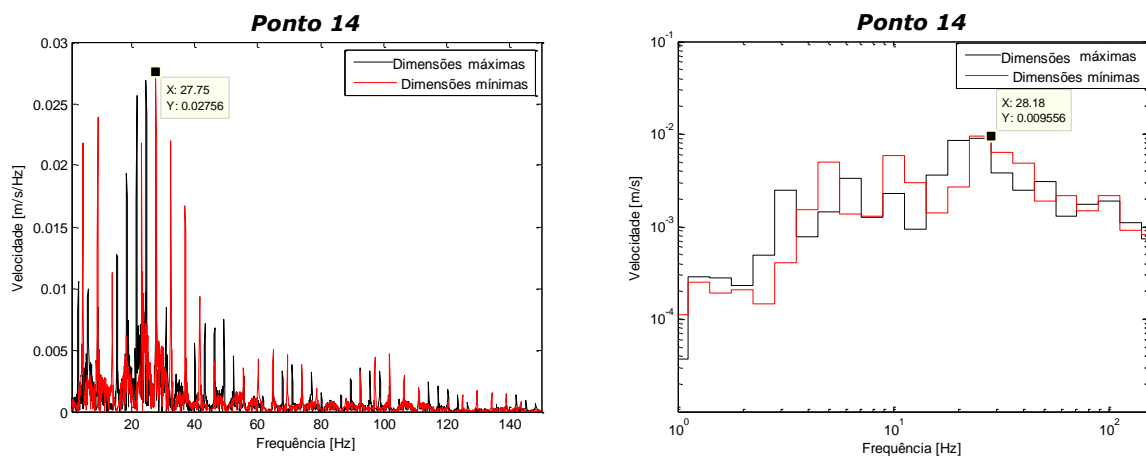


Fig.5.34 – Velocidade em função da frequência, à esquerda, velocidade quadrática média em bandas de 1/3 de oitava da frequência, à direita, ponto 14.

No ponto, que corresponde o ponto do carril, é notório um crescimento suave até aos 30 Hz, aproximadamente, diminuindo também sem grandes variações de velocidade. É o ponto que tem maiores velocidades, pois é onde se encontra aplicada a carga, tendo as velocidades máximas valores iguais a 27,56 mm/s/Hz, situada na banda correspondente a 27,75 Hz e 9,556 mm/s a 28,18 Hz. As velocidades que se encontram próximas destas frequências, tem valores muito próximos dos valores máximos.

### 5.7. VELOCIDADES QUADRÁTICAS MÉDIAS EM BANDAS DE 1/3 DE OITAVA DA FREQUÊNCIA

Serão analisadas as velocidades quadráticas médias em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para cada ponto, comparando as velocidades obtidas para os comboios aleatórios e os comboios limites

#### 5.7.1. PONTO 1

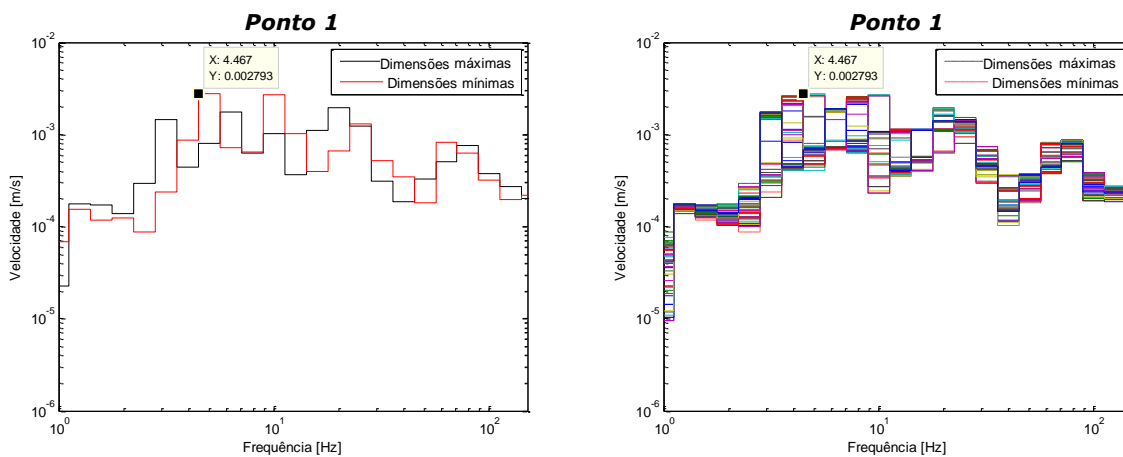


Fig.5.35 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 1.

Comparando os dois gráficos é conclusivo que, para a mesma banda de frequência é obtido o mesmo valor da velocidade máxima de 2,793 mm/s. Isto significa que, se a análise fosse realizada só com os comboios que tem as dimensões extremas, a velocidade máxima obtida para essa análise seria igual ao caso de se analisar todos os comboios aleatórios gerados.

Se a análise só inclui-se os comboios extremos, o que se verificaria, eram bandas com baixas variações da velocidade quadrática médias nas bandas, com a mesma frequência. Pois existem variações das velocidades bastantes maiores na análise dos comboios aleatórios, é o caso das bandas correspondentes às frequências 1, 3, 8, 10 e 40 Hz.

### 5.7.2. PONTO 2

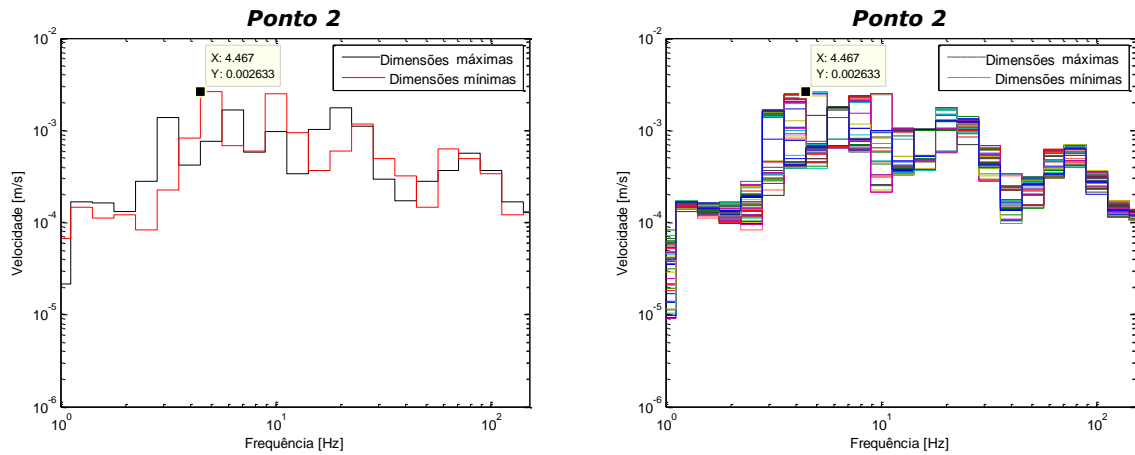


Fig.5.36 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 2.

