
MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Propagação e mitigação de vibrações de baixa
frequência geradas por comboios de alta
velocidade

João Manuel Marcelino Mateus da Silva

Programas de Investigação e de Pós-Graduação na Área Científica de Mecânica dos Solos, apresentados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do título de Habilitado para o Exercício das Funções de Coordenação Científica.

Resumo

Em Portugal serão construídas, nos próximos anos, algumas centenas de quilómetros de vias férreas de alta velocidade. As exigências associadas a estas linhas, em particular no que concerne a tolerâncias de fabrico, são, naturalmente, mais restritivas que as das linhas férreas tradicionais, onde circulam comboios de carga e de passageiros a velocidades mais reduzidas.

Em diversos países tem-se verificado que a conjugação de velocidades elevadas de circulação com determinadas características dos solos de fundação conduz a fenómenos de amplificação dinâmica das deformações resultantes da circulação dos comboios.

As linhas de alta velocidade, em Portugal, terão inevitavelmente de atravessar zonas onde a velocidade de circulação se pode associar com as condições desfavoráveis das fundações criando os fenómenos dinâmicos referidos.

O presente Programa de Investigação situa o problema da circulação dos comboios de alta velocidade sobre solos moles, faz uma revisão dos métodos existentes para a previsão e análise do fenómeno, e analisa as medidas de mitigação existentes.

Em resultado da análise do problema são perspectivadas diversas linhas de investigação que têm como objectivo: a identificação dos factores que contribuem e condicionam a geração e propagação das vibrações; o desenvolvimento de ferramentas de análise e previsão; a identificação e estudo das zonas que, estando no traçado das linhas de alta velocidade em Portugal, possuem as características que potenciam o desenvolvimento do fenómeno e, finalmente, conjugando o conhecimento resultante dos tópicos anteriores, a análise das medidas de mitigação mais adequadas para os casos identificados.

Por último, é apresentado um Programa de Pós-Graduação, onde são concretizadas as linhas de investigação propostas, sob a forma de planos de enquadramento de recém licenciados, de teses de mestrado e de doutoramento.

Summary

In Portugal some hundred kilometers of high-speed railway tracks will be constructed, in the next few years. The requirements for these lines are, obviously, more restrictive than those for traditional railway lines, where freight and low speed passenger trains circulate. In several countries, it has been verified that the conjugation of high speed trains with certain foundation characteristics leads to the dynamic amplification of deformations due to railway traffic.

The new high-speed lines, in Portugal, will inevitably cross zones where the circulation speed can be associated with unfavorable foundation conditions giving rise to the dynamic amplification phenomena.

The present research program addresses the problem of the circulation of high-speed trains on soft soils, by revising the available methods for predicting and analyzing the phenomena, and assesses the existing countermeasures.

As a result of the analysis of the problem, research lines are presented with the purposes as follows: identifying the factors that contribute to and condition the generation and propagation of vibrations; developing prediction and analysis tools; identifying and studying the zones that, by being in the path of the high-speed train lines in Portugal, possess the characteristics that harness the development of the phenomenon; and, lastly, by conjugating the knowledge resulting from the research outlined, analyzing the mitigation measures more adequate for each identified case.

Finally, a Post Graduation program is presented, in which the proposed research lines are realized via plans intended to newly graduated students, as well as via MSc and Ph.D. thesis plans.

Résumé

Au Portugal, pendant les années prochaines, quelques centaines de kilomètres de voies ferrées à haute vitesse seront construites. Les exigences associées à ces lignes sont, naturellement, plus restrictives que celles des lignes ferrées traditionnelles, où des trains de marchandises et de voyageurs circulent à des vitesses plus réduites.

En effet, on a vérifié, à de plusieurs pays, que la conjugaison des vitesses de circulation élevées avec certaines caractéristiques des sols de fondation amène à des phénomènes d'amplification dynamique des déformations résultantes de la circulation des trains.

Les lignes à haute vitesse, au Portugal, seront inévitablement tenues de traverser des zones où la vitesse de circulation pourra être associée à des conditions défavorables des fondations tout en produisant les phénomènes dynamiques mentionnés ci-dessus.

Ce Programme de Recherche présente le problème de la circulation des trains à haute vitesse sur des sols mous, tout en révisant les méthodes existantes pour la prévision et l'analyse de ce phénomène, et étudie les mesures de mitigation disponibles.

Comme résultat de l'analyse du problème, on présente plusieurs lignes de recherche dont les objets essentiels sont les suivants : l'identification des facteurs qui contribuent à et qui conditionnent la production et la propagation des vibrations ; le développement d'outils d'analyse et de prévision ; l'identification et l'étude des zones, qui, en étant situées dans le tracé des lignes à haute vitesse au Portugal, ont les caractéristiques qui stimulent le développement du phénomène et, finalement, moyennant la conjugaison de la connaissance résultante, l'analyse des mesures de mitigation les plus adéquates pour les cas identifiés.

Finalement, on présente un Programme de post graduation, moyennant lequel les lignes de recherche proposées sont concrétisées, soit sous la forme de plans destinés aux nouveaux licenciés, soit sous la forme de thèses de maîtrise et de doctorat.

ÍNDICE DE TEXTO

PREÂMBULO	XIX
PARTE A - PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO	1
1 – INTRODUÇÃO	3
1.1 – Enquadramento do tema e organização do programa	3
1.2 – Linhas de alta velocidade em Portugal e no mundo.....	4
1.3 – Comboios basculantes	11
1.4 – Mecanismos de geração de vibrações	13
1.5 – Efeitos das vibrações na segurança e nas infra-estruturas ferroviárias	16
2 – REVISÃO CRÍTICA.....	21
2.1 – Propagação de vibrações.....	21
2.2 – Comportamento cíclico dos solos.....	25
2.3 – Modelos de previsão e análise	29
2.4 – Modelos analíticos.....	32
2.4.1 – <i>Introdução</i>	32
2.4.2 – <i>Meio elástico infinito e semi-infinito</i>	33
2.4.3 – <i>Modelos de viga em fundação visco-elástica</i>	39
2.4.4 – <i>O comboio como associação de cargas</i>	51
2.5 – Medições in situ.....	52
2.6 – Modelos empíricos	53
2.7 – Modelos numéricos	56
2.8 – Caracterização geotécnica	62
3 – MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DOS PROBLEMAS ASSOCIADOS ÀS LINHAS DE ALTA VELOCIDADE SOBRE SOLOS MOLES	73
3.1 – Introdução.....	73
3.2 – Melhoramento da fundação através da consolidação forçada	75
3.3 – Melhoramento da fundação através de jet-grouting	76
3.4 – Melhoramento da fundação através de colunas de brita.....	77
3.5 – Reforço da plataforma e do aterro através de geogrelhas	78
3.6 – Reforço da plataforma através da estabilização dos solos com ligantes hidráulicos	80

3.7 – Barreiras de vibração	81
3.7.1 – <i>Trincheiras</i>	81
3.7.2 – <i>Blocos de controlo das vibrações</i>	85
3.8 – Laje flutuante	86
3.9 – Vigas flutuantes	88
4 – LINHAS DE INVESTIGAÇÃO ASSOCIADAS AO ESTUDO DA GERAÇÃO, PROPAGAÇÃO E MITIGAÇÃO DE VIBRAÇÕES	89
4.1 – Introdução.....	89
4.2 – Linha de Investigação 1: Modelação da geração, propagação e mitigação de vibrações	90
4.3 – Linha de Investigação 2: Caracterização do comportamento dinâmico de solos moles. Aplicação aos eixos ferroviários de Alta Velocidade	92
PARTE B - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO	95
1 – INTRODUÇÃO	97
2 – PLANO DE ESTUDOS DE PÓS-GRADUAÇÃO	101
2.1 – Plano de enquadramento de recém licenciados.....	101
2.1.1 – <i>Levantamento, recolha e organização da informação já existente na Linha do Norte</i>	101
2.1.2 – <i>Análise e tratamento dos resultados obtidos em campanhas de medição de vibrações em troços da Linha do Norte</i>	102
2.1.3 – <i>Colaboração no desenvolvimento e aplicação de métodos numéricos, e na interpretação dos resultados das campanhas de ensaios</i>	103
2.1.4 – <i>Custos associados à colaboração de recém licenciados</i>	104
2.2 – Teses de mestrado	105
2.2.1 – <i>Aplicação de modelos bidimensionais ao estudo da geração, propagação e mitigação de vibrações - T1</i>	105
2.2.2 – <i>Métodos de caracterização dinâmica de solos moles para o estudo do comportamento dinâmico em linhas ferroviárias de alta velocidade - T2</i>	107
2.2.3 – <i>Medição de vibrações em solos moles geradas pela circulação de comboios de alta velocidade - T3</i>	110
2.3 – Tese de doutoramento - Modelação do comportamento dinâmico de linhas ferroviárias de alta velocidade assentes sobre fundações deformáveis - T4	113
2.4 – Custo global e integração temporal dos trabalhos	116
ANEXOS	121

1 – ANEXO I - EQUAÇÃO DA VIGA DE WINKLER.....	123
1.1 – Equação diferencial da viga de Winkler em diferenças finitas.....	123
1.2 – Solução numérica da equação da viga de Winkler.....	123
2 – ANEXO II - ELEMENTOS FINITOS 2.5D.....	126
2.1 – Formulação.....	126
2.2 – Funções de forma e interpolação dos elementos infinitos.....	129
3 – ANEXO III - COMBOIOS DE ALTA VELOCIDADE.....	131
3.1 – Distribuição de cargas do comboio Alfa Pendular.....	131
3.2 – Distribuição de cargas do comboio X2000.....	132
3.3 – Distribuição de cargas do comboio IC.....	133
3.4 – Distribuição de cargas do comboio Thalys HST.....	134
3.5 – Aplicação do modelo de viga de Winkler ao comboio Alfa Pendular.....	135
4 – ANEXO IV - REVISÃO DE ALGUNS PROGRAMAS COMERCIAIS	139
4.1 – Introdução.....	139
4.2 – Quake/w	139
4.3 – Flac 2D	141
4.4 – Plaxis Dynamic	143
4.5 – Abaqus	145
4.6 – Adina	146
4.7 – Diana	147
4.8 – Flac 3D	148

ÍNDICE DE FIGURAS

PARTE A - PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

Fig. 1.1 – Diagrama da RAVE (http://www.rave.pt)	10
Fig. 1.2 – Funcionamento da suspensão dos comboios basculantes e bogie basculante Pendolino	12
Fig. 1.3 – Modelo analógico de carruagem com rodados, bogies e suspensão	15
Fig. 1.4 – Fontes de geração de vibrações e respectivos comprimentos de onda (Esveld, 2001)	15
Fig. 1.5 – Distribuição de tráfego na LN em Espinho, no dia 1 de Setembro de 2004	18
Fig. 1.6 – Evolução das intervenções de ataque pesado com o número de passagens de comboios (Anderson <i>et al.</i> , 2000).....	19
Fig. 2.1 – Geração e propagação de vibrações (Hall, 2000)	22
Fig. 2.2 – Distribuição e propagação de ondas num meio semi-infinito, homogéneo e isotrópico (Hall, 2000).....	22
Fig. 2.3 – Ondas volumétricas e superficiais – deformação do meio.....	24
Fig. 2.4 – Variação de G/G_0 com a distorção para solos com diversos índices de plasticidade.....	27
Fig. 2.5 – Variação do coeficiente de amortecimento com a deformação distorcional e índice de plasticidade	29
Fig. 2.6 – Classificação das soluções analíticas para carga em movimento num meio elástico em função da relação da velocidade de circulação com a velocidade das ondas no solo	34
Fig. 2.7 – Modelo geométrico de uma carga em movimento num meio ilimitado	35
Fig. 2.8 – Deslocamentos verticais num meio ilimitado para uma carga em movimento a velocidade sub-sónica.....	36

Fig. 2.9 – Deslocamentos verticais num meio ilimitado para uma carga em movimento a velocidade trans-sónica	36
Fig. 2.10 – Deslocamentos verticais num meio ilimitado para uma carga em movimento a velocidade super-sónica	36
Fig. 2.11 – Cones de Mach na propagação de ondas a velocidade supersónica em meio infinito	37
Fig. 2.12 – Propagação das ondas R para um meio semi-infinito	37
Fig. 2.13 – Diagramas de deslocamento vertical (Hung <i>et al.</i> , 2000)	38
Fig. 2.14 – Modelo de um aterro ferroviário e respectivo modelo de viga de Winkler	40
Fig. 2.15 – Modelo reológico da viga de Winkler assente numa fundação visco-elástica	40
Fig. 2.16 – Propagação das vibrações e efeito de Doppler	43
Fig. 2.17 – Solução da viga de Winkler para diversos valores de α e β	44
Fig. 2.18 – Amplificação dinâmica versus factor velocidade (α) para diversos valores do factor de amortecimento (β)	45
Fig. 2.19 – Viga de Winkler com fundação com rigidez variável com uma função de incerteza (Fryba <i>et al.</i> , 1998).....	47
Fig. 2.20 – Exemplo do acréscimo de deformação considerando uma função de incerteza na caracterização da fundação ($\beta=0,5$).....	47
Fig. 2.21 – Modelo de viga de Winkler assente em camadas subjacentes a um meio semi-infinito.....	49
Fig. 2.22 – Forças e deslocamentos nos diversos componentes da superestrutura ferroviária	50
Fig. 2.23 – Resposta vertical da superfície do solo devido à excitação de uma carga com uma frequência de 40Hz à velocidade de 150 m/s	51
Fig. 2.24 – Relação entre a deflexão máxima dinâmica e estática.....	54
Fig. 2.25 – Distribuição de cargas nas travessas	55

Fig. 2.26 – Esquema de divisão das zonas do campo próximo e do campo afastado no método híbrido e na utilização de elementos infinitos (Yerli <i>et al.</i> , 2003)	58
Fig. 2.27 – Condições de carga para estado plano de deformação	59
Fig. 2.28 – Representação esquemática da geometria do problema e do sistema de cargas (Yang <i>et al.</i> , 2003)	61
Fig. 2.29 – Modelo reológico do ensaio de coluna ressonante.....	65
Fig. 2.30 – Níveis de distorção de diversos ensaios de laboratório (Woods, 1978)	65
Fig. 2.31 – Ensaios sísmicos mais correntes.....	66
Fig. 2.32 – Localização das cidades de Karlstad, Gothenburg e Malmö na Suécia	67
Fig. 2.33 – Perfil tipo em Ledsgaard.....	68
Fig. 3.1 – Tratamento da fundação com estacas de brita.....	78
Fig. 3.2 – Reforço da fundação da plataforma através de geogrelhas	79
Fig. 3.3 – Modelo simplificado para estudo da eficiência da trincheira.....	82
Fig. 3.4 – Deslocamento espectral vertical.....	83
Fig. 3.5 – Estudo da variação da eficiência de trincheiras com a distância à origem	83
Fig. 3.6 – Mecanismos de transmissão, reflexão e conversão de ondas nas trincheiras.....	84
Fig. 3.7 – Funcionamento dos blocos de controlo de vibração (adaptado de Takemiya <i>et al.</i> , http://www.aisawa.co.jp).....	85
Fig. 3.8 – Laje flutuante para controlo de vibrações	87
Fig. 3.9 – Via férrea assente em laje flutuante	88
Fig. 3.10 – Via em caixão vazado continuamente apoiado na fundação.....	88

PARTE B - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Fig. 2.1 – Geometria do problema 2.5D	126
---	-----

Fig. 2.2 – Elemento infinito no referencial global e local.....	129
Fig. 2.3 – Funções de forma M_1 , M_2 e M_4 do elemento infinito	130
Fig. 2.4 – Funções de interpolação, parte real e imaginária.....	130
Fig. 3.1 – Perfil transversal tipo da LN.....	135
Fig. 3.2 – Solução da viga de Winkler para diversos valores de α , com $\beta=0,1$ (Anexo 1.2).....	137
Fig. 3.3 – Resultados para $v=50$ km/h	137
Fig. 3.4 – Resultados para $v=100$ km/h.....	137
Fig. 3.5 – Resultados para $v=150$ km/h	138
Fig. 3.6 – Resultados para $v=200$ km/h	138
Fig. 4.1 – Fonteiras de campo livre implementadas no FLAC 3D (Itasca, 1997).....	149

ÍNDICE DE QUADROS

PARTE A - PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

Quadro 1.1 – Factores que afectam a geração de vibrações	14
Quadro 2.1 – Valores de m para cálculo do amortecimento geométrico num semi-espaço inifinito	25
Quadro 2.2 – Factores que afectam o módulo de distorção inicial e a relação G/G_0 em argilas normal ou moderadamente consolidadas (Dobry <i>et al.</i> , 1987)	27
Quadro 2.3 – Factores que afectam o coeficiente de amortecimento ξ em argilas normalmente ou moderadamente consolidadas (Dobry <i>et al.</i> , 1987)	29
Quadro 2.4 – Ensaio de campo para avaliação do módulo de distorção (Santos, 1999)	63
Quadro 2.5 – Ensaio de laboratório para avaliação do módulo de distorção e do coeficiente de amortecimento histerético (Santos, 1999)	64

PARTE B - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Quadro 2.1 - Custos associados à participação de recém licenciados no Programa de Pós-Graduação (valores arredondados).....	104
Quadro 2.2 – Proposta de programa de trabalhos para a aplicação de modelos bidimensionais no estudo da propagação e vibrações e de medidas de mitigação	107
Quadro 2.3 – Custos associados à elaboração da dissertação.....	107
Quadro 2.4 – Proposta de programa de trabalhos para o estudo dos métodos de caracterização dinâmica de solos moles para o estudo do comportamento dinâmico em linhas de alta velocidade	109
Quadro 2.5 – Custos associados à elaboração da dissertação.....	109

Quadro 2.6 – Proposta de programa de trabalhos para a medição de vibrações em solos moles geradas pela circulação de comboios de alta velocidade	112
Quadro 2.7 – Custos associados à elaboração da dissertação.....	113
Quadro 2.8 – Proposta de programa de trabalhos para a “Modelação do comportamento dinâmico de linhas ferroviárias de alta velocidade assentes sobre fundações deformáveis”	115
Quadro 2.9 – Custos associados à elaboração da dissertação.....	115
Quadro 2.10 – Articulação temporal das diversas teses	117
Quadro 2.11 – Cálculo do valor global do Programa de Pós-Graduação.....	117
Quadro 3.1 – Posição dos eixos e cargas para o comboio Alfa Pendular	131
Quadro 3.2 – Posição dos eixos e cargas para o comboio X2000	132
Quadro 3.3 – Posição dos eixos e cargas para o comboio IC.....	133
Quadro 3.4 – Posição dos eixos e cargas para o comboio Thalys HST	134
Quadro 3.5 – Cálculo da velocidade crítica	136
Quadro 3.6 – Valores de α	136
Quadro 4.1 – Preços do programa FLAC2D.....	143
Quadro 4.2 – Preços do programa Plaxis.....	145
Quadro 4.3 – Preços do programa FLAC3D.....	149

Agradecimentos

Os trabalhos da carreira de investigação científica, apesar de serem iniciativas individuais, são também fruto de uma convivência, partilha de experiências e conhecimentos. A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a sua realização, manifesto desde já, os meus agradecimentos.

Há, no entanto, algumas pessoas ou entidades que devem ser destacadas, especialmente pela colaboração ou apoio prestado mais recentemente.

Assim gostaria de agradecer, em particular:

Ao Professor Maranha das Neves, Doutor Delgado Rodrigues e Professor Pedro Mendes pela leitura crítica do presente trabalho e pelas preciosas sugestões que deram para o mesmo;

À REFER, em particular aos colegas Eng^os Jorge Rocha e Alexandra Pratas pelo fornecimento de importantes dados sobre a Linha do Norte;

Aos colegas Doutor António Roque e Doutora Marília Oliveira pelos muito úteis esclarecimentos dados sobre os aspectos mais ligados à Geologia e à Geofísica;

Aos colegas do Núcleo de Barragens e Obras de Aterro, nomeadamente à Doutora Laura Caldeira, pela amizade e apoio prestados;

E, finalmente, *the last but not the least*, à Xana, Elisabete, Joaquim, Sofia, Luís, Miguel e ... que muito me apoiaram e motivaram.

PREÂMBULO

O presente documento materializa uma proposta, da autoria do signatário, de um Programa de Investigação e de um Programa de Pós-Graduação, destinados ao estudo da propagação e mitigação dos efeitos das ondas de baixa frequência, em resultado da circulação de comboios de alta velocidade.

A apresentação dos programas referidos no parágrafo anterior, visa a obtenção do “Título de Habilitado para o Exercício de Funções de Coordenação Científica”, nos termos do estabelecido no Artº 30, números 2 e 3 do Decreto-Lei 124/99 de 20 de Abril de 1999.

Em face do indicado no referido Decreto-Lei, bem como no parecer do Conselho Científico do LNEC, aprovado em sessão plenária em 2002-12-17, foi decidido organizar o documento considerando a sua divisão em duas partes:

Parte A – Programa de Investigação;

Parte B – Programa de Pós-Graduação.

Na Parte A é feito o enquadramento do tema no contexto dos desenvolvimentos presentes e futuros das ferrovias em Portugal, a revisão crítica dos trabalhos mais relevantes, no que concerne à modelação da geração e propagação das ondas devidas a comboios de alta velocidade e do estudo das medidas de mitigação dos seus efeitos, sendo apontadas linhas de investigação para o estudo dos problemas em aberto.

A Parte B procura concretizar a forma de implementar o desenvolvimento das linhas de investigação definidas anteriormente, fazendo o enquadramento de recém licenciados no âmbito da sua participação nessas linhas de investigação e programando, sob a forma de teses de mestrado e de doutoramento, a realização da investigação necessária.

Simbologia

O significado dos símbolos usados é explicitado ao longo do texto, devidamente enquadrado nas matérias expostas. No entanto julga-se ser conveniente apresentar a lista dos símbolos mais importantes.

Atendendo a que se procurou identificar as grandezas através dos símbolos habituais na bibliografia de cada uma das especialidades abordadas podem, por vezes, surgir símbolos com significados múltiplos.

Símbolo/Sigla	Significado
a(t)	História das acelerações
b	Largura da viga de Winkler
c	Coesão do solo, viscosidade de um amortecedor
C	Velocidade de propagação das ondas, velocidade da carga
CBR	California Bearing Ratio
C_{cr}	Velocidade crítica de propagação das ondas
C_P	Velocidade de propagação das ondas P
C_R	Velocidade de propagação das ondas de Rayleigh
CRV	Coeficiente de Redução do nível de Vibração
C_S	Velocidade de propagação das ondas S
e	Índice de vazios
E	Módulo de elasticidade, módulo de deformabilidade
f	Frequência de vibração
G	Módulo de distorção do solo
G_0	Módulo de distorção do solo para deformação distorcional nula
h	Altura de um elemento, espessura de uma camada
I	Momento de inércia
IP	Índice de Plasticidade
K	Módulo de compressibilidade volumétrica do solo
k	Módulo de reacção do solo, rigidez de uma mola elástica
m	Massa
N	Número de ciclos de carga
OCR	Grau de sobreconsolidação
Ondas P	Ondas primárias
Ondas R	Ondas de Rayleigh
Ondas S	Ondas secundárias

Ondas SH	Ondas de corte horizontais
Ondas SV	Ondas de corte verticais
t	Tempo
V, V ₀	Velocidade de circulação
v(t)	História das velocidades
w(t)	História dos deslocamentos
w _p	Limite de plasticidade

Letras gregas

α	Coeficiente de atenuação, razão entre a velocidade da carga e a velocidade crítica
β	Factor de amortecimento
δ_v	Amplitude do movimento vertical
ϕ	Ângulo de atrito do solo
λ	Comprimento de onda, Constante de Lamé
μ	Constante de Lamé ($\mu=G$)
ρ	Massa volúmica aparente
σ	Tensão
σ'_m	Tensão efectiva normal média
ν	Coeficiente de Poisson
ω	Velocidade angular
ξ	Coeficiente de amortecimento

Funções matemáticas

$\delta(x)$	Função de Dirac
H(x)	Função de Heaviside

Acrónimos e siglas

AVE	Alta Velocidad Española
CAD	Computer Aided Design
CPTU	Ensaio de penetração estática com medição de pressão intersticial
GL	Graus de liberdade
LN	Linha do Norte
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEF	Método dos Elementos Finitos
RAVE	Rede Ferroviária de Alta Velocidade, S.A.
REFER	Rede Ferroviária Nacional, EP
SNCF	Société Nationale des Chemins de Fer
TGV	Train à Grande Vitesse

PARTE A - PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Enquadramento do tema e organização do programa

Em Portugal serão construídas, nos próximos anos, linhas ferroviárias de alta velocidade para efectuar não só a ligação entre as principais cidades nacionais, mas também, ligações a Espanha. Em 2003, na XIX Cimeira Luso Espanhola, foi reconhecida pelos dois países a grande importância sócio-económica de uma rede ibérica de alta velocidade que se integre nas redes Transeuropeias (<http://www.rave.pt>). No mesmo encontro, foram também acordados os eixos de ligação Portugal-Espanha. Tais eixos são: Porto-Vigo, Aveiro-Salamanca, Lisboa-Madrid e Faro-Huelva. Ficou ainda estabelecido que seria criada uma Comissão Mista, com membros nomeados pelos governos dos dois países, que estudaria os traçados mais adequados para os diversos eixos. Um dos objectivos principais é o de efectuar a ligação Lisboa-Madrid em 2h e 45min.

A circulação de comboios de alta velocidade sobre solos com determinadas condições pode criar fenómenos de amplificação dinâmica das deformações provocando diversos problemas, nomeadamente de segurança. As linhas de alta velocidade, em Portugal, terão inevitavelmente de atravessar zonas onde situações desse tipo se poderão verificar.

Em face da consciencialização, em Portugal, da necessidade de conhecer o problema da propagação e mitigação de vibrações, é pois, natural que se proponha um programa de investigação sobre este tema.

Para além disso, em Portugal, está em desenvolvimento a criação de uma rede de alta velocidade, a par da renovação/melhoramento de parte da rede existente para a circulação de comboios de velocidade alta, sendo portanto, necessário que o LNEC se posicione como entidade de referência também neste domínio.

O signatário encontra-se ligado desde 1995, ao projecto de modernização da Linha do Norte, onde tem dedicado uma parcela significativa da actividade do LNEC, no âmbito do Protocolo entre a REFER e o LNEC, para prestação de assessoria nas

diversas actividades envolvidas nesse projecto. Desde Novembro de 2003, encontra-se ainda a exercer as funções de coordenação do protocolo.

O presente Programa de Investigação visa apresentar os passos necessários para o estudo da geração e propagação de vibrações e colocar o LNEC em posição de assessorar a entidade ferroviária portuguesa na mitigação do fenómeno, assumindo que a alta velocidade constitui, também, um objectivo estratégico da actividade do LNEC.

O Programa de Investigação apresenta-se dividido em quatro Capítulos e quatro Anexos. No primeiro capítulo, no qual o presente parágrafo se integra, faz-se o enquadramento das linhas de alta velocidade e descrevem-se os mecanismos de geração de vibrações e os seus efeitos.

O segundo capítulo destina-se à revisão dos métodos de modelação da propagação de vibrações.

O terceiro capítulo descreve os métodos de mitigação, discutindo-se algumas vantagens e inconvenientes e os princípios que fundamentam a sua aplicação.

No quarto e último capítulo apresentam-se as linhas de investigação associadas ao fenómeno de propagação e controlo de vibrações de baixa frequência em resultado da circulação de comboios de alta velocidade, tendo como alvo específico a aplicação dos estudos às linhas de alta velocidade em Portugal.

1.2– Linhas de alta velocidade em Portugal e no mundo

As linhas para comboios de alta velocidade são demandas cada vez mais comuns nos mais diversos países, dos diversos continentes. O maior incremento na sua construção verifica-se, actualmente, na Europa e na Ásia, tendo as velocidades especificadas para algumas dessas linhas atingido já valores superiores a 300 km/h (Kaynia *et al.*, 2000). Por exemplo, no Japão, enquanto que, em 1964, quando da entrada em serviço das primeiras linhas de alta velocidade, a velocidade máxima dos comboios era de 200 km/h, actualmente, os comboios “Shinkansen” viajam regularmente a 300 km/h na linha Tokyo-Nagoya-Osaka, e o objectivo é o de que

venham a atingir, de forma regular, velocidades de 350 km/h (www.railway-technology.com).

A França é o país que, a par do Japão, mantém o maior investimento nas linhas ferroviárias de alta velocidade. Neste país, estas linhas foram implementadas na década de 50, tendo os comboios que nelas circulam sido designados por “Train à Grande Vitesse” o que dá origem ao conhecido acrónimo - TGV. O sucesso das linhas de alta velocidade é tão elevado neste país que os voos domésticos são, normalmente, preteridos a favor do transporte ferroviário. As linhas de alta velocidade francesas têm actualmente ligações à Bélgica, Alemanha, Suíça, Holanda, Reino Unido e Itália.

O TGV francês estabeleceu no ano 1990 em 515,3 km/h, o recorde de velocidade de ponta para um comboio tradicional, (<http://www.co.sncf.com>). Apesar de velocidades desta ordem poderem ser atingidas pelos comboios, em operação normal, as velocidades são mais reduzidas (cerca de 300 km/h), porque as restrições à velocidade estão mais relacionadas com a linha (traçado e comportamento) do que com o equipamento circulante.

Na vizinha Espanha, a primeira linha ferroviária de alta velocidade foi inaugurada em 1992, ligando Madrid a Sevilha, tendo adoptado a designação de “Alta Velocidad Española” (AVE). Este país tem actualmente como objectivo, dotar o território com 7200 km de linhas com velocidades de circulação até 350 km/h, por forma a permitir a ligação de Madrid a todas as cidades principais em menos de 4 h. No início de 2003, 752 km dessas linhas encontravam-se já construídas, enquanto que 1146 km estavam em construção e 1182 km em projecto (<http://www.railway-technology.com/projects>).

Em Portugal, seguindo o modelo de outros países da Europa, entre os quais se destacam a Espanha e a França, conforme acima se referiu, está prevista, conforme recentemente anunciado, a construção de uma rede de alta velocidade, tendo-se criado, para esse efeito, a Rede Ferroviária de Alta Velocidade, S.A. (RAVE). A missão dessa empresa é: “Desenvolvimento e coordenação dos trabalhos e estudos necessários para a formação de decisões de planeamento e construção, financiamento, fornecimento e exploração de uma rede ferroviária de alta velocidade

a instalar em Portugal Continental e da sua ligação com a rede espanhola de igual natureza.” (<http://www.rave.pt>).

Neste contexto, a Directiva 96/48/CE do Conselho Europeu, de 23 de Julho de 1996, definiu as seguintes categorias de linhas de alta velocidade:

- **categoria I:** as linhas especialmente construídas para a alta velocidade, equipadas para velocidades geralmente iguais ou superiores a 250 Km/h;
- **categoria II:** as linhas especialmente adaptadas para a alta velocidade, equipadas para velocidades da ordem dos 200 Km/h;
- **categoria III:** as linhas especialmente adaptadas para a alta velocidade, de natureza específica devido a condicionamentos de topografia, relevo ou meio urbano e nas quais a velocidade deverá ser adaptada caso a caso.

Segundo as indicações mais recentes para a implementação, em Portugal, da rede de alta velocidade (RAVE), ir-se-á optar, quase exclusivamente, pela construção de linhas inteiramente novas (de categoria I), pois, para além de outras vantagens que mais à frente se detalharão, é possível optar pelos eixos mais convenientes do ponto de vista de traçado.

Há, de facto, várias razões que aconselham a realização de um novo traçado. Por um lado, a renovação/adaptação à alta velocidade de uma plataforma ferroviária em exploração apresenta diversas limitações, dado que implicaria, pela dimensão das intervenções, importantes restrições à circulação dos comboios nas linhas em obras, nomeadamente, quanto à velocidade de circulação. Por outro lado, as exigências de traçado de uma linha de alta velocidade não são, em muitos casos, compatíveis com as das linhas tradicionais existentes, o que implicaria necessariamente alterações de traçado, que aumentariam certamente o volume de obras a realizar.

Na sua maior parte, os eixos ferroviários em Portugal, pelo menos os mais importantes, foram traçados e parcialmente construídos no século XIX, quando o material circulante não atingia as velocidades actualmente praticadas e quando as técnicas e equipamentos disponíveis para a sua construção eram muito limitadas e restritivas, quando comparadas com as actuais. Por outro lado, e tomando como exemplo a Linha do Norte (LN), esta passa por diversas cidades e povoações de reduzidas dimensões e sem interesse do ponto de vista de uma linha de alta

velocidade, cujo principal objectivo é o de fazer a ligação entre as cidades mais importantes com um mínimo de restrições.

Tendo em atenção as restrições de inclinação que as locomotivas de outrora apresentavam, devido basicamente à baixa potência, na construção das linhas antigas havia a necessidade de fazer o traçado em termos altimétricos, por forma a evitar pendentes muito elevadas. Por outro lado, as velocidades relativamente baixas permitiam o traçado planimétrico com curvas de raio relativamente reduzido, ao contrário do que é exigido às linhas para circulação a altas velocidades, onde o raio das curvas deve ser necessariamente maior do que nos comboios que circulam a velocidades mais reduzidas.

As restrições relativas à potência do material circulante, com a conseqüente necessidade de não criar traçados com pendentes muito elevadas, obrigaram ao atravessamento de diversas zonas com fundações deformáveis que, apesar dessas características, são zonas relativamente planas e, portanto, sob esse aspecto, adequadas para os equipamentos mais antigos.

Assim, o traçado das linhas mais antigas é, de uma forma geral, inadequado para a circulação dos comboios de alta velocidade.

Por outro lado, compreende-se que os critérios de qualidade associados às linhas de alta velocidade sejam, naturalmente, superiores aos das linhas tradicionais, no sentido em que os parâmetros que definem a qualidade são mais exigentes, por exemplo, através da adopção de tolerâncias de fabrico mais reduzidas. Um dos parâmetros mais exigentes a destacar é a regularidade geométrica da linha, quer no sentido transversal, quer no longitudinal. No que concerne às linhas de alta velocidade, é ainda de salientar a importância dos parâmetros de controlo do seu desempenho.

No entanto, para fazer face às prementes exigências de circulação entre as duas principais cidades do País, Lisboa e Porto, optou-se por adaptar a Linha do Norte (LN) à circulação de comboios a “velocidade alta” (categoria II), pelo que desde 1995 se têm vindo a proceder a trabalhos de modernização da linha.

Na renovação da LN, para além da substituição dos elementos estruturais da ferrovia, carris, travessas e balastro, da reformulação dos sistemas de drenagem da

plataforma e taludes e do reforço da plataforma, tem sido necessário também rectificar o traçado no sentido de eliminar determinadas curvas ou aumentar o seu raio, tornando o traçado compatível com as composições de velocidade mais elevada que circulam na linha (Anexo 3.1).

Todos os trabalhos de renovação da LN decorrem com a linha em exploração. Tendo em atenção que a LN é o principal eixo ferroviário de Portugal e que se encontra, em boa medida, saturada, facilmente se compreende haver grandes dificuldades nesses trabalhos.

A opção de efectuar um traçado, na sua maioria novo é, pois, sob diversos pontos de vista, perfeitamente justificada. Com a realização desse traçado será possível otimizar a selecção da trajectória para as composições de alta velocidade, tendo em atenção as povoações a atravessar, bem como os traçados geotecnicamente mais adequados, entre outros.

Não obstante, haverá sempre necessidade de atravessar zonas de características geotécnicas inferiores, onde podem surgir problemas associados à segurança do material circulante, à degradação dos aterros e da qualidade da plataforma.

Por outro lado, as linhas terão de atravessar, quase inevitavelmente, zonas mais ou menos urbanizadas, quanto mais não seja, na proximidade de aglomerados urbanos nas zonas de estação, onde se podem fazer sentir alguns dos efeitos característicos da circulação dos comboios de alta velocidade.

A circulação dos comboios de alta velocidade é susceptível de provocar vibrações importantes que causam incómodo, quer para os utentes dos próprios comboios, quer para os habitantes da proximidade das linhas. Além disso, em determinadas circunstâncias, podem, ainda, causar danos para o património construído.

As vibrações causadas pela circulação de comboios de alta velocidade são acções dinâmicas que podem ser, em certas situações, amplificadas, reduzindo o nível de segurança da circulação ou causando a degradação acelerada da superestrutura e/ou da infra-estrutura ferroviária.

Ao contrário dos assentamentos devidos à consolidação dos solos moles, que ocorrem no atravessamento de zonas aluvionares, e que diminuem com o decorrer

do tempo, os efeitos devidos às vibrações são praticamente intemporais, desde que se mantenham as características dos solos de fundação (Sunaga, 2001).

Na actual configuração estão previstos quatro eixos da RAVE, a concluir em datas distintas. O primeiro eixo será Lisboa-Porto-Vigo (Fig. 1.1); o segundo assegura a ligação à capital Espanhola pela linha Lisboa-Caia-Madrid; a terceira linha efectuará também a ligação a Madrid mas da zona norte de Portugal (linha 3, Porto-Aveiro-Madrid); finalmente o último eixo será o que assegura a ligação ao sul de Espanha (Lisboa-Faro-Huelva). Os prazos previstos para os principais eixos são: Lisboa-Porto-Vigo (2009); Aveiro-Salamanca (2015); Lisboa-Madrid (2010) e Faro-Huelva (2018).

Como facilmente se depreende do traçado da RAVE, apesar de este ser quase integralmente planeado de origem, atravessará sempre zonas problemáticas do ponto de vista geotécnico e em particular, serão atravessadas zonas aluvionares, das quais, pela sua importância e extensão, se destacam as do vale do Tejo e da zona de Aveiro. Nestas zonas, para além dos problemas característicos que estão associados com assentamentos diferidos, comportamento deficiente em geral e problemas de drenagem, entre outros, o comportamento dinâmico dos solos pode causar problemas devidos à circulação de comboios de alta velocidade.

Num levantamento prévio efectuado na carta geológica de Portugal, à escala 1:500.000, e tendo em atenção os alinhamento do traçado, tal como apresentado na Fig. 1.1, foi possível identificar algumas zonas onde as condições geológico-geotécnicas devem ser alvo de um estudo mais pormenorizado. Essas zonas são:

- Troço Porto-Aveiro-Coimbra: travessias da zona lagunar da ria de Aveiro, das aluviões do rio Vouga e das aluviões no baixo vale do rio Mondego.
- Troço Leiria-Alenquer-Lisboa: travessias das planícies aluvionares do rio Lis, da ribeira da Ota, da ribeira de Alenquer, do rio Tejo e do rio Trancão.
- Troço Alenquer-Montemor: travessias das planícies aluvionares do rio Tejo e, eventualmente, do rio Sorraia.
- Troço Lisboa-Montemor: travessias do estuário e da planície aluvionar do rio Tejo.

- Troço Faro-Huelva: travessias do Sapal e zona lagunar de Faro-Olhão-Tavira e do rio Guadiana.

Naturalmente, para além das zonas assinaladas, de maior extensão, haverá sempre o atravessamento de baixas aluvionares de menor expressão ou outras zonas de solos com piores características do ponto de vista do comportamento dinâmico.

Mas, para além da RAVE, também na actual linha do Norte podem surgir problemas associados à circulação de alta velocidade. Com efeito, o objectivo para a LN é o de permitir a circulação dos comboios de “velocidade alta”, ou seja, atingindo a velocidade de 220 km/h, o que, como se verá à frente, pode também gerar problemas de comportamento dinâmico, dependendo, entre outros factores, das características dos solos.

Assim, uma grande parte da problemática associada aos comboios de alta velocidade coloca-se também, já nos dias de hoje, às linhas ferroviárias existentes, como seja o caso da LN, com a circulação dos comboios de velocidade alta.

REDE PORTUGUESA DE ALTA VELOCIDADE



Fig. 1.1 – Diagrama da RAVE (<http://www.rave.pt>)

1.3– Comboios basculantes

As infra-estruturas ferroviárias de alta velocidade não são, regra geral, de circulação exclusiva, isto é, para além da circulação das composições de alta velocidade devem permitir a circulação de outro tipo de composições. Assim sendo, as características da linha (escala, inclinação, raios de curvatura), devem ser ajustadas ao tráfego de diversos tipos de composições. Os comboios de carga circulando a velocidades mais reduzidas aceitam raios de curvatura inferiores, mas, por outro lado, não podem circular em vias com inclinações elevadas, nem escalas¹ superiores a 140 mm. Já os comboios de alta velocidade, admitem inclinações superiores, mas, em resultado das velocidades de circulação mais elevadas, necessitam, em princípio, de uma escala maior e raios de curvatura mais elevados.

Conforme referido na secção anterior, no início do século XIX, os comboios foram projectados em conjunto com as linhas por onde circulavam, fazendo uso da tecnologia de então. A evolução dos comboios ao longo dos anos foi incorporando, em cada época, as tecnologias mais recentes. Numa primeira fase, a evolução foi essencialmente ao nível da mecânica, tendo-se assistido, por exemplo, à passagem dos motores a vapor para os motores diesel e, finalmente, para os motores eléctricos.

No último século, com os desenvolvimentos ao nível da electrónica, e em particular dos computadores, os comboios passaram a incluir quantidades apreciáveis de dispositivos desta natureza, nomeadamente em sistemas de controlo de velocidade e sistemas de travagem. No entanto, os dispositivos electrónicos como sensores, controladores e actuadores podem também ser aplicado às suspensões dos comboios, aumentando muito a sua prestação no que respeita à velocidade, conforto e segurança (Goodall, 2002).

Para ultrapassar as restrições relativas ao projecto das linhas de circulação não exclusiva, e que são, aparentemente, incompatíveis, os comboios de alta velocidade recorrem a uma tecnologia de suspensão activa que incorpora os dispositivos de mecatrónica mais recentes. Um resultado dessa tecnologia é o facto de os comboios

¹ diferença entre a cota do topo dos dois carris

ajustarem automaticamente o seu eixo vertical consoante a inclinação da via e a velocidade de circulação (Fig. 1.2).

Na Europa o conceito está fortemente implementado. No que respeita a fabricantes, destacam-se o Pendolino em Itália, o comboio X2000 na Suécia, o AVE e o Talgo 200 em Espanha e o VT 611 na Alemanha. Um importante fabricante, a Bombardier, produz comboios basculantes para diversos países, como sejam os Estados Unidos da América e o Japão, sendo que, neste último, já em 1996 circulavam, em fase experimental, diversas composições deste tipo.

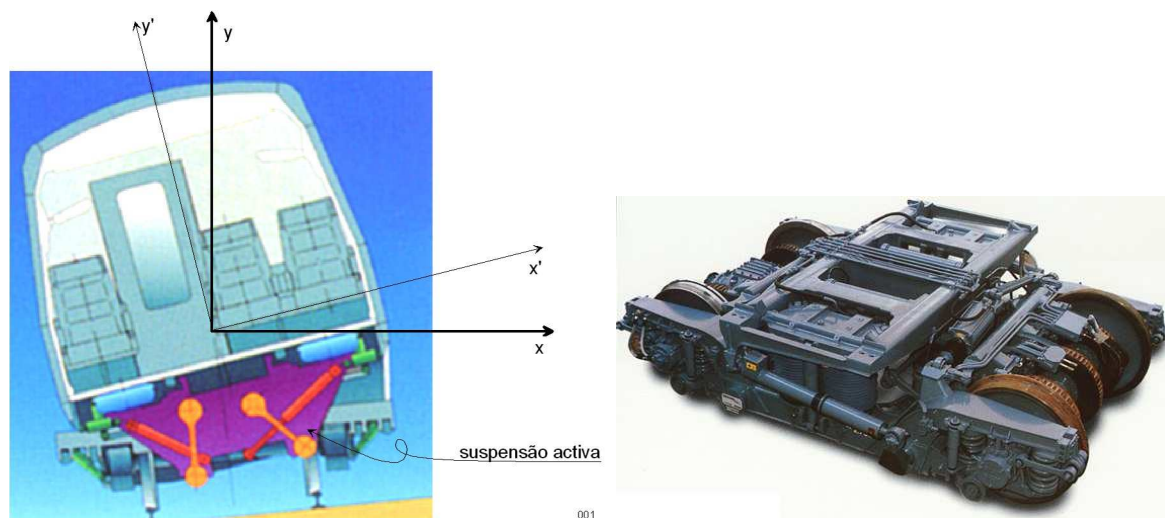


Fig. 1.2 – Funcionamento da suspensão dos comboios basculantes e bogie basculante Pendolino

Já em França, a política de desenvolvimento dos transportes ferroviários tem seguido, ao longo dos tempos, diferentes orientações. Na década de 50, a tecnologia basculante tal como então era entendida (o assunto era objecto de estudo desde 1928), começou por ser explorada. No entanto, naquela época, o movimento basculante do comboio era apenas resultado da aceleração centrífuga (basculamento passivo), não existindo ainda, nas composições, actuadores que forçassem o movimento de inclinação (basculamento activo). Assim, depois de 1971, a tecnologia basculante foi praticamente abandonada, tendo-se optado, em detrimento do desenvolvimento daquela tecnologia, por empreender desenvolvimentos mais profundos ao nível das infra-estruturas ferroviárias. Só mais recentemente, em 1996, foram dadas, naquele país, novas orientações para se retomar a tecnologia basculante em todas as suas vertentes.