Relativamente a este ponto, o que se encontra representado é semelhante à Figura 3.35. Como no caso do ponto 1, o máximo valor da velocidade é igual, no caso de considerar somente os dois casos extremos ou o caso dos comboios aleatórios. O valor da velocidade é de 2,633 mm/s, para a mesma banda do ponto 1.

### 5.7.3. PONTO 3

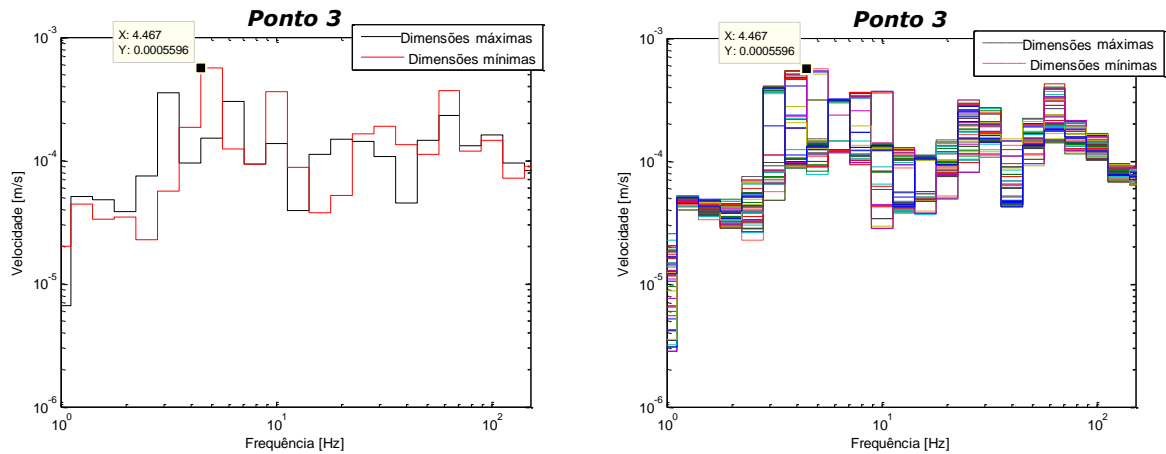


Fig.5.37 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 3.

Neste caso existe uma maior variação das bandas de velocidades, ao longo de todas as bandas o que é visível em ambas as análises. As maiores variações são verificadas principalmente para bandas mais baixas, como se verifica para frequências de 3, 4 e 10 Hz, nesta última verifica-se a maior variação de velocidades.

Também neste caso, comparativamente aos pontos anteriores, a maior velocidade quadrática média é obtida na mesma banda de frequências, tendo neste caso o valor de 0,5596 mm/s.

#### 5.7.4. PONTO 4

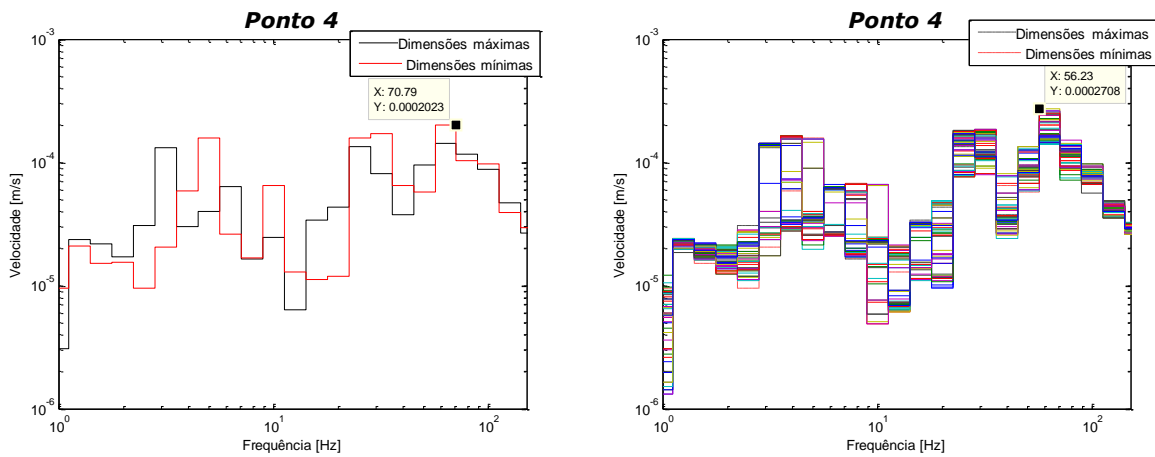


Fig.5.38 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 4.

No ponto 4, a velocidade máxima encontra-se entre os 56,23 Hz e os 70,79 Hz. Para o primeiro caso, considerando só os comboios com as dimensões extremas, a velocidade é de 0,2023 mm/s, sendo superior quando se analisam os comboios aleatórios, tendo o valor de 0,2708 mm/s.

A maior variação encontra-se nos 10 Hz, como é o caso de outros pontos que essa variação também se encontra bem explícita.

#### 5.7.5. PONTO 5

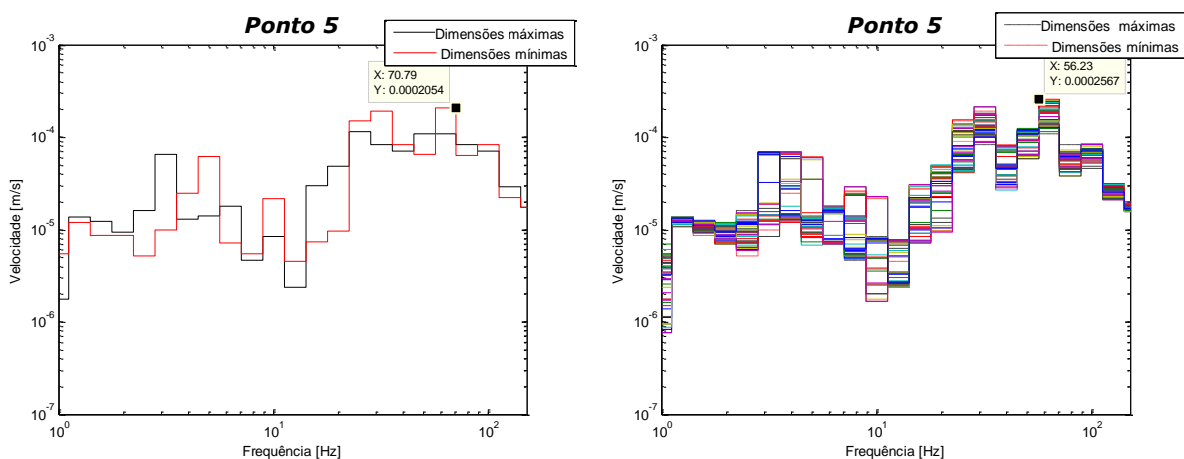


Fig.5.39 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 5.

Neste ponto a variação que até este ponto se verificava aos 10 Hz, já não se torna tão significativa como nos pontos anteriores, mas continua a ser a maior variação verificada. Como no ponto anterior, a velocidade quadrática média mais elevada encontra-se na mesma banda de frequências, tendo o valor de 0,2054 mm/s, no caso das dimensões extremas, e o valor de 0,2567 mm/s, no caso dos comboios aleatórios.

### 5.7.6. PONTO 6

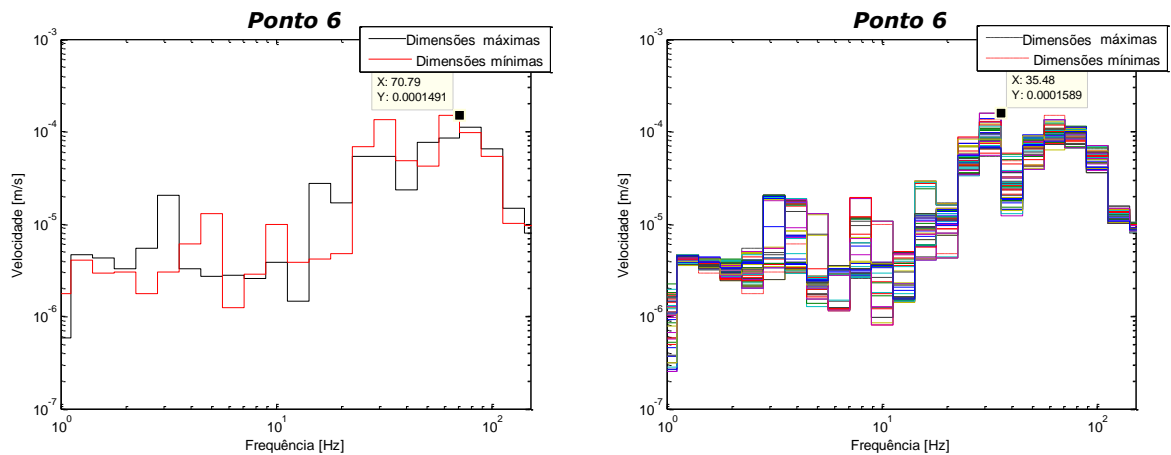


Fig.5.40 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 6.

Para este ponto já não se verificam as velocidades máximas para a mesma frequência, o que se verificou até aqui. Sendo a velocidade máxima de 0,1491 mm/s, para o comboio com dimensões mínimas e 0,1589 mm/s, para um dos comboios aleatórios situadas a frequências distintas, 70 Hz e 35 Hz, respectivamente.

A banda onde se verifica uma maior discrepância das velocidades, para cada frequência, é para a frequência de 8 Hz, que no primeiro caso é muito reduzida sendo no segundo muito mais elevado. Mas a maior variação das velocidades, encontra-se na frequência de 10 Hz, como em todos os casos anteriores.

5.7.7. PONTO 7

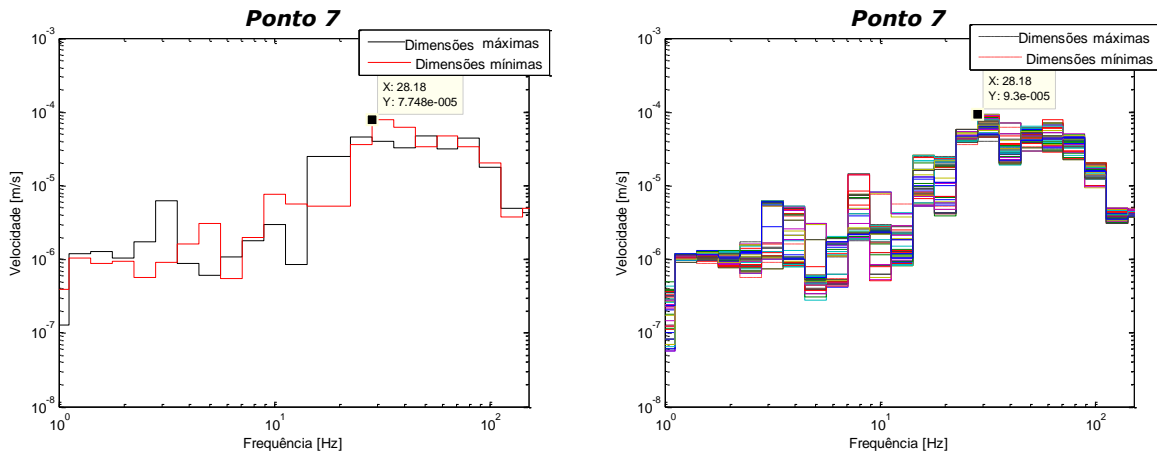


Fig.5.41 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 7.

Verifica-se uma variação da velocidade, ao longo das frequências, muito distinta, havendo um pico máximo nos 30 Hz, com velocidades máximas de 0,07748 mm/s e 0,093 mm/s. A maior variação de velocidades quadráticas médias encontra-se nos 10 Hz, como no caso dos pontos analisados anteriormente.

5.7.8. PONTO 8

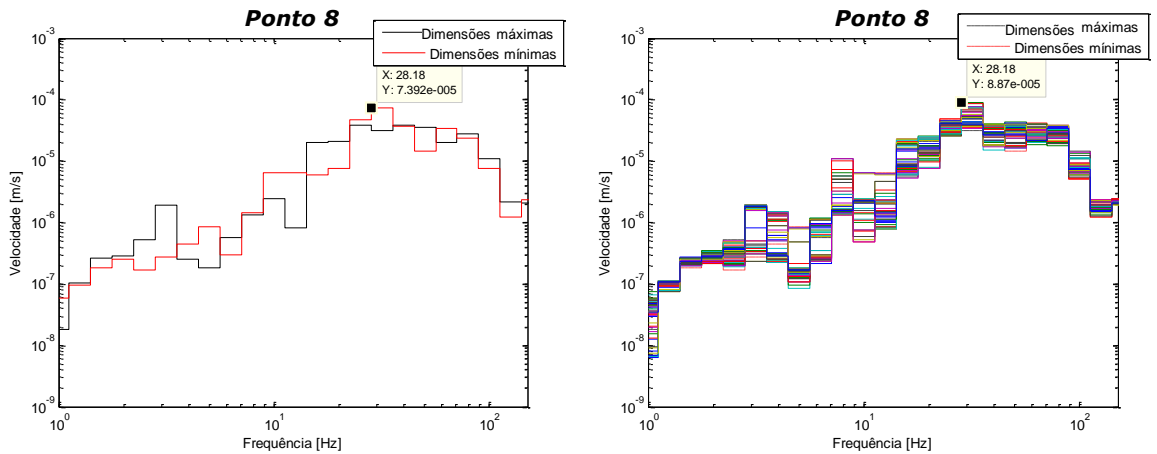


Fig.5.42 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 8.