É necessário salientar que a França ocupa, nos dias de hoje, uma posição praticamente ímpar ao nível do transporte ferroviário de alta velocidade. O projecto TGV foi lançado em 1966 por orientação do Director Geral dos Transportes, de certo modo em resposta aos desenvolvimentos do comboio Shinkansen japonês (Powell-Ladret, 1999). Esse projecto (TGV), aproveitando uma época economicamente favorável, baseou-se fortemente no desenvolvimento de infra-estruturas adequadas à circulação de comboios de alta velocidade. Paralelamente, desde 1996 que a tecnologia basculante passou a ser, de acordo com as directivas emitidas, encarada como mais uma alternativa para tornar as grandes linhas e/ou as linhas regionais mais atractivas e rentáveis. Neste caso, associou-se uma excelente qualidade de infra-estruturas com um material circulante basculante também com excelentes prestações.

A opção, de certo modo conservativa, da autoridade francesa para os caminhos de ferro (SNCF), baseou-se no facto de, à data em que foi decidido construir as linhas de TGV em França, a tecnologia basculante não se encontrar consolidada, sendo ainda alvo de investigação. Mais recentemente, a exploração deste tipo de equipamentos em diversos países veio a mostrar que a tecnologia é viável, adequada e economicamente rentável adequando-se ainda à exploração de linhas existentes.

Em resumo, de acordo com os desenvolvimentos mais recentes nos diversos países, as linhas de alta velocidade combinam uma infra-estrutura melhorada, adaptada à circulação de alta velocidade, com a tecnologia de composições basculantes que permitem o acréscimo de velocidade em cerca de 40% (como no caso do comboio sueco X2000, <http://www.railway-technology.com>), sem introduzir esforços adicionais na linha.

1.4– Mecanismos de geração de vibrações

A principal causa de geração de vibrações está associada com o movimento do campo de tensões resultante das cargas dos eixos dos comboios em movimento e com a resposta da superestrutura ferroviária e respectiva fundação a essas acções (Dawn and Stanworth, 1979).

Para além do movimento do campo de tensões, considerado como causa primária da geração de vibrações, há outras que contribuem para a geração de vibrações ou para a alteração das suas características. No Quadro 1.1 listam-se os principais factores que se relacionam com a geração de vibrações (Krylov, 2002 e Hall, 2003).

Quadro 1.1 – Factores que afectam a geração de vibrações

Ondas devidas à resposta estrutural	Vibração na ligação rodados carris	Carris	Fundação
Carga por eixo	Oscilações do veículo	Defeitos (ondulações)	Características das travessas (espaçamento, rigidez, massa)
Geometria (espaçamento e distribuição de cargas)	Propriedades dinâmicas do bogie	Juntas	Características do balastro
Velocidade	Defeitos dos rodados	Aparelhos de mudança de via	Características do solo de fundação
	Desalinhamento dos motores	Curvas e inclinação	
	Aceleração e desaceleração		

A importância relativa dos factores acima identificados é diversa e dependente da velocidade do comboio, das cargas por eixo e das características dos solos de fundação. Além disso, cada um dos diversos factores que origina vibrações é responsável por ondas com determinados comprimentos e frequências (Esveld, 2001). As ondas geradas pelos comboios apresentam uma gama de frequências relativamente vasta, entre os 0 - 2000 Hz, e, dentro desta gama, as origens dessas frequências são diversas.

O comboio em circulação é constituído por um conjunto de veículos em que cada um compreende, por sua vez, um conjunto de massas ligadas entre si por suspensões. Para contabilizar de forma correcta a dinâmica do veículo, o modelo correspondente deve incluir as rodas, os bogies, a carruagem e os sistemas de suspensão que ligam entre si as diversas massas (Fig. 1.3).

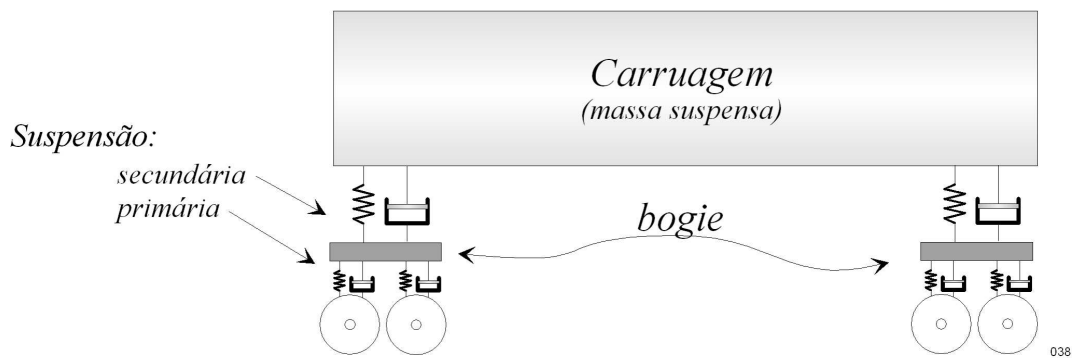


Fig. 1.3 – Modelo analógico de carruagem com rodados, bogies e suspensão

Na Fig. 1.4 apresentam-se, de forma esquemática, alguns dos factores que originam vibrações em relação com os respectivos comprimentos de onda. Por exemplo, as irregularidades nos carris ou nos rodados, com um comprimento de onda λ , provocam, num comboio que circule a uma velocidade V , vibrações com uma frequência f , dada por:

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad \text{Eq. 1.1}$$

Se os defeitos nos carris ou nos rodados tiverem comprimentos da ordem dos 3 m e o comboio circular com uma velocidade da ordem dos 300 km/h, a vibração resultante desses defeitos tem uma frequência de cerca de 28 Hz.

Os bogies apresentam frequências de vibração da ordem dos 20-25 Hz e, as carruagens, frequências típicas ainda mais baixas, tal como apresentado na Fig. 1.4.

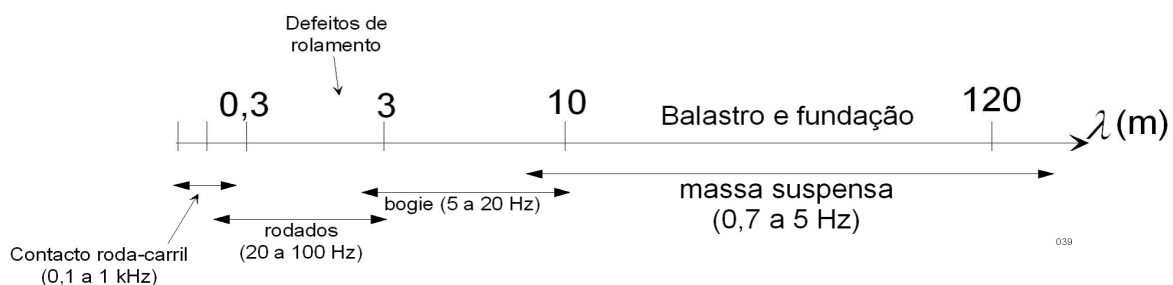


Fig. 1.4 – Fontes de geração de vibrações e respectivos comprimentos de onda (Esveld, 2001)

Um modelo completo para estudo da geração e propagação das vibrações deveria compreender, de forma integrada, os diversos elementos que intervêm no processo,

ou seja, o veículo, a linha, a fundação, etc. Na prática, os modelos deste tipo são bastante complexos e, muitas vezes, analisam-se separadamente os diversos intervenientes no processo de geração e propagação das vibrações.

1.5– Efeitos das vibrações na segurança e nas infra-estruturas ferroviárias

Reconhecida a existência de vibrações devidas à passagem dos comboios, em particular dos comboios de alta velocidade, interessa perceber em que medida essas vibrações afectam quer o meio circundante da infra-estrutura ferroviária, quer a própria infra-estrutura, quer, ainda, o material circulante.

Do ponto de vista ambiental, o aspecto predominante, ou pelo menos o mais perceptível, está relacionado com o ruído gerado pela circulação dos comboios. Uma parte desse ruído tem origem aerodinâmica e está relacionado com o movimento das carruagens através do ar. Outra parcela do ruído pode ter origem no funcionamento dos motores do comboio. Esta última parcela é relativamente reduzida, uma vez que os comboios de alta velocidade são geralmente eléctricos e, conseqüentemente, geram pouco ruído em resultado do seu funcionamento. Uma terceira parcela de ruído tem origem no contacto entre os rodados e o carril em resultado das imperfeições existentes nestes elementos e, ainda, devido ao “arraste” que as superfícies metálicas sofrem em travagens ou em curva. Neste último caso, o ruído é do tipo “guincho” e é fortemente audível. O ruído que se gera devido ao contacto entre as superfícies é susceptível de se transmitir através da fundação e pode chegar aos edifícios vizinhos onde pode causar incomodidade ou danos estruturais ligeiros.

Alguns autores procuram identificar as gamas de frequências que permitem diferenciar os tipos de danos que ocorrem nas estruturas adjacentes à linha em relação com o mecanismo de geração das vibrações (Hildebrand, 2004; Esveld, 2001). Segundo estes autores, a gama de frequências mais relevantes em resultado do tráfego ferroviário situa-se abaixo dos 200 Hz. Acresce que, nas vibrações geradas pelos comboios, o maior conteúdo energético situa-se na gama de baixas frequências (<20Hz). As vibrações com estas frequências podem causar danos na

própria infra-estrutura ferroviária danificando os carris ou o balastro, causar assentamentos devidos a cargas cíclicas no aterro ou na fundação, instabilizar taludes, ou mesmo danificar estruturas adjacentes.

Na gama de frequências dos 20 a 200 Hz, a parcela mais significativa é a que se situa abaixo dos 100 Hz, dado que, por um lado, são vibrações que transportam uma energia significativa e, por outro, correspondem à gama de frequências que causa efeitos vibratórios sensíveis em lajes, paredes ou janelas.

Em resumo, segundo Esveld (2001), as vibrações e o ruído estrutural ocorrem na gama de frequências 0-100 Hz e o ruído audível entre os 30 e os 2000 Hz.

No que respeita à circulação, a amplificação das vibrações, quando a velocidade do comboio se aproxima da velocidade de propagação das ondas de Rayleigh (ver 2.1 e 2.3), pode causar incomodidade para os passageiros, ou em casos extremos, como já se referiu, pôr em causa a estabilidade do próprio comboio. Por outro lado, há também um acréscimo, não desprezável, do consumo da energia que é necessário fornecer ao comboio. Baseados num modelo simplificado, Metrikine *et al.*, (2001) mostram que, do total da energia dissipada no movimento do comboio, entre 10 a 24% corresponde à energia gasta na propagação das ondas visco-elásticas. A parcela restante corresponde à energia gasta por efeitos aerodinâmicos. Embora a primeira parcela seja relativamente pequena, os autores salientam que os cálculos foram efectuados com um modelo simples, que não contabiliza todos os factores que afectam as vibrações e, conseqüentemente, a dissipação de energia.

A infra-estrutura ferroviária está sujeita a assentamentos devidos ao seu peso próprio e devidos à passagem dos comboios. Estes últimos são resultantes do carregamento cíclico imposto pelas composições em circulação. Em geral, admite-se que o assentamento estabiliza ao fim de 10^5 ciclos de carga. No entanto, o efeito de amplificação da amplitude dos movimentos devida ao efeito dinâmico pode agravar o fenómeno de assentamento. Por outro lado, as vias férreas balastradas necessitam, periodicamente de operações de ataque pesado, após as quais a via assume a sua posição original. Segundo Anderson *et al.* (2000), as operações de manutenção pesada tornam-se cada vez mais frequentes, designando-se por “memória do balastro” o facto que determina o incremento da necessidade destas intervenções.

De acordo com os dados recolhidos, na LN ocorrem um total de cerca de $9,9 \times 10^5$ ciclos de carga por ano. A estimativa deste valor tem em conta o tráfego registado no dia 1 de Setembro de 2004, quarta-feira (Fig. 1.5), e a estimativa foi feita considerando os diversos tipos de composições indicadas na mesma figura e uma redução de 50% do tráfego durante o fim de semana.

É sabido que, na linha do Norte, há diversas zonas onde é necessário fazer, diversas vezes por ano, ataque pesado, sendo natural que, uma parcela significativa dessas operações, seja devida precisamente ao mau comportamento dinâmico da fundação desses troços de linha, e à sua influência no comportamento da camada de balastro.

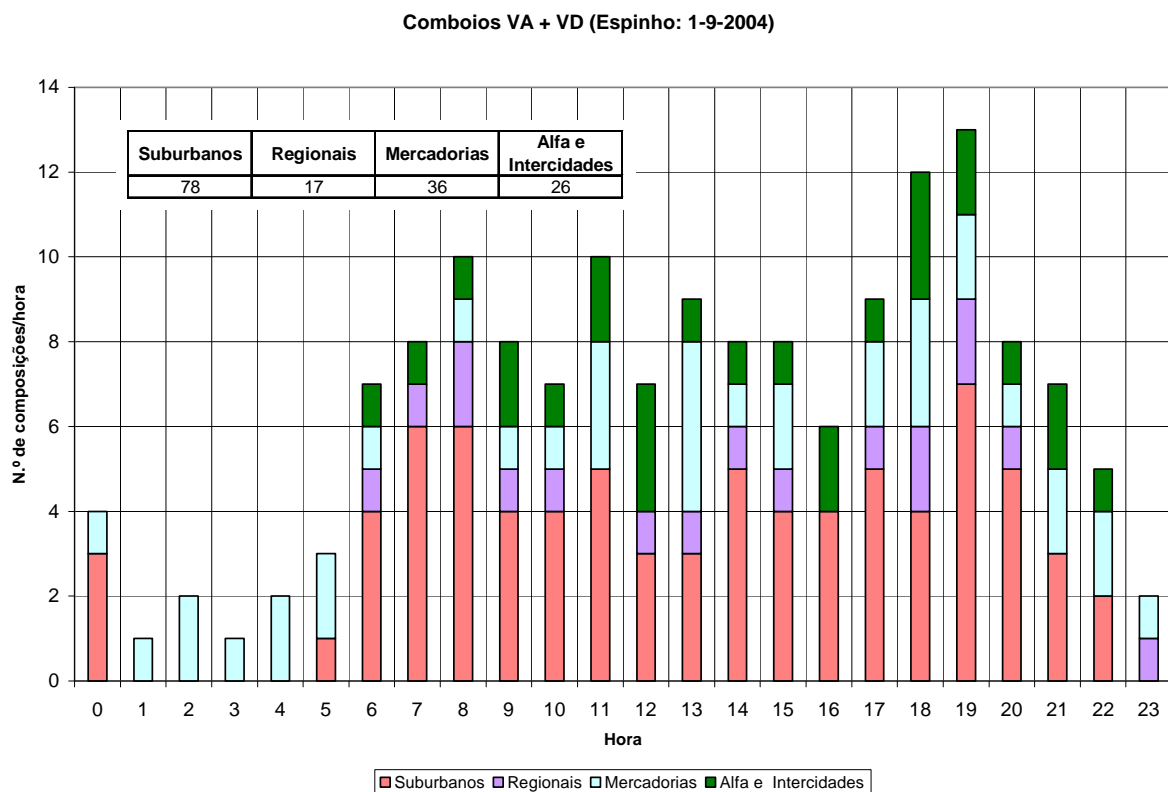


Fig. 1.5 – Distribuição de tráfego na LN em Espinho, no dia 1 de Setembro de 2004

De acordo com as autoridades chinesas de caminhos de ferro, 75 % dos trabalhos diários de manutenção na plataforma ferroviária são devidos ao balastro e à sua deformação (Zhai *et al.*, 2004). O mesmo autor apresenta um estudo teórico e experimental onde determina que o balastro apresenta uma frequência de ressonância entre os 70 e os 100 Hz, de acordo com as previsões do modelo teórico

ou entre os 80 e os 110 Hz, de acordo com as medições efectuadas. Através dos números apresentados é possível deduzir a importância que o balastro tem na superestrutura ferroviária. De facto, para além de poder representar uma parcela significativa dos custos e tempos de manutenção das vias balastradas, verifica-se que a frequência de ressonância deste material se situa precisamente dentro das frequências geradas pelo movimento do comboio, e ainda numa gama onde a vibração apresenta um conteúdo energético significativo.

A amplificação dos movimentos agrava as cargas cíclicas, potenciando, ainda mais, este fenómeno, podendo aumentar conseqüentemente, a necessidade de operações de rebalastagem. Na Fig. 1.6 apresenta-se um diagrama esquemático onde se relaciona o tráfego ferroviário com a necessidade de operações de ataque pesado para repôr o nível de regularidade da linha balastrada.

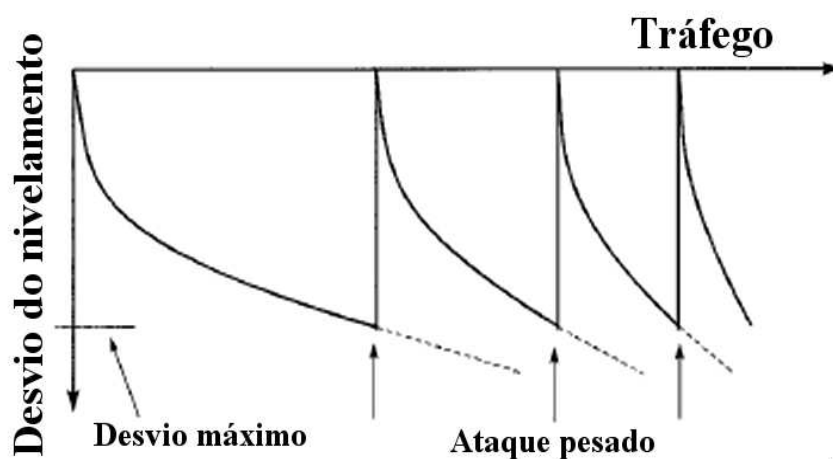


Fig. 1.6 – Evolução das intervenções de ataque pesado com o número de passagens de comboios (Anderson *et al.*, 2000)

Para além dos problemas relacionados com a manutenção da infra-estrutura ferroviária, dos problemas ambientais relacionados com o ruído ou com a propagação de vibrações perceptíveis pelas pessoas e dos problemas de segurança imediatos no que respeita à circulação, é necessário também considerar os problemas de segurança com respeito aos aterros e respectivas fundações. Os solos apresentam um comportamento marcadamente não linear, com variações importantes de deformabilidade para níveis de deformação elevados. Por outro lado, as acções cíclicas, tais como aquelas que podem ser causadas e consideravelmente ampliadas pela circulação dos comboios a elevadas velocidades, podem causar

acréscimos de pressão intersticial nos aterros e respectivas fundações com as consequentes implicações ao nível da segurança.

Ainda no que diz respeito à segurança, reconhecida a existência de uma velocidade para as quais o efeito de amplificação das deformações (velocidade crítica) se faz sentir com maior intensidade, interessa conhecer a velocidade máxima a que os comboios podem circular em condições de segurança. Alguns autores (Hellis *et al.*, 1999) sugerem que a velocidade máxima de circulação deve ter uma reserva de 30% relativamente à velocidade crítica. Embora o estabelecimento da velocidade máxima tenha subjacente a limitação das deformações induzidas pela circulação a essa velocidade, e possa ser considerada como uma primeira aproximação, um critério mais objectivo deve ter em consideração a amplitude das vibrações e os seus efeitos. Por exemplo, Hung *et al.*, (2004), na comparação da eficiência de várias contramedidas de propagação de vibrações, definem um coeficiente de redução do nível de vibração (CRV) por:

$$CRV[dB] = -20 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad \text{Eq. 1.2}$$

onde P_1 e P_2 representam a resposta do sistema com e sem medidas de mitigação, respectivamente. Os valores de P_1 e P_2 podem representar deslocamentos, velocidades ou acelerações.

Ahmad *et al.*, (1991) comparam a amplitude do movimento (δ_v) com e sem as medidas de mitigação:

$$A_r = \frac{\delta_v(\text{contramedidas})}{\delta_v(s/\text{contramedidas})} \quad \text{Eq. 1.3}$$

Este factor (A_r) pode ter um carácter pontual ou referir-se a uma zona afectada pela propagação da vibração.

2 – REVISÃO CRÍTICA

2.1 – Propagação de vibrações

No parágrafo 1.4 foram apresentados sucintamente os principais mecanismos responsáveis pela geração de vibrações. Interessa também conhecer o modo como essas vibrações se propagam nos materiais de fundação da estrutura ferroviária.

O modo como as vibrações geradas são propagadas depende, naturalmente, do tipo de vibrações e das suas características (frequência, amplitude, etc.) e das características geométricas e mecânicas dos materiais envolvidos na propagação.

A vibração causada pela circulação gera diversos tipos de ondas, interessando, porém, destacar os tipos principais: ondas de compressão; ondas de corte e ondas de Rayleigh. Cada um destes tipos de ondas apresenta características diversas nomeadamente no que respeita à velocidade de propagação e à forma como o movimento varia com a distância à fonte de geração. Para além destes aspectos, os solos que compõem a fundação da estrutura ferroviária são, frequentemente, de diversos tipos, com características mecânicas diferentes pelo que o movimento de ondas no solo é ainda afectado por fenómenos de reflexão e refacção que se processam nas transições entre materiais, tal como se representa na Fig. 2.1.

A quantidade de energia transportada por cada tipo de onda depende de diversos factores, nomeadamente da dimensão da fonte de excitação quando comparada com o comprimento da onda gerada. Por esse motivo, no caso da excitação ser proveniente do tráfego ferroviário, é expectável que as ondas de Rayleigh transportem a maior parcela da energia (Hall, 2000). Na Fig. 2.2 apresenta-se de forma esquemática a propagação de ondas geradas pela vibração vertical de uma sapata circular num meio semi-infinito, homogéneo e isotrópico.

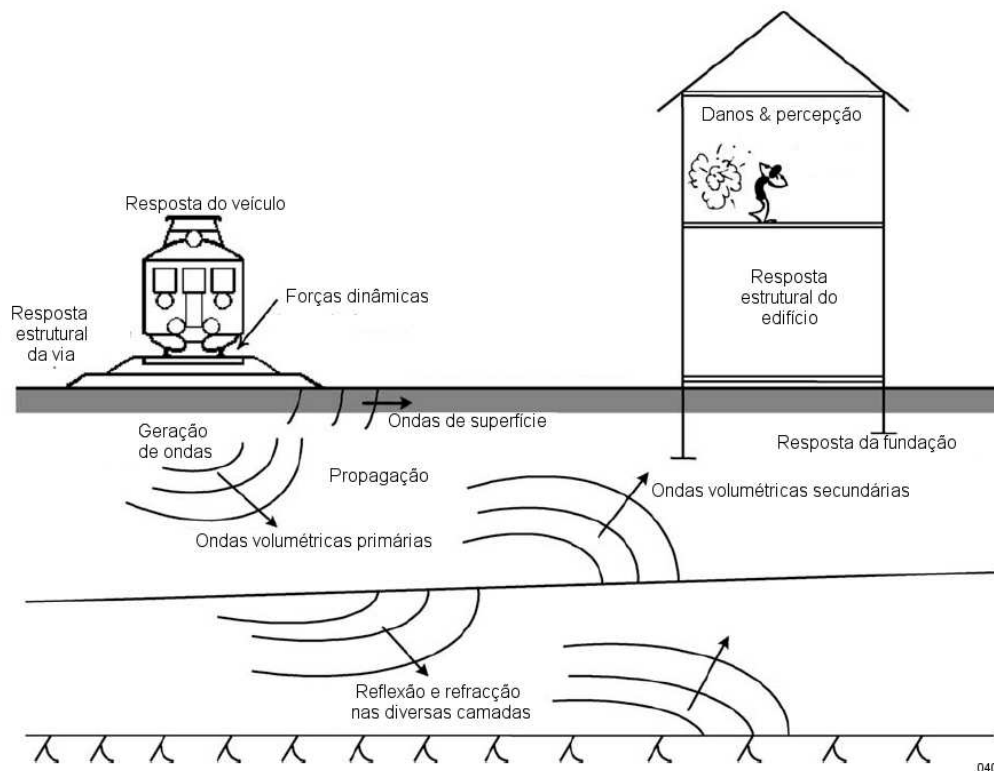


Fig. 2.1 – Geração e propagação de vibrações (Hall, 2000)

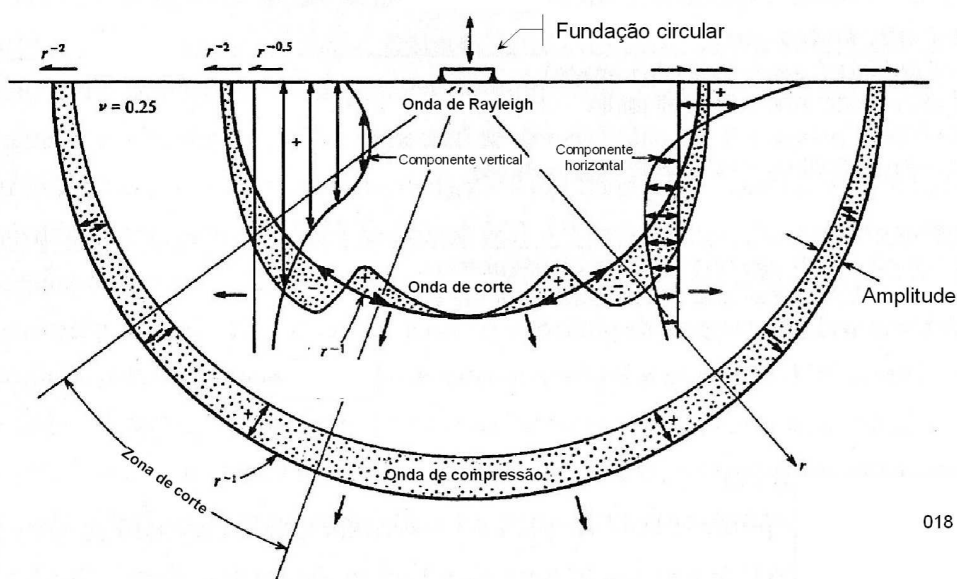


Fig. 2.2 – Distribuição e propagação de ondas num meio semi-infinito, homogêneo e isotrópico (Hall, 2000)

As ondas de compressão e de corte propagam-se no meio segundo qualquer direcção. São ondas volumétricas, cuja velocidade de propagação depende da rigidez do meio. As de Rayleigh, pelo contrário, são ondas de superfície, e a

velocidade a que estas se propagam depende da interacção entre as ondas volumétricas e as características das camadas superficiais do meio. As ondas volumétricas (compressão e corte) são mais rápidas que as de Rayleigh dado que os materiais geotécnicos exibem, em geral, elevada rigidez volumétrica.

As velocidades de propagação das ondas volumétricas (C_P e C_S) relacionam-se com as características elásticas dos solos (módulo de compressibilidade volumétrica, K e módulo de distorção, G) através das seguintes expressões:

para as ondas de compressão:

$$C_P = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad \text{Eq. 2.1}$$

e, para as ondas de corte:

$$C_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Como o módulo de compressibilidade volumétrica dos solos é superior ao módulo de distorção, as ondas de compressão viajam mais rapidamente sendo, por isso, denominadas de primárias (ondas P). As ondas de corte viajam um pouco mais lentamente, sendo designadas por ondas secundárias (ondas S). Estas ondas provocam movimentos de corte no meio em que se propagam. É habitual considerar que as ondas de corte se dividem em duas componentes: as horizontais (ondas SH) e as verticais (ondas SV).

As ondas de Rayleigh (ondas R) originam movimentos superficiais do solo e são, normalmente, as principais responsáveis pelos movimentos sentidos, por exemplo, durante um sismo. A velocidade de propagação destas ondas é inferior à das ondas de corte e pode ser estimada através da seguinte expressão:

$$C_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} C_S \quad \text{Eq. 2.3}$$

onde ν é o coeficiente de Poisson.

Finalmente, um outro tipo de onda superficial é designado por onda de Love. Estas ondas são também geradas à superfície quando o semi-espaco é limitado por uma camada com baixa velocidade de propagação das ondas de corte. Estas ondas são

consideradas como ondas de corte que ficam “presas” pelas reflexões na camada superior.

Na Fig. 2.3 apresentam-se esquematicamente as deformações associadas a cada tipo de onda.

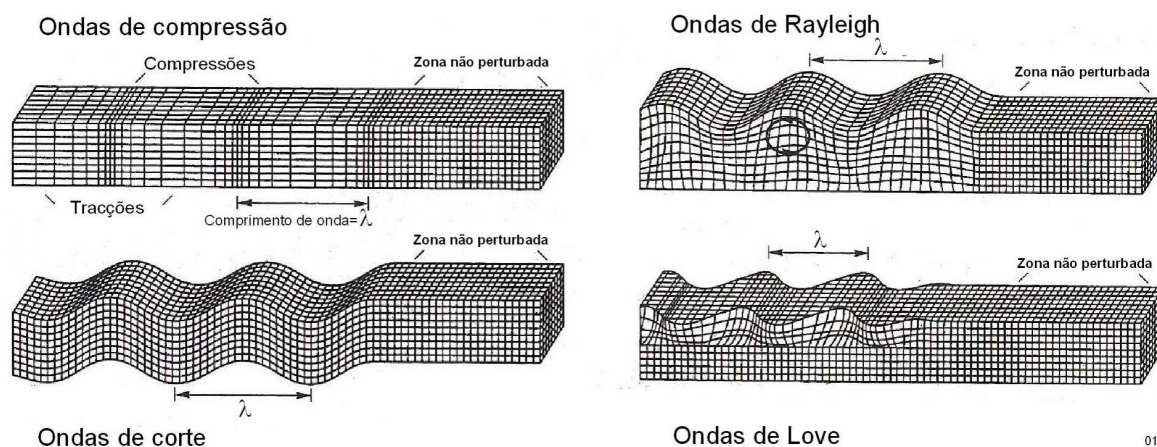


Fig. 2.3 – Ondas volumétricas e superficiais – deformação do meio

À medida que viajam pelo meio as ondas vão sofrendo atenuações que se devem ao amortecimento. Este tem duas origens: o amortecimento geométrico e o amortecimento devido à natureza friccional dos materiais.

O amortecimento geométrico deve-se ao facto de a vibração se propagar a partir da origem por volumes crescentes com a distância, de forma semelhante ao que se observa, por exemplo nas ondas provocadas numa superfície de água por uma pedra. Como as ondas volumétricas se propagam em qualquer direcção, o efeito de atenuação devido ao aumento do volume afectado é elevado. No caso das ondas superficiais de Rayleigh, a propagação apenas afecta a parcela superior do volume de solo, não sofrendo uma atenuação geométrica tão elevada.

A função de atenuação para diversos tipos de ondas e diversas origens foi apresentada por Lamb (1904) e pode ser descrita pela equação:

$$\hat{v} \times r^m = \hat{v}_1 \times r_1^m \quad \text{Eq. 2.4}$$

onde \hat{v} representa a velocidade máxima de uma partícula à distância r da origem da vibração e \hat{v}_1 a velocidade máxima de uma partícula à distância r_1 da origem e m é

um parâmetro que depende do tipo de carregamento e do tipo de onda, conforme definido no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Valores de m para cálculo do amortecimento geométrico num semi-espaço infinito

<i>Tipo de onda</i>	<i>Fonte</i>	<i>Trajectória</i>	<i>m</i>
Volumétrica	Pontual	Superfície	2
Superficial	Pontual	Superfície	0,5
Volumétrica	Pontual	Interior	1
Volumétrica	Carga linear infinita	Superfície	1
Superficial	Carga linear infinita	Superfície	0
Volumétrica	Carga linear infinita	Interior	0,5

Para considerar o efeito do amortecimento mecânico, a Eq. 2.4 foi generalizada para:

$$\hat{v} = \hat{v}_1 \left(\frac{r_1}{r} \right)^m e^{-\alpha(r-r_1)} \quad \text{Eq. 2.5}$$

em que o termo exponencial representa o amortecimento do material. O coeficiente α é denominado por coeficiente de atenuação, relacionando-se com o amortecimento devido ao atrito do material. Este coeficiente varia com o tipo de solo e com a frequência de vibração de acordo com a seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{2\pi f \xi}{C} \quad \text{Eq. 2.6}$$

onde f representa a frequência da vibração, ξ o coeficiente de amortecimento e C a velocidade de propagação das ondas.

2.2 – Comportamento cíclico dos solos

O comportamento cíclico dos solos é caracterizado, fundamentalmente, pelo módulo de distorção G e pelo coeficiente de amortecimento ξ . Estes dois parâmetros não

são constantes variando com diversos factores, como por exemplo o nível de deformação.

Ishihara (1996) considerou que o comportamento dos solos pode ser dividido em três zonas distintas consoante o nível de deformação distorcional. Assim, para deformações distorcionais inferiores a 10^{-5} , o comportamento pode ser considerado como puramente elástico ou seja, todas as deformações são reversíveis. Para deformações distorcionais entre 10^{-4} e 10^{-2} , o comportamento é elasto-plástico havendo, conseqüentemente, uma parcela da deformação que é permanente. Acima de 10^{-2} , as deformações distorcionais são predominantemente plásticas, correspondendo à rotura do solo. Para o primeiro caso, o comportamento é dominado pelo módulo de distorção do solo (G), avaliado para baixas deformações. Quando a deformação distorcional excede 10^{-4} , o amortecimento (ξ) e o coeficiente de Poisson (ν) são também necessários para descrever adequadamente o comportamento deformacional do solo. À medida que a deformação aumenta, os parâmetros de resistência ao corte – coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), passam também a ser considerados no comportamento deformacional do solo. Para grandes deformações, as componentes referentes ao comportamento elástico são menos importantes e as deformações são controladas, quase exclusivamente, pelas componentes relativas à resistência.

O módulo de distorção G_0 (para muito pequenas deformações) é calculado a partir de ensaios de determinação da velocidade de propagação das ondas de corte ou de relações empíricas baseadas em ensaios de laboratório ou ensaios *in situ*. Para ter em consideração a variação do módulo de distorção com o nível de deformação distorcional, é habitual relacionar o seu valor para um dado nível de deformação com o valor para deformação distorcional muito pequena (G_0). No caso de solos finos, é possível relacionar a razão G/G_0 com a distorção para diversos índices de plasticidade IP (Vucetic, 1994), como se apresenta na Fig. 2.4.

O valor de G_0 e a relação G/G_0 dependem de diversos factores conforme se sumaria no Quadro 2.2.

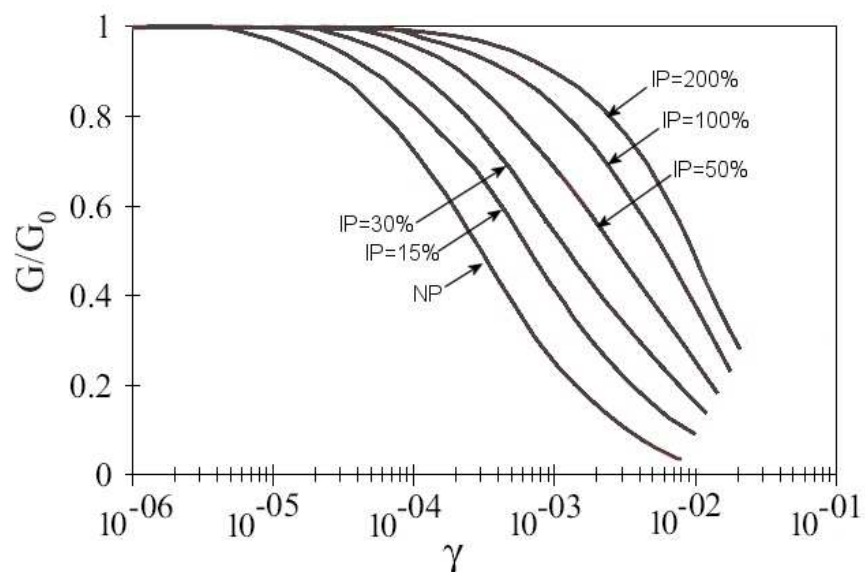


Fig. 2.4 – Variação de G/G_0 com a distorção para solos com diversos índices de plasticidade

Quadro 2.2 – Factores que afectam o módulo de distorção inicial e a relação G/G_0 em argilas normal ou moderadamente consolidadas (Dobry *et al.*, 1987)

Factor	G_0	G/G_0
Tensão de consolidação	Aumenta	Aumenta (o aumento reduz-se para IP mais elevados)
Índice de vazios (e)	Diminui	Aumenta
Idade geológica	Aumenta	Pode aumentar
Cimentação	Aumenta	Pode aumentar
Grau de sobreconsolidação (OCR)	Aumenta	-
Índice de plasticidade (IP)	Aumenta se $OCR > 1$	Aumenta
Deformação cíclica	-	Diminui
Velocidade de deformação	Aumenta para solos plásticos	-
Número de ciclos de carga (N)	Diminui	Diminui

A quantificação de alguns dos factores acima apontados pode ser feita através da proposta de Ishibashi *et al.*, (1993) os quais apresentam uma relação empírica, baseada em ensaios e aplicável a solos arenosos ou argilosos:

$$\frac{G}{G_0} = K(\gamma, IP) (\sigma'_m)^{m(\gamma, IP) - m_0} \quad \text{Eq. 2.7}$$

onde (σ'_m) representa a tensão efectiva normal média e os restantes parâmetros, que contabilizam o efeito da plasticidade do solo e da distorção, são calculados por:

$$K(\gamma, IP) = \frac{1}{2} \left(1 + \tanh \left(\ln \left(\frac{0,000102 + n(IP)}{\gamma} \right)^{0,492} \right) \right)$$

$$m(\gamma, IP) - m_0 = 0,272 \left(1 - \tanh \left(\ln \left(\frac{0,000556}{\gamma} \right)^{0,4} \right) \right) e^{(-0,0145IP^{1,3})}$$

$$n(IP) = \begin{cases} 0 & IP = 0 \\ 3,37 \times 10^{-6} IP^{1,401} & 0 < IP \leq 15 \\ 7,00 \times 10^{-7} IP^{1,976} & 15 < IP \leq 70 \\ 2,70 \times 10^{-5} IP^{1,115} & IP > 70 \end{cases}$$

A dissipação de energia que ocorre nos solos quando submetidos a acções cíclicas é contabilizado através do coeficiente de amortecimento. Nos solos, o amortecimento é praticamente independente da frequência de excitação, estando relacionado com a energia dissipada num ciclo de carga. O amortecimento, nestas condições, diz-se hysterético.

Tal como acontece para o módulo de distorção, também o amortecimento é afectado por diversos factores, apresentando-se no Quadro 2.3 os parâmetros que afectam o coeficiente de amortecimento ξ .

A dependência do coeficiente de amortecimento com a tensão de consolidação e com o índice de plasticidade foi também estabelecida por Ishibashi *et al.*, (1993), à semelhança da proposta para a variação de G/G_0 :

$$\xi = \frac{1}{6} \left(1 + e^{-0,0145IP^{1,3}} \right) \left(0,586 \left(\frac{G}{G_0} \right)^2 - 1,5747 \left(\frac{G}{G_0} \right) + 1 \right) \quad \text{Eq. 2.8}$$

A dependência de ξ com a tensão de consolidação é estabelecida em resultado do valor de G/G_0 que deriva da Eq. 2.7. Na Fig. 2.5 apresenta-se a variação do coeficiente de amortecimento em resultado da aplicação da equação Eq. 2.8.

Quadro 2.3 – Factores que afectam o coeficiente de amortecimento ξ em argilas normalmente ou moderadamente consolidadas (Dobry *et al.*, 1987)

Factor	ξ
Tensão de consolidação	Diminui
Índice de vazios (e)	Diminui
Idade geológica	Diminui
Cimentação	Pode diminuir
Grau de sobreconsolidação (OCR)	-
Índice de plasticidade (IP)	Diminui
Deformação cíclica	Aumenta
Velocidade de deformação	Pode aumentar
Número de ciclos de carga (N)	Não afecta para deformações moderadas e N moderado

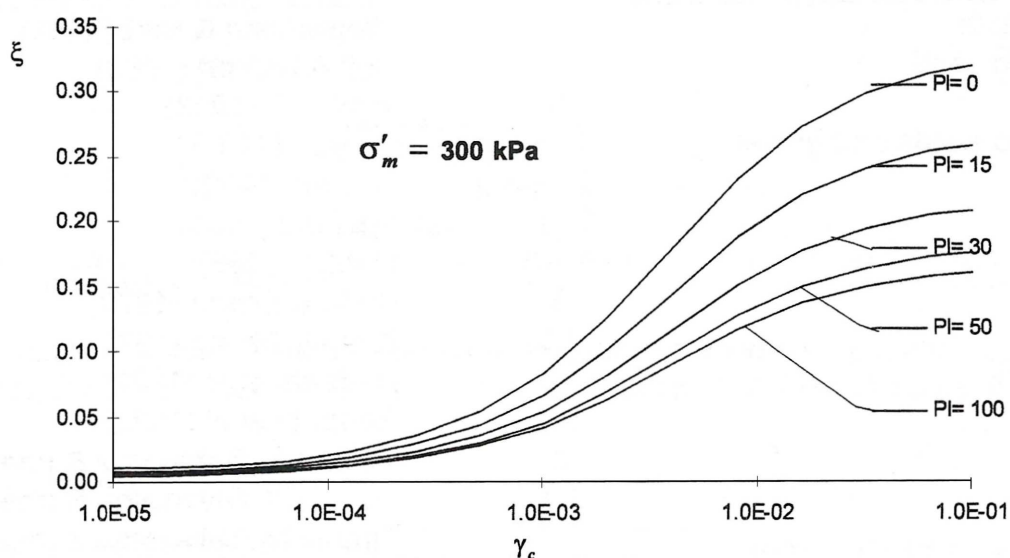


Fig. 2.5 – Variação do coeficiente de amortecimento com a deformação distorcional e índice de plasticidade

2.3– Modelos de previsão e análise

Apesar de o fenómeno de amplificação das vibrações ser já conhecido em termos teóricos desde 1927 por Timoshenko (Madshus *et al.*, 2000) e ter sido relatado há quatro décadas por Filippov (Filippov, 1961), os grandes desenvolvimentos nesta área são recentes. A autoridade sueca de caminhos de ferro (Banverket) deparou-se com problemas de vibrações muito elevadas em resultado da circulação do comboio

X2000 para velocidades da ordem dos 200 km/h, num local chamado Ledsgaard, na linha da costa oeste, ente Göteborg e Malmö.

Em face desses acontecimentos, aquela entidade promoveu um intenso programa de investigação destinado a averiguar as causas desse fenómeno. Em face dos resultados que foram sendo disponibilizados, foram desenvolvidos modelos que permitiram a interpretação dos resultados e, além disso, permitem a previsão de outras situações, nomeadamente do efeito de medidas de mitigação do fenómeno, como será abordado mais à frente.

Também noutros países se verificaram, em determinados locais, fenómenos semelhantes, embora nem todos tenham sido relatados com igual detalhe. Por exemplo, na zona noroeste de França, na zona da baía de Somme, foram também registados deslocamentos elevados na proximidade da linha de caminho de ferro (Picoux *et al.*, 2002). Também neste caso, foram financiadas linhas de investigação, nomeadamente, pelo Ministério Francês do Ambiente, que proporcionaram desenvolvimentos teóricos para o estudo e controlo do fenómeno.

Noutros casos, as autoridades ferroviárias de alguns países têm realizado campanhas de medição dos efeitos da circulação a alta velocidade, mesmo antes da linha entrar em exploração, com o objectivo de proporcionar à comunidade científica dados importantíssimos para a validação dos modelos teóricos. Na Bélgica, algumas semanas antes da entrada em exploração da linha de alta velocidade entre Bruxelas e Paris (em Dezembro de 1997), a autoridade ferroviária belga promoveu campanhas de medição dos deslocamentos provocados pela circulação do comboio Thalys HST a velocidades entre os 160 e os 330 km/h (Degrande *et al.*, 2001).