As formas dos gráficos apresentados, respectivos do ponto 8, são muito semelhantes aos que foram apresentados no ponto 7, sendo as velocidades menores neste caso, visto que se encontra mais afastado do ponto de geração da vibração. Os valores das velocidades são de 0,07392 mm/s e 0,0887 mm/s. Este ponto tem a singularidade de que na frequência de 10 Hz já não se encontra a maior variação das velocidades, havendo uma maior uniformidade de variação das velocidades para as frequências que se encontram os 3 aos 10,5 Hz, aproximadamente.

### 5.7.9. PONTO 9

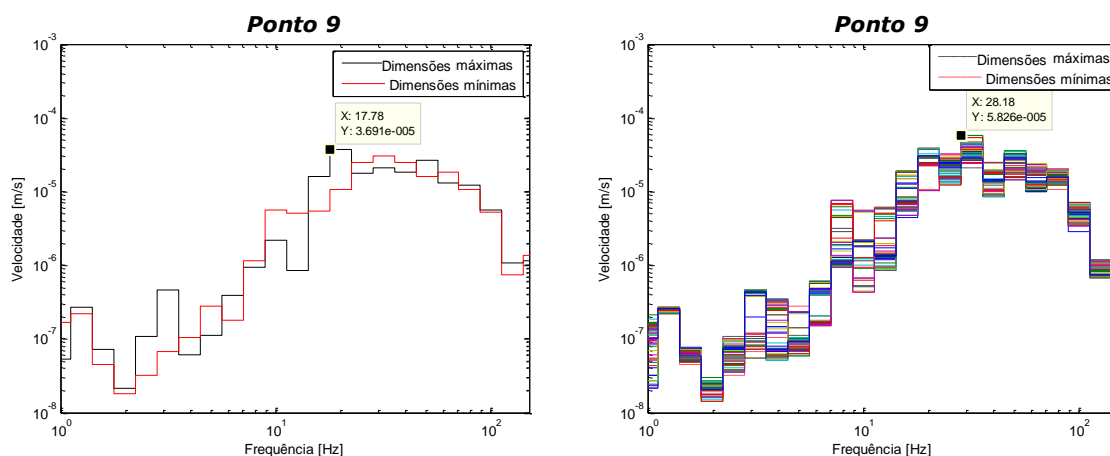


Fig.5.43 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 9.

Este é o ponto que mais variação tem relativamente às velocidades máximas ao longo das frequências, pois para baixas frequências o valor das velocidades é bastante baixo, encontrando-se na gama dos  $10^{-6}$  m/s e para frequências mais altas essas velocidades sobem para  $10^{-4}$  m/s. No caso da análise dos comboios aleatórios esta verificação é mais acentuada.

A banda de frequências, onde se encontram as velocidades máximas, é diferente nas duas análises, sendo a primeira para 17,78 Hz e a segunda 28,28 Hz, com velocidades máximas de 0,03691mm/s e 0,5826 mm/s, respectivamente.

### 5.7.10. PONTO 10

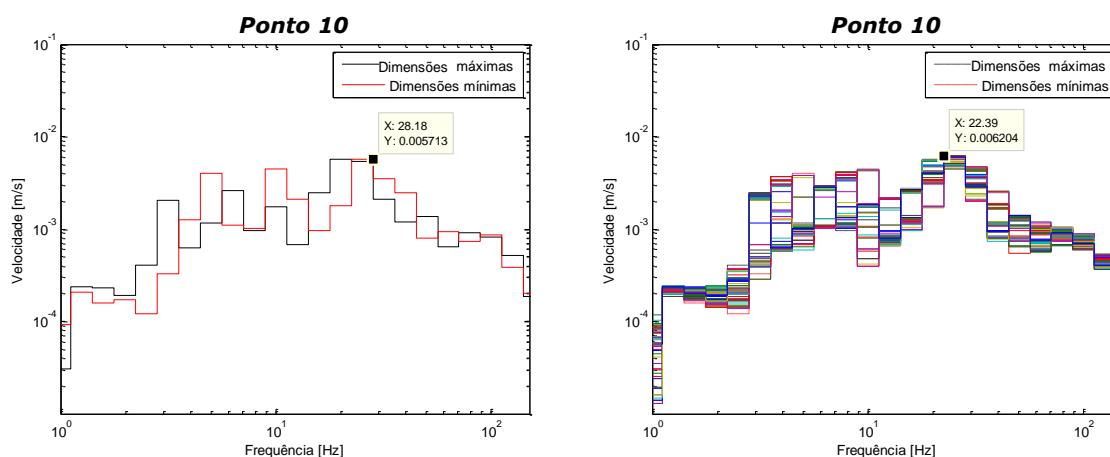


Fig.5.44 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 10.

No ponto 10, a variação das velocidades é muito semelhante ao das bandas, onde se localiza a maior variação verificada é aos 10 Hz. Os valores das velocidades máximas são 5,713 mm/s e 6,204 mm/s, encontrando se na mesma banda.