A percepção de vibrações causadas pelo tráfego de comboios era predominantemente resultante da circulação de comboios de mercadorias com cargas por eixo muito elevadas, embora circulando a velocidades relativamente baixas (Jones *et al.*, 1996 e Sheng *et al.*, 1999). Recentemente, com os desenvolvimentos associados às linhas de alta velocidade, a preocupação com as vibrações resultantes da circulação de comboios mais ligeiros, mas que circulam a velocidades elevadas, ganhou também importância.

A análise dos efeitos da circulação dos comboios tem de ser feita recorrendo a modelos realistas que permitam ter em consideração os diferentes factores

responsáveis pela geração de vibrações, bem como os factores que afectam a sua propagação (Sheng *et al.*1999). Assim, os modelos devem permitir a inclusão explícita ou implícita dos diversos elementos que compõem a superestrutura ferroviária e a respectiva fundação.

Na superestrutura ferroviária incluem-se os diversos elementos acima da fundação: os carris, os elementos de suporte dos carris, as travessas, o balastro, as diversas camadas que compõem a fundação do balastro e, quando aplicável, o aterro ferroviário.

A fundação deve, por sua vez, permitir a consideração de diversas camadas de solos com diferentes características, subjacentes a um maciço rochoso ou solos de características que não influenciem a propagação das ondas de corte.

Os modelos de análise e previsão da transmissão de vibrações devem, na medida do possível, ser capazes de considerar as diversas fases do processo:

- Geração de vibrações. Na geração de vibrações deve-se modelar os diversos mecanismos susceptíveis de causar vibrações: o movimento das cargas aplicadas pelos eixos do comboio, as vibrações causadas pelas irregularidades dos carris e rodados e a resposta dinâmica na interacção entre o veículo e a linha.
- Transmissão. A transmissão compreende a propagação dos diversos tipos de ondas através das camadas de fundação. Se possível, interessa modelar a geometria e as características dessas diversas camadas.
- Recepção. A recepção é o momento em que a vibração chega às estruturas.
- Intercepção. Processo de controlo/redução das vibrações através de medidas de mitigação (barreiras de vibração, aumento de rigidez da fundação, etc.).

Existem actualmente, na literatura, diversas abordagens do fenómeno de propagação de vibrações devidas ao tráfego ferroviário. Essas abordagens podem ser divididas, para simplicidade de tratamento, em quatro categorias:

- Analíticas;
- Baseadas em medições *in situ*;
- Empíricas;

-
- Modelação numérica.

Hung *et al.*,(2001) apresentam uma revisão das diversas abordagens existentes na literatura (embora limitada à anglo-saxónica e à chinesa) onde são descritos os diversos modelos de análise da propagação de vibrações. Note-se que a divisão acima apresentada não é rigorosa, dado que, em diversos casos, podem ser usados métodos mistos e, por outro lado, os métodos numéricos não são mais do que a resolução, por processos de análise numérica, de equações diferenciais que, nalguns casos, também podem ter solução analítica.

2.4 – Modelos analíticos

2.4.1 – Introdução

Os modelos analíticos, de solução exacta, estão naturalmente limitados pelas múltiplas simplificações que é necessário fazer por forma a estabelecer um conjunto de equações que represente o sistema de geração, propagação e recepção das vibrações. São, no entanto, muito úteis, pois permitem a compreensão do fenómeno e, através do estudo de situações simples, permitem também a calibração/verificação de modelos mais complexos como sejam os modelos numéricos, tratados mais à frente.

Todos os modelos apresentados na literatura se baseiam na possibilidade de estudar a resposta dinâmica da fundação ao conjunto de cargas que derivam da passagem do comboio, considerando cada carga isoladamente das restantes. Isto corresponde a admitir como válido o princípio da sobreposição dos efeitos ou, por outras palavras, a admitir que o sistema é elástico linear. A resposta do modelo à circulação do comboio é obtida pela soma das contribuições dos vários eixos do comboio, tendo em atenção a distribuição de cargas correspondentes e as respectivas posições na composição circulante.

Esta hipótese pode ser verificada nos casos em que as velocidades de circulação dos comboios são relativamente baixas quando comparadas com a velocidade de propagação das ondas no solo. No caso contrário, podem ocorrer deformações elevadas (Kaynia *et al.*, 2000, Hall, 2003) e os efeitos de não-linearidade do

comportamento dos solos podem fazer-se sentir, tornando o princípio de sobreposição de efeitos uma aproximação mais grosseira. A solução pode passar por estimar o nível de deformação nos solos e usar parâmetros lineares equivalentes.

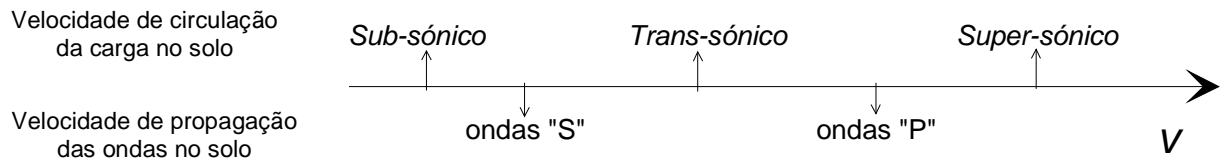
Nas soluções analíticas, seguidamente apresentadas, o mecanismo predominantemente considerado na geração de vibrações é o que resulta do movimento do campo de tensões no meio considerado elástico. Uma descrição mais completa do fenómeno de transmissão de vibrações deverá ter também em consideração o comportamento dinâmico do comboio, o mecanismo de transmissão de cargas à fundação feito através das travessas, os possíveis defeitos nos rodados e carris, etc.

2.4.2 – Meio elástico infinito e semi-infinito

Dentro dos modelos analíticos, aqueles que descrevem um meio elástico submetido à acção de uma carga em movimento foram os primeiros a ser desenvolvidos. Em geral, estes modelos analíticos foram desenvolvidos na sequência do trabalho de Lamb (1904) sendo por isso conhecidos por “problemas de Lamb” (Hung *et al.*,2000). Originalmente os “problemas de Lamb” destinavam-se a analisar o efeito de cargas cíclicas pontuais ou em linha sem movimento mas, uma vez dominada a formulação correspondente a esta situação, os resultados puderam ser estendidos ao problema de cargas em movimento, tais como as que derivam da circulação dos comboios.

A maior preocupação residia, já então, no facto de que pudesse ser gerado um efeito de ondas de choque semelhante ao que acontece nos aviões supersónicos quando é ultrapassada a velocidade do som, se a carga se deslocasse com uma velocidade acima de um determinado valor. No caso das cargas em movimento num meio elástico, esse efeito é verificado quando a velocidade de circulação ultrapassa a velocidade de propagação das ondas nesse meio.

A circulação de uma carga num meio elástico pode ser dividida em 3 situações distintas, consoante a velocidade da carga com relação à velocidade das ondas S ou P. Na Fig. 2.6 apresenta-se essa classificação.



005

Fig. 2.6 – Classificação das soluções analíticas para carga em movimento num meio elástico em função da relação da velocidade de circulação com a velocidade das ondas no solo

A análise destas situações num espaço infinito (Fig. 2.7) foi feita por Fryba (1972). Esta situação é, por exemplo, representativa da resposta devida ao movimento no interior de um túnel. Os deslocamentos verticais devidos a uma carga em movimento num meio ilimitado são obtidos por:

a) velocidade sub-sónica

$$\delta_y = \frac{P}{4\pi GM_2^2} \left(\frac{M_2^2}{R_2} + \frac{x^2}{r^4} (R_2 - R_1) - \frac{y^2 z^2}{r^4} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \right) \quad \text{Eq. 2.9}$$

b) velocidade trans-sónica

$$\delta_y = \frac{P}{4\pi GM_2^2} \left(\frac{M_2^2}{R_2} H(z - a_2 r) + \frac{x^2}{r^4} (R_2 H(z - a_2 r) - R_1) - \frac{y^2 z^2}{r^4} \left(\frac{1}{R_2} H(z - a_2 r) - \frac{1}{R_1} + \frac{a_2 r R_2}{z^2} \delta(z - a_2 r) \right) \right) \quad \text{Eq. 2.10}$$

c) velocidade super-sónica

$$\delta_y = \frac{P}{4\pi GM_2^2} \left(\frac{M_2^2}{R_2} H(z - a_2 r) + \frac{x^2}{r^4} (R_2 H(z - a_2 r) - R_1 H(z - a_1 r)) \right) - \frac{P}{4\pi GM_2^2} \left(\frac{y^2 z^2}{r^4} \left(\frac{1}{R_2} H(z - a_2 r) - \frac{1}{R_1} H(z - a_1 r) + \frac{r}{z^2} (a_2 R_2 \delta(z - a_2 r) - a_1 R_1 \delta(z - a_1 r)) \right) \right) \quad \text{Eq. 2.11}$$

onde:

$r^2 = x^2 + y^2$ representa a distância entre o ponto de aplicação da carga e o ponto onde se determina o deslocamento, no plano que contém a carga e é normal ao vector velocidade; $M_1 = \frac{c}{c_p}$ e $M_2 = \frac{c}{c_s}$ representam a relação entre a velocidade da carga e as velocidades de propagação das ondas P e S; $a_i^2 = |1 - M_i^2|$; $i = 1, 2$ e $R_i^2 = z^2 + (1 - M_i^2)r^2$, $i = 1, 2$.

As funções $H(x)$ e $\delta(x)$ representam, respectivamente, as funções de Heaviside e de Dirac.

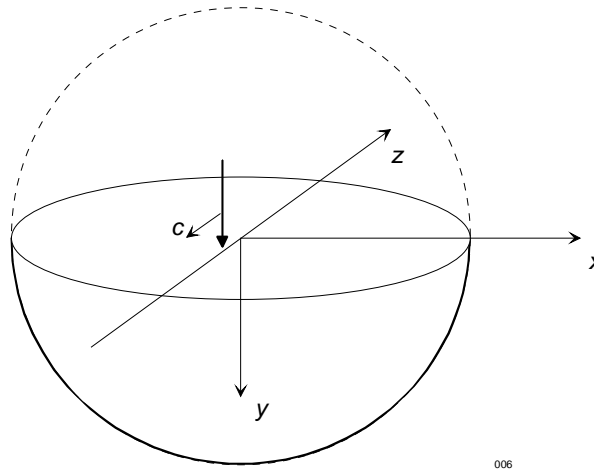
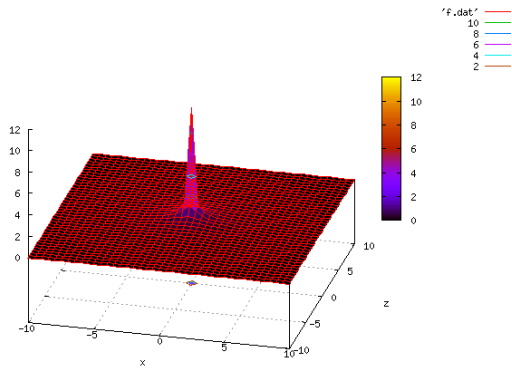


Fig. 2.7 – Modelo geométrico de uma carga em movimento num meio ilimitado

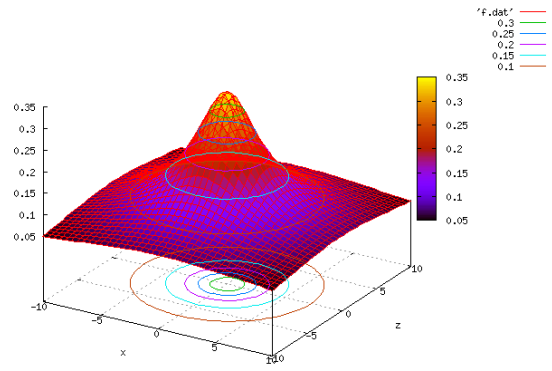
Representando os deslocamentos obtidos pelas equações anteriores, obtêm-se os diagramas representados nas figuras seguintes, traçados para -0,1 e -3,0 m de profundidade.

Da análise das equações anteriores e dos correspondentes diagramas, é possível deduzir alguns dos aspectos do comportamento do meio em função da velocidade da carga.

Com efeito, para velocidades sub-sónicas (Fig. 2.8), os deslocamentos obtidos são simétricos relativamente ao ponto de aplicação da carga. Já no caso da situação super-sónica (Fig. 2.10), não há qualquer perturbação à frente da carga dado que não é possível que nenhuma onda (S ou P) se desloque mais depressa que a carga. O efeito da carga apenas se faz sentir num espaço em forma de “V” (no plano) que corresponde a um cone no espaço (cone de Mach). Na verdade existem 2 cones: um correspondente às ondas S, mais lentas e um segundo, correspondente às ondas P, mais rápidas (Fig. 2.11). Esta situação é bem patente no primeiro diagrama da Fig. 2.10 onde se representam, na base do diagrama, as linhas de igual nível do deslocamento.

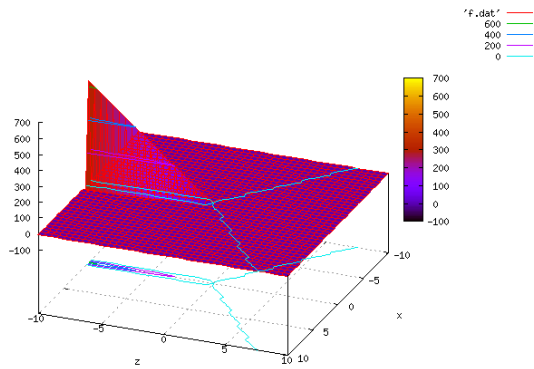


$y=-0,1\text{ m}$

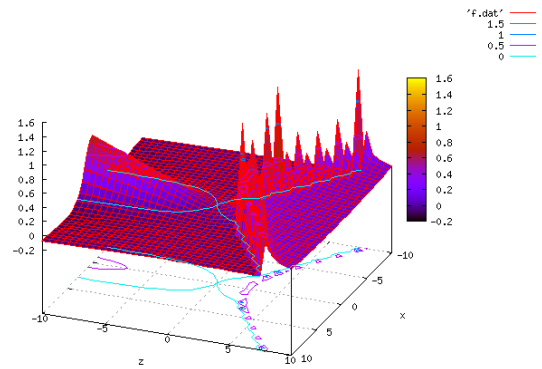


$y=3,0\text{ m}$

Fig. 2.8 – Deslocamentos verticais num meio ilimitado para uma carga em movimento a velocidade sub-sónica

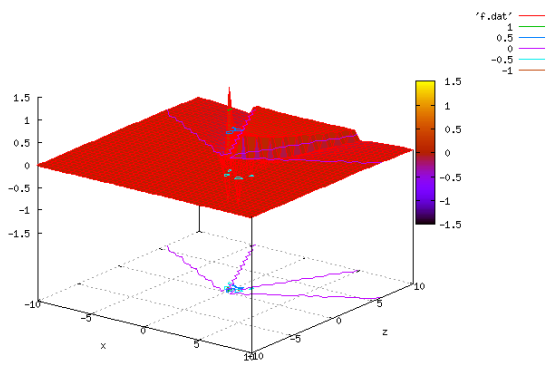


$y=-0,1\text{ m}$

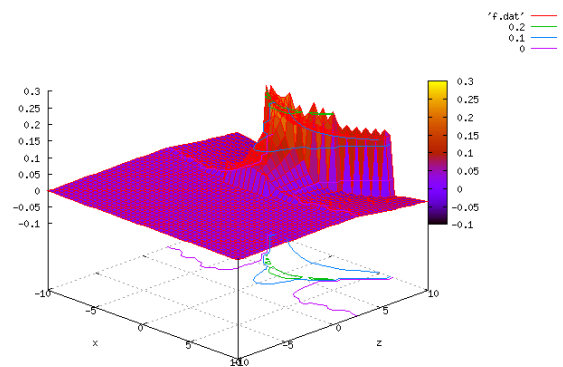


$y=3,0\text{ m}$

Fig. 2.9 – Deslocamentos verticais num meio ilimitado para uma carga em movimento a velocidade trans-sónica



$y=-0,1\text{ m}$



$y=3,0\text{ m}$

Fig. 2.10 – Deslocamentos verticais num meio ilimitado para uma carga em movimento a velocidade super-sónica

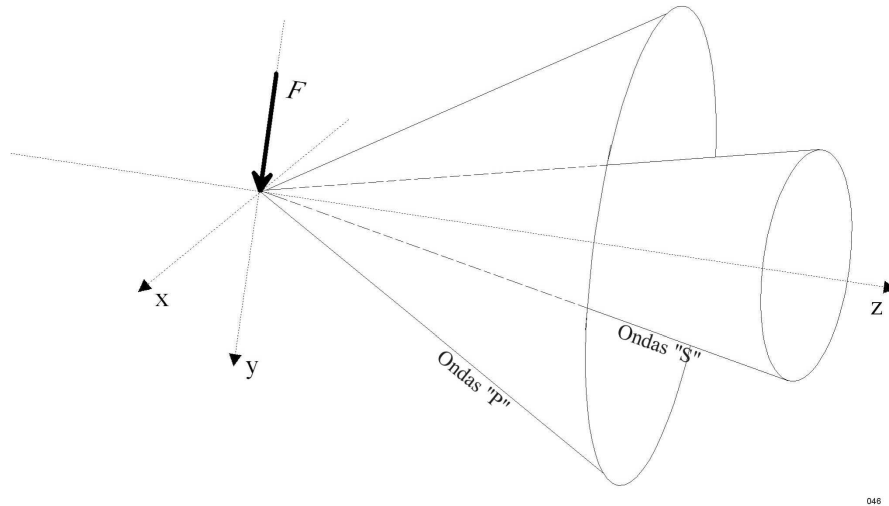


Fig. 2.11 – Cones de Mach na propagação de ondas a velocidade supersónica em meio infinito

Para a situação intermédia, (Fig. 2.9) ocorre também uma situação intermédia. Por um lado, verifica-se a formação de um cone de Mach correspondente à velocidade de circulação ter excedido a velocidade das ondas S e, por outro, há uma perturbação em avanço à carga, correspondente à propagação das ondas P.

Quando a carga circula num semi-espaço, para além das ondas S e P, é necessário considerar as ondas de Rayleigh que ocorrem junto à superfície. A velocidade destas ondas é inferior às duas primeiras, pelo que o efeito de ressonância se faz sentir para velocidades de circulação mais baixas.

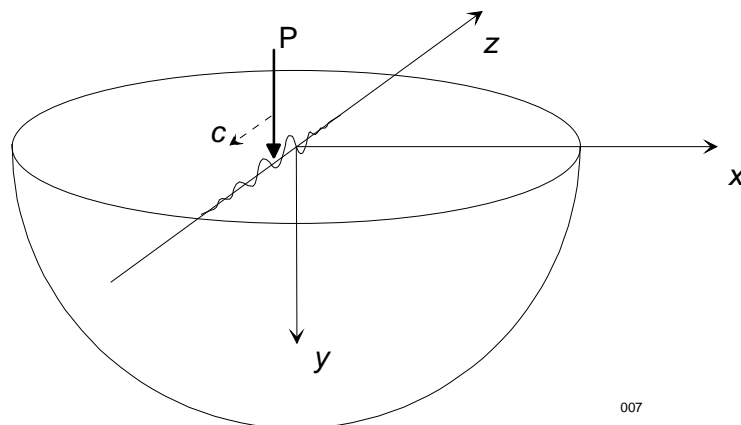


Fig. 2.12 – Propagação das ondas R para um meio semi-infinito

A equação diferencial do movimento pode ser escrita:

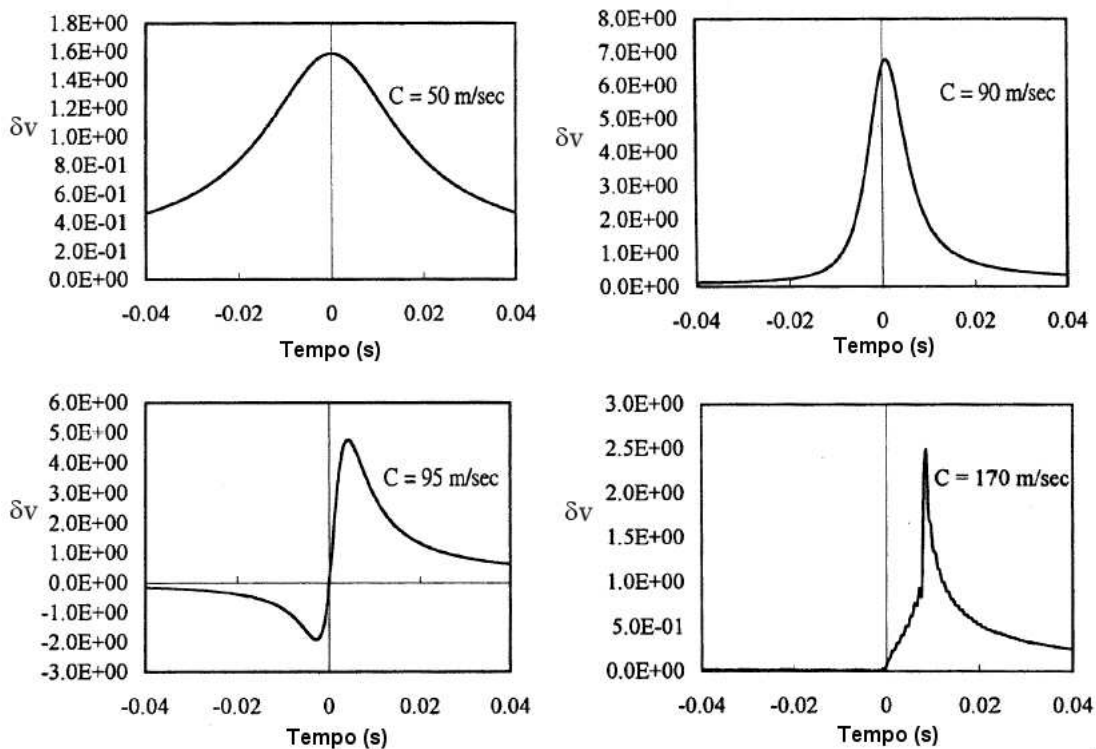
$$G\nabla^2 u_i + (\lambda + G)u_{j,j} + B_i = \rho \ddot{u}_i \quad \text{Eq. 2.12}$$

onde λ e G são as constantes de Lamé, u_i o campo de deslocamentos, B_i as forças mássicas e ρ a densidade mássica.

A expressão anterior representa um conjunto de três equações, para as três componentes do movimento, cuja resolução analítica é extremamente complexa.

De facto, a solução analítica só pode ser conseguida para determinados carregamentos, nomeadamente, para uma carga pontual com velocidade constante de circulação.

Vários autores apresentaram soluções para esta equação, recorrendo a potentes algoritmos de integração numérica e a transformações directas e inversas de Fourier. Hung *et al.* (2001) apresentam a solução para o problema anterior, resumindo-se na Fig. 2.13 os resultados dos deslocamentos verticais normalizados obtidos para várias velocidades de circulação da carga (C). Os resultados apresentados referem-se ao deslocamento de uma carga num meio semi-infinito visco-elástico com $c_R=92$ m/s; $c_S=100$ m/s; $c_P=173.2$ m/s, $\rho=2000$ kg/m³ e amortecimento histerético $\xi=0,01$.



009

Fig. 2.13 – Diagramas de deslocamento vertical (Hung *et al.*, 2000)

Os resultados apresentados mostram claramente o efeito de amplificação dos deslocamentos verticais à medida que a velocidade de circulação da carga se aproxima das velocidades de propagação das ondas no solo. Para velocidades superiores, os deslocamentos obtidos (não apresentados nos diagramas da figura) voltam a decrescer.

2.4.3 – Modelos de viga em fundação visco-elástica

Os modelos acima descritos não consideram a superestrutura ferroviária. De facto, esses modelos não incluem as características dos carris, das travessas, da ligação carril-travessa ou mesmo do aterro, nos casos em que este exista, estando limitados ao meio infinito ou semi-infinito tal como descrito no estabelecimento do modelo geométrico.

Os elementos da superestrutura ferroviária afectam, naturalmente, a propagação das ondas, influenciando também os mecanismo de geração. Surge assim a necessidade de se considerar estes elementos nos modelos de cálculo.

O modelo que tem sido usado mais frequentemente é o de uma viga assente numa fundação elástica (Fig. 2.14), designado por “viga de Winkler”. Neste modelo, a superestrutura ferroviária (carris, travessas, balastro e sub-balastro) são assimilados a uma viga de características elásticas e geométricas traduzidas por um módulo de elasticidade E e por um momento de inércia I . A fundação, incluindo um eventual aterro, são modelados por um conjunto de molas de rigidez k e um conjunto de amortecedores de viscosidade c .

Não é consensual a divisão apresentada. De facto, para alguns autores, a superestrutura ferroviária é constituída apenas pelos carris e travessas. A autoridade ferroviária portuguesa (REFER) inclui nesta parcela também o balastro. Em qualquer dos casos, o modelo pode ser considerado, apresentando, naturalmente, valores diversos para os parâmetros EI , k e c , característicos respectivamente da superestrutura e respectiva fundação.

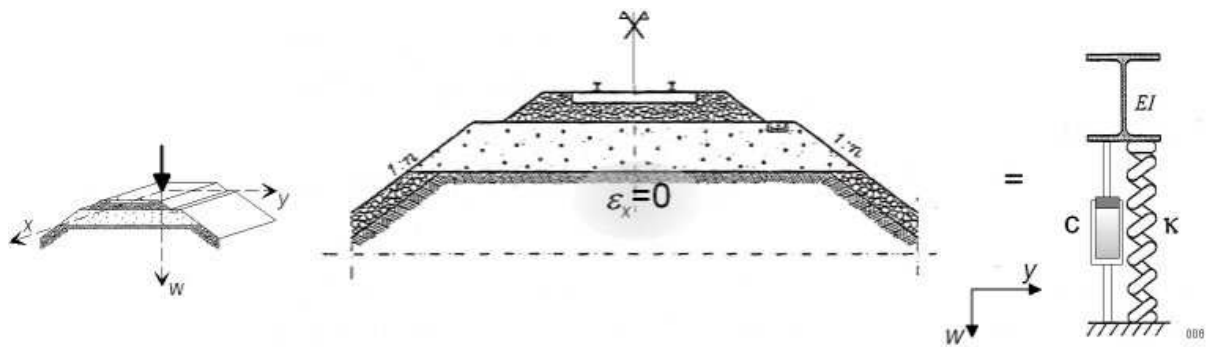


Fig. 2.14 – Modelo de um aterro ferroviário e respectivo modelo de viga de Winkler

O modelo reológico da viga de Winkler assente numa fundação visco-elástica é o que se apresenta na Fig. 2.15. Neste modelo, a fundação é assimilada a um conjunto de molas e amortecedores de rigidez e viscosidade equivalente k e c respectivamente. A equação diferencial da deformação da viga para uma carga em movimento e incluindo as forças de inércia é, nestas condições, dada por:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} + kw = q(t, x) \quad \text{Eq. 2.13}$$

onde m representa a massa da viga por unidade de comprimento, e $q(x,t)$ a carga aplicada na viga que, em geral, depende da coordenada x e do tempo t .

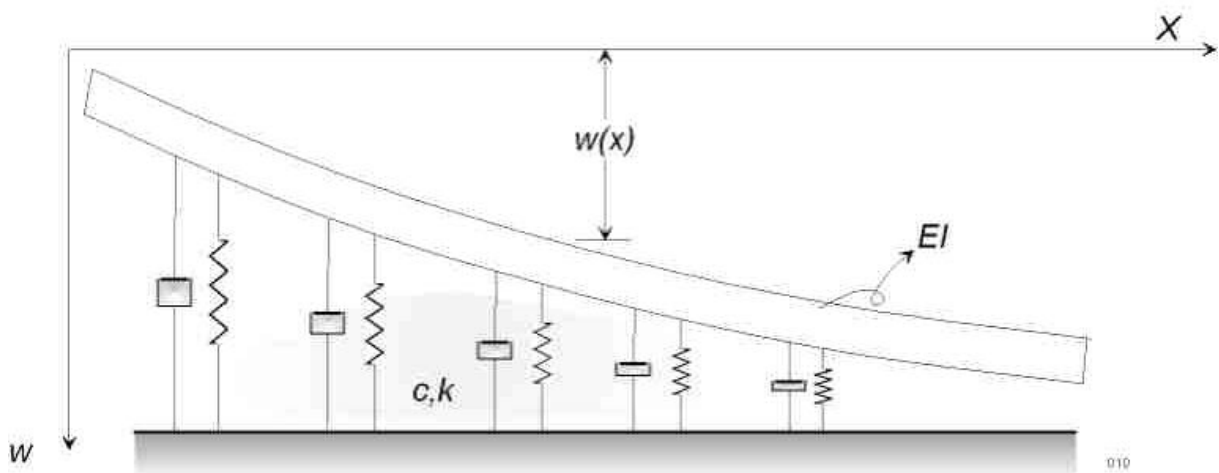


Fig. 2.15 – Modelo reológico da viga de Winkler assente numa fundação visco-elástica

O valor do módulo de reacção k representa a carga (pressão) que se gera na fundação para um deslocamento unitário, vertical, na viga. A determinação deste

valor não é, também, consensual. De facto, a determinação do valor de k varia consoante o que se considera ser a superestrutura (ou a viga) e aquilo que se considera ser fundação. Em primeira análise pode-se considerar a proposta de Biot (1937):

$$k = 1,23 \left[\frac{E_s b^4}{(1-\nu_s^2)EI} \right]^{0,11} \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)} \quad \text{Eq. 2.14}$$

onde E_s, ν_s representam as características elásticas do solo, EI a rigidez à flexão da viga e b corresponde a metade da sua largura. Outro processo mais adequado para a determinação do módulo de reacção do solo passa pela realização de uma análise pelo método dos elementos finitos específica para esse efeito. Através deste processo é possível considerar de forma mais correcta, por exemplo, as diversas camadas que compõem a fundação e, além disso, fica resolvida a ambiguidade na definição da “viga” e da “fundação”.

Admitindo que a carga é constante em magnitude (Q) mas que se encontra em movimento com velocidade V_0 , a Eq. 2.13 pode ser escrita por:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} + kw = Q \delta(x - V_0 t) \quad \text{Eq. 2.15}$$

A equação anterior pode ser mais facilmente resolvida considerando um referencial em movimento com a mesma velocidade da carga. Seja:

$$s = \lambda(x - V_0 t) \quad \text{Eq. 2.16}$$

onde λ representa o inverso do comprimento característico da viga;

$$\lambda = \frac{1}{L} = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad \text{Eq. 2.17}$$

Considerando esta mudança de referencial, a Eq. 2.15 pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial s^4} + 4\alpha^2 \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} - 8\alpha\beta \frac{\partial w}{\partial t} + 4w = Q \delta(s) \quad \text{Eq. 2.18}$$

onde,

$\alpha = \frac{V_0}{2\lambda} \sqrt{\frac{m}{EI}}$ representa a relação entre a velocidade de circulação da carga e a velocidade crítica, definida de seguida e;

$\beta = \frac{c}{2m} \sqrt{\frac{m}{k}}$ a relação entre o amortecimento e o amortecimento crítico.

A solução, nestas condições, mas considerando uma fundação elástica, sem amortecimento ($c=0$ e portanto $\beta=0$) foi apresentada por Kenney (1954). Na solução apresentada, Kenney determinou a existência de uma velocidade crítica para a qual as deformações na viga se tornariam infinitas, isto é, em que ocorre o fenómeno de ressonância. Essa velocidade corresponde exactamente à velocidade de propagação das ondas na viga (Hung *et al.*, 2000), sendo dada por:

$$C_{cr} = \sqrt[4]{\frac{4kEI}{m^2}} \quad \text{Eq. 2.19}$$

Para velocidades V_0 inferiores à velocidade crítica, as deformações mais elevadas situam-se na proximidade (ou mesmo debaixo) do ponto de aplicação da carga. Para velocidades V_0 superiores a C_{cr} as deformações mais elevadas ocorrem antes do ponto de aplicação da carga. Por outro lado, as deformações à frente da carga apresentam menores comprimentos de onda e menores amplitudes que aquelas que se situam aquém da carga (Fig. 2.16). Este fenómeno é conhecido por “efeito de Doppler”.

Este efeito traduz-se por uma alteração da frequência das ondas que viajam à frente ou atrás da carga. Se for V_0 a velocidade de circulação da carga e C_{cr} a velocidade de propagação das ondas no solo, a alteração da frequência (f_0) das ondas, não havendo amortecimento, é dada por:

$$f = \frac{f_0}{1 \pm \frac{V_0}{C_{cr}}} \quad \text{Eq. 2.20}$$

Quando a velocidade V_0 , da carga, é superior à velocidade crítica de propagação das ondas, a frequência f , detectada pelo observador estático é, de acordo com a Eq. 2.20, negativa, o que implica que, teoricamente, não há propagação de vibrações à frente da carga (Yang, *et al.* 2003). Na solução da equação da viga de

Winkler, para valores crescentes de α , as amplitudes obtidas à frente da carga são progressivamente mais reduzidas, indicando um fenômeno semelhante (Fig. 2.16).

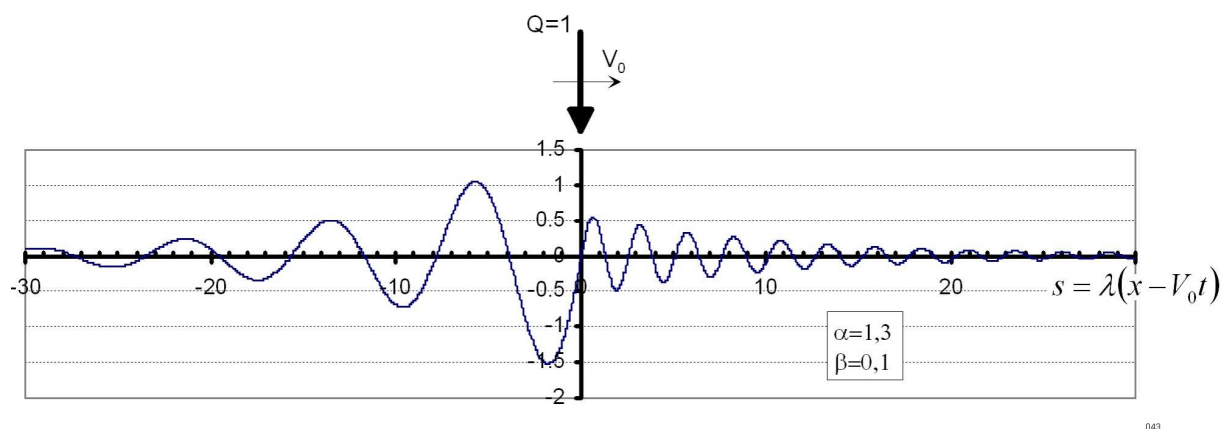


Fig. 2.16 – Propagação das vibrações e efeito de Doppler

A solução analítica da equação mais geral, considerando o amortecimento devido ao comportamento elástoplastico da fundação, é bastante complexa. Kenney (op. cit.) apresenta também a solução para este caso. Em alternativa, é possível considerar a solução numérica da equação, por exemplo, através do método das diferenças finitas. Em anexo (Anexo-1) apresenta-se o desenvolvimento da equação em diferenças finitas, tornando possível a sua solução através de métodos numéricos. No mesmo anexo apresenta-se também o desenvolvimento da solução apresentada por Esveld (2001) através do desenvolvimento de um programa em Fortran 77 que recorre às rotinas IMSL (Aird *et al.*, 1991) na solução do polinómio de 4º grau e nas operações matriciais. Na Fig. 2.17 apresentam-se os deslocamentos calculados pelo algoritmo descrito para diversos valores de velocidade de circulação da carga relativamente à velocidade crítica ($\alpha = V_0 / C_{CR}$) em conjunto com diversos valores do amortecimento em comparação com o amortecimento crítico (β). Os deslocamentos desenhados encontram-se normalizados relativamente ao deslocamento obtido para $\alpha=0$ e $\beta=0$.

Da análise das figuras é bastante evidente o fenómeno de amplificação que se processa para valores de $\alpha \approx 1$ no caso não amortecido ($\beta=0$), como se verifica no primeiro diagrama do conjunto de figuras. Note-se, porém, que, para evitar os valores infinitos obtidos para $\alpha=1$, no caso não amortecido, se considerou $\alpha \approx 0,99$.

Verifica-se, ainda, que, quando há amortecimento ($\beta \neq 0$), a deflexão máxima se situa antes do ponto de aplicação da carga sendo o desvio tanto maior quanto maior for o valor do amortecimento. De igual forma, para $\alpha > 1$ a deflexão máxima ocorre antes da carga, dado que as deformações da viga não conseguem acompanhar a velocidade da carga.

Na Fig. 2.18 apresenta-se o diagrama onde, para diversas relações entre a velocidade de circulação da carga e a velocidade crítica, se pode determinar a amplificação dinâmica para diversos valores de amortecimento.

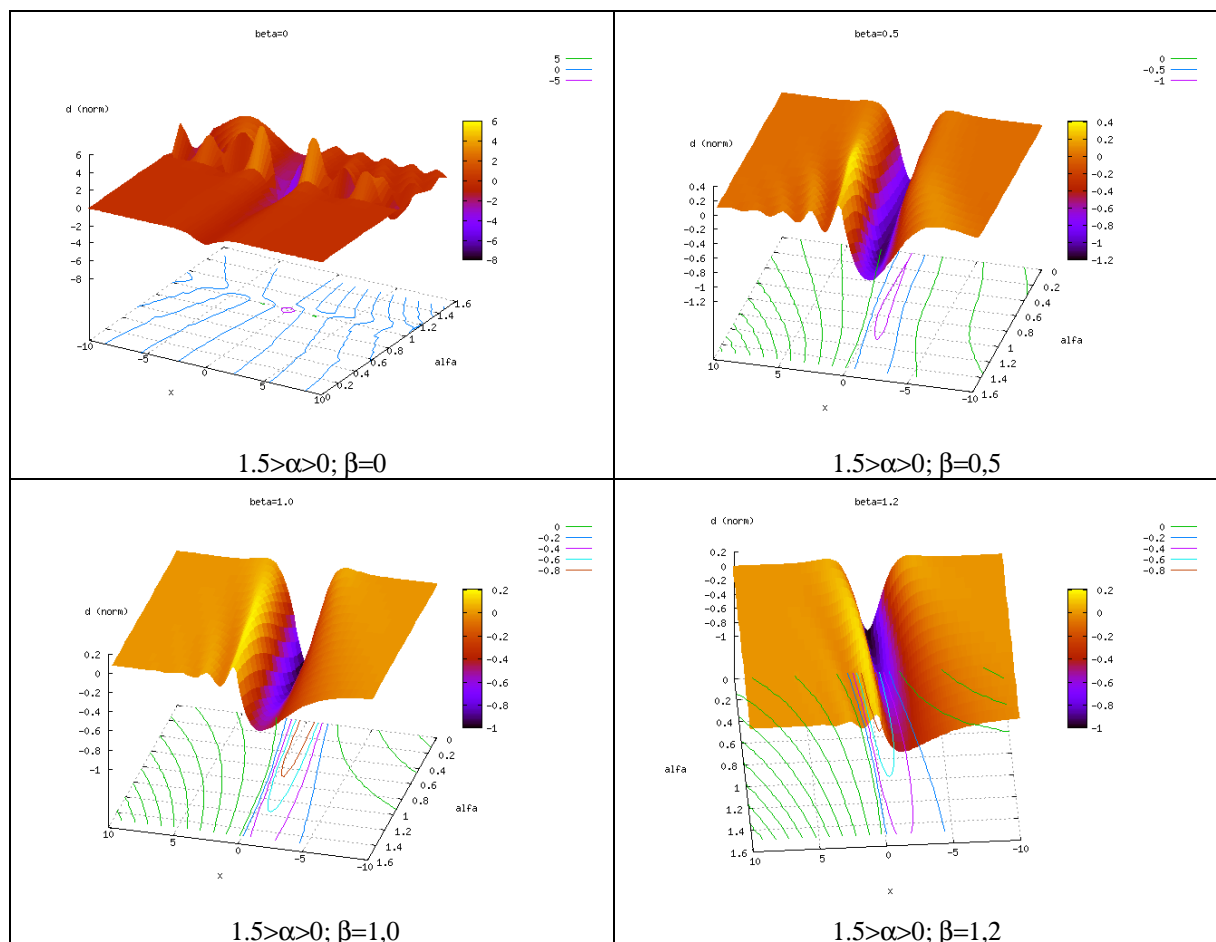


Fig. 2.17 – Solução da viga de Winkler para diversos valores de α e β

Apesar das soluções analíticas baseadas no modelo da viga de Winkler serem importantes na compreensão e descrição do fenómeno de propagação de vibrações, elas são também, naturalmente, limitadas. Assim, estes modelos padecem das mesmas limitações que todos (ou praticamente todos) os modelos analíticos, estando por isso limitados a casos simples, quer em termos de geometria, quer em

termos do comportamento dos materiais. Por outro lado, pela sua formulação, os modelos baseados na viga de Winkler são bidimensionais, e apenas visam descrever a linha central do modelo (eixo de simetria da Fig. 2.14), não havendo qualquer previsão quanto ao sentido transversal ao deslocamento.

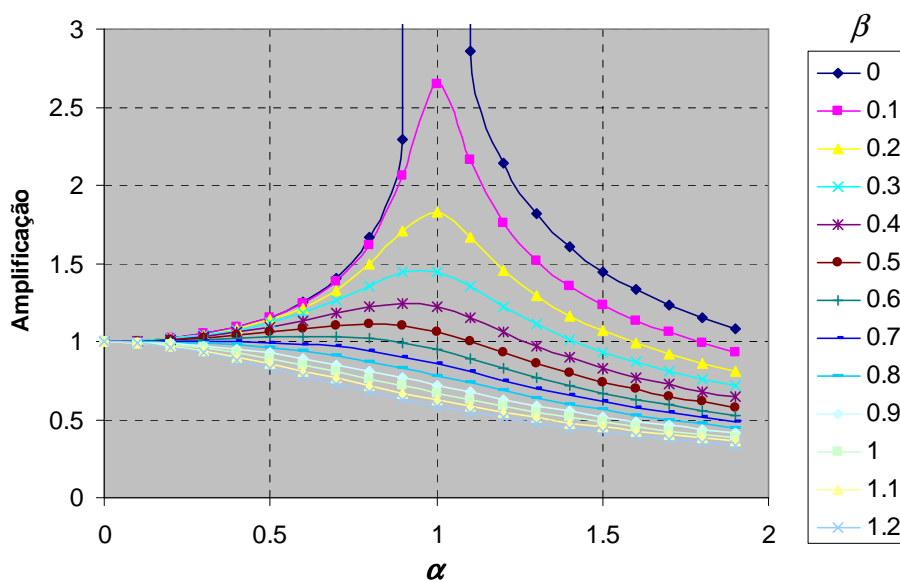


Fig. 2.18 – Amplificação dinâmica versus factor velocidade (α) para diversos valores do factor de amortecimento (β)

Os mecanismos de geração de vibrações considerados nestes modelos são apenas os que resultam da resposta da estrutura ferroviária ao movimento do campo de tensões (Quadro 1.1), não considerando outros aspectos importantes do processo de geração de vibrações, nomeadamente as cargas dinâmicas devidas às oscilações das diversas massas do comboio.

No que respeita ao comportamento da fundação, verificam-se outras importantes limitações. Assim, por exemplo, no modelo da viga de Winkler apoiada num meio visco-elástico, a resposta de cada conjunto mola-amortecedor que representa a fundação é independente das restantes, contudo, essa situação é pouco representativa do comportamento real dos solos que constituem os aterros ou a fundação.

Finalmente, outra importante limitação da solução analítica deste modelo tem a ver com o facto de não se contabilizar o comportamento não linear dos materiais de fundação e as suas características de material multifásico, o que leva a grandes

dificuldades na obtenção dos parâmetros necessários para alimentar o modelo. Por exemplo, Hall (2000) determinou ser necessário reduzir os parâmetros EI da viga e o parâmetro k do solo, por forma a ajustar as previsões do modelo analítico às medições efectuadas para o comboio X2000 na linha sueca em Ledsgaard. Este autor determinou ser necessário reduzir a rigidez de flexão da viga por um factor de 4 e a rigidez da fundação por um factor de 11, relativamente aos valores calculados com base na geometria e nos parâmetros determinados experimentalmente. Refira-se, porém, que as previsões analíticas efectuadas por este autor não contabilizaram os efeitos dinâmicos (amortecimento e inércia), isto é, limitaram a solução da Eq. 2.18 ao caso em que $\alpha=\beta=0$, sendo, neste caso, a solução dada por:

$$w(s) = \frac{Q}{2kL} e^{-s/L} \left(\cos \left| \frac{s}{L} \right| + \sin \left| \frac{s}{L} \right| \right) \quad \text{Eq. 2.21}$$

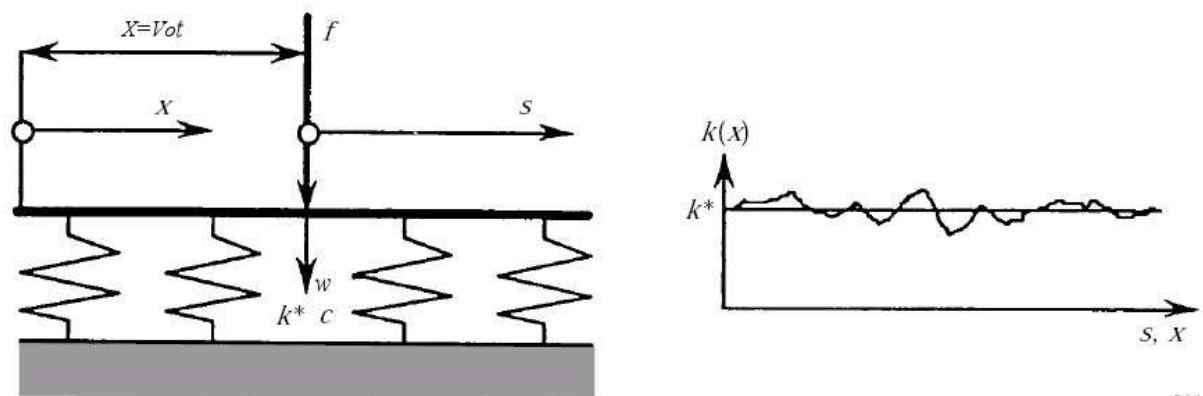
onde Q representa a carga por eixo, L o comprimento característico da viga, s a coordenada do referencial em movimento e k o módulo de reacção do solo de fundação.

Para ultrapassar a limitação do comportamento elástico e da constância dos diversos parâmetros intervenientes na Eq. 2.15 (ou na Eq. 2.18) necessária para a obtenção de uma solução analítica, é possível, considerando o desenvolvimento em diferenças finitas ou a solução através de elementos finitos, calcular a solução, desde que se disponha de leis que permitam estimar a variação de E , k ou c com, por exemplo, a deformação.

Para além dos modelos de viga simples, ou de fundação homogénea, alguns autores têm procurado introduzir variantes do modelo de viga de Winkler. Fryba *et al.*, (1998) consideram o modelo de uma viga de Winkler assente numa fundação com um módulo de reacção $k(x)$ variável (Fig. 2.19):

$$k(x) = k^* (1 + \varepsilon(x)) \quad \text{Eq. 2.22}$$

onde k^* representa o valor nominal do módulo de reacção da fundação e $\varepsilon(x)$ uma função adimensional de incerteza que define os desvios do valor de $k(x)$ em relação a k^* .



014

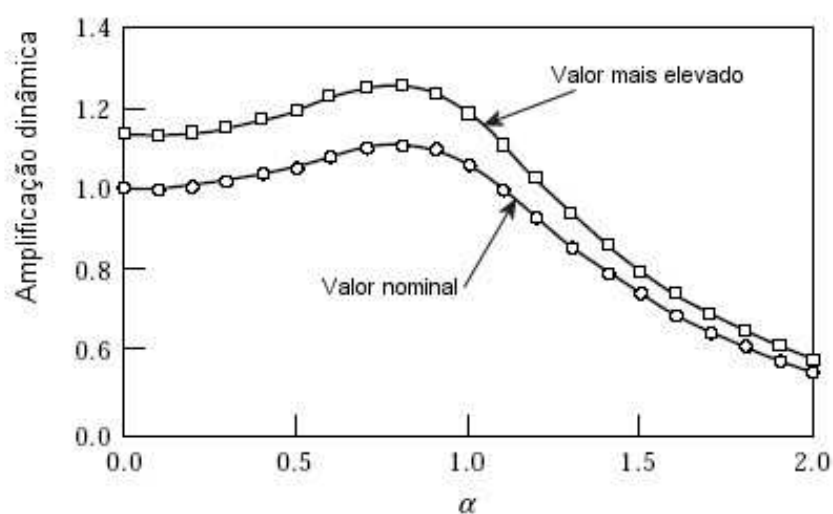
Fig. 2.19 – Viga de Winkler com fundação com rigidez variável com uma função de incerteza (Frýba *et al.*, 1998)

A equação diferencial num referencial em movimento (Eq. 2.18) assume a forma:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial s^4} + 4\alpha^2 \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} - 8\alpha\beta \frac{\partial w}{\partial t} + 4(1 + \varepsilon(s)) = Q\delta(s) \quad \text{Eq. 2.23}$$

Os autores desenvolvem uma análise de sensibilidade onde a equação anterior é resolvida pelo métodos dos elementos finitos, considerando uma função de incerteza $\varepsilon(s)$ com valor nominal nulo para cada elemento finito. Na Fig. 2.20 apresenta-se um exemplo dos resultados obtidos onde se verifica um acréscimo da deformação máxima em virtude da incerteza do módulo de reacção do terreno.

Uma abordagem semelhante pode ser feita, considerando a resolução da Eq. 2.23, através do método das diferenças finitas.



015

Fig. 2.20 – Exemplo do acréscimo de deformação considerando uma função de incerteza na caracterização da fundação ($\beta=0,5$)

Outro desenvolvimento de grande interesse é apresentado por Sheng *et al.*, (1999) e Sheng *et al.*, (1999a). No modelo proposto, consideram a possibilidade de a fundação incluir, para além do semi-espaço infinito, tal como os demais modelos baseados na solução de Winkler, uma série de camadas de comportamento visco-elástico, sobrejacentes àquele espaço, o que permite modelar fundações estratificadas tal como acontece, frequentemente, nas fundações das vias férreas. Mais recentemente (Sheng *et al.*, 2003), o modelo é estendido de forma a, na geração das vibrações, se considerar em simultâneo o mecanismo resultante do movimento do campo de tensões em conjunto com a dinâmica do veículo (Fig. 2.21). Segundo os autores, este factor é da maior importância na geração de vibrações, nomeadamente para velocidades de circulação inferiores à velocidade crítica.

No modelo, o aterro ferroviário é considerado infinito (segundo xx) e assentando sobre a fundação numa largura $2b$. Os carris são materializados por uma viga, com massa m_R e características elásticas EI . As travessas de massa equivalente m_S , por unidade de comprimento, contactam com os carris, através de palmilhas com rigidez k_P . Este sistema encontra-se apoiado no balastro que exhibe apenas rigidez vertical (k_B), tem largura $2b$ e massa por unidade de comprimento m_B . A cada componente da superestrutura ferroviária associa-se um amortecimento pelo uso de módulos complexos de rigidez.

O solo de fundação é, como foi dito, constituído por “ n ” camadas sobrejacentes a um meio semi-infinito, tratado no modelo como camada “ $n+1$ ”. Cada camada “ j ” é caracterizada pelo seguinte conjunto de parâmetros: $E_j, \nu_j, \rho_j, \xi_j, h_j$, representando, respectivamente, o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, densidade, factor de perda (amortecimento) e espessura da camada.

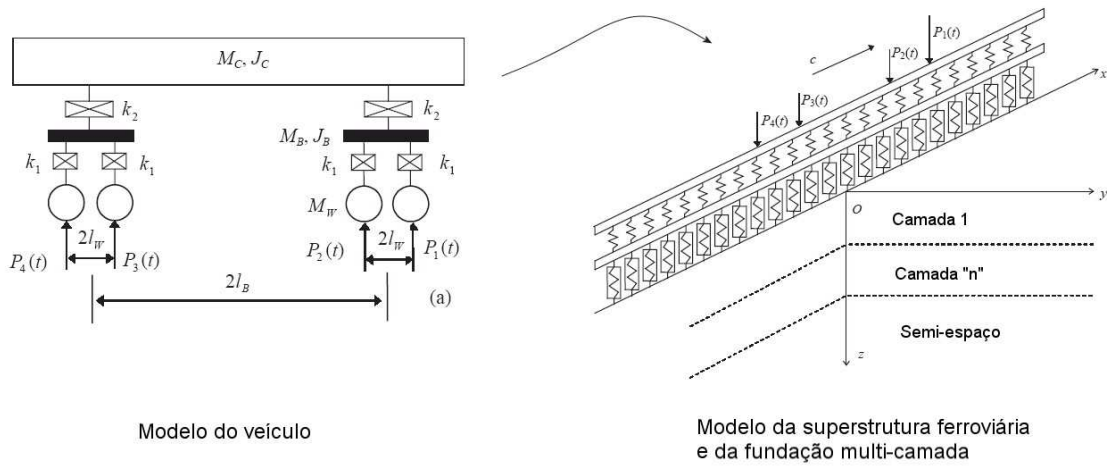


Fig. 2.21 – Modelo de viga de Winkler assente em camadas sobrejacentes a um meio semi-infinito

Na formulação original (Sheng *et al.*, 1999), considerando apenas um carregamento harmónico definido por:

$$P = P_0 e^{i\omega t} \tag{Eq. 2.24}$$

as equações do movimento do sistema são:

- Carris:

$$EI \frac{\partial^4 w_1(x,t)}{\partial x^4} + m_R \frac{\partial^4 w_1(x,t)}{\partial t^2} + k_p [w_1(x,t) - w_2(x,t)] = \delta(x - ct) P_0 e^{i\Omega t} \tag{Eq. 2.25}$$

- Travessas:

$$m \frac{\partial^2 w_2(x,t)}{\partial t^2} + k_p [w_2(x,t) - w_1(x,t)] = -F_2(x,t) \tag{Eq. 2.26}$$

- Balastro:

$$\frac{m_B}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_2(x,t)}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 w_3(x,t)}{\partial t^2} \end{Bmatrix} + k_B \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_2(x,t) \\ w_3(x,t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_2(x,t) \\ -F_3(x,t) \end{Bmatrix} \tag{Eq. 2.27}$$

Para as diversas camadas de solo, incluindo o meio semi-infinito, o movimento é governado pelas equações de Navier. Assim, para a camada j :

$$\begin{aligned}
 (\lambda_j + \mu_j) \frac{\partial \Delta_j}{\partial x} + \mu_j \nabla^2 u_j &= \rho_j \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} \\
 (\lambda_j + \mu_j) \frac{\partial \Delta_j}{\partial y} + \mu_j \nabla^2 v_j &= \rho_j \frac{\partial^2 v_j}{\partial t^2} \quad j = 1, \dots, n, n+1 \\
 (\lambda_j + \mu_j) \frac{\partial \Delta_j}{\partial z} + \mu_j \nabla^2 w_j &= \rho_j \frac{\partial^2 w_j}{\partial t^2}
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 2.28}$$

Nas equações anteriores, (u_j, v_j, w_j) representam as três componentes do deslocamento segundo os eixos x, y, z ; $\delta(a)$ a função de Dirac; λ_j e μ_j as constantes de Lamé; F_j as forças de contacto entre as diversas camadas da superestrutura ferroviária (ver Fig. 2.22) e:

$$\Delta_j = \frac{\partial u_j}{\partial x} + \frac{\partial v_j}{\partial y} + \frac{\partial w_j}{\partial z}
 \tag{Eq. 2.29}$$

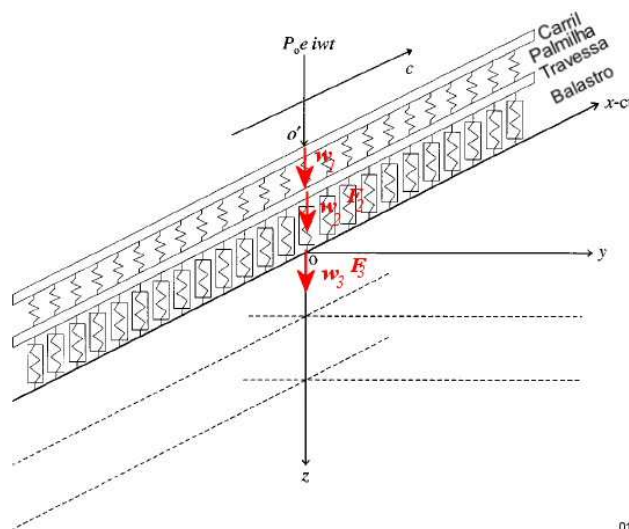
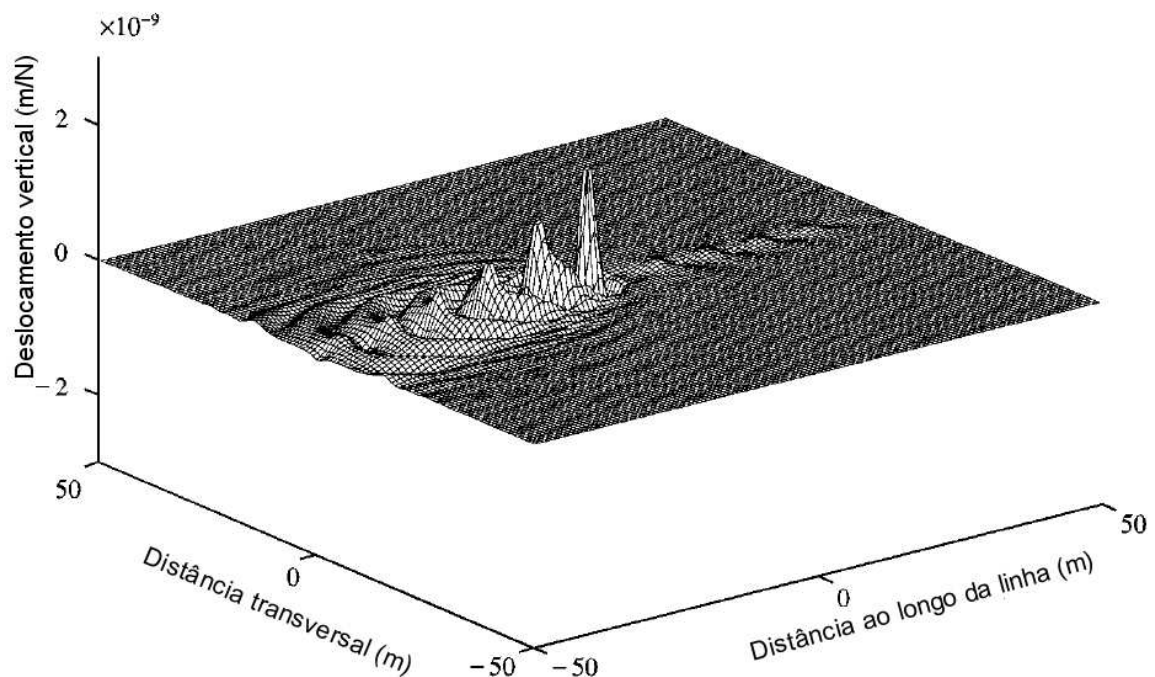


Fig. 2.22 – Forças e deslocamentos nos diversos componentes da superestrutura ferroviária

Através da resolução conjunta das equações anteriores é possível obter soluções onde se pode analisar a influência das diversas camadas do solo, nomeadamente através da formação de mais de um “cone” de Mach, correspondendo cada um a cada camada de solo. Outro aspecto que o modelo permite verificar é a propagação de ondas à frente da carga, por acção da rigidez (e conseqüentemente da maior velocidade de propagação de ondas) dos carris (Fig. 2.23).

Os modelos analíticos mais complexos, nomeadamente os que incluem os diversos elementos da estrutura ferroviária, têm permitido prever a existência de uma velocidade crítica mais baixa que a que deriva do modelo mais simples da viga de Winkler. Por exemplo, Labra (1975) verificou que os efeitos de amplificação podem fazer-se sentir de forma igualmente sensível para velocidades de circulação inferiores à velocidade das ondas Rayleigh, nomeadamente quando os carris estão sujeitos a tensões axiais de compressão como é o caso por exemplo, das devidas às variações térmicas.



044

Fig. 2.23 – Resposta vertical da superfície do solo devido à excitação de uma carga com uma frequência de 40Hz à velocidade de 150 m/s

2.4.4 – O comboio como associação de cargas

Como se referiu no parágrafo 2.4.1, os modelos apresentados baseiam-se na possibilidade de estudar o efeito do comboio sobre a fundação individualizando o efeito de cada carga, e analisando a resposta da estrutura ferroviária a essa carga, considerada como separada das restantes. De acordo com esta suposição, o efeito do comboio pode ser obtido pela soma das contribuições de cada um dos eixos. Assim, a história dos deslocamentos ($w(t)$), velocidades ($v(t)$) e acelerações ($a(t)$) é

obtida pela soma de cada uma dessas grandezas, para cada um dos eixos que constituem o comboio, por:

$$\begin{aligned}
 w(t)_{\text{comboio}} &= \sum_{i=1}^{n.\text{eixos}} w(s_i) \\
 v(t)_{\text{comboio}} &= \sum_{i=1}^{n.\text{eixos}} v(s_i) \\
 a(t)_{\text{comboio}} &= \sum_{i=1}^{n.\text{eixos}} a(s_i)
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 2.30}$$

onde $s_i = \lambda(x_i - V_0 t)$ é a posição do eixo i no referencial transformado “s”.

A resposta para cada carga pode ser obtida por alguma das formulações apresentadas anteriormente. Para a viga de Winkler em fundação visco-elástica, por exemplo, pode-se recorrer ao algoritmo desenvolvido no Anexo 1.2, obtendo-se a resposta $w(s)$ para uma carga unitária. Como se admite, na solução apresentada, que o comportamento é elástico linear, a resposta para uma carga não unitária é, simplesmente:

$$w(s)_Q = Q \times w(s)
 \tag{Eq. 2.31}$$

Os restantes resultados podem ser calculados derivando os resultados obtidos para os deslocamentos.

Para conhecer a resposta para um comboio “real” torna-se necessário conhecer a distribuição de cargas (valor e posição) para esse comboio e conhecer a velocidade de circulação. No Anexo 3 apresentam-se esses elementos para diversos comboios de alta velocidade, incluindo o Alfa Pendular que circula na Linha do Norte.

2.5– Medições *in situ*

A realização de medições de vibrações em resultado da passagem de comboios permite, evidentemente, o conhecimento da resposta real da fundação tendo em consideração as condições de um determinado local. Assumindo que é possível montar um aparato de medição completo, e isento de erros, tais campanhas permitirão, após análise, a previsão do comportamento de situações semelhantes.

Trata-se de uma abordagem bastante dispendiosa, dado que implica a realização de medições de vibrações através de equipamentos sofisticados capazes de elevadas taxas de aquisição e relativamente robustos em relação às diversas fontes de erro.

Pelos factores apontados, as medições *in situ* devem ser encaradas mais como um meio para obtenção de parâmetros que permitam alimentar e calibrar os modelos matemáticos do que como mecanismos de previsão.

Existem diversos casos relatados na bibliografia que dão conta de campanhas de medição dos efeitos da passagem de comboios, sendo de salientar os realizados na Suécia em Ledsgaard e em Malmö, pela quantidade de publicações científicas a que deram origem, e os da homologação da linha Bruxelas-Paris, dado que os resultados estão disponíveis na internet em <http://www.bwk.kuleuven.ac.be/bwm/>.

Para além destas campanhas são relatadas outras, por exemplo na linha Bruxelas-Colónia (Kogut *et al.*,2003), na Holanda, na linha que une Amesterdão a Utrecht, e na Alemanha, para o comboio ICE.

Outras referências, menos pormenorizadas, são feitas relativamente a campanhas de medições realizadas em Itália e em Inglaterra, França, Reino Unido e Suíça (Kaynia *et al.*, 2000 e Sheng *et al.*,2003).

2.6 – Modelos empíricos

A complexidade do fenómeno de geração e propagação de vibrações devido ao tráfego ferroviário é bastante elevada e isso dificulta bastante a elaboração de um modelo, mesmo que empírico, que contabilize todos os factores no sistema completo (Hung *et al.*, 2001). Uma abordagem possível consiste em considerar de forma separada os diversos factores que intervêm na geração e propagação das vibrações e contabilizar esses factores num modelo final, unificado.

Por exemplo, para determinar a deflexão máxima expectável no caso dinâmico, pode-se considerar a expressão (Esveld, 2001):

$$w_{din\u00e2mico} = w_{est\u00e1tico} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_0}{C_{cr}}\right)^2}} \quad \text{Eq. 2.32}$$

onde $w_{est\u00e1tico}$ representa a deflex\u00e3o m\u00e1xima obtida para o caso est\u00e1tico ($\alpha=0$ na Eq. 2.18), sendo obtida pela resolu\u00e7\u00e3o dessa equa\u00e7\u00e3o:

$$w_{est\u00e1tico} = \frac{Q}{8EI\lambda^3} \quad \text{Eq. 2.33}$$

A Eq. 2.32 constitui uma boa aproxima\u00e7\u00e3o para o caso n\u00e3o amortecido e para velocidades V_0 inferiores \u00e0 velocidade cr\u00edtica. Na Fig. 2.24 apresenta-se um diagrama onde se comparam os resultados da equa\u00e7\u00e3o Eq. 2.32 com o resultado da equa\u00e7\u00e3o Eq. 2.18 para $\beta=0$, isto \u00e9, sem amortecimento.

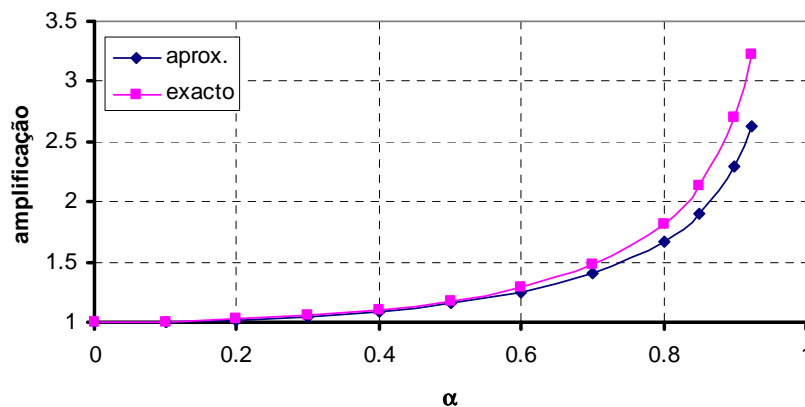


Fig. 2.24 – Rela\u00e7\u00e3o entre a deflex\u00e3o m\u00e1xima din\u00e2mica e est\u00e1tica

Outros exemplos de express\u00f5es emp\u00edricas encontram-se na regulamentação de alguns pa\u00edses. Por exemplo, na regulamentação japonesa, as cargas din\u00e2micas devidas aos rodados podem ser calculadas a partir das cargas est\u00e1ticas por (Shin *et al.*, 2002):

$$P'_w = P_w \times i \times (1 + c) \quad \text{Eq. 2.34}$$

onde P'_w representa a carga din\u00e2mica em cada rodado; P_w a carga est\u00e1tica e

$$i = 1 + 0,3 \left(\frac{V}{100} \right) \quad \text{Eq. 2.35}$$

é o factor de impacto dinâmico, onde V representa a velocidade de circulação em km/h e c um coeficiente variável entre 0,2 e 0,4, com um valor médio de 0,3.

A distribuição de cargas debaixo de cada travessa não é uniforme considerando-se simplifadamente a distribuição representada na Fig. 2.25.

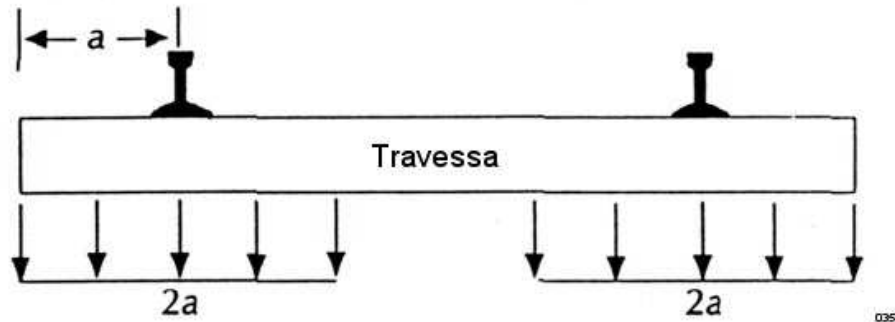


Fig. 2.25 – Distribuição de cargas nas travessas

Na mesma regulamentação considera-se também uma determinada distribuição de cargas entre as travessas, admitindo-se que uma parcela variável entre 40 e 60% da carga em cada travessa é transmitida para as travessas adjacentes.

No que respeita à possibilidade da fundação ser constituída por mais de um material, alguns autores (por exemplo, Heelis *et al.*, 1999) sugerem que, em camadas de solo caracterizadas por módulos de reacção k_0, k_1, \dots, k_n , o módulo equivalente da associação desses materiais k^* seja, aproximadamente, dado por:

$$k^* = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}} \quad \text{Eq. 2.36}$$

A expressão anterior dá resultados pouco coerentes dado que, por exemplo, para duas camadas iguais reduz o módulo de reacção da fundação para metade. Corrigindo a equação anterior obtém-se:

$$k^* = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2} + \dots + \frac{h_n}{k_n}} \quad \text{Eq. 2.37}$$

expressão correspondente à associação em série de camadas com espessuras h_i e com rigidez diferente, e que já conduz a valores coerentes.

2.7 – Modelos numéricos

Para ultrapassar as limitações das abordagens analíticas, experimentais ou empíricas surge, naturalmente, a necessidade de considerar modelos numéricos que permitem, pelo menos em princípio, simular de forma mais realista e completa o fenómeno de geração/propagação/recepção de vibrações.

O grande advento dos métodos numéricos está associado ao desenvolvimento dos computadores digitais desde a década de 70. Os métodos numéricos dos elementos finitos, das diferenças finitas ou dos elementos de fronteira passaram a ser ferramentas úteis e viáveis na resolução de muitos problemas, nomeadamente em problemas dinâmicos. Cada método apresenta determinadas particularidades e especificidades que interessa discutir, pelo menos de forma genérica, para avaliar a sua adequação à modelação da propagação de vibrações geradas pelo tráfego ferroviário.

O método dos elementos de fronteira é especialmente adequado na modelação de semi-espacos relativamente homogéneos e permite contabilizar de forma adequada o amortecimento por radiação nas fronteiras situadas a grande distância. Por outro lado, não é muito adequado à resolução de problemas com irregularidades, quer geométricas, quer mecânicas, como as que ocorrem, naturalmente, na maioria dos casos reais.

O método dos elementos finitos (MEF), pela sua natureza, é especialmente indicado para a modelação de geometrias arbitrarias, com elevado número de irregularidades, sendo por isso adequado para modelar as zonas próximas da fonte de geração de vibrações, para as zonas receptoras e para a propagação entre as duas zonas. A maior limitação deste método prende-se precisamente com a modelação dos semi-espacos infinitos. Os elementos finitos não são especialmente adequados para modelar de forma correcta os problemas de amortecimento por radiação, dado que a modelação do meio, mesmo infinito, é feita à custa de elementos finitos, limitados no espaço. Uma forma de contornar esta limitação recorrendo exclusivamente ao MEF consiste no uso de elementos infinitos (Bettess, 1992; Sitharam *et al.*, 1998; Yang *et al.*, 2003).

Por vezes, nos pacotes comerciais habitualmente usados pode não estar contemplado o tipo de elemento infinito que permite modelar as fronteiras sem reflexão das ondas. Nesses casos, podem-se simular essas fronteiras considerando diversas camadas de elementos de dimensão e amortecimento crescentes. Segundo Gardien *et al.* (2003), a não consideração deste tipo de fronteiras pode levar a sobrestimar o nível de deformação por um factor de 2 vezes.

O problema da extensão da malha até grandes distâncias para ter em consideração a radiação nas fronteiras é mais sentido para a propagação de ondas de baixa frequência e maiores comprimentos de onda. Por outro lado, a dimensão dos elementos finitos deve ser inferior ao menor dos comprimentos de onda o que, no caso de propagação de ondas de maior frequência, implica malhas com um elevado número de elementos. A conjugação das duas condições para problemas onde se propague um espectro relativamente alargado de frequências leva a que as malhas de elementos finitos, em especial as tridimensionais, possam ter um número muito elevado de elementos e portanto sejam muito dispendiosas em termos de tempo de cálculo.

Outra abordagem aplicada em diversas referências encontradas na bibliografia (Schnack *et al.*, 1997; Perera *et al.*, 1997) consiste no método híbrido, onde se conjuga a utilização do MEF usado na modelação do campo próximo com o método dos elementos de fronteira, usado na modelação do campo afastado. Na Fig. 2.26 exemplifica-se uma forma de subdividir o meio semi-infinito nas zonas próximas e afastadas. Na zona de campo próximo, modelada com elementos finitos, incluem-se eventuais estruturas e medidas de mitigação da propagação das vibrações.

A zona afastada é modelada, como se referiu, por elementos de fronteira. A ligação das zonas afastada e próxima pode ser feita através de uma matriz de impedâncias que relaciona as forças nodais na união das duas zonas com os deslocamentos do campo afastado (Hung *et al.*, 2000). A ligação entre os dois domínios não é simples devido à natureza diversa dos dois métodos. No método dos elementos finitos é necessário resolver sistemas de equações simétricas, esparsas e definidas positivas, enquanto que, nos elementos de fronteira, as matrizes dos sistemas de equações são totalmente não simétricas. No primeiro caso as matrizes são resolúveis por processos iterativos de forma muito eficiente enquanto que, no

segundo caso, é necessário realizar a solução directa da totalidade do sistema. Juntando os dois sistemas de equações, o resultado é uma matriz em que nenhum algoritmo é especialmente adequado para a sua resolução.

Felizmente já existem procedimentos otimizados para a resolução deste tipo de sistemas incluindo os que tiram partido do processamento paralelo, que pode usar “arrays” de computadores na resolução de um dado problema, separando o problema em diversas partes e fazendo cada computador (ou grupo de computadores) resolver apenas essa parte (Perera *et al.*, 1997; Kocak *et al.*, 2001). O recurso a sistemas de computação paralela tirando partido de técnicas de divisão em subestruturas foi abordado inicialmente por Przemieniecki (1963) sendo uma proposta muito importante, à data, dado que os computadores existentes tinham capacidades muito restritas, quer em termos de memória, quer em termos de velocidade ou de espaço para armazenamento dos sistemas de equações globais de uma estrutura completa.

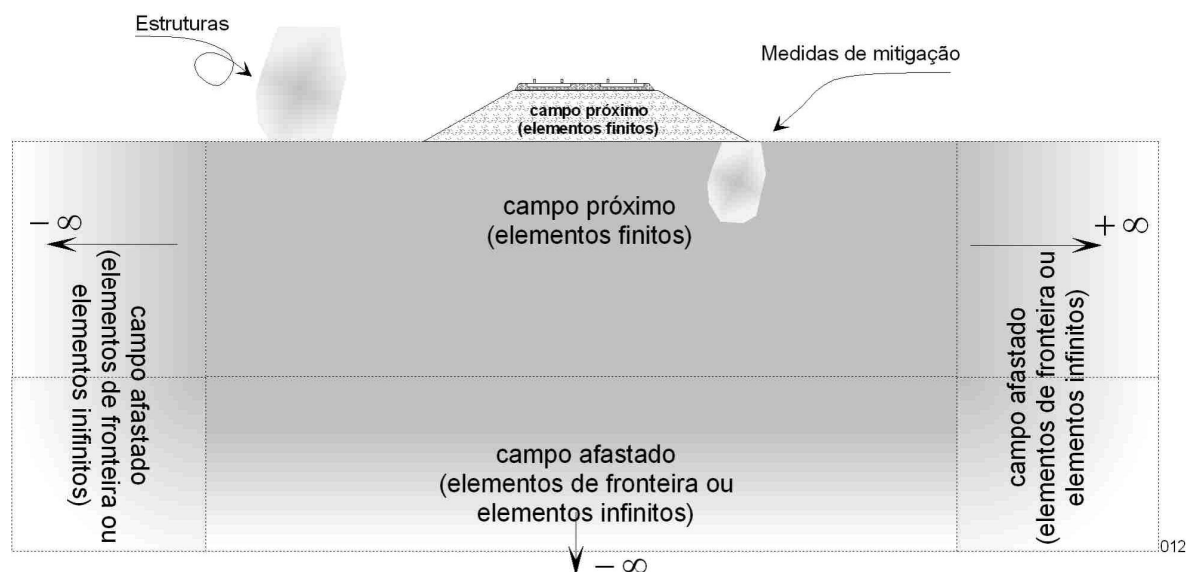


Fig. 2.26 – Esquema de divisão das zonas do campo próximo e do campo afastado no método híbrido e na utilização de elementos infinitos (Yerli *et al.*, 2003)

Em muitos casos, a geometria longitudinal da linha e as características dos materiais que incorporam a fundação apresentam uma certa regularidade, podendo ser aproximadamente assumidas como constantes ao longo do eixo longitudinal. Nestes casos, sem considerar o carregamento, o modelo plano, em condições de deformação plana, é adequado para descrever o modelo físico. Considerando a

circulação do comboio, para velocidades baixas, inferiores à velocidade crítica (ver 2.4.3), é também razoável admitir que a carga possa ser aproximada a uma carga linear infinita e, portanto, a aproximação de estado de deformação plana é ainda válida (Fig. 2.27). Como se viu, na descrição da deformação num meio elástico infinito, para velocidades sub-sónicas (Eq. 2.9), a deformação apresenta simetria radial em torno do ponto de aplicação da carga. Para uma carga linear, a deformação resultante resulta num estado plano de deformação. Segundo Gutowski *et al.*,(1976), a aproximação de carga linear em movimento para modelar a passagem de um comboio é válida desde que o ponto de observação das vibrações se situe a uma distância inferior a $\frac{1}{\pi} \times L_c$, sendo L_c o comprimento do comboio.

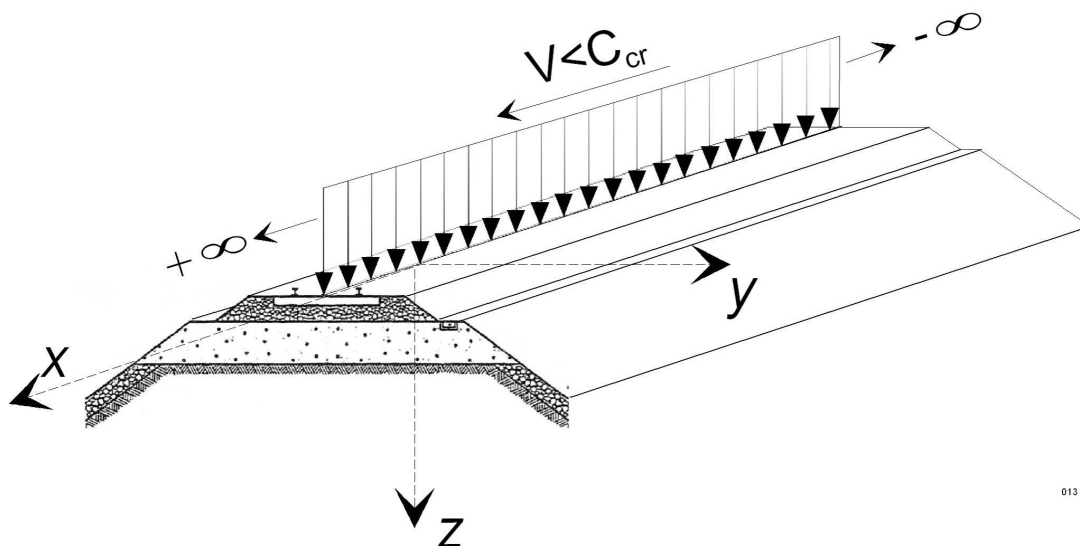


Fig. 2.27 – Condições de carga para estado plano de deformação

À medida que a velocidade de circulação (V) aumenta até valores próximos da velocidade crítica (C_{CR}), ou mesmo para valores superiores a esta, embora se mantenham as condições geométricas e mecânicas do meio onde se propagam as ondas, as condições físicas totais, que incluem o carregamento, passam a ser claramente tridimensionais. De facto, a amplificação da deformação, traduzida pela existência dos cones de Mach, não tem as mesmas condições de simetria e, estritamente falando, a análise tridimensional passa a ser imperativa. Na propagação de ondas num meio elástico ilimitado (secção 2.4.2), essa verificação é óbvia.

Embora, do ponto de vista formal, a consideração de modelos tridimensionais para a modelação adequada do fenómeno em causa seja mais ou menos simples, do ponto de vista prático existem muitas dificuldades a considerar. A primeira e mais óbvia, tem a ver com o custo computacional associado à resolução de problemas tridimensionais. De facto, a cada ponto nodal passam a estar associados três deslocamentos, segundo os três eixos do espaço, ao contrário dos problemas bidimensionais onde apenas existem dois deslocamentos a considerar. Na resolução dos sistemas de equações, na preparação das matrizes necessárias à formulação do método, os tempos de cálculo são, portanto, muito acrescidos.

Pelos motivos apontados, a modelação da propagação de vibrações a três dimensões é um processo numérico de alguma complexidade e bastante moroso sendo, normalmente, feitas diversas simplificações que compreendem a geometria da superestrutura ferroviária, os sistemas de carregamento, o tipo de simetria do modelo, entre outras.

As análises bidimensionais baseadas na simetrias planas, em estado plano de deformação, podem conduzir a alguns resultados úteis, mas, segundo diversos autores, a sua validade limita-se às zonas mais próximas do aterro e o erro é crescente com a distância ao mesmo, atingindo valores cerca de uma ordem de magnitude superiores aos medidos (Paolucci, 2003). Aliás, é fácil de reconhecer que o problema é claramente tridimensional (Fig. 2.28). De facto, embora a geometria possa, em geral, ser simplificada e uma secção transversal da linha possa representar bem a geometria de uma determinada extensão dessa linha, o carregamento imposto pelo material circulante é tridimensional sendo, além disso, variável no tempo em resultado da passagem dos vários eixos.

Apesar deste carácter tridimensional, alguns autores consideram uma simetria especial, a que designam por 2.5D em analogia aos termos mais ou menos consagrados de 2D para análises bidimensionais ou 3D para problemas tridimensionais (Yang, *et al.*, 2001). Esta simetria especial considera três graus de liberdade (GL) por cada ponto nodal. Dois desses GL são os habituais num problema em simetria plana e descrevem o campo de deslocamentos no plano da análise (x e y na Fig. 2.27). O terceiro GL é perpendicular ao plano e descreve o campo de deslocamentos segundo o eixo zz e tem em consideração a transmissão

das vibrações no plano perpendicular ao da análise. No caso de um estado plano de deformação, a componente zz dos deslocamentos (e das deformações) é sempre nula, mas nesta formulação esses deslocamentos podem ser diferentes de zero.

Os elementos finitos considerados nesta formulação comportam-se no plano x,y como os elementos finitos bidimensionais, mas consideram a extensão da geometria até ao infinito no plano perpendicular (tal como num estado plano de deformação) e permitem o cálculo de deslocamentos segundo esta direcção.

No modelo proposto, o campo próximo é modelado através de elementos finitos, podendo ter em consideração a existência de estruturas fora da plataforma ferroviária ou a estratificação que normalmente ocorre em camadas aluvionares. O campo afastado é modelado através de elementos infinitos que, não sendo tão precisos como os elementos de fronteira, baseiam-se também nos conceitos de funções de forma e de funções de interpolação sendo, portanto, mais fáceis de implementar em programas de elementos finitos existentes.

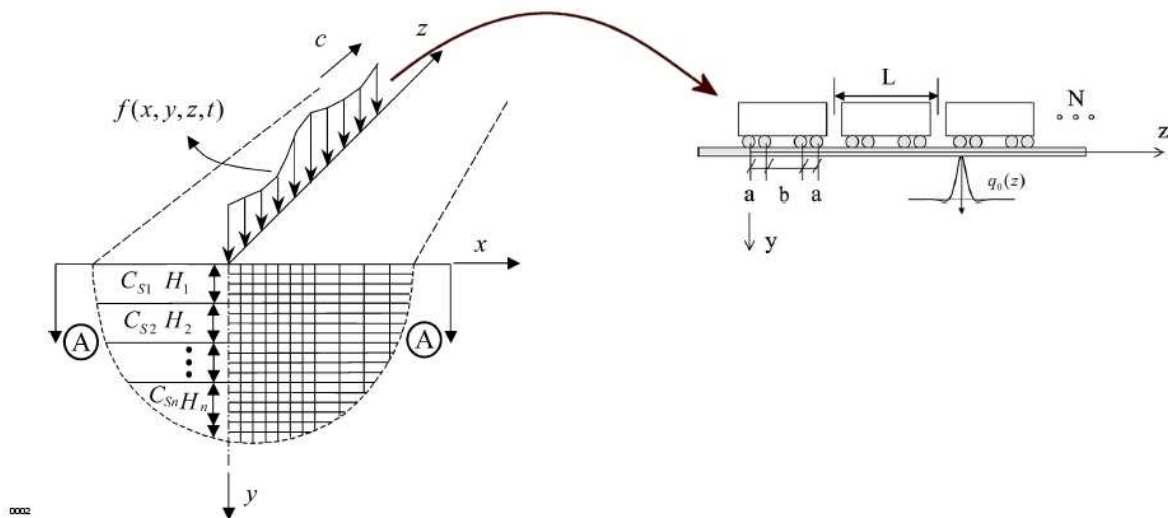


Fig. 2.28 – Representação esquemática da geometria do problema e do sistema de cargas (Yang *et al.*, 2003)

No Anexo 2 apresentam-se alguns detalhes da formulação proposta por Yang *et al.* (2001) por se considerar que constitui uma alternativa potente para os casos em que a geometria segundo zz se pode considerar como constante.

Em Anexo (Anexo 4), apresenta-se a revisão das capacidades de alguns programas comerciais para cálculo de problemas bi e tridimensionais que podem ser usados na

modelação da propagação de vibrações, bem como os respectivos custos. A utilização, para este efeito, de alguns desses programas é referida na bibliografia consultada.

2.8– Caracterização geotécnica

A caracterização geotécnica necessária para estudar a geração e propagação das ondas deve, em princípio, estar relacionada com a modelo escolhido.

Se a modelação for feita através do modelo de Winkler, por exemplo, é necessário conhecer a geometria e as características mecânicas dos materiais que são incluídos na “viga”. Por outro lado, para a fundação, é apenas necessário conhecer o módulo de reacção dos terrenos que incorporam a fundação.

No entanto, para modelos mais complexos, torna-se necessário conhecer as características dos materiais com maior precisão tendo em vista “alimentar” esses modelos por forma a realizar análises realistas.

Podem-se considerar três abordagens distintas no que diz respeito à obtenção de parâmetros que permitem modelar o comportamento dos materiais que estão envolvidos na propagação de vibrações, nomeadamente a caracterização laboratorial, a caracterização através de ensaios *in situ* ou o recurso a correlações empíricas.

Estas abordagens podem e devem ser consideradas como complementares em especial as duas primeiras. O recurso correlações empíricas para obter parâmetros é mais falível, embora possa, por vezes, complementar ou validar a informação recolhida através de um conjunto específico de ensaios.

As técnicas de ensaio para a caracterização das propriedades dinâmicas de solos são dirigidas, normalmente, para a caracterização do comportamento para muito pequenas deformações ou para deformações maiores, consoante o tipo de estudo que se pretenda. O comportamento do solo para baixos níveis de deformação depende fundamentalmente, da rigidez, do amortecimento, do coeficiente de Poisson e da sua massa volúmica aparente. Para deformações mais elevadas, o comportamento não linear dos solos torna-se mais notório e outros factores, como a

velocidade de deformação, ou o número de ciclos de carga, assumem também importância.

A programação dos ensaios necessários para o estudo de um determinado problema deve ter estes aspectos em consideração. Assim, é conveniente, à partida, estimar os níveis de deformação que poderão vir a ocorrer, embora para essa estimativa seja necessário conhecer de forma aproximada os parâmetros dos materiais envolvidos. De certo modo, este processo é iterativo.

Nos quadros seguintes resumem-se os tipos de ensaios de campo (Quadro 2.4) e de laboratório (Quadro 2.5) mais usados na determinação das características dinâmicas dos solos.