5.7.11. PONTO 11

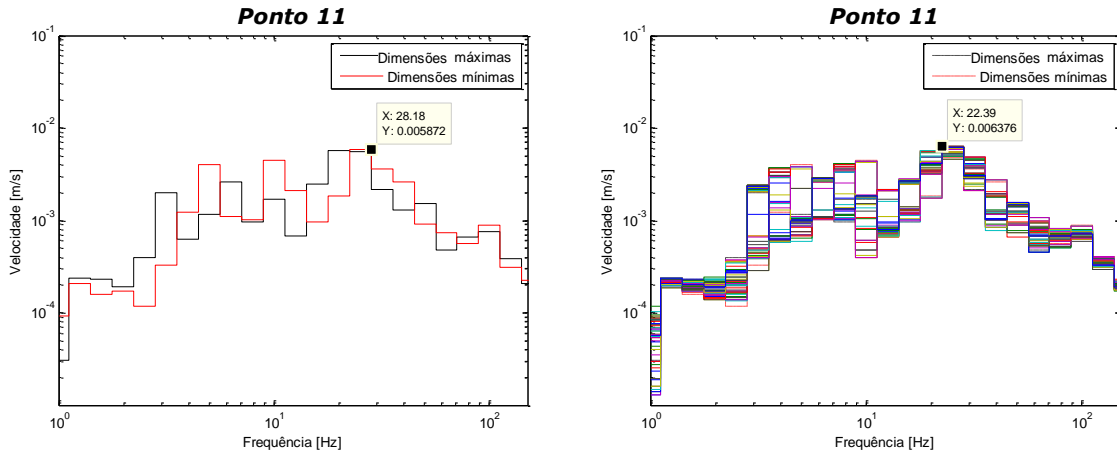


Fig.5.45 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 11.

Neste ponto as velocidades máximas obtidas são de 5,872 Hz e 6,376 Hz, para uma mesma banda de frequência. Em relação à primeira análise, verifica-se altos e baixos em relação às velocidades máximas, e na segunda análise nas frequências de 3 a 10 Hz existe uma homogeneidade das velocidades máximas obtidas. Sendo a maior variação de velocidades verificada aos 10 Hz.

5.7.12. PONTO 12

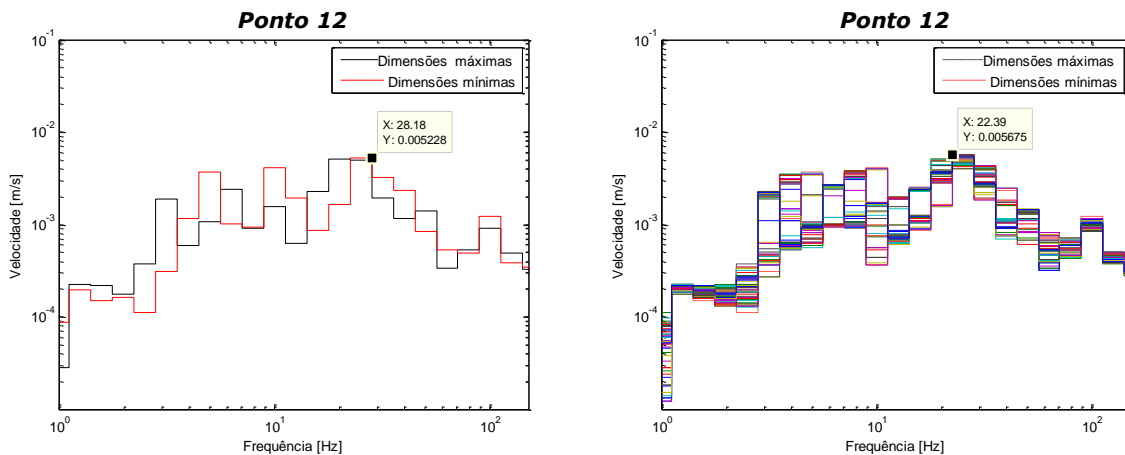


Fig.5.46 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 12.

Neste caso, as velocidades máximas verificadas para as duas análises, encontram-se na mesma banda de frequências, com valores de 5,228 Hz e 5,675 Hz. Verifica-se que a banda dos 10 Hz obtém a maior variação de velocidades. E entre os 3 e os 10 Hz, as velocidades máximas obtidas são muito semelhante. No caso dos comboios com as dimensões extremas, o resultado nesse intervalo de frequências não demonstram valores das velocidades máximas tão uniformes, havendo altos e baixos, como se pode verificar.

### 5.7.13. PONTO 13

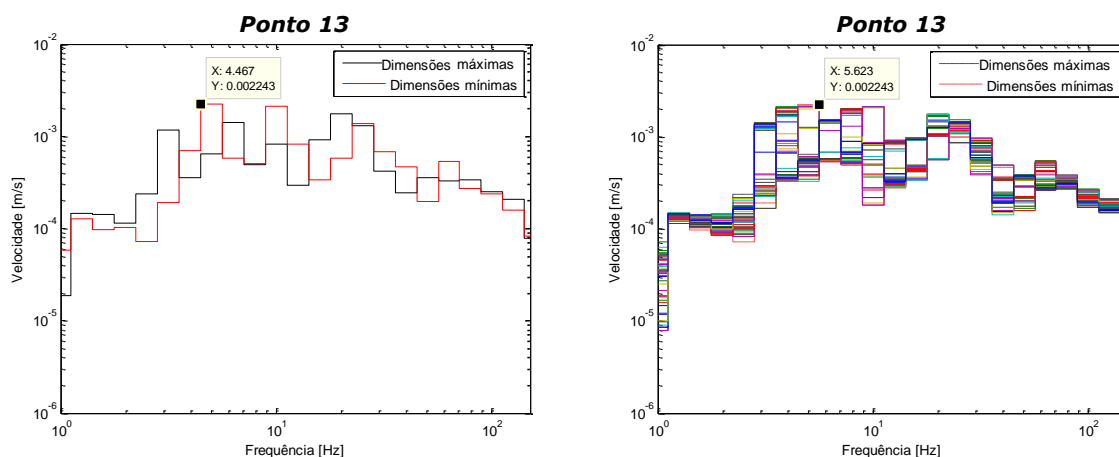


Fig.5.47 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 13.

É para a mesma banda, que se verifica a velocidade quadrática média contendo o valor máximo de 2,243 mm/s, e tem o mesmo valor para todos os comboios analisados. Como outros pontos, a maior variação de velocidade encontra-se a na banda dos 10 Hz.