Quadro 2.4 – Ensaios de campo para avaliação do módulo de distorção (Santos, 1999)

Designação		Princípio da técnica	Nível de distorção
Sísmico entre furos (cross-hole)		Determinação da velocidade de propagação da onda de corte (C_s)	$\approx 10^{-6}$
Sísmico ao longo de furos	Fonte à superfície (downhole)		
	Fonte no interior do furo (uphole)		
Piezocone sísmico			
Refracção sísmica			
Vibração em regime permanente			
Análise espectral de ondas de superfície			
Ensaio com pressiómetro autoperfurador		Curva tensão-deformação	$>10^{-3}$

Os ensaios de campo apresentam a vantagem de caracterizarem os solos em condições reais, caracterização essa baseada num volume significativo de solo, sem efeitos de amostragem. Por outro lado, nos ensaios de campo podem, em certos casos, ser aplicadas deformações da mesma ordem de grandeza que aquelas que serão aplicadas no protótipo que se pretende estudar. Por exemplo, nos casos em que se pretende caracterizar o comportamento de uma linha existente, pode proceder-se a passagens experimentais de comboios a diversas velocidades e estudar a resposta dos solos a esses carregamentos.

Os ensaios de laboratório são muito adequados para avaliar a sensibilidade dos parâmetros dos solos a diversas condições de ensaio e são adequados para a determinação dos coeficientes de amortecimento. Além disso, nos ensaios de laboratório é possível ensaiar o comportamento dos solos para uma gama de deformações mais elevada (Quadro 2.5). No ambiente controlado de um laboratório é mais fácil conhecer todos os factores que podem afectar um determinado ensaio ou a variação de um determinado parâmetro. Em contrapartida, para a realização de ensaios de laboratório é necessário colher amostras de muito boa qualidade, com perturbação mínima em resultado do processo de extracção, e isso, nem sempre é fácil ou mesmo possível.

Quadro 2.5 – Ensaios de laboratório para avaliação do módulo de distorção e do coeficiente de amortecimento histerético (Santos, 1999)

Designação	Princípio da técnica	Nível de distorção
Coluna ressonante	Velocidade de propagação da onda de corte	de 10^{-6} a 10^{-4}
Bender elements		10^{-6}
Corte simples	Curva tensão-distorção	$>10^{-4}$
Triaxial cíclico		$>10^{-4}$
Torção cíclica		$>10^{-4}$

No que respeita a ensaios de laboratório, o ensaio de coluna ressonante é o mais usado na determinação das características dinâmicas de solos. Através deste ensaio (Fig. 2.29) determina-se o módulo de distorção, G , e o coeficiente de amortecimento, ξ , no domínio das pequenas a muito pequenas deformações (Santos, 1999).

Na Fig. 2.30 apresenta-se a gama de deformações envolvidas em diversos tipos de ensaios de laboratório. Os ensaios de coluna ressonante com amostras ocas e o torcional cíclico são os ensaios que abrangem uma maior gama de deformações, permitindo o estudo da variação de G e ξ para diversos níveis de deformação, bem como a avaliação do comportamento cíclico dos solos.

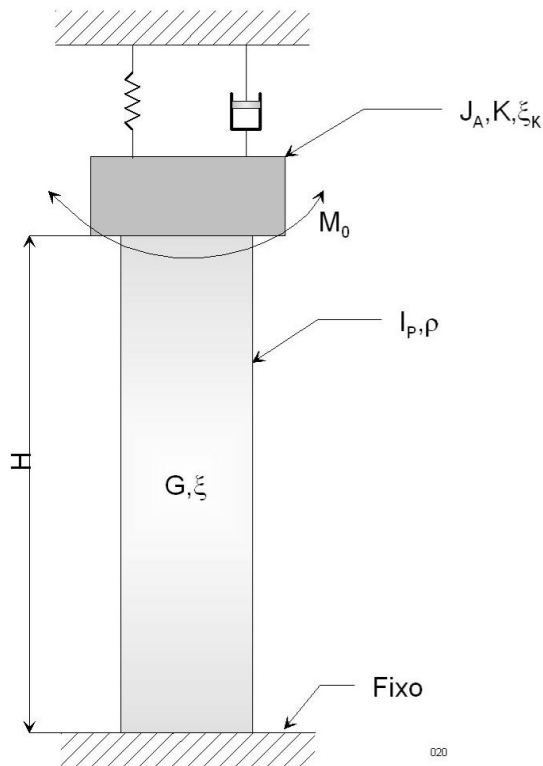


Fig. 2.29 – Modelo reológico do ensaio de coluna ressonante

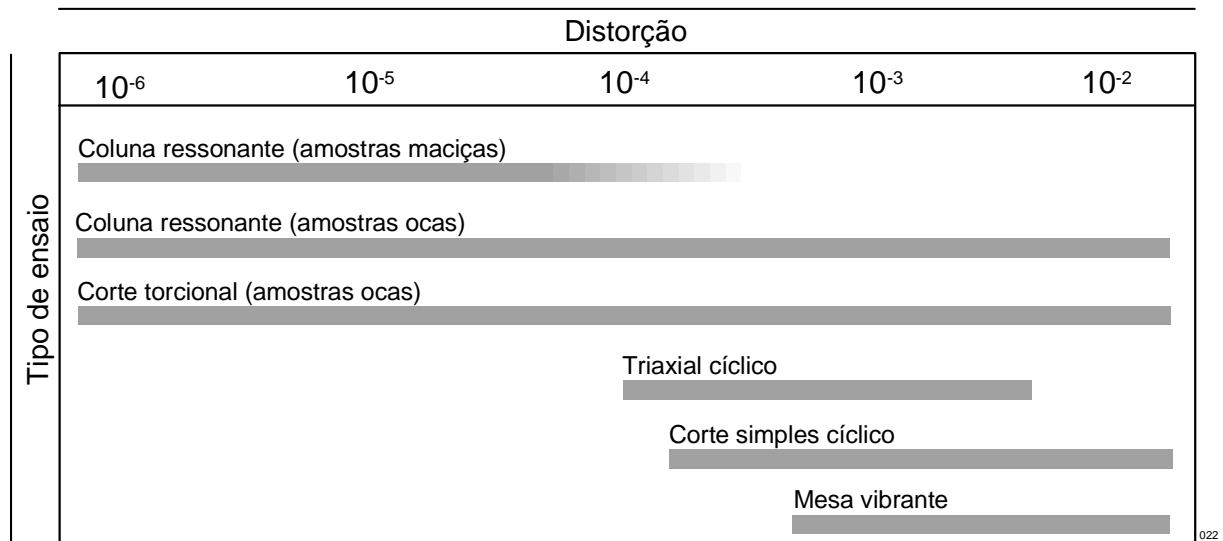


Fig. 2.30 – Níveis de distorção de diversos ensaios de laboratório (Woods, 1978)

Relativamente aos ensaios de campo, os mais frequentemente são usados são os ensaios geofísicos sísmicos em que as características dos solos são determinadas pela medição directa das velocidades de propagação das ondas P e S. Existem diversas modalidades para a execução dos ensaios sísmicos, sendo os mais correntes o *cross-hole*, *down-hole* e a refração sísmica (Fig. 2.31).

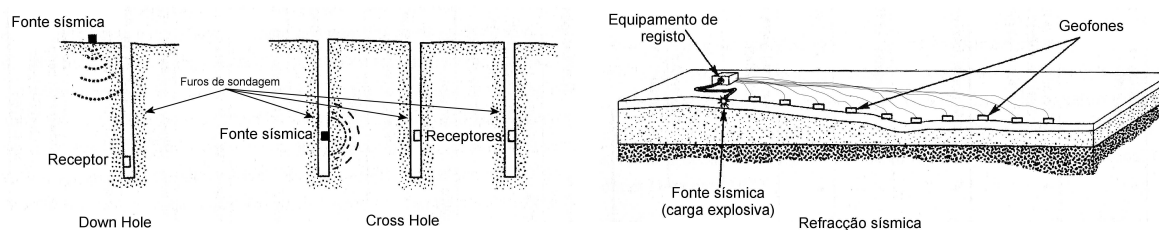


Fig. 2.31 – Ensaios sísmicos mais correntes

No ensaio *cross-hole* a trajectória das ondas sísmicas é conhecida, permitindo a determinação, com pequena margem de erro, da velocidade das ondas P e S ao longo das diversas camadas atravessadas. A verticalidade dos furos, dois ou mais, tem de ser verificada com rigor, normalmente com recurso a um inclinómetro, por forma a conhecer bem a distância entre a fonte sísmica e os receptores, em função da profundidade. Para além do conhecimento das velocidades, com este ensaio é também possível determinar o amortecimento e a variação da velocidade com a amplitude da deformação. A distância máxima entre furos depende da potência da fonte sísmica, sendo habitual não ultrapassar 15 a 20 m.

O ensaio *down hole* (ou *up hole*) permite também a determinação das velocidades das ondas P e S e do amortecimento e é, naturalmente, mais económico que o *cross-hole*, mas é mais susceptível de ser afectado por erros provenientes do ruído ambiente à superfície. A trajectória das ondas é subvertical e, para além disso, as velocidades determinadas, no caso de terrenos com estratificação horizontal, representam valores médios das camadas atravessadas. A profundidade máxima que é possível ensaiar também depende da potência da fonte sísmica. Correntemente, podem ser ensaiadas profundidades até 20-25 m, embora estejam relatados na bibliografia ensaios com maiores profundidades.

Os ensaios de refração sísmica permitem a determinação das velocidades das ondas sísmicas (P e S), permitindo ainda, a determinação da profundidade das diversas camadas que compõem a fundação. São adequados para estudos de zonas relativamente extensas, em especial numa fase preliminar, mas apresentam menor precisão e as propriedades medidas aplicam-se apenas às camadas superficiais. Trata-se de um ensaio muito utilizado na caracterização geotécnica de sítios, nomeadamente para fazer o zonamento geotécnico e verificar a ripabilidade dos terrenos ocorrentes.

Outro ensaio com potencialidades adequadas para a caracterização dinâmica dos solos é o ensaio de análise espectral de ondas de superfície. Neste ensaio apenas se determina a velocidade das ondas S (e por consequência apenas o valor de G), mas é possível também determinar a profundidade das camadas mais superficiais. Uma das limitações deste ensaio prende-se com a incerteza relativa à profundidade que é possível amostrar com este equipamento.

Para a caracterização da deformabilidade das camadas superficiais pode-se ainda recorrer ao deflectómetro de impacto portátil (Fortunato, 2000) que permite, em determinadas condições e através de retro-análise, determinar o(s) módulo(s) de deformabilidade das camadas superficiais (Fortunato *et al.*, 2003).

Algumas das aplicações mais relevantes do ponto de vista da caracterização *in situ* são aquelas em que se procede ao estudo dos solos em linhas existentes. Na Suécia, por exemplo, foram realizados estudos na cidade de Grums, na linha que liga Karlstad a Gothenburg (Ljungberg *et al.*, 1997), e em Ledsgaard, na linha entre Gothenburg e Malmö (Fig. 2.32).

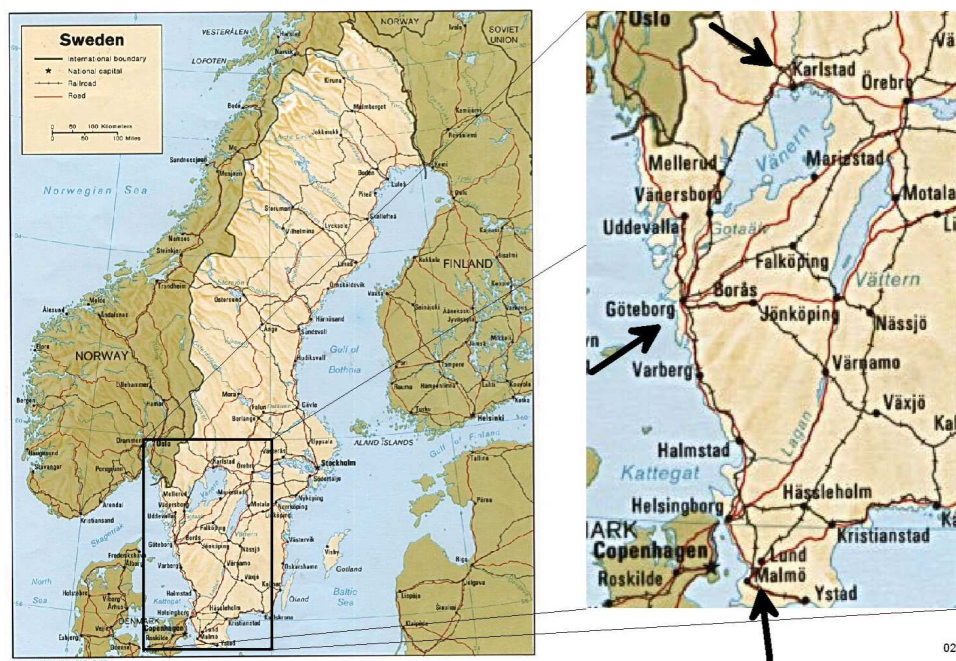


Fig. 2.32 – Localização das cidades de Karlstad, Gothenburg e Malmö na Suécia

Estas linhas foram construídas por volta de 1930, havendo zonas em aterro fundado em argilas moles que atingem espessuras consideráveis (até 50 m). O estudo em

Ledsgaard foi motivado pela medição de grandes vibrações causadas por comboios de alta velocidade. Em face dessa situação, a autoridade ferroviária Sueca (Banverket) promoveu um projecto de estudo das causas das vibrações envolvendo diversas entidades. Entretanto e por questões de segurança (Smekal *et al.*, 2002), a velocidade de circulação foi reduzida de 200 km/h para 160 km/h e, alguns meses mais tarde, foi ainda reduzida para 130 km/h, com os inevitáveis custos em termos de exploração da linha. A velocidade de circulação só veio a ser restabelecida depois de implementadas as medidas de mitigação das vibrações que derivaram dos diversos estudos efectuados e de comprovada a eficiência dessas soluções de melhoramento dos solos de fundação, com novas campanhas de medição.

As linhas principais do estudo efectuado (Hall, 2000), que compreendeu ensaios de laboratório e ensaios *in situ*, servem de referência para a avaliação de situações semelhantes. O perfil tipo, deduzido com base na prospecção efectuada, é o que se apresenta na Fig. 2.33 onde, por simplificação, se omitem as camadas de argilas mais profundas.

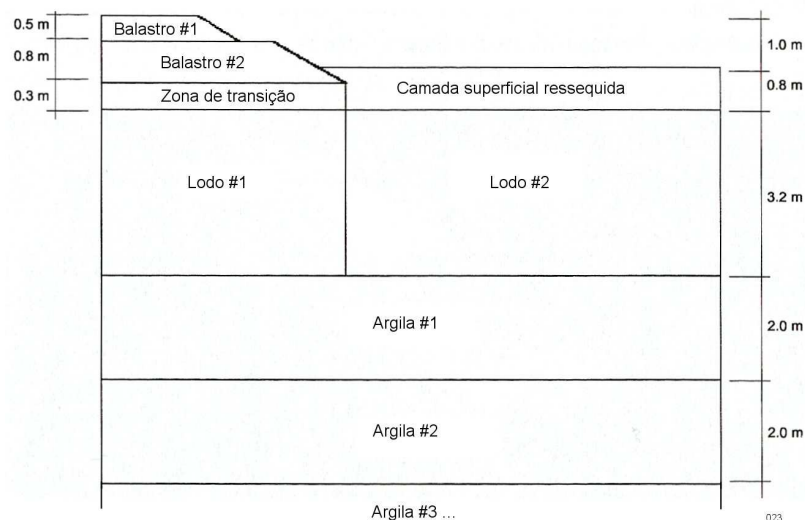


Fig. 2.33 – Perfil tipo em Ledsgaard

A primeira fase da caracterização consistiu na realização de ensaios CPTU até profundidades da ordem dos 20 m e na recolha de amostras remexidas e intactas para realização de ensaios de caracterização laboratorial. Desses ensaios foram determinadas as características físicas, características de estado hídrico e

características mecânicas. Destacam-se a massa volúmica, o teor em água, os limites de Atterberg, a coesão não drenada, a tensão de pré-consolidação e o módulo edométrico.

No que respeita à caracterização dinâmica, foi dada especial atenção aos ensaios *cross-hole* mas foram também realizados ensaios *down-hole* na fundação e ensaios de impacto para a caracterização do material de aterro e do material de balastro.

O equipamento usado no registo dos ensaios *cross-hole* permitia a aquisição de dados a uma taxa de 1 kHz. Alguns cuidados especiais têm de ser considerados na interpretação destes ensaios, o que pode requerer técnicas de eliminação de ruído de fundo através da filtragem analógica ou digital dos sinais. Outro aspecto de especial importância na escolha do equipamento usado nos ensaios prende-se com a frequência limite inferior (cut-off frequency) dos geofones. Os geofones são sensores que respondem a movimentos gerando impulsos eléctricos em resposta à velocidade do invólucro. Consoante os pormenores construtivos dos geofones, estes respondem bem, isto é, registam bem o movimento, para vibrações acima de determinadas frequências. Os geofones são caracterizados pela sua frequência de ressonância. Para excitações acima dessa frequência, a resposta é boa enquanto que, para frequências inferiores, a resposta é deficiente, ficando deprimida. A frequência normal dos geofones varia entre 4 Hz e 30 Hz, para geofones de grande e pequena dimensão, respectivamente. As vibrações geradas pelos comboios em fundações moles têm normalmente um conteúdo muito significativo de frequências baixas (abaixo dos 4 Hz, ver Anexo 3.5), pelo que a utilização de geofones especiais pode ser necessária.

Os ensaios de impacto destinaram-se a caracterizar as camadas de balastro e a camada ressequida sobrejacente aos lodos (Fig. 2.33). A fonte de excitação sísmica consistiu na queda de um peso (60 kgf a 0,5 m no caso da camada ressequida e 200 kgf a 2,5m no caso das camadas de balastro) e no registo da chegada das ondas através de geofones, no caso da camada sobrejacente aos lodos, e através de acelerómetros, no caso da caracterização do balastro.

Os ensaios para caracterização da velocidade de propagação das ondas no balastro revestem-se de algumas dificuldades que se relacionam, nomeadamente, com o carácter relativamente grosseiro do material em conjunto com as dificuldades de

fixar os equipamentos de medição no balastro, nomeadamente os acelerómetros. A medição correcta das vibrações pode implicar a construção de um recipiente próprio que por um lado, proteja o acelerómetro do contacto directo com o balastro e, por outro, permita a medição satisfatória da vibração (Zhai *et al.*, 2004). Nos ensaios realizados para os materiais de balastro nos dois locais acima indicados, obtiveram-se velocidades de propagação das ondas S de 295 e 233 m/s e, para as ondas P, velocidades de 576 m/s. Tendo em atenção as dificuldades apontadas, estes valores podem ser considerados como referência em futuras investigações.

A caracterização dinâmica dos solos do perfil tipo em Ledsgaard contou também com ensaios de laboratório, nomeadamente ensaios triaxiais dinâmicos onde se avaliou a variação do módulo de distorção secante com o módulo de distorção máximo (G/G_0) e do coeficiente de amortecimento em função do nível de distorção. Foram ainda realizados ensaios com *bender elements* para determinação da velocidade de propagação das ondas S e consequente determinação do módulo de distorção para baixas deformações.

A culminar os trabalhos de caracterização geotécnica realizados em Ledsgaard e dado que se tratava de uma linha em exploração, foram realizadas medições experimentais correspondentes à passagem de uma composição do comboio X2000 a diversas velocidades. Esta abordagem é, nestes casos de linhas existentes, a mais completa em termos de caracterização, dado que incide sobre o protótipo em condições reais. Infelizmente é também bastante complexa e dispendiosa.

O estudo promovido pela Banverket teve como objectivos fundamentais a verificação da existência de uma velocidade crítica no local, avaliar a variação das vibrações com a profundidade, avaliar a influência da velocidade de circulação na amplitude das vibrações e avaliar se a resistência e a deformabilidade do aterro ferroviário seriam afectados pelas vibrações de grande amplitude (Hall, 2000).

O dispositivo experimental compreendeu a utilização de diversos tipos de equipamentos destinados a fazer a medição, tão completa quanto economicamente possível, do campo de deformações na linha e nas suas imediações. Assim, foram usados extensómetros de varas, na medição dos deslocamentos na linha, acelerómetros, nas medições efectuadas no aterro, e geofones, na medição das velocidades nas zonas mais afastadas. Outros autores, reportam na medição da

resposta da linha, a utilização de acelerómetros (Hartung *et al.*, 2003; Degrande *et al.*, 2001) ou geofones (Heelis *et al.*, 1999; Ditzel *et al.*, 2001).

As medições dos deslocamentos debaixo da linha e na zona da fundação mais próxima do aterro foram feitas a diversas profundidades, até 12 metros, no primeiro caso, e até cerca de 7 metros, no segundo. No que respeita à medição dos deslocamentos à superfície, a distância máxima, relativamente à linha, a que foram colocados os geofones foi de 50 m.

As medições efectuadas permitiram cumprir a maioria dos objectivos preconizados mas, para além disso, forneceram importantes indicações para o dimensionamento de outros dispositivos a usar em futuros estudos. Uma das conclusões prende-se com a utilização, em exclusivo, dos geofones na medição dos deslocamentos nas zonas mais afastadas. Estes dispositivos podem não registar de forma adequada as vibrações de baixa frequência, podendo, portanto, ser inadequados para as medições das vibrações provocadas pelos comboios em fundações com solos moles. Nestes casos, uma parte importante da vibração ocorre precisamente no campo das baixas frequências (ver 1.4 e 1.5).

3 – MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DOS PROBLEMAS ASSOCIADOS ÀS LINHAS DE ALTA VELOCIDADE SOBRE SOLOS MOLES

3.1 – Introdução

Nos dois capítulos anteriores foi feita uma revisão de diversos aspectos relacionados com a problemática da propagação de vibrações devidas à circulação de comboios de alta velocidade. Os mecanismos de geração e propagação de vibrações foram revistos, tendo em atenção o objectivo de proceder à modelação do fenómeno através de modelos analíticos ou numéricos.

Para a aplicação desses modelos é necessário conhecer parâmetros que traduzam da forma mais fidedigna possível, os aspectos do comportamento dos solos que estão contemplados nesses modelos. Assim, torna-se necessário proceder à caracterização dos materiais envolvidos. Aqueles que compõem a superestrutura e, fundamentalmente, aqueles nos quais a via férrea se encontra fundada. Os processos de caracterização laboratorial e *in situ* apresentam vantagens e inconvenientes devendo ser encarados de forma complementar.

O objectivo último destes estudos é o de prever a existência de problemas resultantes da amplificação das vibrações e, caso estes ocorram, dimensionar medidas que permitam anular ou minorar os seus efeitos.

Nos parágrafos que se seguem serão analisadas algumas das medidas que têm sido implementadas nos casos em que se detectaram problemas de amplificação dinâmica das vibrações decorrentes da circulação de comboios de alta velocidade.

É necessário distinguir dois grandes tipos de medidas de mitigação. O primeiro destina-se a controlar a geração de vibrações, nos casos em que estas sejam de uma dimensão que possa afectar de alguma forma a circulação ferroviária. O segundo grande grupo é aplicável aos casos em que, muito embora existam

vibrações em resultado da circulação, a sua grandeza não é, de todo, prejudicial à circulação mas, em contrapartida, tem efeitos colaterais, por exemplo, provocando a degradação de outras estruturas ou causando incomodidade às populações.

Enquanto que em alguns casos a implementação das medidas do primeiro grupo serão suficientes, noutros poderá ser necessário a implementação conjunta dos dois grupos de medidas.

No contexto do dimensionamento das medidas de mitigação das vibrações, as soluções baseadas em modelos analíticos, apesar de estarem limitadas a casos particulares, assumem especial importância conforme se analisa em seguida.

Uma das soluções analíticas mais divulgadas na bibliografia sobre este assunto é a que se baseia no modelo de uma viga contínua, infinita, apoiada numa fundação constituída por um semi-espaço de comportamento elástico ou visco-elástico. Algumas dessas soluções, para uma carga em movimento, foram apresentadas e analisadas na secção 2.4.3. Um dos resultados mais importantes dessas soluções, obtida para o caso particular de fundação elástica, sem amortecimento, é o de identificar a existência de uma velocidade de circulação da carga para a qual a resposta da viga se torna infinita. Essa velocidade pode ser calculada, de acordo com as hipóteses do modelo, por:

$$C_{cr} = \sqrt[4]{\frac{4kEI}{m^2}} \quad \text{Eq. 2.19 (bis)}$$

onde k representa o módulo de reacção do terreno, E e I o módulo de elasticidade e o momento de inércia da viga e m a sua massa por unidade de comprimento. Em termos práticos, e apesar das simplificações inerentes ao modelo, a equação anterior permite analisar de que forma os parâmetros envolvidos afectam a velocidade crítica.

É imediato reconhecer que o aumento da velocidade crítica pode ser atingido através de:

- Aumento da rigidez da fundação (k)
- Aumento da rigidez da “viga” (EI)
- Diminuição da massa da viga (m)

Algumas das soluções de mitigação das vibrações, em especial aquelas que se destinam a controlar a origem da vibração, derivam da possibilidade de alterar o valor da velocidade crítica do conjunto viga+solo, alterando as características que determinam o valor daquelas propriedades. Assim, o aumento de rigidez da fundação (intervindo no valor de k) pode ser conseguido através do reforço do material de fundação, por exemplo, com colunas de brita ou colunas de jet-grouting. Note-se, porém, que a velocidade crítica depende dos factores indicados (entre outros não incluídos na formulação), mas a dependência tem uma raiz quarta, o que atenua muito os efeitos de melhoramento. Um aumento de 100% no radicando traduz-se por um aumento de apenas 19% na velocidade crítica. Tomando um factor de segurança da velocidade crítica de 30%, conforme sugerido por alguns autores (Heelis *et al.*, 1999), a razão kEI/m^2 terá de ser aumentada por um factor de aproximadamente 2,85.

Nos parágrafos seguintes são discutidos alguns dos métodos de redução e controlo das vibrações.

3.2– Melhoramento da fundação através da consolidação forçada

O problema da construção de estruturas sobre solos moles é um problema clássico no âmbito da Mecânica dos Solos. Também nas infra-estruturas de vias de comunicação ocorrem, frequentemente, situações em que é necessário atravessar zonas em que as características dos solos de fundação põem problemas de assentamentos ou de estabilidade. O tratamento analítico deste problema pode ser feito recorrendo à teoria clássica de consolidação de Terzaghi.

A consolidação dos solos traduz-se por assentamentos que resultam da expulsão diferida da água no solo, devido ao excesso de pressão intersticial gerado pelos acréscimos de carga em resultado das construções. A par do assentamento há um aumento da resistência e uma redução da deformabilidade dos solos da fundação. Em geral os tempos de consolidação são elevados, sendo prática corrente recorrer a medidas de aceleração da consolidação. Essas medidas compreendem o aumento de carga sobre as fundações e a diminuição do percurso de drenagem dos solos.

Esta última medida é correntemente implementada através da colocação de geodrenos ou de estacas de brita (secção 3.4). A contabilização do efeito benéfico resultante da consolidação é traduzida, no caso do modelo da viga de Winkler, pelo aumento do módulo de reacção do terreno (k).

3.3– Melhoria da fundação através de jet-grouting

O reforço da fundação da via férrea através da realização de colunas de cimento e cal constitui uma das soluções relatadas na bibliografia. O caso de Ledsgaard, na Suécia, é relatado por Bahrekazemi *et al.*, (2002) e Smekal *et al.*, (2002) entre outros, na sequência dos estudos efectuados, onde se reconheceu a necessidade de intervir na infra-estrutura para repor as velocidades de circulação inicialmente preconizadas para a exploração daquela linha.

A tecnologia de construção de colunas de cimento e cal através de injeções na fundação é relativamente bem conhecida e de prática corrente na estabilização de solos. Uma das aplicações deste método consiste na redução dos assentamentos devidos à consolidação em solos moles. Assim, a sua aplicação ao controlo de vibrações é considerada uma extensão natural do processo.

A redução das vibrações é conseguida pelo aumento da rigidez da fundação com o conseqüente aumento da velocidade crítica. O dimensionamento optimizado da disposição das colunas deve, preferencialmente, ser feito através da modelação numérica tridimensional da fundação com as colunas de *jet-grouting*.

O dimensionamento do sistema de colunas é feito tendo em consideração diversos factores, nomeadamente geométricos (diâmetro das colunas, profundidade, disposição em planta) e de composição (relação cal/cimento).

Os estudos de dimensionamento devem procurar, por um lado, optimizar a solução tendo em atenção a relação custo-benefício e, por outro, a geração de efeitos colaterais. Com efeito, embora esta solução conduza a melhoramentos no que respeita às vibrações de baixa frequência, Hildebrand (2004) relata que há um acréscimo de vibração na banda audível (>20 Hz). Segundo o mesmo autor e outros, as frequências até 200 Hz são as mais relevantes dentro daquelas que são geradas

pelo movimento dos comboios. A parte até aos 100 Hz é aquela que apresenta o maior conteúdo em energia e, além disso, é a parcela que está associada à vibração de lajes, paredes e janelas e à geração de ruídos parasitas e incomodativos. A parcela abaixo dos 20 Hz portanto, inferior do espectro audível, está mais associada à deterioração da plataforma, das respectivas fundações ou a alterações da estabilidade de taludes. O estudo da solução de melhoramento através da modelação pelo MEF permite, em princípio, avaliar a possibilidade de se gerarem efeitos colaterais.

3.4– Melhoramento da fundação através de colunas de brita

Outro método muito usado na estabilização de fundações em solos moles consiste na realização de colunas (ou estacas) de brita. As estacas de brita são empregues com dois objectivos: por um lado, ao facilitarem a drenagem, permitem acelerar a consolidação em resultado da construção de aterros ou outras estruturas; por outro, promovem a substituição parcial do solo de fundação que passa a ser um material compósito, de maior resistência e menor deformabilidade que o solo original.

O dimensionamento das estacas de brita é, normalmente, feito tendo em consideração dois factores: o tempo de consolidação e a redução do assentamento. Assim, o diâmetro e o afastamento (Fig. 3.1) das colunas de brita são determinados pela conjugação dos dois factores. A redução do assentamento pode ser contabilizada através de um coeficiente de melhoramento (Cristóvão, 1985). Esse factor traduz, de forma simplificada, a relação entre o assentamento da fundação depois do tratamento com as estacas de brita e antes desse tratamento, tendo em atenção a área da estaca de brita em relação à área de solo e as características de resistência ao corte do material que as constitui.

De forma análoga, a estabilização da fundação através de estacas de brita pode ser contabilizada considerando o acréscimo do módulo de deformabilidade que o solo tratado apresenta relativamente ao solo não tratado. Assim, esta medida de tratamento da fundação para controlo da vibração poderá ter um tratamento semelhante ao que corresponde às colunas de cal/cimento feitas com recurso ao *jet-grouting*.

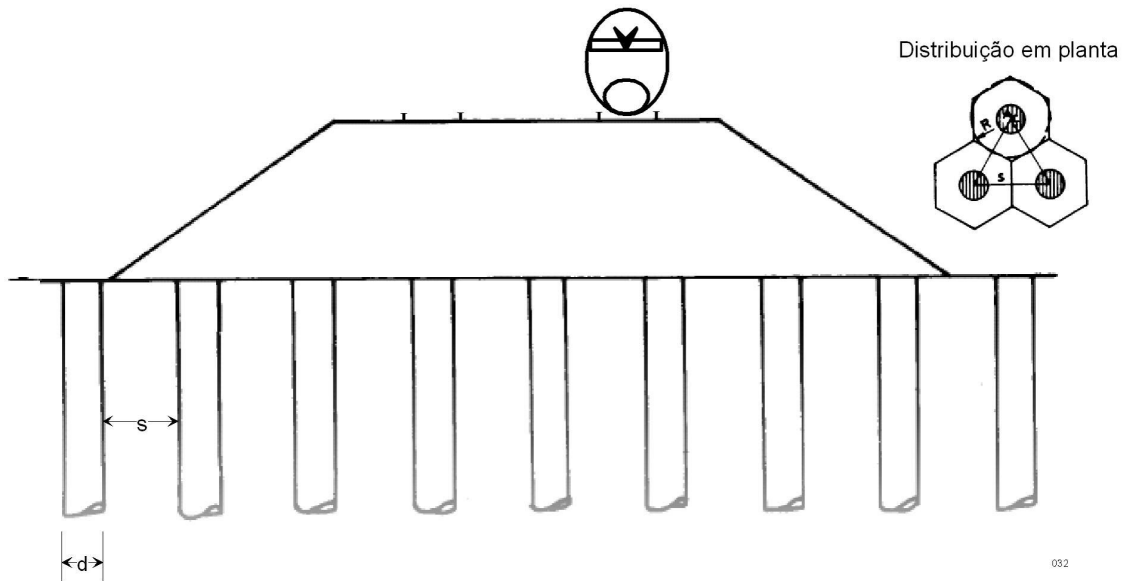


Fig. 3.1 – Tratamento da fundação com estacas de brita

Na bibliografia consultada não foram encontradas referências à utilização de estacas de brita com o intuito exclusivo de controlar as vibrações, devendo-se esse facto, provavelmente, à circunstância de, nos casos em que a linha se encontra em exploração, a execução destes trabalhos ser mais complexa do que, por exemplo, a execução das colunas de *jet-grouting* sendo, além disso, o efeito destas últimas mais rápido.

3.5– Reforço da plataforma e do aterro através de geogrelhas

Na fundação de aterros sobre solos deformáveis tem vindo a ser incrementada a utilização de materiais geosintéticos como complemento da estrutura aterro+fundação. Alguns desses materiais apresentam meramente funções de separação e/ou filtragem enquanto que, noutros casos, apresentam também uma contribuição significativa do ponto de vista da resistência e da deformabilidade.

As geogrelhas são materiais geosintéticos cuja função primordial é a de reforçar os aterros. O princípio de funcionamento das geogrelhas baseia-se na sua colocação nos aterros em camadas, conferindo resistência à tracção ao material compósito resultante (Fig. 3.2). A utilização de geogrelhas altera, conseqüentemente, a distribuição de tensões no material solo+geogrelha, contribuindo, assim, para

substanciais melhoramentos do funcionamento dos aterros. As vantagens da utilização de geogrelhas são, de forma sucinta, as seguintes (Montanelli *et al.*, 2003):

- Permite criar uma plataforma onde as deformações horizontais e verticais são minimizadas;
- Aumenta a capacidade de carga da plataforma e melhora a distribuição de tensões reduzindo, conseqüentemente, os picos de carga transmitidos à fundação;
- Aumenta a rigidez do aterro e confere ao material uma coesão aparente, em resultado da resistência à tracção do geosintético;
- Aumenta o amortecimento.

Recorrendo a ensaios à escala real, Montanelli *et al.*, (op. cit.) reportam acréscimos do módulo de deformabilidade da plataforma ferroviária de 163, 179 e 238% pela adição de uma, duas ou três camadas de geogrelhas.

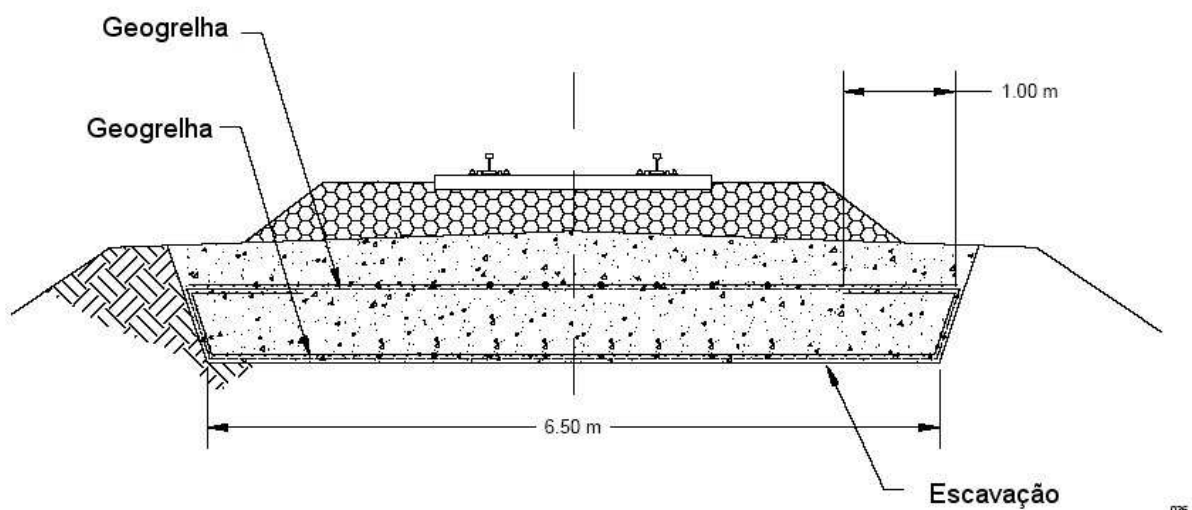


Fig. 3.2 – Reforço da fundação da plataforma através de geogrelhas

3.6– Reforço da plataforma através da estabilização dos solos com ligantes hidráulicos

O recurso aos ligantes hidráulicos, nomeadamente a cal, o cimento e a mistura cal-cimento tem sido empregue na construção de plataformas de estradas e caminhos de ferro. Com efeito, na execução de terraplenagens, a ocorrência de solos com elevado teor em água e/ou com elevados teores em argila coloca problemas diversos ao desenvolvimento dos trabalhos. Um dos problemas sentidos é o da traficabilidade dos equipamentos, que fica consideravelmente perturbada ou é mesmo inviável nos casos em que os teores em água das formações ocorrentes são elevados. Outras dificuldades prendem-se com a impossibilidade de efectuar uma adequada compactação dos solos do leito da via e das camadas de apoio e com a garantia do bom desempenho da plataforma, quer durante o processo construtivo, quer durante a fase de exploração.

A consideração do tratamento com cal dos solos com piores características parece poder obviar alguns destes problemas por provocar a alteração de diversos parâmetros que se relacionam com o seu comportamento, nomeadamente:

- Diminuição do teor em água (especialmente quando se trata da adição de cal viva);
- Diminuição do Índice de Plasticidade (IP) ;
- Diminuição do valor de azul de metileno;
- Aumento do limite de plasticidade (w_p);
- Diminuição do peso volúmico máximo;
- Aumento do CBR;
- Achatamento da curva Proctor.

Para além do melhoramento dos parâmetros acima indicados, a adição de cal provoca alterações ao nível do comportamento mecânico do solo tratado. O melhoramento traduz-se por um aumento da resistência e pela diminuição da deformabilidade (Mateus da Silva *et al.*, 2004). Neste contexto, para além dos benefícios imediatos, em termos de obra, na utilização de misturas de solos com

ligantes, a utilização das misturas estabilizadas proporciona um aumento de rigidez da plataforma e, conseqüentemente, um aumento da velocidade crítica.

3.7 – Barreiras de vibração

3.7.1 – Trincheiras

Uma parte significativa das vibrações que causam maior incomodidade e efeitos mais nocivos propaga-se junto à superfície do terreno. As ondas Rayleigh-Ondas R- são aquelas que apresentam a velocidade de propagação mais reduzida, portanto com maior probabilidade de ser igualada pela velocidade de circulação dos comboios, e são geradas precisamente pela interação entre as ondas volumétricas junto à superfície onde se dá a transição entre o semi-espaço infinito - terreno e o ar.

O controlo da propagação dessas vibrações pode, portanto, ser feito impedindo a sua transmissão junto à superfície, criando uma trincheira vazia ou preenchida, através da qual essas ondas não se propaguem. Em teoria, a trincheira vazia apresentará melhores resultados no que respeita à propagação das ondas embora, na prática, seja algo de difícil execução.

Hung *et al.*, (2004) recorrendo à modelação de trincheiras com e sem preenchimento, mostram que, em geral, considerando os efeitos estáticos e dinâmicos das cargas em movimento, as últimas são mais eficientes no controlo da transmissão das vibrações. A utilização de trincheiras no controlo de vibrações teve origem no isolamento das fundações de máquinas.

O dimensionamento de uma trincheira destina-se a determinar a sua geometria (profundidade e largura), as características do material de preenchimento e o seu posicionamento relativamente à fonte de excitação (Ahmad *et al.*, 1991). A importância relativa das dimensões da trincheira são dependentes de estas serem preenchidas ou não. Assim, no caso de trincheiras ocas, a largura da mesma não é importante, à excepção do caso de trincheiras baixas, com profundidade da ordem de grandeza do comprimento da onda R. Neste caso, ambas as dimensões são relevantes. No caso de trincheiras preenchidas, tanto a largura e profundidade como as características do material de enchimento são importantes. Conclusões

semelhantes são obtidas por Hu (2004), que desenvolveu análises tridimensionais pelo MEF e analisou diversas medidas de mitigação das vibrações devidas à circulação de comboios de alta velocidade.

Segundo Hung *et al.*,(2001), a profundidade da trincheira deve ser da ordem de grandeza do comprimento de onda das ondas de superfície para ser eficiente. Para uma gama de velocidades entre 150 e 250 km/h, ondas com frequências da ordem dos 5Hz têm comprimentos de onda entre 8 e 14 m, enquanto que, para frequências elevadas, por exemplo de 50 Hz, os comprimentos de onda oscilam entre 0,8 e 1,4 m. Assim, as trincheiras de dimensões correntes são eficientes apenas para as frequências médias a altas.

A ilustrar esta regra, elaborou-se um modelo simples de uma fundação de comportamento elástico sujeita a um carregamento harmónico de 10 Hz (Fig. 3.3) e calculou-se a resposta de um ponto à superfície, tal como indicado na figura. Os cálculos foram elaborados com a versão educacional do programa Quake/w (ver 4.2).

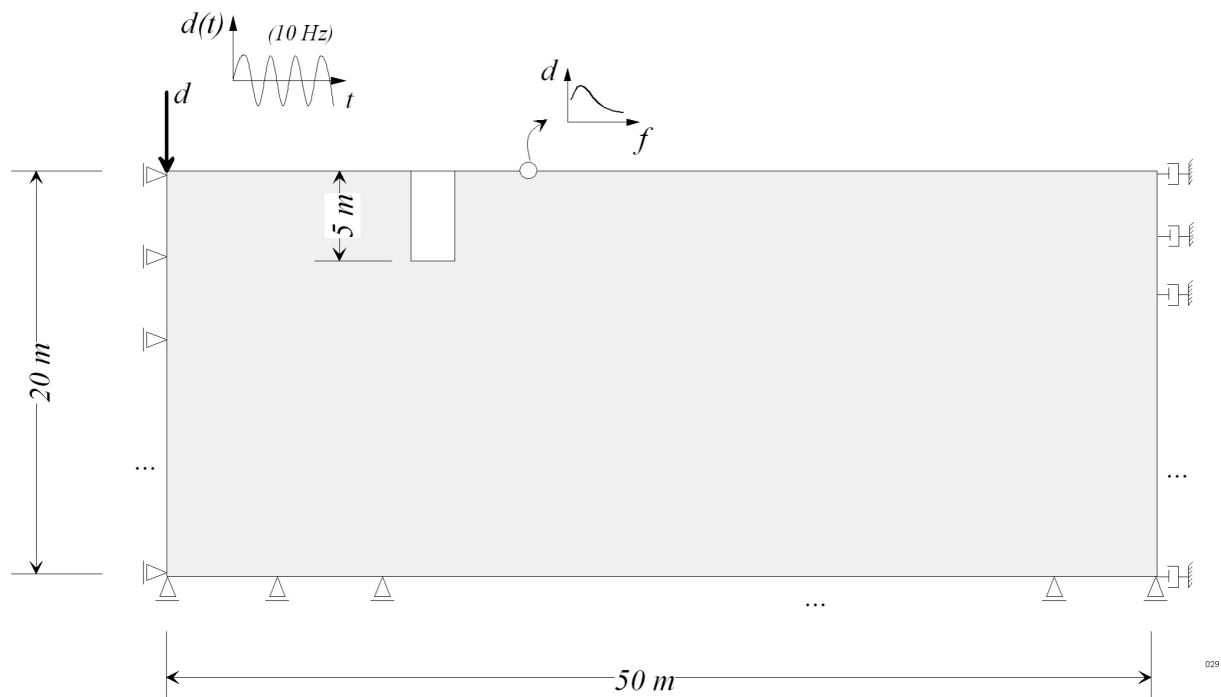


Fig. 3.3 – Modelo simplificado para estudo da eficiência da trincheira

Na Fig. 3.4 apresenta-se a resposta calculada no ponto de referência. Para uma excitação de 10 Hz, os espectros de deslocamento mostram que as frequências

mais altas são deprimidas (acima de 13 Hz) por acção da trincheira, enquanto que para as frequências mais baixas não há praticamente alteração da resposta.

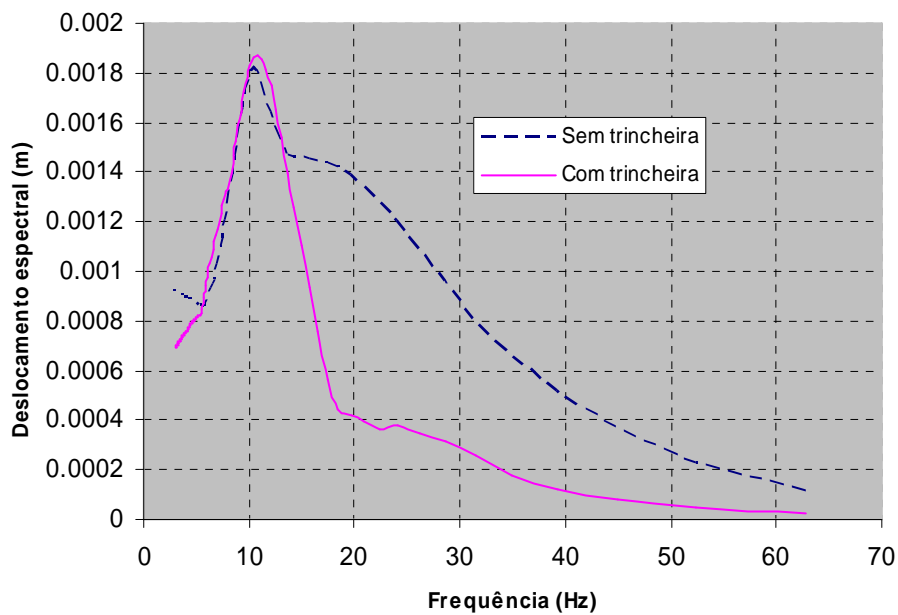


Fig. 3.4 – Deslocamento espectral vertical

Ahmad *et al.*, (op. cit.) avaliaram ainda a variação da eficiência das trincheiras com relação à origem da perturbação. Na Fig. 3.5 apresentam-se os resultados dos cálculos de modelação efectuados por aqueles autores nesse estudo, para trincheiras ocas ou preenchidas com betão.

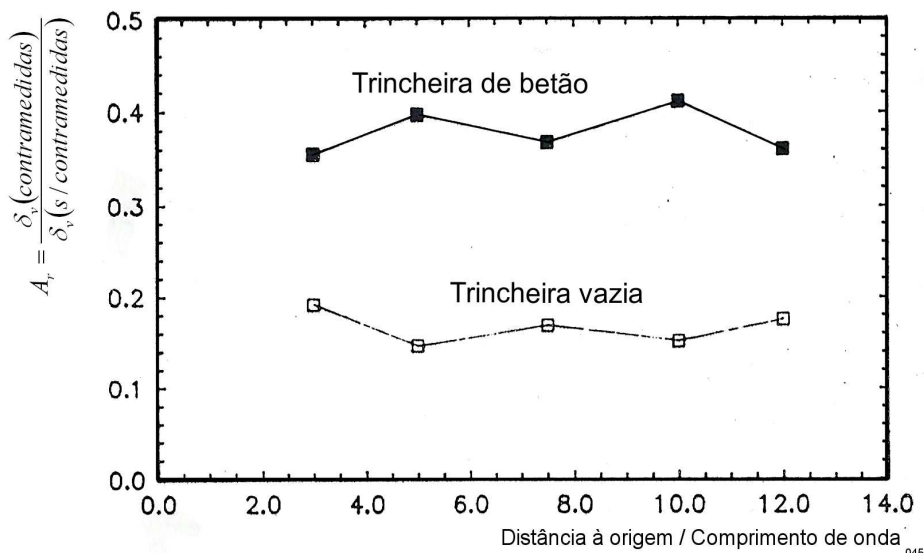


Fig. 3.5 – Estudo da variação da eficiência de trincheiras com a distância à origem

Do diagrama é possível verificar também que a eficiência das trincheiras não é afectada com a distância à origem, embora seja necessário referir que, quanto maior a distância, maior é a extensão de terreno sujeito às vibrações. O estudo refere-se apenas à eficiência depois da trincheira. Por outro lado, é possível verificar que a eficiência da trincheira vazia é muito superior à da trincheira com enchimento, como seria expectável.

A explicação tem a ver com o facto de a incidência de uma onda R na trincheira dar origem, devido à transição de meio, à reflexão de ondas R, à geração de ondas P e S e transmissão de ondas R (Fig. 3.6). Ao fenómeno geração de ondas P e S a partir de ondas R incidentes numa barreira de vibração dá-se o nome de conversão de modo. Se a trincheira estiver preenchida, a quantidade de vibrações que a atravessa é elevada, ao contrário do que se passa numa trincheira oca. Nesta última, a vibração remanescente após a trincheira deve-se fundamentalmente às ondas (P e S) irradiadas da base da mesma, as quais, com a distância, se convertem parcialmente em ondas R.

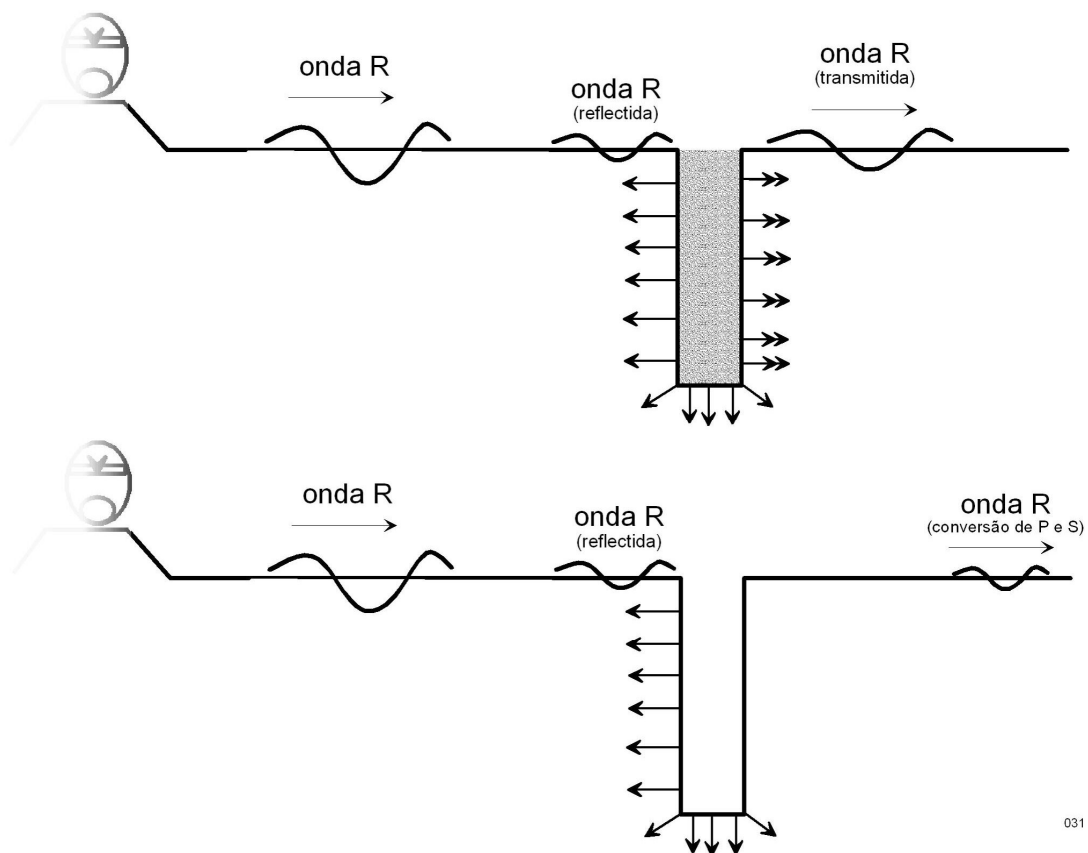


Fig. 3.6 – Mecanismos de transmissão, reflexão e conversão de ondas nas trincheiras

3.7.2 – Blocos de controlo das vibrações

As camadas de solo sobre um substrato rochoso têm um comportamento dinâmico condicionado por essa barreira natural, não sendo possível existirem modos de vibração com frequências inferiores a $C_p/4h$ ou a $C_s/4h$, sendo h a altura da fundação acima do substrato rochoso, para as vibrações de compressão verticais ou para as vibrações de ondas de corte, respectivamente (Hung *et al.*, 2001). Tirando partido desse facto, para impedir ou limitar a propagação de vibrações no solo de fundação de um aterro ferroviário pode-se construir um bloco de controlo de vibração (Takemiya *et al.*, 1995). Na Fig. 3.7 ilustra-se esquematicamente o funcionamento do sistema. O princípio de funcionamento consiste no aumento da frequência de corte reduzindo o valor de h , pela introdução de uma barreira à propagação das vibrações. Essa barreira pode ser construída antes da colocação do aterro, sendo materializada através de uma laje ou, durante o funcionamento da linha de caminho de ferro, recorrendo às técnicas de *jet-grouting*. Em princípio, a construção de uma laje implica a realização de escavações de monta, com os consequentes custos e dificuldades de execução. Recorrendo à técnica de *jet-grouting* os custos são mais limitados podendo esta técnica ser aplicado antes ou após a entrada em funcionamento da linha.

A eficiência do método aumenta com a rigidez dos blocos, o que pode ser conseguido à custa do aumento da sua espessura ou da rigidez do material que os compõe. Em qualquer caso, para as dimensões normais, o bloco não impede totalmente a vibração.

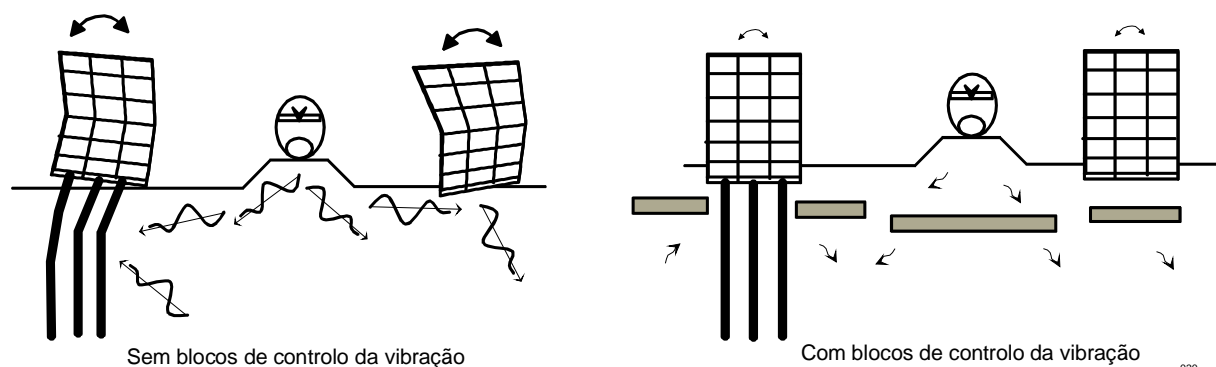


Fig. 3.7 – Funcionamento dos blocos de controlo de vibração (adaptado de Takemiya *et al.*, <http://www.aisawa.co.jp>)

3.8– Laje flutuante

A utilização de lajes flutuantes constitui um processo de controlo das vibrações muito usado em comboios urbanos do tipo metropolitano ou em algumas linhas de alta velocidade, como por exemplo no Japão (Esveld, 2001).

Para além das vantagens relacionadas com o controlo de vibração, as vias de caminho de ferro assentes sobre lajes apresentam menores custos de manutenção, apesar de o custo inicial ser bastante superior.

As vantagens das vias assentes sobre uma laje são diversas: baixo custo de manutenção (valores típicos entre 20 e 30% do custo de manutenção de uma via balastrada); baixo peso (vantajoso em obras de arte); altura reduzida (mais importante em túneis e outras situações em que o espaço disponível é reduzido); redução dos níveis de vibração; execução mais expedita (em especial recorrendo à pré-fabricação), entre outras.

No que respeita ao controlo de vibrações, parte das vantagens de uma via assente numa laje podem ser interpretadas recorrendo à expressão da velocidade crítica da viga de Winkler. De acordo com esta expressão, o aumento da velocidade crítica pode ser conseguido aumentando o valor da rigidez à flexão da viga (EI) a par da redução da massa da mesma. As soluções de via assente em laje cumprem ambos os desideratos. Com efeito, apesar de, em geral, o momento de inércia ser menor, comparativamente com aquele que se obtém com as espessuras habituais de via balastrada, o módulo de elasticidade do betão é muito superior ao do balastro e, por outro lado, a massa por unidade de comprimento é também inferior.

Outra parcela do controlo de vibrações resultante da aplicação de lajes flutuantes é conseguida nos casos em que a mesma apoie numa estrutura em betão armado ou equivalente. Nesses casos, o apoio entre a laje e a estrutura pode ser efectuado com recurso sistemas em materiais elastoméricos (Fig. 3.8).

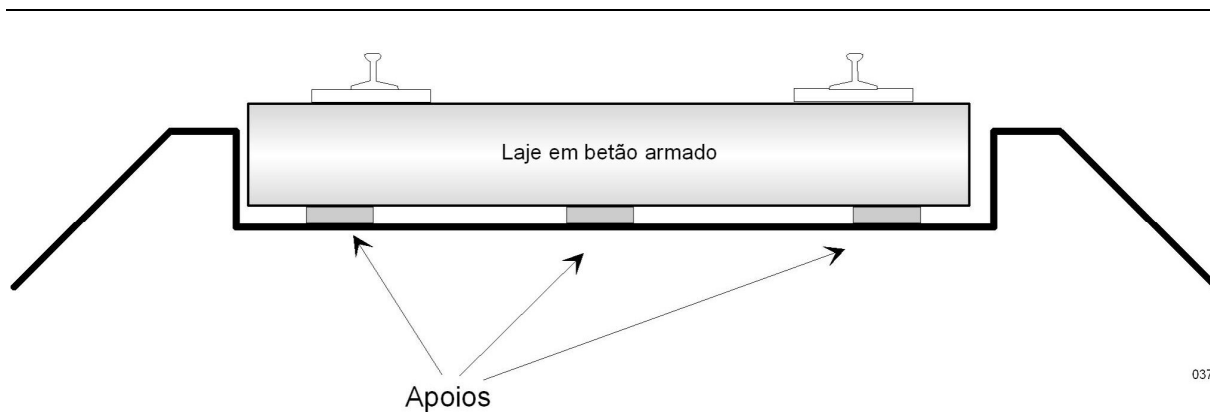


Fig. 3.8 – Laje flutuante para controlo de vibrações

De acordo com Wilson *et al.*,(1983), para o sistema ser eficiente, a massa da laje deve ser equivalente à massa da carruagem e a três vezes a massa não suspensa do bogie. É necessário salientar que os pressupostos deste sistema são os de baixar uma parte do espectro de vibração devida à circulação, forçando-as para frequências abaixo dos 20-25 Hz. Ora, ao forçar a vibração para esta gama de frequências, pode-se criar um efeito nefasto no caso de a fundação entrar em ressonância precisamente nessa gama de frequências.

Apesar de, reconhecidamente, as vias não balastradas apresentarem diversas vantagens, também apresentam alguns inconvenientes. Em primeiro lugar encontra-se, naturalmente, o maior custo inicial. Por outro lado, do ponto de vista ambiental, são sistemas que dão origem a maior ruído ambiente (para frequências mais altas), são estruturas pouco adaptadas a rectificações do traçado e, também, no caso de descarrilamento, são de reparação mais complexa do que as vias balastradas.

Existem diversas variantes de vias não balastradas, assentes sobre laje. Embora a sua discussão pormenorizada saia fora do âmbito do presente trabalho, interessa referir, por exemplo, que, neste tipo de vias, os carris podem ser embebidos na laje ou presos de forma tradicional, usando os dispositivos de fixação tradicionais.

Na Fig. 3.9 apresenta-se um exemplo de via férrea assente em laje flutuante. Neste exemplo, o carril está embebido na laje e o balastro disposto lateralmente tem apenas funções de protecção.

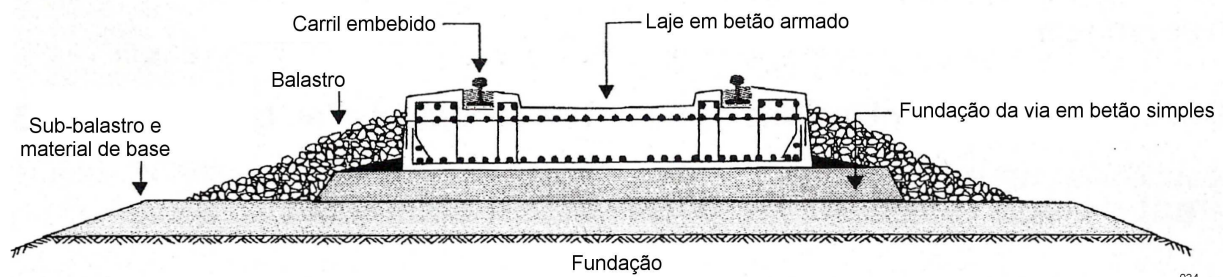


Fig. 3.9 – Via férrea assente em laje flutuante

3.9– Vigas flutuantes

Uma extensão do sistema de laje flutuante é o sistema de “viga flutuante” ou Deck Track. O sistema consiste numa viga em caixão, em tudo semelhante a uma estrutura de ponte em caixão. Esta estrutura apoia directamente, de forma contínua, no solo de deficientes características mecânicas, podendo ser enterrado neste (Fig. 3.10).

Com este sistema, há compensação do peso da estrutura em relação ao solo escavado, pelo que não há lugar a assentamentos. Por outro lado, do ponto de vista dinâmico, a estrutura em caixão apresenta, como foi dito, peso reduzido mas também elevada rigidez, contribuindo, assim, por esses dois aspectos, de forma decisiva, para o aumento da velocidade crítica e, conseqüentemente, para a redução dos fenómenos dinâmicos devidos à circulação (Madshus 2001).

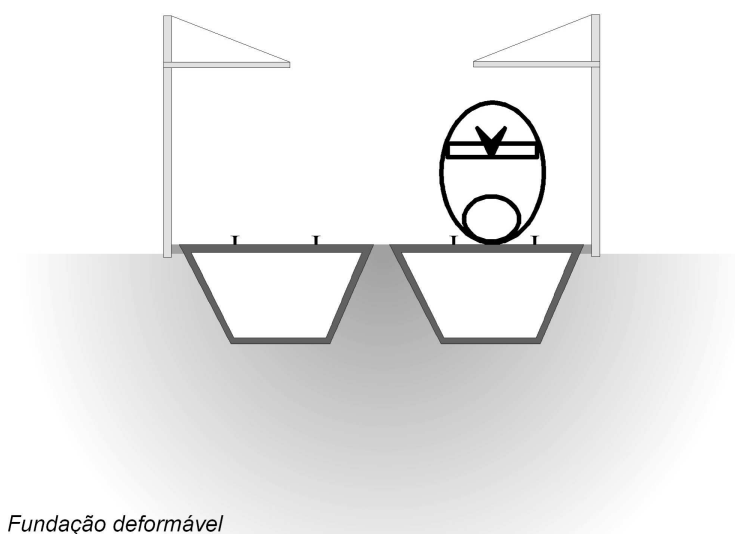


Fig. 3.10 – Via em caixão vazado continuamente apoiado na fundação

4 – LINHAS DE INVESTIGAÇÃO ASSOCIADAS AO ESTUDO DA GERAÇÃO, PROPAGAÇÃO E MITIGAÇÃO DE VIBRAÇÕES

4.1 – Introdução

No presente capítulo apresentam-se linhas de investigação relativas ao estudo dos mecanismos de geração e propagação de vibrações de baixa frequência, devidas à circulação de comboios de alta velocidade, tendo em vista o estudo das medidas mais adequadas para a sua mitigação.

Tendo presente a oportunidade e a necessidade de dominar o conhecimento associado à questão das vibrações resultantes da circulação de comboios de alta velocidade, devida à implementação da alta velocidade em Portugal, as linhas de investigação serão direccionadas no sentido da sua aplicação quer à RAVE, quer à REFER.

É neste contexto que se enquadram as propostas do presente plano de investigação, cujos objectivos fundamentais são:

- avaliação da potencial ocorrência, em Portugal, de fenómenos de amplificação das vibrações devidas a comboios de alta velocidade, com identificação dos locais críticos;
- caracterização desses locais do ponto de vista do seu comportamento dinâmico, recorrendo aos dados de prospecção existentes e estabelecimento/execução de programas de prospecção que permitam completar os dados disponíveis;
- desenvolvimento de modelos de análise para a previsão do fenómeno de amplificação das ondas sísmicas e estudo de medidas de mitigação dos seus efeitos adequadas a cada caso;

-
- elaboração de propostas de soluções de mitigação dos efeitos das vibrações e recomendações suportadas pela caracterização efectuada e pelos modelos desenvolvidos.

Apesar de, no presente Programa de Investigação ser dada ênfase à componente geotécnica dos aspectos de geração e propagação de vibrações em resultado da circulação dos comboios de alta velocidade, é oportuno referir que se trata de um assunto com implicações em diversos ramos da Engenharia. Com efeito, os problemas das vibrações colocam-se em diversos tipos de estruturas, nomeadamente, em obras de arte, relacionando-se, neste caso, com a teoria das Estruturas. Já para vibrações de frequência mais elevadas, na gama audível, a abordagem dos problemas coloca-se ao nível da acústica. Assim, o LNEC, desenvolvendo a sua actividade em diversas áreas da Engenharia Civil, encontra-se numa situação privilegiada para a abordagem dos diversos problemas indicados, tendo em consideração a sua interdisciplinaridade.

4.2– Linha de Investigação 1: Modelação da geração, propagação e mitigação de vibrações

Da revisão do estado da arte efectuada, ficou patente que é necessário aprofundar os conhecimentos ao nível da modelação conjunta da geração e propagação das vibrações. Com efeito, as vibrações geradas pela circulação dos comboios, são o resultado de interações dinâmicas entre o material circulante e a resposta da superestrutura ferroviária e respectiva fundação.

Muitos modelos, consideram apenas uma das fontes da geração de vibrações, o movimento do campo de tensões gerados pelas cargas transmitidas pelos rodados dos bogies à fundação. No entanto, esta visão simplificada do fenómeno não contabiliza toda a gama de frequências, nem a verdadeira grandeza das vibrações resultantes. É necessário desenvolver modelos mais completos, embora necessariamente, com algumas simplificações, que permitam quantificar, o mais detalhadamente possível, as cargas dinâmicas. Os mecanismos de geração das cargas devem ser integrados num modelo numérico que permita contabilizar o carácter marcadamente tridimensional do fenómeno e a natureza quase infinita do

meio e, dessa forma, estudar quer o efeito das vibrações na superestrutura ferroviária, quer na sua fundação, quer ainda nas estruturas adjacentes.

Por outro lado, os níveis de deformação atingidos para velocidades de circulação mais elevadas, próximas da velocidade crítica, provocam respostas acentuadamente não lineares dos solos. Acresce a este facto, a natureza multifásica dos solos que condiciona o seu comportamento, implicando a necessidade de considerar modelos reológicos que contemplem estes aspectos. A modelação destes efeitos poderá ser conseguida através de um programa de análise de meios contínuos baseado no método dos elementos finitos, elementos de fronteira ou no método das diferenças finitas. A consideração dos métodos híbridos que conjugam as potencialidades dos diversos métodos pode também ser encarada.

No que respeita à superestrutura ferroviária, especial atenção deve ser dispensada ao comportamento dinâmico do balastro. Com efeito, as vibrações provocadas pela circulação ferroviária, apresentam uma gama de frequências com um espectro relativamente alargado, e uma parte significativa dessas frequências, pode interferir com a frequência de ressonância do balastro provocando a sua instabilização. Os efeitos nefastos sobre a via férrea são o de comprometer a segurança de circulação e, ao mesmo tempo, aumentar os custos associados à manutenção da via. A modelação do comportamento do balastro à excitação resultante da circulação dos comboios, permitirá antever o problema e dimensionar as medidas de mitigação mais adequadas. Pela natureza do material, predominantemente granular, a modelação poderá ser feita recorrendo ao método dos elementos discretos.

A concretização desta linha de investigação tem como objectivo final o desenvolvimento das metodologias mais adequadas para o estudo da geração e propagação de vibrações e a sua incidência na superestrutura ferroviária, nas estruturas adjacentes e na percepção humana.

A disponibilidade de tais ferramentas permite, no caso de vias novas, a realização do dimensionamento das linhas de alta velocidade tendo em consideração a minimização dos efeitos nefastos das vibrações ou, no caso das vias existentes onde o fenómeno se venha a verificar, o dimensionamento das contramedidas mais adequadas.

A consideração atempada da problemática da geração-propagação-mitigação das vibrações permite que a introdução da alta velocidade em Portugal venha a ocorrer sem necessidade de condicionar a implementação do projecto pela detecção *a posteriori* das situações críticas. Por outro lado, o LNEC colocar-se-à em posição privilegiada, na assessoria que presta às obras públicas de grande envergadura e impactos social e económico, em Portugal.

4.3– Linha de Investigação 2: Caracterização do comportamento dinâmico de solos moles. Aplicação aos eixos ferroviários de Alta Velocidade

O sucesso da aplicação dos modelos de geração e propagação de vibrações e consequente estudo das medidas de mitigação pressupõe, para além da adequabilidade dos próprios modelos, a representatividade dos parâmetros que caracterizam o comportamento dos diversos materiais envolvidos na análise.

A primeira linha de investigação proposta (parágrafo 4.2) visa a obtenção dos modelos mais adequados para a simulação deste fenómeno complexo. A segunda linha de investigação, a desenvolver complementarmente com a primeira, destina-se a avaliar os métodos mais adequados para proceder à caracterização do comportamento dinâmico dos solos, tendo em vista a obtenção dos parâmetros necessários para esses modelos e a sua aplicação prática.

A caracterização dos materiais deverá ser conduzida tendo em consideração a sua natureza e o tipo de acções a que irão ser submetidos, em resultado da circulação ferroviária de alta velocidade.

É necessário proceder à revisão detalhada dos métodos de ensaio em laboratório visando a avaliação da sua adequabilidade para a caracterização do comportamento dinâmico dos diversos materiais, tendo em atenção tipo de deformações envolvidas nos ensaios e a sua comparação com aquelas que ocorrem em resultado das vibrações geradas pela passagens dos comboios.

Para além da realização de ensaios laboratoriais, na caracterização do meio de propagação das ondas, deverão também ser realizadas campanhas de ensaios *in*

situ, o que desempenha um papel fundamental na sua caracterização dado que incidem sobre volumes significativos dos materiais, tal como eles ocorrem, sem perturbação devida à amostragem. Por outro lado, considerando que a circulação ferroviária, provoca uma excitação dinâmica com características especiais, com um conteúdo significativo de vibrações de baixa frequência, é necessário conduzir as campanhas de caracterização de forma a verificar o comportamentos dos materiais para essa gama de frequências.

A avaliação do comportamento da via férrea também deve ser feita recorrendo à medição das vibrações de troços experimentais, para diversas velocidades de circulação dos comboios. A concretização dessas campanhas apresenta um duplo objectivo: por um lado, permite o conhecimento da resposta real do protótipo e a avaliação directa da eficiência de eventuais medidas de mitigação, comparando a resposta obtida antes e depois da sua implementação; por outro, conjugando a avaliação da resposta medida com a prevista através dos modelos desenvolvidos, é possível, por retro-análise, a aferição dos parâmetros que caracterizam os materiais envolvidos, à luz desse modelo.

PARTE B - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

1 – INTRODUÇÃO

Em Portugal serão construídas, dentro em breve, algumas centenas de quilómetros de linhas ferroviárias de alta velocidade. Para além disso, Portugal dispõe, actualmente, de uma linha que une Lisboa ao Porto (Linha do Norte, LN) onde, nalguns troços, já se praticam velocidades elevadas, da ordem dos 220 km/h. Enquanto que a construção da rede de alta velocidade ainda não se iniciou, a LN encontra-se em operação e em processo de modernização.

A modernização da LN compreende a reformulação da infra-estrutura ferroviária no sentido de a adaptar à circulação do comboio pendular, com tecnologia basculante, a velocidades elevadas. Parte dessa renovação está concluída e outra parte está em fase de obra. A actual LN segue, na sua essência, o traçado original em planta, embora tenha também alguns troços em variante. Nesse traçado, a LN atravessa diversas zonas potencialmente problemáticas do ponto de vista da geração e propagação de vibrações, com os consequentes efeitos nocivos que daí podem advir. Duas zonas potencialmente problemáticas são a zona do vale do Tejo e a zona de Aveiro. Para além destas, outras zonas onde sejam atravessados vales aluvionares ou lagunares, podem também ser causadoras de problemas.

O traçado da RAVE não está totalmente estabelecido. No entanto, o traçado previsto atravessará, para além das zonas referidas, outras que se prevê serem igualmente problemáticas, como seja, no Algarve a travessia do Rio Guadiana.

Aliás, muito recentemente, foi considerada a hipótese de a linha ferroviária de alta velocidade entre Lisboa e Porto partilhar com a LN alguns troços, nomeadamente os que correspondem aos acessos a Lisboa e ao Porto. Nesta hipótese, o traçado novo limitar-se-á ao troço Carregado-Mealhada, ao que corresponde uma extensão de cerca de 230 km. Os restantes troços, à saída de Lisboa e à chegada ao Porto, serão comuns à LN, correspondendo no total a cerca de 75 km.

Em diversos países, a circulação de comboios de alta velocidade em zonas de piores características geotécnicas deu origem a problemas de amplificação de vibrações, o que obrigou à limitação da velocidade de circulação e à implementação

de campanhas de caracterização das fundações para o estudo do problema. Em face dos resultados obtidos, foram detectadas as principais causas das vibrações e desenvolvidos estudos, com o objectivo primordial de determinar as medidas de mitigação mais adequadas para repor as condições de circulação previstas para a exploração dessas linhas.

Apesar de, em Portugal, haver uma percepção clara no meio científico, do problema de amplificação das deformações devido à circulação a alta velocidade, não existe, actualmente, um levantamento pormenorizado dos locais onde o fenómeno poderá ocorrer. Além disso, não se dispõe, de imediato, de modelos testados e calibrados, necessários para o estudo do problema e para o dimensionamento das medidas de mitigação mais adequadas.

É neste contexto que se enquadram as propostas do Plano de Investigação apresentado na Parte A do presente documento, cujos objectivos fundamentais são:

- avaliação da potencial ocorrência, em Portugal, de fenómenos de amplificação das vibrações devidas a comboios de alta velocidade, com identificação dos locais críticos;
- caracterização desses locais do ponto de vista dinâmico, recorrendo aos dados de prospecção existentes e estabelecimento/execução de programas de prospecção que permitam completar os dados disponíveis;
- desenvolvimento de modelos de análise, para a previsão do fenómeno de amplificação das ondas geradas pela circulação de comboios de alta velocidade e estudo de medidas de mitigação adequadas a cada caso;
- elaboração de propostas de soluções de mitigação e de recomendações suportadas pela caracterização efectuada e pelos modelos desenvolvidos.

Tendo em consideração os objectivos acima referidos, apresentam-se seguidamente propostas para o enquadramento de recém licenciados no âmbito do Programa de Pós-graduação e propostas para três teses de Mestrado e uma tese de Doutoramento, com os respectivos planos orientadores de trabalhos e correspondente estimativa de custos.

A programação das teses tem em atenção o escalonamento temporal entre os diversos estudos propostos, bem como a oportunidade resultante dos

desenvolvimentos actuais ao nível das infra-estruturas ferroviárias, nomeadamente da renovação da Linha do Norte e da futura execução da rede de alta velocidade.

O objectivo integrado das teses propostas é o de proporcionar ao meio científico e técnico as ferramentas de previsão e análise do problema de geração e transmissão de vibrações de baixa frequência em resultado da circulação de comboios de alta velocidade, fazendo simultaneamente o estudo das situações que, em Portugal, são susceptíveis de sofrer esse problema, indicando para cada caso a(s) medida(s) de mitigação mais adequadas.

2 – PLANO DE ESTUDOS DE PÓS-GRADUAÇÃO

2.1 – Plano de enquadramento de recém licenciados

O desenvolvimento das linhas de investigação propostas na Parte A do presente documento apresenta diversas oportunidades de enquadramento de recém licenciados nas actividades necessárias para a sua concretização.

Assim, prevê-se a possibilidade de recorrer a recém licenciados em Engenharia Civil, em Engenharia Geológica ou em Geologia e em Engenharia Electrotécnica. Os trabalhos previstos para cada uma destas especialidades são apresentados nos parágrafos seguintes.

2.1.1 – Levantamento, recolha e organização da informação já existente na Linha do Norte

A anteceder a realização de campanhas de prospecção, que incluam a realização de ensaios *in situ* ou a recolha de amostras para ensaios de laboratório, para a caracterização dos locais atravessados pelas linhas de alta velocidade, quer as existentes da LN, quer as futuras da RAVE, deve ser feito o levantamento, recolha e compilação da informação já existente. Com efeito, no âmbito dos projectos de renovação da LN, foram realizadas diversas campanhas de caracterização geotécnica que podem constituir uma importante informação de base para o estudo que se propõe. Essa informação está disponível na REFER, no Projecto de Modernização da Linha do Norte, mas não se encontra devidamente compilada nem organizada em termos globais. A divisão em troços e sub-troços adoptada para a LN, e a calendarização das obras, fez com que a informação de caracterização geotécnica fosse obtida em diferentes fases do processo de modernização, cujos trabalhos se iniciaram em 1995. Parte dessa informação é, pois, anterior ao início dos trabalhos. Além disso, como não visava a caracterização do comportamento dinâmico dos solos, é natural que não inclua informação sobre este aspecto mas,

por outro lado, constitui uma base importante de elementos de caracterização geotécnica relevante para uma primeira abordagem do problema.

Estes estudos servirão de base ao desenvolvimento da tese de Mestrado T2 – “Métodos de caracterização dinâmica de solos moles para o estudo do comportamento dinâmico em linhas ferroviárias de alta velocidade” (parágrafo 2.2.2).

O levantamento, recolha e organização dos elementos disponíveis constitui uma tarefa que pode ser desenvolvida por licenciados na área da Geologia ou por licenciados em Engenharia Civil mas com formação complementar em Geologia.

Os licenciados que participem neste projecto adquirirão um conhecimento privilegiado sobre as condições geotécnicas dos locais atravessados pelas linhas de alta velocidade, para além de uma experiência considerável na interpretação de ensaios *in situ* e de laboratório.

Prevê-se que a tarefa de recolha, compilação e organização da informação existente, possa ser realizada num prazo de 6 meses.

2.1.2 – Análise e tratamento dos resultados obtidos em campanhas de medição de vibrações em troços da Linha do Norte

Numa fase posterior à realização dos estudos acima referidos, serão efectuadas campanhas de medição experimental das vibrações devidas à passagem de comboios a diversas velocidades, em troços experimentais da LN. Em resultado dessas campanhas, serão obtidos grandes volumes de informação, correspondentes aos valores medidos pelos dispositivos instalados nas secções experimentais. Esses resultados requerem posterior análise e tratamento, por forma a extrair a informação pretendida, nomeadamente a que permitirá, por retroanálise, a estimativa dos parâmetros dos solos considerados nos modelos de comportamento e a avaliação da eficiência de eventuais medidas de mitigação.

No dimensionamento do sistema de aquisição/processamento de dados há diversos factores a considerar, destacando-se os seguintes:

- a capacidade de aquisição das conversões analógico-digitais;
- a adequação dos diversos dispositivos de medição com relação às frequências e amplitude dos movimentos a medir;

-
- os problemas eléctricos relacionados com a presença da catenária;
 - a eventual necessidade de filtros electrónicos ou digitais para eliminação do ruído.

A contribuição de um licenciado em Engenharia Electrotécnica constituirá, pois, certamente, uma mais-valia na realização e interpretação das campanhas de medição das passagens experimentais de comboios, enquadrando-se no desenvolvimento da tese de Mestrado T3 - “Medição de vibrações em solos moles geradas pela circulação de comboios de alta velocidade” (parágrafo 2.2.3). Atendendo à natureza dos trabalhos a desenvolver por este recém licenciado, prevê-se a necessidade e o interesse em que o seu enquadramento seja efectuado em conjunto com o Centro de Instrumentação Científica do LNEC.

Os aspectos relacionados com o dimensionamento do sistema de aquisição de dados, realização de campanhas de medição, e interpretação de resultados têm uma duração prevista de 5 meses, pelo que a colaboração de um licenciado em Engenharia Electrotécnica se deve prolongar por igual período.

2.1.3 – Colaboração no desenvolvimento e aplicação de métodos numéricos, e na interpretação dos resultados das campanhas de ensaios

A tese de Doutoramento T4 – “Modelação do comportamento dinâmico de linhas de alta velocidade assentes sobre fundações deformáveis”, que constitui o culminar lógico do Programa de Pós-Graduação proposto, está explicitada no parágrafo 2.3 e incidirá na modelação do comportamento dinâmico de linhas de alta velocidade assentes sobre fundações deformáveis. A elaboração desta tese implica o desenvolvimento e aplicação de modelos numéricos, a interpretação de ensaios de caracterização geotécnica e a interpretação das campanhas de medição de passagens experimentais de comboios.

Estes trabalhos podem ser desenvolvidos com a colaboração de licenciados em Engenharia Civil, que adquirirão uma vasta experiência na aplicação dos modelos numéricos, nomeadamente na realização de retroanálises, na interpretação dos ensaios de caracterização do comportamento dinâmico dos solos e nos sistemas de

aquisição de dados, correspondentes às medições experimentais das passagens dos comboios. Atendendo à natureza das tarefas a desenvolver, os recém licenciados deverão possuir formação complementar no desenvolvimento e aplicação de modelos numéricos em análises dinâmicas.

A complexidade dos problemas a analisar, de acordo com a proposta de plano apresentada no parágrafo 2.3 e a necessidade de formação complementar acima referida, permite prever que as tarefas contem com a participação de um Engenheiro Civil por um período de um ano.

2.1.4 – Custos associados à colaboração de recém licenciados

Os custos correspondentes à participação de recém licenciados, podem ser estimados considerando os valores atribuídos pelo LNEC, para as bolsas de Iniciação à Investigação Científica, às quais corresponde um subsídio mensal de 1247 €. Por outro lado, prevê-se que a participação possa ser desenvolvida considerando uma taxa de ocupação de 50%. Assim, os custos calculados para a participação de recém licenciados está resumido no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Custos associados à participação de recém licenciados no Programa de Pós-Graduação (valores arredondados)

	50% Subsídio mensal (€)	Duração (meses)	Total (€)
Levantamento, recolha e organização da informação já existente na Linha do Norte	623.5	6	3741
Análise e tratamento dos resultados obtidos em campanhas de medição de vibrações em troços da Linha do Norte	623.5	5	3118
Colaboração no desenvolvimento e aplicação de métodos numéricos, e na interpretação dos resultados das campanhas de ensaios	623.5	12	7482
		Total (€)	14341

A participação dos recém licenciados nos estudos referidos, proporcionará uma importante formação para o prosseguimento de actividades de investigação científica e tecnológica, nomeadamente, para o eventual desenvolvimento de

dissertações de Mestrado e Doutoramento. No final da sua participação em cada um dos estudos, serão produzidos relatórios com a descrição dos resultados obtidos. Esses documentos, para além de servirem de base para o desenvolvimento dos diversos estudos de investigação subsequentes, passarão a integrar o *curriculum professional* dos seus autores e poderão servir, por exemplo, como relatório de estágio para conclusão dos estudos de licenciatura ou para ingresso em ordens profissionais, nos casos em que for aplicável.

2.2 – Teses de mestrado

2.2.1 – Aplicação de modelos bidimensionais ao estudo da geração, propagação e mitigação de vibrações - T1

A utilização de métodos numéricos de cálculo por parte das empresas de projecto tem sido vulgarizada nos últimos anos. A aplicação dessas ferramentas deixou de ser do âmbito exclusivo da investigação ou das grandes empresas de projecto, passando a ser praticamente do domínio público.

Para este desenvolvimento, muito contribuiu o aparecimento no mercado de programas com um razoável campo de aplicação, mas que se encontra em permanente mudança. Assim, para além dos programas de análise de estabilidade pelo método das fatias é corrente, hoje, a aplicação de modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos (MEF) para realizar análises de percolação ou de tensão-deformação em regime estático. Alguns dos programas comerciais de análise tensão-deformação pelo MEF apresentam também módulos destinados à resolução de problemas dinâmicos. Normalmente, esses programas visam a análise do comportamento de estruturas geotécnicas a acções sísmicas, mas podem ser usados também na resolução de outros problemas dinâmicos, nomeadamente os que se refere à propagação de vibrações.

É importante ainda acrescentar que os programas de utilização mais vulgarizada estão normalmente limitados a casos especiais de simetria, nomeadamente em deformação plana e/ou em simetria axi-simétrica. O problema de propagação de vibrações devidas a comboios de alta velocidade é, claramente, um problema

tridimensional, mas o seu estudo pode, dentro de certos limites, ser feito recorrendo a modelos planos.

Tendo em atenção este cenário, justifica-se o desenvolvimento de estudos que visem a quantificação do fenómeno de propagação de ondas através de modelos planos e o estudo, com recurso às mesmas ferramentas, dos diversos tipos de medidas de mitigação do fenómeno.

Um dos aspectos em que a aplicação dos modelos bidimensionais pode ser encarada, tem a ver com a facilidade em modelar de forma razoavelmente precisa, as condições reais da fundação de um aterro ferroviário. O modelo plano assim estabelecido, permite determinar, com uma aproximação razoável, o módulo de reacção do solo que pode ser usado no modelo da viga de Winkler, permitindo um estudo mais aproximado do fenómeno, com base neste modelo.

Para além disso, com este projecto, pretende-se avaliar o grau de adequação dos modelos planos ao estudo deste tipo de vibrações, quantificar o erro resultante da sua aplicação, e verificar, pelo menos numa primeira aproximação, a adequação e eficiência das diversas medidas de mitigação no controlo de vibrações. A verificação deste último aspecto poderá ser feita para várias situações-tipo, nomeadamente no que diz respeito às medidas de mitigação, à configuração das camadas de solos de fundação e à própria estrutura ferroviária.

Finalmente, após o estabelecimento de metodologias para o estudo da passagem de um comboio, iniciar-se-ão, com base nos modelos estabelecidos, estudos correspondentes aos efeitos resultantes do cruzamento de dois comboios, tendo em vista a avaliação do agravamento dos fenómenos dinâmicos e a avaliação da eficiência dos sistemas de mitigação das vibrações neste novo cenário.

Tratando-se de um trabalho a desenvolver no âmbito de uma tese de mestrado, recorrendo a meios de cálculo comerciais, a duração esperada para desenvolvimento deste trabalho é de oito meses. O programa de trabalhos proposto está apresentado no Quadro 2.2 e os respectivos custos no Quadro 2.3.

O desenvolvimento da dissertação de mestrado deve ser feito por um Engenheiro Civil do ramo de Estruturas ou de Geotecnia e que, em qualquer dos casos, tenha efectuado a parte escolar de um Curso de Mestrado em Mecânica dos Solos ou em

Geotecnia. A experiência no âmbito do projecto de infra-estruturas de vias de comunicação e em análise dinâmica de estruturas pelo MEF são também factores relevantes.

Quadro 2.2 – Proposta de programa de trabalhos para a aplicação de modelos bidimensionais no estudo da propagação e vibrações e de medidas de mitigação

	Meses							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Revisão bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■
Seleccção e estudo do programa de cálculo	■	■	■					
Verificação e calibração de modelos			■	■	■			
Simulação da passagem de comboios				■	■	■		
Simulação das medidas de mitigação					■	■	■	
Análise comparativa de resultados					■	■	■	■
Desenvolvimento da parte escrita		■	■	■	■	■	■	■

Actividades principais	■
Actividades complementares	■
Actividades de carácter pontual	■

Quadro 2.3 – Custos associados à elaboração da dissertação

	Unidade	Valor	Valor unitário (€)	Total (€)
1 Orientação	meses	2	3706	7412
2 Desenvolvimento da dissertação	meses	8	1247	9976
3 Aquisição de software	unidade	1	6000	6000
4 Aquisição de hardware	unidade	1	1250	1250
5 Aquisição de bibliografia	Valor global			500
			Soma	25138
6 Despesas gerais	Valor global			2514
			Custo total	27652
			Arredondamento	27700

Descrição

- 1- Actividade de orientação desenvolvida pelo investigador do LNEC, orientador da dissertação
- 2- Actividade desenvolvida pelo aluno de mestrado
- 3- Aquisição do programa de análise dinâmica pelo mef
- 4- Aquisição de microcomputador
- 5- Aquisição de bibliografia especializada sobre o tema

2.2.2 – Métodos de caracterização dinâmica de solos moles para o estudo do comportamento dinâmico em linhas ferroviárias de alta velocidade - T2

Uma parte fundamental dos estudos de geração e propagação de vibrações em infra-estruturas ferroviárias sobre solos moles é a caracterização dos terrenos envolvidos no fenómeno. O sucesso na aplicação dos algoritmos de previsão e no estudo das medidas de mitigação está, naturalmente, condicionado pela

possibilidade de dispor de parâmetros que representem de forma adequada os materiais geotécnicos envolvidos no processo.