### 5.7.14. PONTO 14

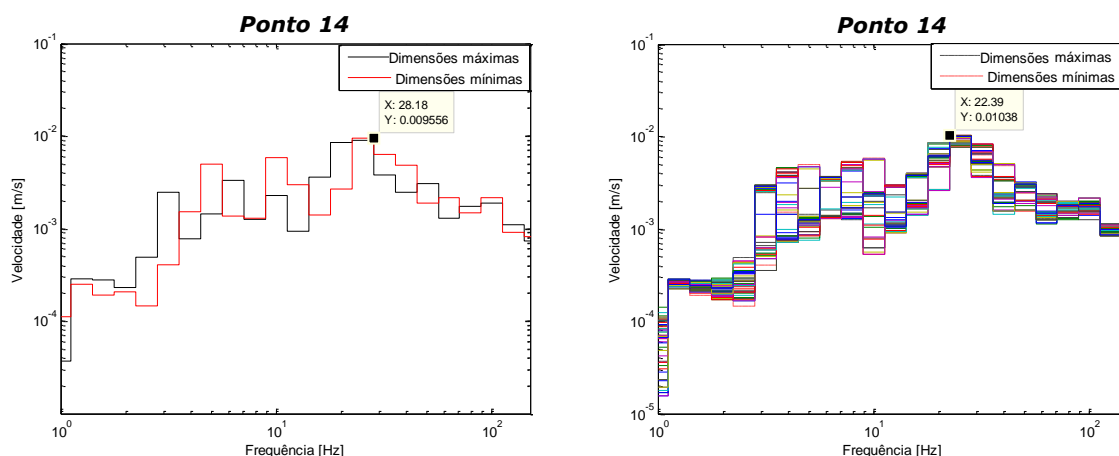


Fig.5.48 – Comparação de velocidades quadráticas médias em bandas de 1/3 de oitava da frequência, entre os comboios limite e os aleatórios, ponto 14.

Este ponto corresponde ao carril, onde o valor da velocidade é máximo, pois é o ponto de aplicação da carga. A velocidade máxima situa-se na banda correspondente a frequência de 25 Hz, aproximadamente, na qual para o primeiro caso tem o valor de 9,556 mm/s e para o segundo o valor de 10,38 mm/s. A maior variação de velocidades encontra-se na banda que corresponde à frequência de 10 Hz.

# 6

## CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1. CONCLUSÕES

O principal objectivo desta tese é a determinação da influência das vibrações, em zonas próximas das vias de alta velocidade interoperáveis. Este estudo é importante, pois é possível quantificar as vibrações sentidas à superfície nas zonas próximas da via.

Relativamente à consideração das irregularidades dos carris, torna-se bastante notória a sua influência quando a distância da geração da vibração se afasta, ocorrendo um pico perto dos 16 m de distância do eixo de simetria, sendo o valor da percentagem de influência igual a 60%. Próximo do carril essa influência não se torna tão notória, não ultrapassando os 6%. Não se torna interessante uma análise deste tipo ao longo da profundidade, pois não existe grande relação a este nível. Pode-se concluir portanto que, a utilização de irregularidades em estudos numéricos é necessária, pois este factor tem uma grande influência nos resultados obtidos.

A conclusão principal relativamente a este trabalho, é que a escolha dos comboios com as dimensões limites, não é a melhor opção para se obter uma correcta análise do que efectivamente ocorre nas zonas próximas à via férrea. Muito menos, quando o estudo é realizado nas zonas um pouco mais distantes da via. Os valores obtidos dos deslocamentos e velocidades, para os comboios de dimensões extremas, são menores em muitos dos pontos analisados comparativamente aos valores obtidos pelos comboios aleatórios.

Em relação aos deslocamentos é conclusivo que, quando a análise é feita para pontos situados no aterro os deslocamentos máximos obtidos ocorrem, quando se simula a passagem do comboio com menores dimensões. Mas para os deslocamentos nas zonas exteriores ao aterro, esse comboio já não é o mais gravoso.

Onde ocorre o deslocamento máximo é no carril, ponto de aplicação da carga dinâmica, tendo valores próximo de 0,95 mm, valores que normalmente são obtidos em casos reais. Este deslocamento vai diminuindo à medida que nos afastamos da fonte de geração de vibração. Sendo este valor da ordem dos 0,7 mm, quando analisamos os pontos situados em cima do aterro, enquanto que nos pontos situados em baixo do aterro, os valores dos deslocamentos são da ordem de 0,4 mm, Quando os pontos se situam fora do aterro, esses valores decrescem substancialmente para aproximadamente 0,1 mm (ponto situado próximo do aterro), ocorrendo um decréscimo gradual e até a uma distância de 15 m do eixo de simetria, e a partir desse ponto os deslocamentos têm quase o valor de zero.

Relativamente às velocidades verticais, o que acontece é muito semelhante ao que ocorre nos deslocamentos. Onde se verifica o maior valor da velocidade é no carril, diminuindo gradualmente à medida que a análise é feita aos pontos mais afastados da via. A velocidade obtida no carril foi de aproximadamente 53 mm/s. Analisando os pontos que pertencem à travessa, ocorre um decréscimo das velocidades para 38 mm/s. Nos pontos situados no aterro obtiveram-se valores de 17 mm/s. Quando a análise é feita para os pontos que se situam à superfície, os valores das velocidades verticais diminuem bastante. Para o ponto que se encontra a 6 m do eixo de simetria, o valor da velocidade é de aproximadamente 3,5 mm/s, diminuído gradualmente à medida que a análise é dirigida para os pontos mais afastados. A partir dos 15 m o valor da velocidade é inferior a 1 mm/s.

Analisando as velocidades quadráticas médias é possível concluir, que o valor mais elevado situa-se no ponto que representa o carril, tendo uma velocidade de 10,38 mm/s, ocorrendo uma diminuição desse valor à medida que a análise é feita para os pontos que se encontram mais afastados. Existe uma redução brusca, quando se analisam os pontos da travessa, possuindo valores próximos de 6 mm/s. Nos restantes pontos que pertencem ao aterro, a velocidade máxima obtida foi no ponto que se situa sobre o aterro com o valor de 2,24 mm/s. Relativamente aos pontos que se situam sobre o aterro, obtiveram-se valores próximos de 2,7 mm/s, para o ponto que se situa no eixo de simetria e para o ponto mais afastado do eixo, mas pertencendo ainda ao aterro, tem o valor de 0,56 mm/s. Analisando os pontos situados à superfície é possível observar a uma redução gradual da velocidade quadrática média, à medida que a análise é feita para os pontos cada vez mais distantes do eixo de simetria.

A maior variação de valores da velocidade quadrática média, para a mesma banda de frequências, verifica-se para a banda que contem a frequência de 10 Hz, sendo a sua variação em alguns dos pontos bastante acentuada. É visível que nas variações de banda existem alguns espaços vazios, isto acontece provavelmente porque a amostra é pequena, pois só se geraram 50 comboios, o que não é uma amostra muito elevada, mas é uma amostra representativa do que acontece nas zonas próximas de uma linha de alta velocidade interoperável.

É possível dizer que no carril os picos encontram-se ao longo dos 40 Hz. Nos pontos pertencentes à travessa, os picos com maior frequência diminuem a sua intensidade, havendo maiores picos até aos 40 Hz. E os picos máximos verificados para as travessas encontram-se para frequências baixas, aproximadamente 9 Hz, enquanto que nos pontos pertencentes ao aterro esses picos máximos encontram-se para frequências de cerca de 5 Hz. No ponto mais próximo do aterro ocorre o pico máximo das frequências, sendo um valor muito próximo do aterro. Para o caso dos pontos que se encontram à superfície, as frequências onde se situam os picos máximos é variável, mas apresentam frequências superiores às anteriores, na ordem dos 22 Hz e 32 Hz. Quanto mais afastado o ponto estiver, menor é a frequência que se encontra o pico máximo da velocidade.