Os parâmetros mais relevantes para as análises dinâmicas e os correspondentes métodos de caracterização *in situ* e laboratoriais habitualmente utilizados foram passados em revista no Programa de Investigação (Parte A do presente documento). De igual modo, tendo em atenção o traçado previsto para a RAVE e o actual traçado da LN, foram inventariadas, de forma preliminar, as zonas potencialmente problemáticas do ponto de vista da geração e propagação de vibrações.

Para uma quantificação mais objectiva dos locais problemáticos, os estudos de inventariação das baixas aluvionares e outras zonas problemáticas têm de ser aprofundados. Por outro lado, atendendo ao comportamento peculiar dos solos, em que alguns dos parâmetros que caracterizam o seu comportamento mecânico são dependentes dos níveis de deformação e da história de tensões, os aspectos relacionados com o método de ensaio ou a eventual amostragem podem ser determinantes nos planos de prospecção.

Tendo em atenção estes aspectos, interessa desenvolver estudos relacionados com os métodos de caracterização do comportamento dinâmico dos materiais ocorrentes nos locais seleccionados. Esses estudos visam definir a metodologia de prospecção mais adequada, tendo em consideração a necessidade de obter parâmetros representativos do comportamento dinâmico dos solos.

É necessário ter em atenção a escolha dos processos mais adequados para a caracterização, tendo em consideração a caracterização dos solos do âmbito da propagação de ondas de baixa frequência. Estes estudos incidirão sobre a caracterização laboratorial e sobre a caracterização *in situ*.

A metodologia desenvolvida será aplicada a algum dos troços inventariados no traçado da RAVE e da LN, procedendo-se à caracterização dos locais com o objectivo de efectuar estudos de propagação de vibrações e de aplicação das medidas de mitigação a esses locais. A aplicação prática dos estudos desenvolvidos pressupõe o estabelecimento de parcerias com as entidades ferroviárias portuguesas, RAVE e REFER, com vista à obtenção de elementos relativos aos traçados das linhas, às características do material circulante e também no sentido de

possibilitar o co-financiamento dos trabalhos, nomeadamente nas campanhas de prospecção e de caracterização geofísica.

A formação de base necessária para o desenvolvimento da dissertação de mestrado proposta é a de um Engenheiro Geólogo com conhecimentos sólidos na área de geofísica e em ensaios de laboratório. É ainda fundamental a frequência da parte escolar de um curso de Mestrado em Mecânica dos Solos ou de Geologia de Engenharia.

A duração da dissertação e o correspondente custo estão condicionados pela possibilidade de aplicar as metodologias desenvolvidas no campo. Supondo que os trabalhos de campo decorram com normalidade, prevê-se uma duração de oito meses para esta dissertação. No Quadro 2.4 detalha-se o programa de trabalhos correspondente a este estudo e, no Quadro 2.5, os correspondentes custos.

Quadro 2.4 – Proposta de programa de trabalhos para o estudo dos métodos de caracterização dinâmica de solos moles para o estudo do comportamento dinâmico em linhas de alta velocidade

	Meses							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Revisão bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■
Inventariação dos sítios problemáticos (RAVE)		■	■	■				
Inventariação dos sítios problemáticos (LN)			■	■	■			
Aplicação das metodologias					■	■	■	■
Análise dos resultados							■	■
Desenvolvimento da parte escrita			■	■	■	■	■	■

Actividade principal	■
Actividade complementar	■
Actividade de carácter pontual	■

Quadro 2.5 – Custos associados à elaboração da dissertação

	Unidade	Valor	Valor unitário (€)	Total (€)
1 Orientação	meses	1.5	3706	5559
2 Desenvolvimento da dissertação	meses	8	1247	9976
3 Campanhas de prospecção	unidade	3	3000	9000
4 Ensaios de laboratório	unidade	20	1250	25000
5 Aquisição de bibliografia		Valor global		500
			Soma	50035
6 Despesas gerais		Valor global		5003
			Custo total	55038
			Arredondamento	55100

Descrição

- 1- Actividade de orientação desenvolvida pelo investigador do LNEC, orientador da dissertação
- 2- Actividade desenvolvida pelo aluno de mestrado
- 3- Ensaios geofísicos e colheita de amostras para ensaios de laboratório
- 4- Ensaios de caracterização dinâmica em laboratório
- 5- Aquisição de bibliografia especializada sobre o tema

Os valores estimados para os ensaios de laboratório só podem, em rigor, ser estabelecidos no decurso dos estudos e da programação que for estabelecida. No entanto, para efeitos de estimativa de custos, e tendo em atenção os parâmetros mais indicados para a caracterização do comportamento dinâmico, estabeleceu-se um conjunto de ensaios considerados como adequados para esse fim. Assim, os valores indicados no Quadro 2.5 têm como base a realização dos seguintes ensaios para cada amostra de solo:

- peso específico das partículas;
- teor natural em água;
- limites de Atterberg;
- ensaio edométrico;
- ensaio triaxial dinâmico.

Relativamente às campanhas de prospecção, estas envolvem a realização de furos para a realização de ensaios *cross-hole* e *down-hole* e a colheita de amostras para a realização de ensaios de laboratório. Os custos apresentados, não incluem as operações de furação, nem a colheita de amostras para a realização dos ensaios acima referidos, admitindo-se que as despesas correspondentes serão suportadas pelas entidades directamente interessadas nos resultados.

2.2.3 – Medição de vibrações em solos moles geradas pela circulação de comboios de alta velocidade - T3

As campanhas de medição de vibrações correspondentes à passagem de comboios a alta velocidade têm sido usadas em diversos países como medida de avaliação do fenómeno de amplificação das vibrações, como medida de caracterização dos solos e, finalmente, como meio para a avaliação da eficiência das medidas de mitigação das vibrações.

A realização destas campanhas requer a montagem de um dispositivo relativamente complexo de sistemas de aquisição de dados e a disponibilidade de sistemas de análise dos registos obtidos. Entre os diversos aspectos a considerar, é necessário dimensionar o *layout* do sistema, os tipos de equipamentos destinados às medições

e as características desses mesmos equipamentos, tendo em consideração a gama de vibrações a medir.

Apesar de o dimensionamento do referido sistema, com especificação dos equipamentos de medição e aquisição de dados, ser parte integrante da dissertação, é possível estimar o seu custo, tendo em atenção a experiência de casos semelhantes. Assim, o dispositivo de medição deve compreender, uma unidade de aquisição de dados com diversos canais, geofones triaxiais de baixa frequência, acelerómetros triaxiais e transdutores de deslocamento. No Quadro 2.6 apresenta-se uma estimativa de custos para um sistema de aquisição de dados.

Quadro 2.6 – Estimativa de custos para o sistema de aquisição de dados

	Preço unitário	Quantidade	Sub-total
Transdutores de deslocamento, amplitude 150mm com conector final e 10m de cabo	825 €	10	8 250 €
Geofone triaxial, com frequência de 4.5Hz e sensibilidade de 0.7V, com 10m de cabo e acessórios de montagem	1 500 €	10	15 000 €
Accelerómetro triaxial com frequência de resposta de 3.0Hz-8000Hz e sensibilidade de 0.5V/g, com 10m de cabo	1 250 €	10	12 500 €
Unidade de leitura Data Logger, com 30 canais e ligação directa a computador ou a modem	25 000 €	1	25 000 €
		Total	60 750 €

O objectivo principal desta dissertação de Mestrado é o de preparar e aplicar um sistema de medição das vibrações que possa ser usado na RAVE, nos locais previamente levantados, onde possam existir fenómenos de amplificação das vibrações. A aplicação do sistema à RAVE será antecedida pela sua aplicação, verificação e calibração num troço da LN, preferencialmente onde tenha sido feita a caracterização geotécnica em resultado da dissertação anterior (T2).

O estabelecimento de parcerias com a REFER e a RAVE é indispensável à obtenção de dados relativos aos locais a estudar, à prossecução dos trabalhos e ao seu co-financiamento.

Os resultados das campanhas efectuadas serão interpretadas à luz dos modelos planos desenvolvidos na dissertação correspondente à “Aplicação de modelos

bidimensionais ao estudo da geração, propagação e mitigação de vibrações” (T1), procurando-se, por retro-análise, a aferição dos parâmetros que caracterizam o comportamento dinâmico dos solos nos locais estudados.

Os trabalhos a desenvolver no âmbito desta tese de Mestrado, implicam sólidos conhecimentos na área de geofísica e na área de aplicação de modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos. Assim, o perfil necessário para a sua concretização é relativamente alargado, podendo ser o de um Engenheiro Geólogo ou de um Geofísico com formação adicional no campo da aplicação de modelos matemáticos, nomeadamente do MEF, ou o de um Engenheiro Civil, com conhecimentos de geofísica.

A calendarização da dissertação de Mestrado será parcialmente condicionada pela possibilidade de efectuar a aplicação das metodologias desenvolvidas para a medição das vibrações em secções reais da linha férrea. Admitindo que, são estabelecidas as parcerias com as entidades ferroviárias e que, nessa hipótese, não haverá entraves especiais à realização das campanhas de medição, a duração previsível desta tese de Mestrado será de 8 meses.

Quadro 2.7 – Proposta de programa de trabalhos para a medição de vibrações em solos moles geradas pela circulação de comboios de alta velocidade

	Meses							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Revisão bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■
Dimensionamento do sistema de Aquisição		■	■	■				
Medição Troço experimental nº 1 (LN)				■				
Interpretação e análise dos dados				■	■	■	■	
Medição Troço experimental nº 2 (LN)					■			
Interpretação e análise dos dados						■	■	
Desenvolvimento da parte escrita	■	■	■	■	■	■	■	■

Actividade principal	■
Actividade complementar	■
Actividade de carácter pontual	■

Quadro 2.8 – Custos associados à elaboração da dissertação

	Unidade	Valor	Valor unitário (€)	Total (€)	
1	Orientação	meses	1.5	3706	5559
2	Desenvolvimento da dissertação	meses	8	1247	9976
3	Campanhas de medição	unidade	2	5000	10000
4	Equipamento de medida	Valor global			60750
4	Aquisição de bibliografia	Valor global			1000
			Soma		87285
5	Despesas gerais	Valor global			8728
			Custo total		96013
			Arredondamento		96100

2.3– Tese de doutoramento - Modelação do comportamento dinâmico de linhas ferroviárias de alta velocidade assentes sobre fundações deformáveis - T4

Os trabalhos desenvolvidos nas dissertações de Mestrado apresentadas no parágrafo 2.2 visam a obtenção de dados de base e o desenvolvimento de métodos que permitam o estudo detalhado do fenómeno de geração e propagação de vibrações e, finalmente, o dimensionamento de medidas de mitigação para o fenómeno.

Com a sua elaboração, estarão concluídos os primeiros objectivos do presente programa de investigação, a saber:

- Selecção e caracterização dos locais problemáticos do ponto de vista de geração e propagação de vibrações;
- Obtenção de parâmetros para a modelação do fenómeno.

O passo seguinte consiste em desenvolver modelos, o mais completos possível, para modelação realista do fenómeno e para o dimensionamento das contramedidas mais adequadas a cada caso.

Os estudos compreenderão os seguintes passos:

- Revisão bibliográfica detalhada dos diversos aspectos associados a:
 - Caracterização do comportamento dinâmico dos solos;
 - Geração de vibrações;

-
- Transmissão de vibrações;
 - Mitigação das vibrações.
 - Desenvolvimento de modelos de geração de vibrações que contabilizem a interação entre os diversos elementos que intervêm no processo.
 - Desenvolvimento de algoritmos de propagação de vibrações que tenham em consideração o carácter tridimensional do processo:
 - Desenvolvimento de programas com simetria 2.5D;
 - Aplicação de um programa comercial tridimensional na modelação da propagação das vibrações, com calibração do modelo por ajuste às medições experimentais realizadas na LN;
 - Estudo comparativo das medidas de mitigação das vibrações tendo em atenção as respectivas vantagens e inconvenientes;
 - Estudo do comportamento da via para a situação de cruzamento de comboios de alta velocidade.
 - Aplicação dos algoritmos de previsão ao traçado da RAVE e estudo das correspondentes medidas de mitigação, com base nos modelos desenvolvidos.

À semelhança dos estudos anteriores, o desenvolvimento dos trabalhos deste programa de tese pressupõe o estabelecimento de uma ampla parceria com a RAVE no sentido de proporcionar os dados necessários para os estudos e de co-financiar a investigação.

É de todo o interesse para este Programa de Pós-Graduação e, em particular, para o desenvolvimento desta tese, o estabelecimento de contactos internacionais com algumas das entidades que têm desenvolvido trabalhos neste domínio. Neste âmbito, prevê-se também, a realização de um estágio de curta duração, com uma dessas entidades.

Esta dissertação de Doutoramento deve ser desenvolvida por um Engenheiro Civil com formação nas áreas de Geotecnia, modelação numérica, processamento de sinais e programação em Fortran ou C.

O prazo para a elaboração dos estudos desta dissertação de Doutoramento será de 3 anos, visando a sua aplicação ao traçado da RAVE em prazo útil. Com efeito, prevê-se que a primeira ligação de alta velocidade, Lisboa-Porto-Vigo entre em funcionamento durante 2009, sendo oportuno dispor de resultados antes dessa data.

Quadro 2.9 – Proposta de programa de trabalhos para a “Modelação do comportamento dinâmico de linhas ferroviárias de alta velocidade assentes sobre fundações deformáveis”

	Anos											
	1				2				3			
	Trimestres											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisão bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Processo de geração de vibrações		■	■									
Modelação da propagação de vibrações 2.5 D			■	■	■	■						
Modelação da propagação de vibrações com programa comercial						■	■					
Determinação de parâmetros por retroanálise das passagens experimentais							■					
Estudo do problema de cruzamento de comboios								■				
Modelação e estudo de medidas de mitigação									■	■		
Aplicação à RAVE										■	■	
Desenvolvimento da parte escrita da tese	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Actividade principal	■
Actividade complementar	■
Actividade de carácter pontual	■

Quadro 2.10 – Custos associados à elaboração da dissertação

	Unidade	Valor	Valor unitário	Total
1 Orientação	meses	6	3706	22235
2 Desenvolvimento da dissertação	meses	36	1646	59256
3 Aquisição de software	unidade	1	11538	11538
4 Aquisição de hardware	unidade	1	1500	1500
5 Missões ao estrangeiro	unidade	2	2500	5000
6 Aquisição de bibliografia	Valor global			1000
			Soma	100529
7 Despesas gerais	Valor global			10053
			Custo total	110582
			Arredondamento	110600

Descrição

- 1- Actividade de orientação desenvolvida pelo investigador do LNEC, orientador da dissertação
- 2- Actividade desenvolvida pelo estudante de doutoramento
- 3- Aquisição de um programa de análise pelo mef
- 4- Aquisição de um computador para a realização de cálculos
- 5- Aquisição de bibliografia especializada sobre o tema

2.4 – Custo global e integração temporal dos trabalhos

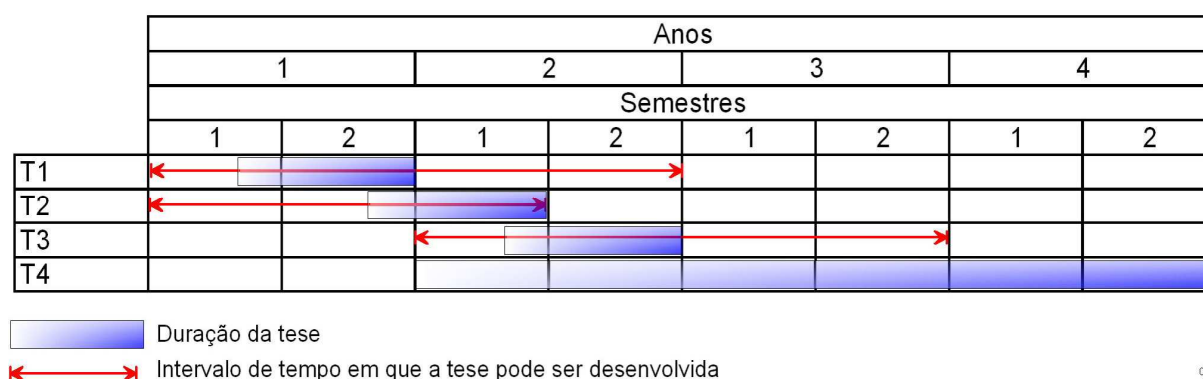
A proposta de trabalhos de investigação apresentada no presente Programa de Pós-Graduação tem como objectivo fundamental a aplicação dos conhecimentos desenvolvidos à rede de transportes ferroviários em Portugal. Com efeito, no nosso país, está em desenvolvimento uma rede de caminhos de ferro de alta velocidade, a par da renovação de uma boa parte da rede existente. Como o desenvolvimento de ambas obedece a calendários condicionados por questões económicas e também políticas, interessa que a investigação acerca dos métodos de avaliação e controlo do fenómeno de amplificação das vibrações seja desenvolvida atempadamente. Assim, a proposta de investigação que se apresenta tem um sentido pragmático de proporcionar ao LNEC a forma de investigar o problema e assessorar as entidades ferroviárias portuguesas no estudo e mitigação dos fenómenos devidos à propagação de ondas em resultado da circulação dos comboios de alta velocidade.

O princípio que orientou o estabelecimento das teses de Mestrado e da tese de Doutoramento teve em consideração um enquadramento lógico das actividades e a oportunidade proporcionada pelos trabalhos que decorrem na Linha do Norte. Assim, a investigação relativa à caracterização dos materiais e ao estudo das vibrações em troços experimentais da Linha do Norte deve anteceder o desenvolvimento dos estudos específicos para a RAVE, desenvolvidos na tese de Doutoramento. Esses estudos iniciar-se-ão, de acordo com a proposta de programa, no final do segundo ano. De igual forma, a caracterização dos solos moles ao longo do traçado da LN deve preceder o estudo das vibrações devidas à passagem experimental de comboios.

A aplicação de modelos bidimensionais ao estudo da geração, propagação e mitigação de vibrações está menos condicionada temporalmente, na medida em que se pretende que seja um estudo mais teórico, em que um dos objectivos será o de verificar a adequação e as limitações desses modelos.

O resumo das considerações anteriores relativas à calendarização dos trabalhos está esquematizado no Quadro 2.11. Nele se indica a duração das diferentes teses, bem como o intervalo de tempo no qual estas se podem desenvolver.

Quadro 2.11 – Articulação temporal das diversas teses



O custo global do Programa de Pós-Graduação, referido a valores de 2005, e a parcela correspondente a cada um dos itens necessários para a sua elaboração resumem-se no Quadro 2.12. Da análise do quadro é possível verificar que 47,5% desse valor se destina a meios humanos, e que cerca de 20% do custo global se destina à aquisição do equipamento de registo das vibrações para passagens experimentais de comboios. Das restantes parcelas, a mais significativa, corresponde à realização de ensaios de laboratório e *in situ*, atingindo 14,5% do custo global.

Quadro 2.12 – Cálculo do valor global do Programa de Pós-Graduação

Item		Tese				Totais	
		1	2	3	4		
		9.1%	19.4%	32.6%	38.9%		
	Orientação	13.4%	7 412 €	5 559 €	5 559 €	22 235 €	40 765 €
	Estudantes (M/D)	29.4%	9 976 €	9 976 €	9 976 €	59 256 €	89 184 €
	Recém licenciados	4.7%		3 741 €	3 118 €	7 482 €	14 341 €
	Ensaio	14.5%		34 000 €	10 000 €		44 000 €
	Programas	5.8%	6 000 €			11 538 €	17 538 €
	Computadores	0.9%	1 250 €			1 500 €	2 750 €
	Equipamento	20.0%			60 750 €		60 750 €
	Bibliografia	1.0%	500 €	500 €	1 000 €	1 000 €	3 000 €
	Missões	1.6%				5 000 €	5 000 €
	Despesas gerais	8.7%	2 514 €	5 003 €	8 728 €	10 053 €	26 299 €
	Totais		27 652 €	58 779 €	99 131 €	118 064 €	303 627 €

Uma parcela importante dos trabalhos será efectuada, como se depreende da proposta de trabalhos, no âmbito da realização de dissertações de Mestrado e de Doutoramento. Relativamente a estes estudos, é de salientar o facto de o LNEC colaborar com o Instituto Superior Técnico e com a Universidade Nova de Lisboa no

curso de Mestrado em “Geotecnia para Engenharia Civil”, o que constitui uma fonte potencial de alunos com a preparação adequada para o desenvolvimento dos referidos estudos.

Actualmente, a integração de mestrandos e doutorandos na actividade do LNEC é, em geral, feita através da atribuição de Bolsas LNEC de Investigação Científica, em particular de Bolsas de Iniciação à Investigação Científica e de Bolsas de Doutoramento, respectivamente. Assim, os encargos relativos aos alunos de Mestrado e Doutoramento foram calculados com base nos valores estabelecidos para cada um dos tipos de bolsa referidos.

No que concerne ao enquadramento de recém licenciados, estes podem ser oriundos das Universidades com as quais o LNEC mantém convénios e integrar o presente Programa de Pós-Graduação no âmbito da realização de estágios de final de licenciatura. Em alternativa, podem ser recém licenciados contratados pela REFER ou pela RAVE, que exerçam temporariamente um estágio no LNEC, no âmbito deste plano de estudos de Pós-Graduação, constituindo, neste caso, mais valias directas para a formação dos quadros técnicos dessas empresas.

Cabe aqui salientar que, atendendo ao interesse que o presente Programa de Pós-Graduação tem, quer para a REFER, quer para a RAVE, considera-se indispensável o estabelecimento de protocolos entre estas entidades e o LNEC que permitam o co-financiamento dos estudos.

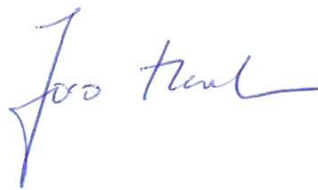
Além disso, o LNEC, em conjunto com a Universidade do Minho e com a Universidade Nova de Lisboa, participa num projecto de investigação financiado pela FCT, no qual serão também desenvolvidos estudos relacionados com a circulação de comboios de alta velocidade. O projecto designado por “Interacção solo-via férrea para comboios de alta velocidade” abordará aspectos relacionados com o controlo de qualidade na construção, com a realização de ensaios triaxiais de grande diâmetro, com a modelação numérica e com a realização de medições de vibração. A existência de alguns pontos comuns com o presente plano de estudos permite também a integração dos objectivos.

As actividades de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico devem ser realizadas em colaboração com diversas instituições, tanto em Portugal, como no estrangeiro, associando a diversidade de valências e coordenando esforços de

forma a potenciar a utilização dos recursos disponíveis, quer materiais, quer humanos. É nesse sentido que, no presente Programa de Pós-Graduação, se considera como indispensável o estabelecimento de parcerias com as entidades directamente interessadas, se privilegia a ligação LNEC – Universidades e se prevê o intercâmbio de experiências com entidades estrangeiras.

Um dos aspectos mais sensíveis para empresas como a RAVE e a REFER, prende-se com os prazos para a obtenção de resultados. No programa proposto, procura-se escalonar as diversas actividades tendo em conta este aspecto. Assim, o plano de trabalhos inclui teses de Mestrado que permitirão a obtenção de resultados de base num intervalo de tempo relativamente curto, e uma tese de Doutoramento que visa a realização de estudos de maior complexidade e duração. Prevê-se que no final do primeiro ano ou do segundo possam ser publicados os primeiros resultados.

Lisboa, Fevereiro de 2005



João Manuel Marcelino Mateus da Silva

ANEXOS

1 – ANEXO I - EQUAÇÃO DA VIGA DE WINKLER

1.1 – Equação diferencial da viga de Winkler em diferenças finitas

Equação diferencial da viga de Winkler:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} + kw = q(t, x)$$

As derivadas intervenientes na equação, escritas em diferenças finitas centrais são:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{w_{t+1,x} - w_{t-1,x}}{2\Delta t}; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{w_{t+1,x} - 2w_{t,x} + w_{t-1,x}}{\Delta t^2}; \quad \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \frac{w_{t,x-2} - 4w_{t,x-1} + 6w_{t,x} - 4w_{t,x+1} + w_{t,x+2}}{\Delta x^4}$$

Substituindo e resolvendo em ordem ao deslocamento no intervalo de tempo $t+1$, obtém-se:

$$w_{t+1,x} = \frac{2\Delta x^4 \Delta t^2 q(t,x) - 2\Delta x^4 \Delta t^2 k w_{t,x} - c \Delta x^4 \Delta t (-w_{t-1,x}) - 2m \Delta x^4 (-2w_{t,x} + w_{t-1,x}) - 2EI \Delta t^2 (w_{t,x-2} - 4w_{t,x-1} + 6w_{t,x} - 4w_{t,x+1} + w_{t,x+2})}{(2m \Delta x^4 + c \Delta x^4 \Delta t)}$$

1.2 – Solução numérica da equação da viga de Winkler

Retomando a Eq. 2.18, e inserindo $w = e^{\gamma s}$ (Esveld, 2001)

$$\frac{\partial^4 w}{\partial s^4} + 4\alpha^2 \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} - 8\alpha\beta \frac{\partial w}{\partial t} + 4w = 0$$

a equação anterior transforma-se em:

$$\gamma^4 + 4\alpha^2 \gamma^2 - 8\alpha\beta\gamma + 4 = 0$$

O termo correspondente à carga será considerado no estabelecimento das condições de fronteira. Esta equação apresenta quatro raízes que, no caso mais geral serão complexas. Apenas para determinados valores de amortecimento (em geral elevados) há duas raízes reais.

Para se obter $w_{+\infty} = w_{-\infty} = 0$ a solução da equação anterior é, necessariamente da forma:

$$w(x) = \begin{cases} w = A_1 e^{\gamma_1 s} + A_2 e^{\gamma_2 s} & \text{se } s < 0 \\ w = A_3 e^{\gamma_3 s} + A_4 e^{\gamma_4 s} & \text{se } s \geq 0 \end{cases}$$

Os parâmetros A_i são determinados impondo as condições de fronteira no ponto central $s=0$. Essas condições são as que garantem a continuidade dos deslocamentos, do declive da deformada, o equilíbrio de momentos e do esforço transversal nesse ponto. Obtém-se o seguinte sistema linear de equações em C:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & -\gamma_3 & -\gamma_4 \\ \gamma_1^2 & \gamma_2^2 & \gamma_3^2 & \gamma_4^2 \\ \gamma_1^3 & \gamma_2^3 & \gamma_3^3 & \gamma_4^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 8w_0 \end{bmatrix}$$

Resolvendo este sistema determinam-se os parâmetros A_i necessários para concretizar a solução da equação. Se for $w_0=1$, os deslocamentos obtidos estão adimensionalizados, isto é, para $\alpha=0$ e $\beta=0$, obtém-se, para $s=0$, $w=1$. Os restantes deslocamentos são referidos a este valor sendo imediata a determinação do factor de amplificação. No caso geral, para uma carga Q , será:

$$w_0 = \frac{Q}{8EI\lambda^3}$$

onde w_0 é o deslocamento para uma carga Q na situação estática e sem amortecimento ($\alpha=0$ e $\beta=0$).

Em seguida apresenta-se o programa em Fortran 77, desenvolvido para calcular a solução com o algoritmo acima descrito:

```

program winkler_ab
!determinação da solução completa da equação
!da viga de Winkler
!Dados: alfa=relação entre a vel. da carga e a vel. crítica
!       : beta=relação entre o amortecimento e o amort. crítico
!       : smax=valor máximo da ordenada para o traçado da func.
!       : xint=incremento para traçado da função

!Usa rotinas IMSL
use msimsl
real coeff(5)
complex root(4),a(4,4),b(4),x(4)
write(*,*)'Viga de Winkler solução completa'
write(*,*)'João Marcelino 2004'
write(*,*)
write(*,*)'Valor de alfa='
read(*,*)alfa
write(*,*)'Valor de beta='
read(*,*)betax

```

```

write(*,*)'Limites para cálculo da função='
read(*,*)smax
smax=abs(smax)
write(*,*)'Intervalo para o traçado da função'
read(*,*)xint
!constrói polinómio
ndeg=4
coeff(5)=1
coeff(4)=0
coeff(3)=4*alfa**2
coeff(2)=-8*alfa*betax
coeff(1)=4
!calcula e escreve as raízes do polinómio (IMSL)
CALL ZPORC (NDEG, COEFF, ROOT)
CALL WRCRN ('Raizes da equação', 1, 4, root, 1, 0)
!resolve o sistema de equações para determinar os coefs Ai
!constrói a matriz do sistema de equações
n=4
do i=1,4
  do j=1,4
    a(i,j)=root(j)**(i-1)
  enddo
enddo
!troca os sinais
do i=1,4
  do j=3,4
    a(i,j)=-a(i,j)
  enddo
enddo
LDA=4
!vector de termos independentes
b(1)=(0,0)
b(2)=(0,0)
b(3)=(0,0)
b(4)=(8,0)
!resolve o sistema de equações para determinar a solução
CALL LSACG (N, A, LDA, B, 1, X)
! escreve os resultados determinados
CALL WRCRN ('COEFS Ai', 1, 4, X, 1, 0)
!escreve os resultados no ecrã e num ficheiro
open(1,status='new',file='winklerab.prn')
write(1,*)'Alfa=',alfa
write(1,*)'Beta=',betax
write(1,*)
xc=-smax
nsteps=2*smax/xint+1
!calcula a resposta da viga
do i=0,nsteps
  if(xc.lt.0)then
    w=x(1)*cexp(root(1)*xc)+x(2)*cexp(root(2)*xc)
  else
    w=x(3)*cexp(root(3)*xc)+x(4)*cexp(root(4)*xc)
  endif
  write(*,*)xc,w
  write(1,'(1xf9.5,3x,f9.5)')xc,w
  xc=xc+xint
enddo
close(1)
end

```

2 – ANEXO II - ELEMENTOS FINITOS 2.5D

2.1 – Formulação

Considere-se a geometria representada na Fig. 2.1.

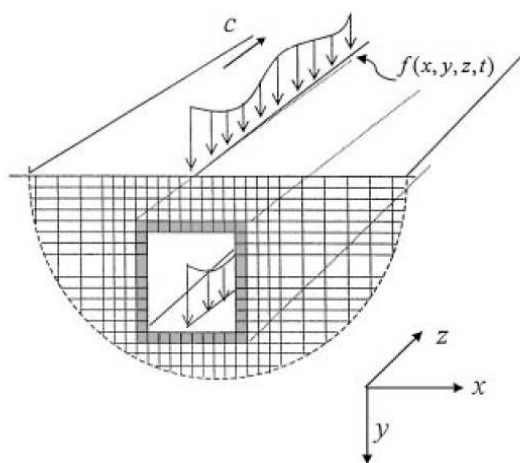


Fig. 2.1 – Geometria do problema 2.5D

Admitindo que a geometria e os materiais da fundação são mantidos ao longo do eixo z e que o sistema está sujeito a um carregamento dado por:

$$f(x, y, z, t) = \psi(x, y)e^{-ikz}e^{i\omega t}$$

o campo de deslocamentos (u, v, w) , pode ser calculado por:

$$u(x, y, z, t) = \hat{u}(x, y)e^{-ikz}e^{i\omega t}$$

$$v(x, y, z, t) = \hat{v}(x, y)e^{-ikz}e^{i\omega t}$$

$$w(x, y, z, t) = \hat{w}(x, y)e^{-ikz}e^{i\omega t}$$

onde $k = (\omega - \omega_0) / \lambda$, sendo ω a frequência angular do carregamento e ω_0 a frequência angular do primeiro modo de vibração. O efeito tridimensional devido à variação da carga segundo z está separado do plano da análise em x e y . Assim, a discretização do problema pode ser feita apenas no plano x, y . Os campos de

deslocamentos no plano podem ser obtidos através das funções de interpolação N_i . Assim, considerando que as coordenadas locais são (ξ, η) , ter-se-á:

$$\hat{u}(\xi, \eta) = \sum_1^n N_i(\xi, \eta) u_i$$

$$\hat{v}(\xi, \eta) = \sum_1^n N_i(\xi, \eta) v_i$$

$$\hat{w}(\xi, \eta) = \sum_1^n N_i(\xi, \eta) w_i$$

De forma análoga, as coordenadas dos pontos do elemento finito podem ser expressas através das coordenadas dos pontos nodais e das funções de forma do elemento:

$$x(\xi, \eta) = \sum_1^n M_i(\xi, \eta) x_i$$

$$y(\xi, \eta) = \sum_1^n M_i(\xi, \eta) y_i$$

A equação do movimento, no domínio da frequência pode ser escrita na forma habitual:

$$([K] - \omega^2 [M])\{\delta\} = \{F\}$$

onde $\{\delta\}$ representa o vector de deslocamentos, $\{F\}$ o vector de forças nodais e $[K]$ e $[M]$ as matrizes de rigidez e massa, respectivamente. O vector de deslocamentos tem a forma:

$$\{\delta\} = \{u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad \dots \quad u_n \quad v_n \quad w_n\}^T$$

e o vector de forças $\{F\}$ é:

$$\{F\} = \{Fx_1 \quad Fy_1 \quad Fz_1 \quad \dots \quad Fx_n \quad Fy_n \quad Fz_n\}^T$$

O vector de tensão, pode ser obtido a partir das deformações através da matriz de constantes elásticas $[D]$ por:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda^*+2G^* & \lambda^* & \lambda^* & 0 & 0 & 0 \\ \lambda^* & \lambda^*+2G^* & \lambda^* & 0 & 0 & 0 \\ \lambda^* & \lambda^* & \lambda^*+2G^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix}$$

por sua vez, o campo de deformações é definido, na hipótese das pequenas deformações por:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & -ikN_1 \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ -ikN_1 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ 0 & -ikN_1 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} = [B_i] \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix}$$

Os termos da equação anterior podem ser determinados em coordenadas globais, partindo das derivadas das funções de interpolação em coordenadas locais e da matriz jacobiana tendo-se:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_m}{\partial x} \\ \frac{\partial N_m}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i x_i \frac{\partial M_i}{\partial \xi} & \sum_i y_i \frac{\partial M_i}{\partial \xi} \\ \sum_i x_i \frac{\partial M_i}{\partial \eta} & \sum_i y_i \frac{\partial M_i}{\partial \eta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_m}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_m}{\partial \eta} \end{Bmatrix}$$

As matrizes $[K]$ e $[M]$ da equação do movimento são obtidas através da “soma” das matrizes $[k]$ e $[m]$ de cada elemento individual, sendo:

$$[k] = \int_{V_e} [B]^T [D] [B] dv$$

$$[m] = \int_{V_e} \rho [N]^T [N] dv$$

onde $[N]$ é a matriz das funções de forma $[N_i]=N_i[I]$, onde $[I]$ é a matriz identidade.

Os parâmetros λ^* e G^* das relações constitutivas incorporam o amortecimento histerético através do coeficiente de amortecimento β , sendo:

$$\lambda^* = \lambda(1 + 2\beta i)$$

$$G^* = G(1 + 2\beta i)$$

2.2 – Funções de forma e interpolação dos elementos infinitos

Considerando o elemento finito representado na Fig. 2.2, nos referenciais global e local, onde um dos extremos do elemento se encontra no infinito, as funções de forma são:

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

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

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

onde η_i representa a ordenada do ponto nodal no referencial local.

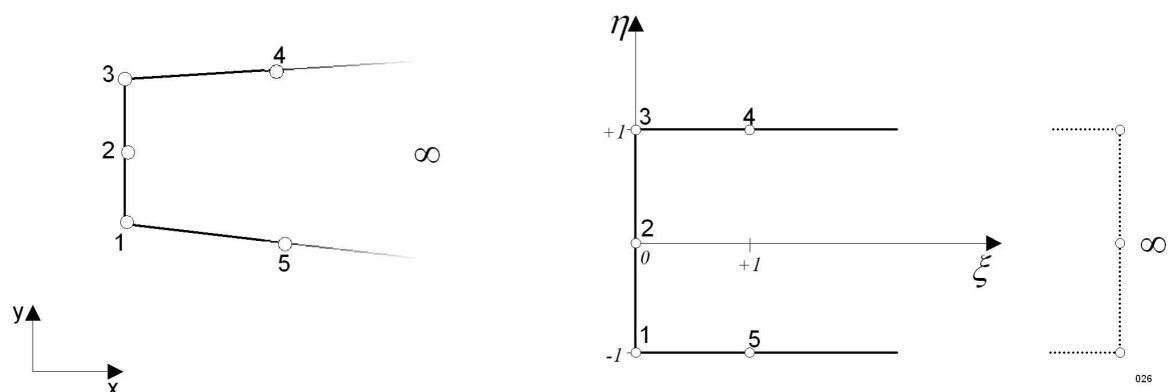


Fig. 2.2 – Elemento infinito no referencial global e local

Essas funções têm a representação que se apresenta na Fig. 2.3.

As funções de interpolação dos deslocamentos nodais são:

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

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

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

onde o termo $e^{-\alpha\xi}$ é referente ao amortecimento geométrico e k' é o número de onda das ondas que se propagam para o infinito:

$$k'_j = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_j}\right)^2 - \left(\frac{\omega - \omega_0}{c}\right)^2}$$

e o índice j se refere às ondas R, P ou S.

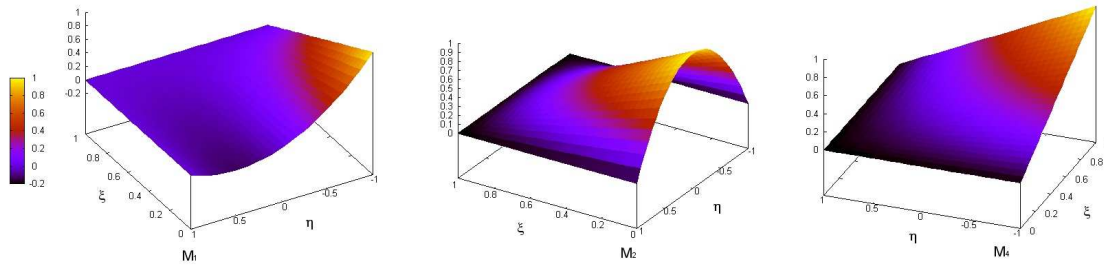


Fig. 2.3 – Funções de forma M_1 , M_2 e M_4 do elemento infinito

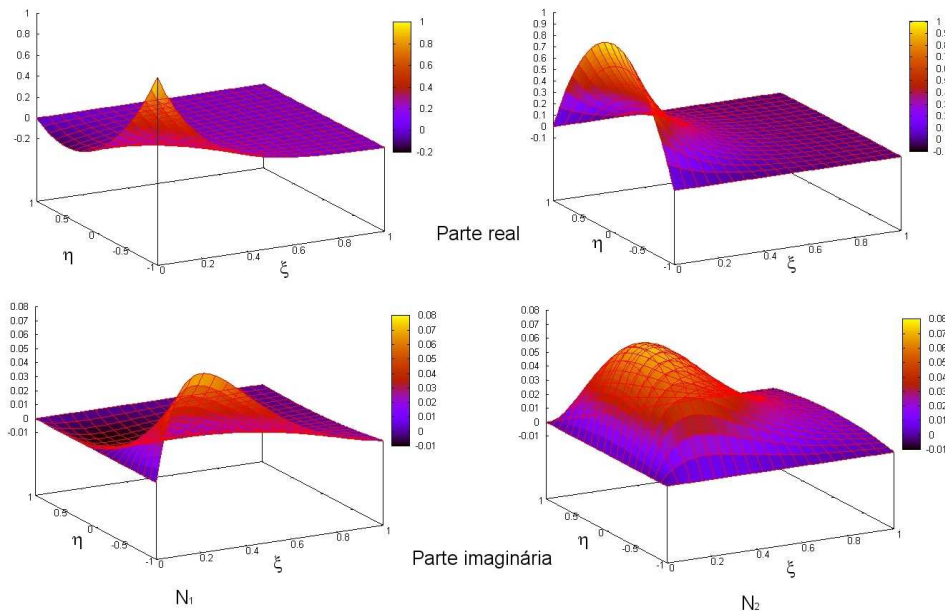


Fig. 2.4 – Funções de interpolação, parte real e imaginária

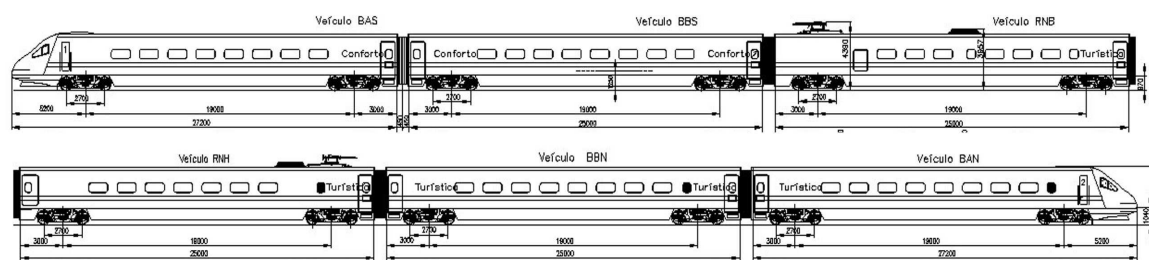
3 – ANEXO III - COMBOIOS DE ALTA VELOCIDADE

3.1 – Distribuição de cargas do comboio Alfa Pendular



Configuração normal – Seis carruagens incluindo duas de tracção

Velocidade máxima (em operação normal): 220 km/h (61.11 m/s).



Quadro 3.1 – Posição dos eixos e cargas para o comboio Alfa Pendular

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

3.2 – Distribuição de cargas do comboio X2000



Configuração normal – Carruagem de tracção mais 5 carruagens de passageiros

Configuração máxima - Carruagem de tracção mais 16 carruagens de passageiros

Configuração de ensaio em Ledsgaard – Carruagem de tracção mais 4 carruagens de passageiros. Comprimento 114,7 m.

Velocidade máxima (em operação normal): 200 km/h (55.556 m/s).

Quadro 3.2 – Posição dos eixos e cargas para o comboio X2000

X	F	X	F	X	F	X	F
(m)	(kN)	(m)	(kN)	(m)	(kN)	(m)	(kN)
111.0	185.8	91.9	122.0	52.6	125.5	25.6	122.0
108.3	185.8	77.2	122.0	49.7	125.5	21.2	143.3
101.9	185.8	74.4	122.0	45.7	122.0	18.4	143.3
98.9	185.8	69.9	125.5	42.7	122.0	6.7	143.3
94.7	122.0	67.1	125.5	28.4	122.0	3.9	143.3

3.3 – Distribuição de cargas do comboio IC



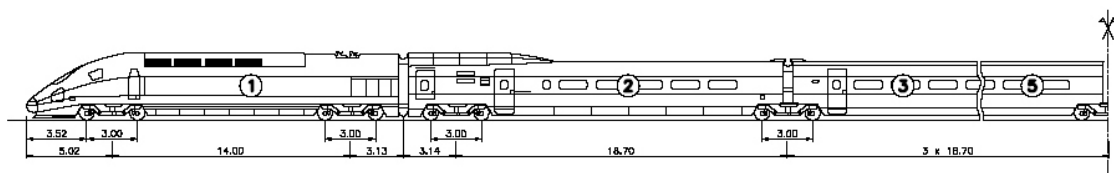
Configuração normal – Nove carruagens incluindo uma de tracção

Velocidade máxima – 220 km/h

Quadro 3.3 – Posição dos eixos e cargas para o comboio IC

X	F	X	F	X	F	X	F
(m)	(kN)	(m)	(kN)	(m)	(kN)	(m)	(kN)
2.9	220.5	51.2	113.8	119.4	113.8	175.2	113.8
5.9	220.5	66.6	113.8	122.4	113.8	180.2	113.8
13.3	220.5	69.6	113.8	127.4	113.8	183.2	113.8
16.3	220.5	74.6	113.8	130.4	113.8	198.6	113.8
21.8	113.8	77.6	113.8	145.8	113.8	201.6	113.8
24.8	113.8	93.0	113.8	148.8	113.8	206.6	115.9
40.2	113.8	96.0	113.8	153.8	113.8	209.6	115.9
43.2	113.8	101.0	113.8	156.8	113.8	225.0	115.9
48.2	113.8	104.0	113.8	172.2	113.8	228.0	115.9

3.4– Distribuição de cargas do comboio Thalys HST



Configuração normal – Dez carruagens incluindo duas de tracção.

Velocidade máxima: 330 km/h (91.67 m/s).

Velocidade máxima em operação normal: 300 km/h (83.33 m/s)

Quadro 3.4 – Posição dos eixos e cargas para o comboio Thalys HST

X	F	X	F	X	F	X	F
(m)	(kN)	(m)	(kN)	(m)	(kN)	(m)	(kN)
3.5	166.6	45.5	166.6	117.3	166.6	173.4	142.1
6.5	166.6	61.2	166.6	120.3	166.6	176.4	142.1
17.5	166.6	64.2	166.6	136.0	166.6	179.7	166.6
20.5	166.6	79.9	166.6	139.0	166.6	182.7	166.6
23.8	142.1	82.9	166.6	154.7	166.6	193.7	166.6
26.8	142.1	98.6	166.6	157.7	142.1	196.7	166.6
42.5	142.1	101.6	166.6				

3.5– Aplicação do modelo de viga de Winkler ao comboio Alfa Pendular

Neste anexo apresenta-se, de forma esquemática, a aplicação do modelo de viga de Winkler ao comboio Alfa Pendular numa situação hipotética baseada na geometria do perfil transversal-tipo para a Linha do Norte (Fig. 3.1) e em valores correntes para os materiais que constituem o aterro e a fundação.

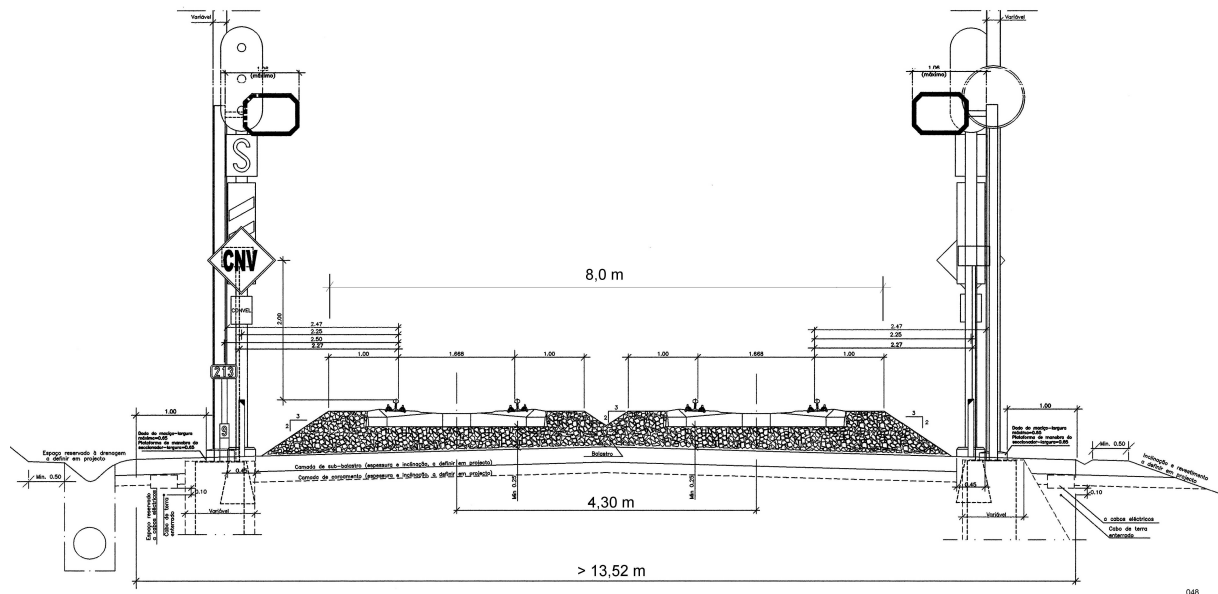


Fig. 3.1 – Perfil transversal tipo da LN

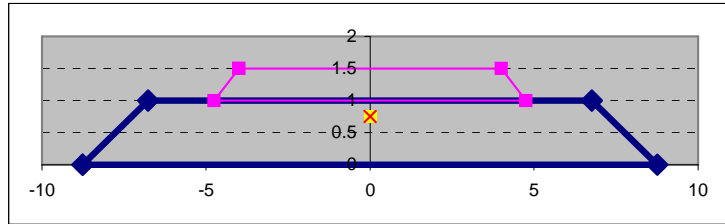
Foram considerados os seguintes valores:

- Aterro
 - Módulo de elasticidade do aterro: $E=300$ MPa
 - Largura do aterro: 13,52 m
 - Altura de aterro: 1,0 m
 - Largura do balastro: 8 m
- Solo de fundação
 - Módulo de elasticidade do solo de fundação: $E=150$ MPa
 - Coeficiente de Poisson: $\nu=0,3$

Quadro 3.5 – Cálculo da velocidade crítica

Características geométricas do aterro incluindo balastro

Altura=	1 m
Largura=	13.52 m
i=	0.5 m/m
Largura base=	17.52 m
Largura balastro	8 m
Altura balastro	0.5
i=	0.667 m/m
Largura base	9.5 m



Cálculos

Inércia (balastro)I=	0.091 m ⁴
Inércia (aterro)I=	1.286 m ⁴
Inércia total=	4.646 m ⁴
Area balastro=	8.75 m ²
Area aterro=	15.52 m ²
Es=	150 000 kPa
vs=	0.3
E=	300 000 kPa
γ=	19.2 kN/m ³
massa=	465.984 kN/m
k=	565 098 kPa
Veloc. Crítica=	61.72 m/s
EI=	1 393 789 kNm ²

Centro Gravidade

balastro	1.24 m
aterro	0.48 m
Cg=	0.75 m

$$I = \frac{h^3(a^2 + 4ab + b^2)}{36(a + b)}$$

$$k = 1,23 \left[\frac{E_s b^4}{(1 - \nu_s^2)EI} \right]^{0,11} \frac{E_s}{(1 - \nu_s^2)}$$

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

De acordo com as determinações efectuadas no Quadro 3.5, e fazendo os cálculos para as velocidades de 50, 100, 150 e 200 km/h, obtêm-se os valores de α apresentados no Quadro 3.6. Em todos os cálculos foi considerado um coeficiente de amortecimento, $\beta=0,1$. Na Fig. 3.2 apresenta-se a solução da viga de Winkler calculada para uma carga unitária, no referencial em movimento com a carga. Na Fig. 3.3 e seguintes apresentam-se os resultados calculados para a circulação do comboio Alfa pendular nas velocidades anteriormente indicadas. Para cada caso é o diagrama da deflexão calculada num ponto que, no instante $t=0$, se encontra no início do comboio, bem como a correspondente análise do conteúdo de frequências de cada diagrama.

Quadro 3.6 – Valores de α

Velocidade de circulação (km/h)	α
50	0.225
100	0.450
150	0.675
200	0.900

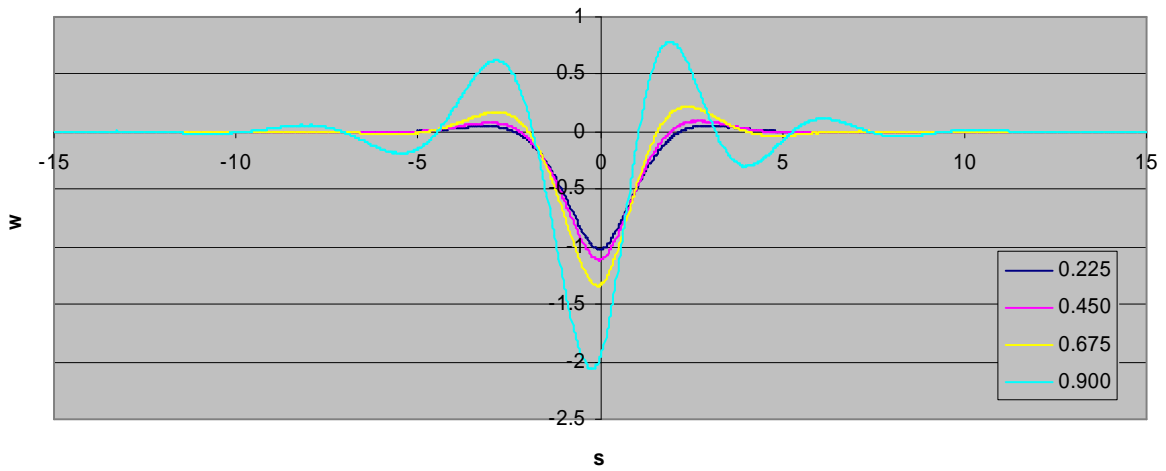


Fig. 3.2 – Solução da viga de Winkler para diversos valores de α , com $\beta=0,1$ (Anexo 1.2)

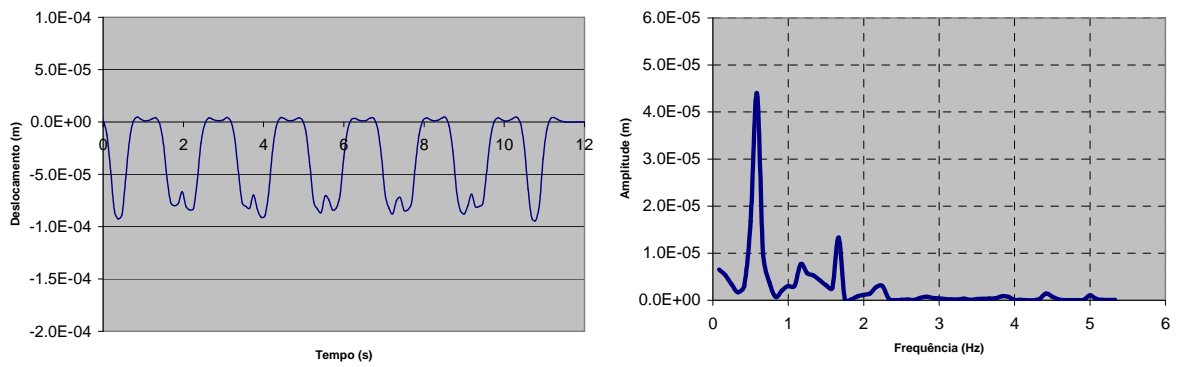


Fig. 3.3 – Resultados para $v=50$ km/h

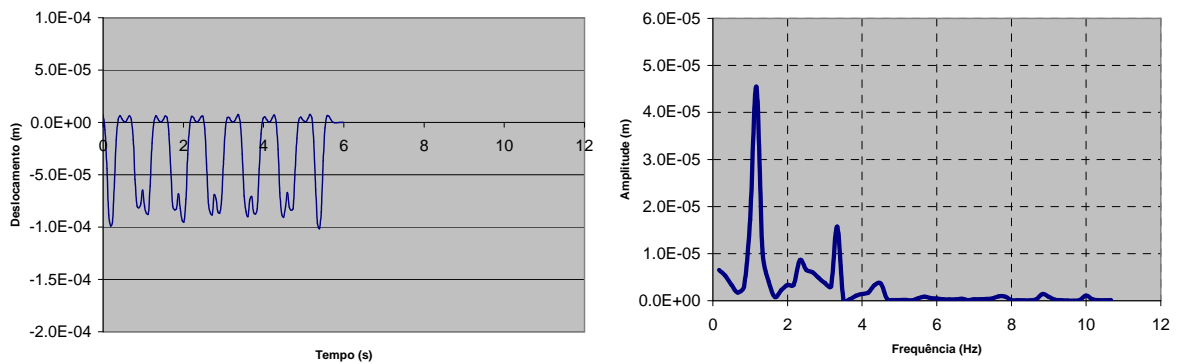


Fig. 3.4 – Resultados para $v=100$ km/h

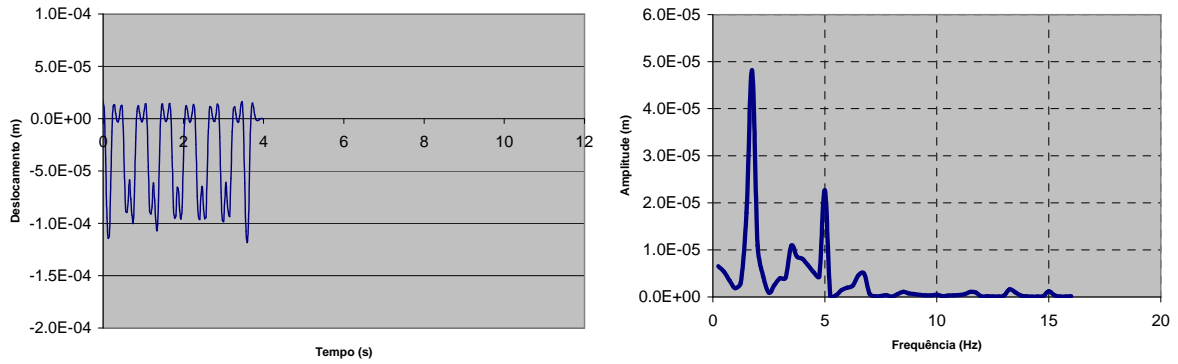


Fig. 3.5 – Resultados para $v=150$ km/h

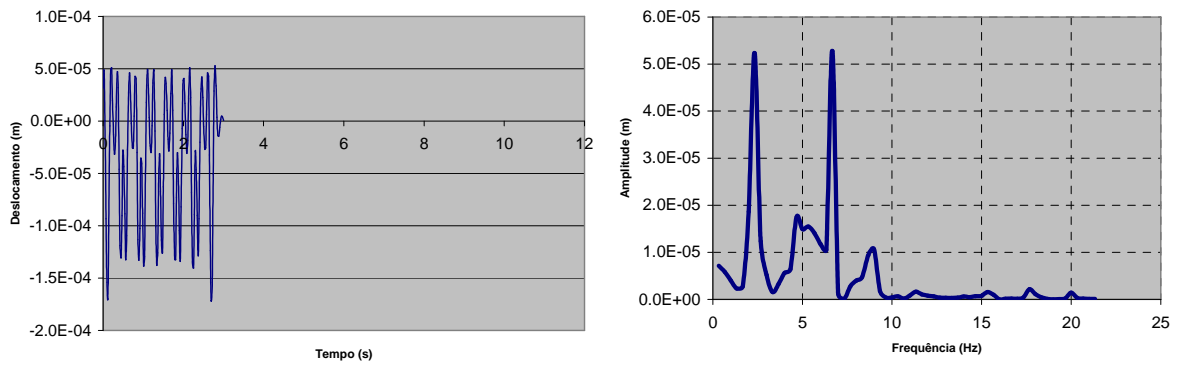


Fig. 3.6 – Resultados para $v=200$ km/h

4 – ANEXO IV - REVISÃO DE ALGUNS PROGRAMAS COMERCIAIS

4.1 – Introdução

No presente Anexo passam-se em revista alguns dos programas comerciais cuja utilização tem sido referida na bibliografia ou que, não sendo referidos, apresentam potencialidades para serem aplicados no estudo da propagação de vibrações.

O uso de programas comerciais apresenta como vantagem a optimização do tempo necessário para obter resultados usando rotinas e códigos testados por utilizadores e investigadores em diversos países mas, em contrapartida, não permite normalmente a realização de adaptações dado que, em geral, são programas “fechados”, isto é, são programas que não permitem alterações, por exemplo nos modelos reológicos.

Na descrição apresentada, referem-se apenas os tópicos considerados mais relevantes, no âmbito da aplicação dos diversos programas. à análise dos problemas de propagação e mitigação das vibrações resultantes do tráfego ferroviário de alta velocidade.

4.2 – Quake/w

O programa Quake/w é um programa de elementos finitos genérico para a análise dinâmica de estruturas geotécnicas (Geo-Slope, 2001). O programa está incluído num pacote de programas de elementos finitos e do método das fatias e é vendido pela empresa Geo-Slope International, Calgary, Alberta, Canadá.

Apesar de se tratar de um programa genérico de análise dinâmica, o seu objectivo principal é o de estudar o comportamento dinâmico de estruturas em terra sujeitas à acção de sismos.

O programa Quake/w considera a utilização de elementos finitos isoparamétricos triangulares e rectangulares de respectivamente 3 ou 6 e 4 ou 8 pontos nodais. O equilíbrio do problema é definido em condições de deformação plana.

A malha de elementos finitos pode ser importada de outros programas do pacote, sendo especialmente interessante a possibilidade de utilização do programa Sigma/w para efectuar a análise estática e, por exemplo, estabelecer o estado de tensão inicial do problema ou do programa Seep/w para importar as pressões intersticiais correspondentes a um regime de percolação permanente ou transitório.

O programa é bastante simples de utilizar, nomeadamente no que respeita à introdução de dados, porque o ambiente de trabalho, em Windows, é do tipo CAD². Porém, o programa não possui geração automática da malha de elementos finitos.

Neste programa contempla-se a utilização de dois modelos reológicos, o linear elástico e o modelo linear equivalente. Os parâmetros de cada um destes modelos são:

- Elástico linear: Módulo de elasticidade; coeficiente de Poisson e coeficiente de amortecimento (constante ou variável com a deformação distorcional).
- Linear equivalente: Módulo de distorção (constante ou dependente da tensão de confinamento); coeficiente de Poisson; coeficiente de amortecimento (constante ou variável com a deformação distorcional).

No caso em que o coeficiente de amortecimento é variável, é possível considerar uma função $\xi = f(\varepsilon)$ que define a variação desta grandeza com o nível de deformação. Em alternativa, o programa permite definir uma variação de ξ em função do índice de plasticidade de acordo com a Eq. 2.8 e para estabelecer o valor de G/G_0 com a Eq. 2.7.

No programa Quake/w é possível incluir na malha de elementos finitos elementos estruturais de barra segundo duas modalidades; elementos com rigidez axial e rigidez de flexão ou apenas com rigidez axial. Estes elementos podem ser úteis no estudo de medidas de mitigação das vibrações, como por exemplo para modelar uma laje ou estacas.

² Computer Aided Design

As condições de fronteira contempladas no programa são:

- Nós: deslocamento impedido; mola; força aplicada; fronteira absorvente;
- Bordos: tensão aplicada; pressão hidrostática; fronteira absorvente.

As fronteiras absorventes são consideradas através do cálculo de forças proporcionais às velocidades nos pontos nodais ou no bordo. O amortecimento das fronteiras é considerado constante.

No que respeita aos carregamentos admitidos pelo programa, estes podem ser constituídos por acelerogramas e/ou histórias de deslocamentos e/ou de forças concentradas nos pontos nodais ou distribuídas nos lados dos elementos.

A integração das equações de movimento é feita no domínio do tempo em detrimento do domínio da frequência uma vez que o programa admite a variação dos parâmetros do modelo.

O programa permite estimar, de forma aproximada, a ocorrência de liquefacção através de uma função do excesso de pressão intersticial (r_u), fazendo variar este parâmetro com a relação entre o número de ciclos aplicados e o número de ciclos necessários para a ocorrência de liquefacção.

O custo do programa Quake/w, na versão de 2004 é de USD 3995, ou seja cerca de 2950 €.

4.3– Flac 2D

O programa FLAC 2D “Fast Lagrangian Analysis of Continua” é um programa bidimensional de cálculo explícito pelo método das diferenças finitas de estruturas em solos, rochas ou outros materiais (Itasca, 2003).

O meio é discretizado através de uma grelha de elementos ou zonas que são ajustados de forma a modelar a geometria pretendida. O processo de integração explícita no tempo incorporado no programa FLAC 2D permite modelar convenientemente as situações de colapso estrutural.

A formulação do programa, que recorre à integração explícita no tempo das equações, permite a análise de problemas de grande dimensão sem fazer uso de

grandes recursos de memória, dado que não são formadas matrizes globais para resolução de sistemas de equações. A desvantagem do método, consiste na necessidade de dispor de uma boa velocidade de cálculo, que permita a integração das equações com intervalos de tempo muito pequenos.

De entre as diversas características do programa salientam-se as seguintes:

- Resolução de problemas em deformação plana, tensão plana ou axi-simetria;
- Capacidade para realizar análise acoplada;
- Possibilidade de incluir elementos estruturais (por exemplo: estacas)
- Possibilidade de efectuar cálculos no domínio das grandes deformações;
- Opção de módulo dinâmico;
- Opção de utilização de modelos reológicos definidos pelo utilizador (programação em linguagem C)
- Programação em FISH (linguagem própria do programa FLAC e FLAC3D);
- Possibilidade de incluir elementos de junta para a modelação de discontinuidades.

A definição da geometria, modelos, etc. no programa FLAC 2D pode ser feita recorrendo ao ambiente tipo CAD do programa ou através da criação de um ficheiro de texto que contém os comandos para o programa. Esta é aliás uma das características do programa que o torna mais potente mas simultaneamente mais difícil de usar.

No que respeita aos modelos reológicos o programa FLAC 2D contempla, entre outros:

- Modelos elásticos isotrópico e transverso-isotrópico
- Mohr-Coulomb
- Mohr-Coulomb com endurecimento e amolecimento
- Modelo elástico bi-linear
- Modelo cam-clay modificado
- Modelo com dupla superfície de cedência.

Os cálculos podem, naturalmente, ser conduzidos em tensões totais ou em tensões efectivas.

O módulo dinâmico do FLAC 2D permite a análise dinâmica dos modelos nas mesmas condições de simetria e usando as mesmas capacidades que para a análise estática, nomeadamente, a análise acoplada.

O programa considera o uso do amortecimento de Rayleigh à semelhança de outros programas de cálculo (ver, por exemplo 4.4). No entanto, se for utilizado um modelo definido pelo utilizador que considere de forma correcta o efeito histerético na curva tensão distorção, não é necessário introduzir nenhum amortecimento adicional. De acordo com o manual do programa, nenhum dos modelos incluídos no programa dispensa o uso do amortecimento de Rayleigh.

As acções dinâmicas podem ser aplicadas através de histórias de acelerações, velocidades, deslocamentos ou forças.

A modelação do espaço semi-infinito é feita à custa de fronteiras absorventes em que as forças de reacção são proporcionais à velocidade.

Os preços do Programa Flac 2D versão 4 são os apresentados no Quadro 4.1

Quadro 4.1 – Preços do programa FLAC2D

Item	Versão Profissional	Versão Educacional
FLAC2D 4.0	4615 €	831€
Dynamic option	1385 €	1385 €
Total	6000 €	2215 €

4.4– Plaxis Dynamic

O programa Plaxis Dynamic é produzido pela empresa Plaxis BV, Holanda. Deriva do bem conhecido Plaxis, programa de elementos finitos planos para análise estática de estruturas geotécnicas.

O Plaxis Dynamic destina-se a realizar a análise dinâmica de estruturas geotécnicas submetidas a cargas dinâmicas e a analisar as vibrações resultantes no solo. No

manual do programa (Plaxis, 2004) é feita a referência à excitação dinâmica resultante da circulação de comboios.

As características gerais do programa são:

- Interface tipo CAD em ambiente Windows;
- Elementos finitos triangulares de 6 pontos nodais ou de 15 pontos nodais;
- Geração automática da malha de elementos finitos, dadas as fronteiras das diversas zonas com possibilidade de refinamento local ou global;
- Possibilidade de considerar elementos de junta nas interfaces entre as diversas zonas;
- Equilíbrio em estado plano de tensão ou em axi-simetria;
- Fronteiras com deslocamentos impedidos, conhecidos ou fronteiras absorventes;
- Possibilidade de usar os modelos disponíveis no Programa Plaxis V8 destacando-se:
 - Elástico linear;
 - Mohr-Coulomb;
 - Hardening Soil;
 - Soft-Soil Creep;
 - User Defined.
- Geração de excessos de pressão intersticial devido à deformação volumétrica dos solos em comportamento não drenado.

Os parâmetros necessários para cada um dos modelos dependem, naturalmente, do modelo em causa. Nos modelos com elasticidade linear (nos quais se inclui o modelo elástico linear e o modelo Mohr-Coulomb) pode-se alternativamente introduzir os parâmetros E e ν ou as velocidades de propagação das ondas C_p e C_s . Conhecido o valor do peso volúmico, a relação entre os dois conjuntos de parâmetros é definida.

Para além dos parâmetros acima referidos, havendo amortecimento, é necessário fornecer ao programa os respectivos coeficientes. A formulação adoptada no Plaxis Dynamics é a de amortecimento de Rayleigh:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad \text{Eq. 4.1}$$

onde $[C]$ representa a matriz de amortecimento $[M]$ a matriz de massas, $[K]$ a matriz de rigidez e α, β os parâmetros de amortecimento. Os parâmetros de amortecimento são definidos para cada tipo de material.

No que respeita ao carregamento, para além do carregamento estático, o programa aceita carregamentos dinâmicos a partir de acelerogramas, histórias de velocidade e de deslocamentos digitalizados ou carregamentos harmónicos do tipo:

$$F(t) = F_0 \text{sen}(\omega t + \phi_0) \quad \text{Eq. 4.2}$$

onde F_0 representa a amplitude da carga, ω a velocidade angular e ϕ_0 o ângulo inicial de fase.

O programa Plaxis Dynamics é considerado um acessório do Plaxis V8. Assim, o custo do pacote tem de incluir o programa de base acrescido do módulo dinâmico. Na versão de 2004 os custos são:

Quadro 4.2 – Preços do programa Plaxis

Item	Versão Profissional	Versão Educacional
Plaxis V8	5000 €	2550 €
Plaxis Dynamics	1000 €	500 €
Total	6000 €	3050 €

4.5– Abaqus

O programa ABAQUS é um programa genérico de análise de problemas de engenharia pelo método dos elementos finitos.

A geometria dos modelos é tridimensional e o programa permite efectuar análises estáticas ou dinâmicas em regime linear ou não-linear.

A análise dinâmica pode ser feita em análise modal ou em integração implícita no tempo. Para problemas fortemente não lineares está disponível um módulo para realizar a análise explícita.

O programa inclui diversos modelos lineares, isotrópico, anisotrópico, viscoso, etc., elasto-plásticos (incluindo o modelo Cam-clay) e muitos outros modelos especiais, nomeadamente para estudos de acústica e de difusão. Além disso permite definir modelos adicionais.

A biblioteca de elementos finitos inclui diversos tipos de elementos, unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais que, no caso de problemas tensão-deformação, podem ser formulados para pequenas ou grandes deformações.

A modelação do campo afastado poder ser feita com o recurso a elementos infinitos com amortecimento e as condições de fronteira podem ser do tipo deslocamento conhecido, impedido ou fronteiras absorventes.

É necessário ainda salientar que foram encontradas referências à utilização do Abaqus no estudo da propagação de ondas devido a comboios de alta velocidade (Hall, 2000).

O programa Abaqus na versão comercial é “alugado” e custa 21 450 €/ano. As versões académicas, como se aplica no caso do LNEC, custam cerca de 10% do valor da versão comercial.

4.6– Adina

O programa Adina é constituído por um pacote de módulos destinados a diversos tipos de análises 3D pelo método dos elementos finitos. Está disponível para diversas plataformas destacando-se os sistemas Unix e Windows sendo é capaz de fazer o processamento paralelo em sistemas de vários processadores.

De entre as várias possibilidades de cálculo destacam-se:

- Análise estática;
- Análise dinâmica no domínio da frequência;
- Análise dinâmica no domínio do tempo.

A geometria tridimensional do problema é definida num ambiente gráfico recorrendo a diversas primitivas que se podem combinar, adicionar ou subtrair. A malha de elementos finitos é gerada partindo da geometria e subdivisões definidas para os diversos alinhamentos.

O programa contempla diversos tipos de modelos, elásticos (linear; ortotrópico; não linear), plásticos, plásticos com fluência, e modelos geotécnicos (Mohr-Coulomb; Cam-Clay) entre outros.

As licenças de utilização, para investigação do programa Adina têm um desconto de 50% sobre o preço da versão comercial. Além disso o programa pode ser usado na versão “alugada” ou comprada sendo os preços respectivos de, 5250 €/ano, no primeiro caso e 9200 €, no segundo.

4.7 – Diana

O programa DIANA permite a análise tridimensional estática e dinâmica em regime não linear de estruturas de engenharia através do método dos elementos finitos. O programa dispõe de uma vasta biblioteca de tipos de elementos finitos e de procedimentos sendo especialmente vocacionado para a análise de problemas em Mecânica dos Solos e em estruturas metálicas e de betão armado. O programa tem sido aplicado no projecto de pontes, barragens, plataformas *offshore*, estradas, caminhos de ferro e túneis.

A biblioteca inclui elementos do tipo treliça, viga, estado plano de tensão e deformação, axi-simétricos, de laje, de casca, tridimensionais, de armadura, de interface e discretos (molas, amortecedores e de massa).

No que respeita a modelos reológicos o programa inclui, entre outros, modelos de elasticidade linear (isotrópica, ortotrópica), elasticidade não linear, elastoplásticos (Mohr-Coulomb, Cam-clay) e modelos visco-plásticos.

As análises dos problemas pode ser feita em regime estático linear e não linear, em regime dinâmico linear (resposta no domínio da frequência, em análise espectral ou no domínio do tempo).

O programa DIANA possui ainda outros módulos dos quais se destacam o módulo para estimativa de parâmetros e para a interacção fluido estrutura.

O programa DIANA pode ser usado em regime de aluguer anual e, quando se destina à investigação, os preços são mais reduzidos, rondando os 2000 €/ano.

4.8 – Flac 3D

O programa FLAC 3D “Fast Lagrangian Analysis of Continua in three Dimensions” é um programa de cálculo explícito pelo método das diferenças finitas para engenharia (Itasca, 1997). O FLAC 3D é baseado na formulação numérica usada na versão 2D (ver 4.3) e aplica-se, de igual forma, a estruturas em solo, rochas ou outros materiais com comportamento plástico. A modelação geométrica tridimensional é conseguida à custa de grelhas de poliedros, que se podem somar ou subtrair, por forma a materializar a estrutura pretendida.

À semelhança da versão bidimensional, não há lugar à formação de matrizes globais de rigidez para a estrutura, o que torna o programa pouco exigente em utilização de memória embora necessite, em contrapartida, de uma boa capacidade em termos de rapidez.

O programa FLAC 3D funciona em ambiente DOS ou Windows.

No que respeita aos modelos reológicos, estão contemplados essencialmente os mesmos modelos que se encontram na versão bidimensional podendo, também neste caso, realizar-se análises em tensões totais ou efectivas, bem como análises acopladas.

A malha de diferenças finitas pode considerar elementos estruturais, por exemplo, para a modelação do revestimento de túneis, estacas, geogrelhas, etc.

O cálculo dinâmico está disponível do FLAC 3D como módulo opcional do programa. As acções dinâmicas correspondentes, podem ser aplicadas através de histórias de acelerações, velocidades, deslocamentos ou forças, quer como condição de fronteira externa, quer como acção interna.

A modelação do espaço infinito pode ser feita à custa de fronteiras absorventes ou de campo livre, ligadas à zona próxima da malha de diferenças finitas através de

amortecedores. Finalmente, refira-se que a análise dinâmica também pode ser acoplada ao escoamento.

O programa FLAC 3D já foi empregue na modelação da propagação de vibrações devidas à circulação de comboios de alta velocidade (Madshus, 2001).

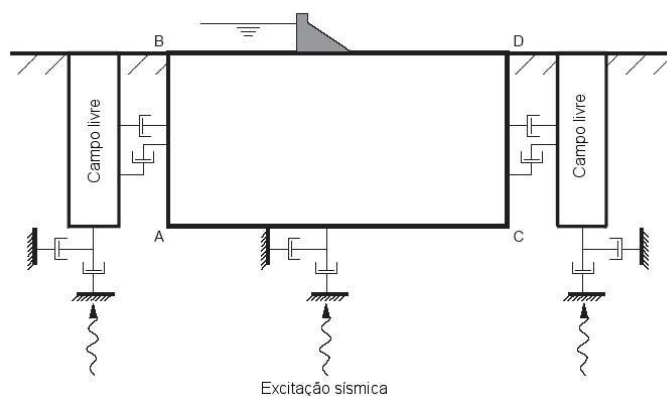


Fig. 4.1 – Fonteiras de campo livre implementadas no FLAC 3D (Itasca, 1997)

Os preços do Programa Flac 3D versão 2.1 são os apresentados no Quadro 4.3

Quadro 4.3 – Preços do programa FLAC3D

Item	Versão Profissional	Versão Educacional
FLAC3D 2.1	9230 €	-
Dynamic option	2308 €	-
Total	11538 €	-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad et. al. (1991)-"Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches".Journal of Geotechnical Engineering 117(1) 67-8821, 83, 85
- Aird et al. (1991)-"IMSL Technical Report 9103".IMSL, Houston..... 45
- Anderson et al.(2000)-"Model testing of two-layer railway track ballast".Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, April 2000 18
- Bahrekazemi et al. (2002)-"Train-Induced Ground Vibrations Reduced by Lime-Cement Column Soil Stabilization".Structural Dynamics, EUROODYN2002, Grundmann & Schueller (eds) pp. 473-478 78
- Bettess (1992)-"Infinite Elements".Penshaw Press.....58
- Biot (1937)-"Bending of an infinite beam on an elastic foundation".Journal of Applied Mechanics, ASCE, pp. A1-A7 43
- Cristóvão (1985)-"Melhoria das características geotécnicas de solos com os vibradores em profundidade. Vibrocompactação e substituição por "Estacas de brita"".Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa..... 79
- Dawn and Stanworth (1979)-"Ground vibration from passing trains".Journal of Sound Vibration, 66; pp 335-362..... 14
- Degrande et al.(2001)-"Free field vibrations during the passage of a thalys high-speed train at variable speed".Journal of Sound and Vibration (2001) 247(1), 131-144..... 32, 73
- Dobry et al., (1987)-"Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits".International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City. Proceedings, vol. 2, pp. 51-87.....29, 31
- Esveld (2001)-"Modern Railway Track".MRT-Productions. Delft University of Technology..... passim
- Filippov (1961)-"Steady-state vibrations of a infinite beam on elastic half-space subjected to a moving load".Izvestija AN SSSR OTN Mehanika i Mashinostroenie 7, 97-105..... 31
- Fortunato (2000) - Modernização da Linha do Norte. Estudos Relativos à Renovação Da Plataforma. Ensaios de Carga com Deflectómetro de Impacto Portátil. LNEC Rel 248/2000-DG. Lisboa 69
- Fortunato, E.; Mateus da Silva, J.M.M.; Pinelo, A. (2002) – Caracterização de camadas de reforço de plataformas ferroviárias. 8º Congresso Nacional de Geotecnia, LNEC, Lisboa, 15 a 18 de Abril de 2002 69
- Fryba (1972)-"Vibration of Solids and Structures under Moving Loads".Noordhoff International Publishing, Groningen, The Netherlands 36

Frýba et al.(1998)-"Bounds analysis of a beam based on the convex model of uncertain foundation".Journal of Sound and Vibration (1998) 212(3), 547-557.....	48, 49
Gardien et al.(2003)-"Modelling of soil vibrations from railway tunnels".Journal of Sound and Vibration 267 (2003) 605–619	59
GeoSlope (2001)-"Quake/w Users Manual".Geo-Slope International. Calgary, Alberta, Canadá.....	139
Goodall (2002)-"Mechatronic developments for railwayvehicles of the future".Control Engineering Practice 10 (2002) 887–898.....	12
Gutowski et al.(1976)-"Propagation of ground vibration:a review".Journal of Sound and Vibration (1976) 49(2), 179-193.....	61
Hall (2000)-"Simulations and analyses of train-induced ground vibrations. A comparative study of two- and three-dimensional calculations with actual measurements".Royal Institute of Technology. Doctoral Thesis 1034. Stockholm 2000	passim
Hall (2003) -"Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models".Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23 (2003) pp 403-413.....	14, 34
Hartung et al.(2003)-"A full-scale test rig for railway rolling noise: simulation and measurement of dynamic wheelset-track interaction".Journal of Sound and Vibration 267 (2003) 549–563.....	73
Heelis et al.(1999)-"Predicting and measuring vertical track displacements on soft subgrades".World Congress on Railway Research October 19-23, 1999 Tokyo, Japan.....	20, 57, 73
Hildebrand (2004)-"Effect of soil stabilization on audible band railway ground vibration".Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24 (2004) pp 411–424	17, 78
Hu (2004)-"Three-Dimensional Analyses of Wave Barriers for Reduction of Train-Induced Vibrations".Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130:7 740-748.....	84
Hung et al.(2001)-"A Review of Researches on Ground-Borne Vibrations with Emphasis on Those Induced by Trains".Proc. Natl. Sci. Council. ROC(A) Vol. 25, No. 1, 2001. pp. 1-16	passim
Hung et al.(2004)-"Wave barriers for reduction of train-Induced vibrations in soils".Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering. 1283-1291 (2004).....	83

Ishibashi et al. (1993)-"Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay".Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 33, n. 1, pp. 182-191	29, 30
Ishihara (1993)-"Dynamic properties of soils and gravels from laboratory tests".Proc. of the Seminar on Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, P. S. Sêco e Pinto Editor, A.A. Balkema, pp. 1-17	28
Itasca (1997) - FLAC3D VERSION 2 MANUAL. Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, Minnesota-USA.....	148, 149
Itasca (2003) - FLAC VERSION 4.0 MANUAL. Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, Minnesota- USA.....	141, 148
Jones et al.(1996)-"Prediction of ground vibration from freight trains".Journal of Sound and Vibration (1996) 193(1) 205-213	32
Kaynia et al.(2000) -"Ground vibration from high-speed trains: prediction and countermeasure".Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering.....	4, 55
Kenney (1954)-"Steady-state vibrations of a beam on elastic elastic foundation for moving load".Journal of Applied Mechanics, Vol. 76, pp. 359-364	44
Kocak et al.(2001)-"Parallel schur complement method for large-scale systems on distributed memory computers".Appl Math Modell 2001; 25:873–86.....	60
Kogut et al.(2003)-"In situ vibration measurements on the high speed track L2 - Brussels-Köln".Structures for high-speed railway trasnpostation. IABSE Symposion 2004	55
Krylov (2002)-"Effects of the embankment topography and track curvature on ground vibration boom from high-speed trains".Structural Dynamics, EUROODYN2002, Grundmann & Schueller (eds) pp. 473-478	14
Labra (1975)-"An axially stressed railroad track on an elastic continuum subjected to a moving load".Acta Mechanica 22, 113-129.....	53
Lamb (1904)-"On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid".Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, CCIII 1, 1-42	26, 35
Ljungberg et al.(1997)-"Seismic field mesurements in soft clay at Grums, Sweden".Inst. För Anläggning och Miljö. Kungl Tekniska Högskolan	69
Madshus (2001)-"Modelling, monitoring and controlling the behaviour of embankments under high speed loads".Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures. 225-238.....	148

Madshus et al.(2000)-"High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed".Journal of Sound and Vibration (2000) 231(3), 689-701	31
Mateus da Silva et al.(2004)-"Modernização da Linha do Norte. Estudos relativos à renovação da plataforma. Estudo analítico para o dimensionamento das camadas de reforço da plataforma ferroviária considerando a estabilização de solos com cal.".Núcleo de Barragens e Obras de Aterro	82
Metrikine et al.(2001)-"Drag experience by a high-speed train due to excitation of ground vibrations".International Journal of Solids and Structures 38 (2001) 8851-8868.....	18
Montanelli, et al.(2003)-"Geogrid reinforced railways embankments: Design concepts and experimental test results".Structures for high-speed railway transtation. IABSE Symposium 2003. Antwerp. Belgium. August 27-29, 2003	81
Paolucci et al.(2003)-"Numerical prediction of low-frequency ground vibrations induced by high-speed trains at Ledsgaard, Sweden".Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23 (2003) pp 425–433	62
Perera et al.(1997)-"FE-BE Coupling Methods for Elastoplasticity". Communications In Numerical Methods In Engineering, Vol. 13, 785-792 (1997)	59
Picoux et al.(2002)-"Experimental and Numerical Investigations on Vibrations from a Railway Traffic moving on a Soft Ground".Structural Dynamics, EUROODYN2002, Grundmann & Schueller (eds) pp. 473-487	32
Plaxis (2004)-"Plaxis Dynamics Manual".Plaxis BV, Delft Holland	144
Powell-Ladret (1999)-"From the TGV system to the tilting TGV".Recherche transports sécurité N° 64, Juillet-Setembre.....	13
Przemieniecki (1963) JS. -"Matrix structural analysis of substructures. ".AIAA J 1963;1:138–47.	60
Santos, Jaime (1999)-"Caracterização de solos através de ensaios dinâmicos e cíclicos de torção. Aplicação ao estudo de comportamento de estacas sob acções horizontais estáticas e dinâmicas".Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa	65, 66
Schnack et al.(1997)-"Domain decomposition with BEM and FEM".International Journal For Numerical Methods In Engineering, Vol. 40, 2593-2610 (1997).....	59
Sheng et.al. (1999)-"Ground vibration generated by a load moving along a railway track".Journal of Sound and Vibration (1999) 228(1), 129-156.....	32, 33, 50, 51
Sheng et.al. (1999a)-"Ground vibration generated by a harmonic load acting on a railway track".Journal of Sound and Vibration (1999) 225(1), 3-28.....	50

Sheng et.al. (2003)-"A comparison of a theoretical model for quasi-statically and dynamically induced environmental vibration from trains with measurements".Journal of Sound and Vibration 267 (2003) 621–635	50, 55
Shin et al.(2002)-"Geogrid-reinforced railroad bed settlement due to cyclic load".Geotechnical and Geological Engineering 20: 261-271, 2002.....	56
Sitharam et al.(1998)-"Non-linear analysis of geomechanical problems using coupled finite and infinite elements".Geotechnical and Geological Engineering, 1998, 16, 129–149	58
Smekal, et al.(2002)-"Mitigation of track vibration at Ledsgard Sweden, Field measurements before and after soil improvement".Structural Dynamics, EURODYN2002, Grundmann & Schueller (eds) pp. 473-486	70
Sunaga (2001)-"Characteristics of embankment vibrations due to high-speed train loading and some aspects of the design standard for high -speed links in Japan".Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures. 203-211	9
Takemiya et al.(1995)-"Embankment train track on soil stratum and wave impeding block (WIB) measured for vibrations reduction".Transactions on Built Environment 14.....	87
Vucetic (1994)-"Cyclic threshold shear strains in soils".Journal of Geotechnical Engineering ASCE, vol. 120, no.12, pp. 2208-2228.	28
Wilson et al.(1983)-"Control of ground-borne noise and vibration".Journal of Sound and Vibration 87(2), 339-350	89
Woods (1978)-"Measurements of dynamic soil properties".Proc. ASCE Geotechnical Specialty Conference, Earthquake Eng. and Soil Dynamics. Pasadena Ca. Vol1, pp. 91-178	67
Yang, et.al. (2001)-"A 2.5D finite/infinite element approach for modeling visco-elastic bodies subjected to moving loads".International Journal For Numerical Methods In Engineering 51:1317–1336	62, 63
Yang, et.al. (2003)-"Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation".Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23 (2003) pp 263-278.....	44, 58
Yerli, et al.(2003)-"A parallel finite–infinite element model for two-dimensional soil–structure interaction problems".Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23 (2003) 249–253.....	60
Zhai et al.(2004)-"Modelling and experiment of railwayballast vibrations".Journal of Sound and Vibration 270 (2004) 673–683	19, 72

ENDEREÇOS DA INTERNET

http://www.bwk.kuleuven.ac.be/bwm/ Department of Civil Engineering, K.U. Leuven, Belgica	55
http://www.co.sncf.com/histoire/etablissement.htm	5
http://www.railway-technology.com/projects	5
http://www.railway-technology.com/projects/shinkansen/specs.html - The Website for the railway industry	5
http://www.railway-technology.com/projects/sweden/index.html	14
http://www.rave.pt - Endereço da Rede de Alta Velocidade em Portugal	11
http://www.rave.pt /ligacoes/ligacoes.htm	3
Takemiya <i>et al.</i> (www.aisawa.co.jp)-"Development of Vibration Reduction Measure Wave Impeding Block ". http://www.aisawa.co.jp /giken /ronbun /doboku /istokyo/wibkoku.htm	87