## **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Um dos estudos que pode vir a ser executado, é a comparação de resultados entre, um modelo 3D e o modelo utilizado neste trabalho.

Outro estudo que pode ser executado, é verificar se para as mesmas condições mas com um número mais elevado de comboios aleatórios, os resultados são semelhantes ou novas conclusões podem vir a ser retiradas.

Pode ser feita também uma validação experimental dos resultados obtidos, percebendo quais os erros que o método pode ter, procedendo a algumas correcções na modelação, para que os resultados sejam mais realistas.



## BIBLIOGRAFIA

- Ahmad et. Al. (1991), *Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches*. Journal of Geotechnical Engineering 117(1), páginas de 67 até 88.
- Alves Costa, P., Calçada, R., Silva Cardoso, A. (2009a). *Moving Loads on the Ground: A Numerical Model Based on 2.5D FEM/ITM for Dynamic Analyses*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Alves Costa, P., Calçada, R., Cardoso, A, Bodare, A. (2009b). *Influence of soil non-linearity on the dynamic response of high-speed railway tracks*. Journal of Sound and Vibration, 19/11/2009, páginas 221 até 235, ELSEVIER, Leuven.
- Alves Costa, P., Calçada, R., Cardoso, A, Bodare, A. (2010a) *Modelação numérica de vibrações induzidas por tráfego ferroviário*.
- Alves Costa, P., Calçada, R., Couto Marques, J., Silva Cardoso, A. (2010b). *A 2.5D finite element model for simulation of unbounded domains under dynamic loading*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Antunes, Rogério (2004). *A Alta Velocidade Ferroviária - Breve enquadramento mundial*. Rede Ferroviária de Alta Velocidade S. A. Maio 2004.
- Bahrekazemi, Mehdi (2004). *Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction*. Dissertação de Doutoramento, Royal Institute of Technology, Estocolmo.
- BIOCRAWLER(2010)[http://www.biocrawler.com/w/images/b/bb/ICE\\_train.jpg](http://www.biocrawler.com/w/images/b/bb/ICE_train.jpg). 28/03/2010.
- Caetano, Elsa de Sá (1992). *Identificação Experimental de Parâmetros Dinâmicos em Sistemas Estruturais*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Coelho, Bruno Emanuel Zuada (2008). *Comportamento Dinâmico de Lajes sobre Estacas para Suporte de Vias Férrea de Alta Velocidade*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Costa Lopes, Patricia., Alves Costa, Pedro., Calçada, Rui., Silva Cardoso, António (2010). *Análise numérica da vibrações induzidas por tráfego ferroviário em túneis baseada em modelos 2.5D*. XII Congresso Nacional de Geotecnia., 28 de Abril de 2010, Campus de Azurém, páginas de 1787 até 1796, Guimarães.
- Couto Marques, J. (2004). *Program GEN2D (versão 2003.01) -Guia do Utilizador*. 7 de Outubro de 2004. GEN2D\_man.doc.
- CP(2010)<http://www.cp.pt/cp/displayPage.do?vgnextoid=1d94079ffa057010VgnVCM1000007b01a8c0RCRD>. 10/06/2010
- EN1991-2 (2003). *Actions on structures - Parte2: Traffic loads on bridges*.
- Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track*. Delft University of Technology. MRT Productions, Zaltbommel.
- Fernandes, Carlos (2010). *Alta Velocidade: Portugal Mais Próximo. A Rede Ferroviária da Alta Velocidade em Portugal*, Rede Ferroviária de Alta Velocidade S. A.
- FIRETRENCH(2010)<http://ftnews.firetrench.com/wp-content/uploads/2007/10/bombardieragc-2.jpg>. 28/03/2010.
- FLICKR(2010)[http://farm3.static.flickr.com/2543/4150090502\\_8b2c89904b.jpg](http://farm3.static.flickr.com/2543/4150090502_8b2c89904b.jpg). 24/03/2010.

- Fortunato, Eduardo Manuel Cabrita (2005). *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Gonçalves, Sílvio Daniel da Silva (2008). *Vibrações Induzidas em Edifícios Devidas ao Tráfego Ferroviário de Alta Velocidade*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Guedes, Manuel Vaz (2010). *Veículos para Tracção Electrica: material circulante; veículos. Visita de Estudo: EMEF (Guifões)*. 25/10/2005. [http://paginas.fe.up.pt/tre/TrE\\_folhas05/TrE\\_5f6.pdf](http://paginas.fe.up.pt/tre/TrE_folhas05/TrE_5f6.pdf). 20/05/2010
- Hall, Lars (2000). *Simulations and Analyses of Train-induced Ground Vibrations – A comparative study of two- and three-dimensional calculations with actual measurements*. Dissertação de Doutoramento, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005). *High-Speed Groud Transportantion Noise and Vibration Impact Assessment*. U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration.
- ISO 2631-1. (1997). *Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements* . International Organization for Standardization.
- ISO 2631-2. (2003). *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1Hz to 80Hz)* . International Organization for Standardization.
- ISO 4866. (2010). *Mechanical vibration and shock – Vibration of fixed structures – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures* . International Organization for Standardization.
- ISO 10811-1. (2000). *Mechanical vibration and shock – Vibration and shock in buildings with sensitive equipment – Part 1: Measurement and evaluation* . International Organization for Standardization.
- ISO 10811-2. (2000). *Mechanical vibration and shock – Vibration and shock in buildings with sensitive equipment – Part 2: Classification*. International Organization for Standardization.
- ISO 14837-1. (2005). *Mechanical vibration – Ground borne noise and vibration arising from rail systems – Part 1: General Guidance* . International Organization for Standardization.
- Larson Davis Inc. (2010). *Higiene Industrial. Vibração no Corpo Humano*. <http://www.grom.com.br/produto/med-vibracao/catalogo/Apresentacao%20Vibracao.pdf>. 10/06/2010.
- Lombaert, G., Degrande, G., Kogut, J., François, S. (2006). *The experimental Validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations*. Journal of Sound and Vibration, 11/06/2006, páginas 525 e 526, ELSEVIER, Leuven.
- Mateus da Silva, João Manuel (2005). *Propagação e Mitigação de Vibrações de Baixa Frequência Gerada por Comboios de Alta Velocidade*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Monteiro, Manuel João Pego (2009). *Estudo de vibrações induzidas pela circulação ferroviária. Caso de estudo: Alargamento da plataforma ferroviária do Gare Oriente*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.

- Pereira, Miguel Felipe Duque Fonseca (2008). *Comportamento Dinâmico de Pontes Ferroviárias de Alta Velocidade. Especificações para o projecto de estruturas*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- RAILWAYMANIA(2010)[http://www.railwaymania.com/docs/imgdb/renfe252\\_09.jpg](http://www.railwaymania.com/docs/imgdb/renfe252_09.jpg). 07/04/2010.
- RAVE (2008). *Alta Velocidade: Portugal Mais Próximo*. O projecto de Alta velocidade em Portugal., 30 de Junho de 2008, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rede Ferroviária de Alta Velocidade S. A., Porto.
- RAVE (2010a) <http://www.rave.pt/tabid/218/Default.aspx>. 22/05/2010.
- RAVE(2010b) <http://www.rave.pt/tabid/234/Default.aspx>. 22/05/2010.
- RAVE(2010c) <http://www.rave.pt/tabid/239/Default.aspx>. 22/05/2010.
- REFER(2010a).[http://www.refer.pt/Portals/0/conteudos/imagens/historias\\_de\\_vida/img\\_pessoas\\_historias\\_1\\_1\(1\).jpg](http://www.refer.pt/Portals/0/conteudos/imagens/historias_de_vida/img_pessoas_historias_1_1(1).jpg). 22/05/2010
- REFER(2010b)[http://www.refer.pt/LinkClick.aspx?link=conteudos%2fimagens%2fTransporteFerroviario%2fMapaPeninsula\\_2007GRD.jpg&tabid=274&mid=801](http://www.refer.pt/LinkClick.aspx?link=conteudos%2fimagens%2fTransporteFerroviario%2fMapaPeninsula_2007GRD.jpg&tabid=274&mid=801). 23/05/2010.
- REFER(2010c)[http://www.refer.pt/LinkClick.aspx?link=conteudos%2fimagens%2fTransporteFerroviario%2fMapaPeninsula\\_2007GRD.jpg&tabid=274&mid=801](http://www.refer.pt/LinkClick.aspx?link=conteudos%2fimagens%2fTransporteFerroviario%2fMapaPeninsula_2007GRD.jpg&tabid=274&mid=801). 23/05/2010.
- REFER(2010d)[http://www.refer.pt/DesktopModules/Articles/MakeThumbnail.aspx?Image=%2fPortals%2f0%2fconteudos%2fimagens%2fComunicacaoSocial%2fNoticias%2fREFER\\_IMG\\_0738\\_destaque\\_tratada.jpg&tabid=447&w=400](http://www.refer.pt/DesktopModules/Articles/MakeThumbnail.aspx?Image=%2fPortals%2f0%2fconteudos%2fimagens%2fComunicacaoSocial%2fNoticias%2fREFER_IMG_0738_destaque_tratada.jpg&tabid=447&w=400). 02/05/2010.
- REFER(2010e)[http://www.refer.pt/LinkClick.aspx?link=conteudos%2fimagens%2fTransporteFerroviario%2fMapaPeninsula\\_2007GRD.jpg&tabid=274&mid=801](http://www.refer.pt/LinkClick.aspx?link=conteudos%2fimagens%2fTransporteFerroviario%2fMapaPeninsula_2007GRD.jpg&tabid=274&mid=801). 07/04/2010.
- Ribeiro, Diogo Rodrigo Ferreira (2004). *Comportamento Dinâmico de Pontes sob Acções de Tráfego Ferroviário a Alta Velocidade*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rigueiro, Maria Constança Simões (2007). *Avaliação dos Efeitos Dinâmicos em Pontes Ferroviárias de Alta Velocidade de Pequeno e Médio Vão*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- RTP(2010)<http://tv1.rtp.pt/noticias/?article=91800&visual=3&layout=10>. 23/03/2010.
- Santos, Nuno (2006). *Comportamentos Dinâmicos e seus Principais Efeitos: Túneis e Via*. RAVE & Instituto da Construção da FEUP.
- Silva Gonçalves, Henrique Manuel (2008). *Ruído de Comboio de Alta Velocidade*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- SMH(2010)<http://images.smh.com.au/2009/10/08/778370/Eurostar-Train-600x400.jpg>. 27/03/2010.
- SPUR1(2010)<HTTP://WWW.SPUR1.DE/VORBILD/OBERBAU/PROFIL-UIC60.GIF>. 02/05/2010.
- UKTRAINPHOTOS(2010)<http://www.uktrainphotos.co.uk/images/390n20.jpg>. 28/03/2010.
- Van den Broeck, Peter (2001). *A prediction model for ground-borne vibrations due to railway traffic*. Dissertação de Doutoramento, Katholieke Universiteit Leuven - Faculteit Toegepaste Wetenschappen.
- Vendrame, António Carlos (2010). *Vibrações Ocupacionais*.  
[http://www.vendrame.com.br/novo/artigos/vibracoes\\_ocupacionais.pdf](http://www.vendrame.com.br/novo/artigos/vibracoes_ocupacionais.pdf). 10/06/2010

WAPEDIA(2010).[http://wapedia.mobi/thumb/07c514774/pt/max/470/360/0\\_Q4\\_Kodama\\_Hakata\\_19\\_980700.jpg?format=jpg%2Cpng%2Cgif](http://wapedia.mobi/thumb/07c514774/pt/max/470/360/0_Q4_Kodama_Hakata_19_980700.jpg?format=jpg%2Cpng%2Cgif). 22/05/2010

WIKIMEDIA(2010a)[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2f/Alstom\\_AGV\\_Cerhenice\\_img\\_0365.jpg/800px-Alstom\\_AGV\\_Cerhenice\\_img\\_0365.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2f/Alstom_AGV_Cerhenice_img_0365.jpg/800px-Alstom_AGV_Cerhenice_img_0365.jpg). 23/03/2010.

WIKIMEDIA(2010b)[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3d/Alfa\\_Pendular\\_CP\\_Lisboa\\_Santa\\_Apolonia.jpg/800px-Alfa\\_Pendular\\_CP\\_Lisboa\\_Santa\\_Apolonia.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3d/Alfa_Pendular_CP_Lisboa_Santa_Apolonia.jpg/800px-Alfa_Pendular_CP_Lisboa_Santa_Apolonia.jpg). 06/04/2010.

4RAIL[http://4rail.net/arpics/etr500\\_trenitalia\\_28A\\_500.jpg](http://4rail.net/arpics/etr500_trenitalia_28A_500.jpg) 28/03/2010.