

DISPOSIÇÕES TÉCNICAS DE VIA EM LINHAS FERROVIÁRIAS DE ALTA VELOCIDADE

PEDRO JAIME ALEXANDRINO PEQUITO MINGA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor António José Fidalgo do Couto

JUNHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

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

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

À minha família e amigos

“Nada está feito enquanto restar alguma coisa para fazer”

Romain Rolland

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer de forma muito especial ao meu Orientador, Professor Doutor António Fidalgo Couto, da secção de Vias de Comunicação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela proposta de um tema que tanto me interessou e entusiasmou. O seu conhecimento, domínio e competência nesta área ajudaram-me imenso. Agradeço, acima de tudo, todo o apoio que me prestou, a sua total disponibilidade e empenho na orientação da minha investigação. O meu obrigado pelas sugestões e indicações nas tomadas de decisão bem como as correcções e o fornecimento de informação fundamental na elaboração desta tese.

Agradeço também ao Professor Rui Calçada, da secção de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela sua colaboração nesta investigação, indicando-me alguns livros essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

O meu obrigado ao Professor Vaz Guedes, docente no Departamento de Engenharia Electrónica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela importante bibliografia facultada no âmbito deste projecto.

Um agradecimento especial à RAVE (Rede Ferroviária de Alta Velocidade), designadamente à sua Directora de Comunicação e Imagem, Fernanda Rendeiro, pela amabilidade com que respondeu à minha solicitação de bibliografia e aos documentos fundamentais que disponibilizou para a elaboração desta dissertação.

Ao Engenheiro Civil Henrique Oliveira de Sá, uma palavra de agradecimento pelos textos que me facultou e o aconselhamento no modo como devia abordar determinadas questões específicas.

O meu muito obrigado aos meus pais, pela preocupação com o meu trabalho e por terem criado todas as condições para que a investigação se tenha desenvolvido de uma forma natural. A minha gratidão pela força, apoio, entusiasmo e pela confiança que sempre demonstraram nas minhas capacidades.

À minha avó Néné e irmã Paula o meu apreço pelo carinho e incentivos.

Aos meus tios Júlio e Manuela o reconhecimento pela amizade e apoio.

Agradeço a todos os meus amigos pelos momentos de descontração e boa disposição que me proporcionaram durante a elaboração da dissertação. Obrigado ao João Diogo, Nuno Farias, Rui Neiva, Joel Malveiro e André Domingues pela companhia e motivação que me deram em tantos dias vividos a trabalhar na biblioteca da Faculdade. Ao João Laranjeira, Mauro Rego, Luís Rodrigues, Nuno Ferreira, Gonçalo Correia, Fernando Pinto, Luís Cunha, Gonçalo Saraiva, Samuel Vieira, João Ferreira, André Morais, João Neto, José Pedro, Hélio Silva, Tiago Tarrataca, pela força transmitida ao longo destes últimos cinco anos e especialmente nesta fase árdua de trabalho.

À memória dos meus avós António e Lena que tanto gostaria de ter presentes neste momento.

RESUMO

A tese exposta versa, em toda a sua estrutura e composição, sobre o Mundo da Alta Velocidade. Este universo tão complexo e com tanto para descobrir foi aqui retratado através dos seus elementos mais importantes.

Procura-se organizar a informação contemplada e analisada segundo uma construção que seja fiel ao princípio da linearidade, isto é, pretende-se expor os conteúdos de uma forma encadeada onde as matérias abordadas se perfilam de uma forma ordenada. Teve-se sempre o cuidado de, cada vez que se introduzia um novo assunto, referir a sua base e contextualização para o leitor poder acompanhar rigorosamente a obra.

Numa dissertação com este título, e subordinada à temática da alta velocidade, é imperativo elaborar primeiramente um enquadramento histórico com a finalidade de se perceber a evolução documentada deste transporte nos vários países precursores desta tecnologia.

No seguimento torna-se necessário discutir a dicotomia entre alta velocidade e velocidade elevada que tanta polémica gerou e ainda gera nos dias de hoje. E na continuação dessa controvérsia afigura-se plausível a explanação de novos projectos de alta velocidade em debate.

Na preparação da dissertação, averiguou-se que um dos capítulos fundamentais era a temática das inclinações longitudinais máximas em alta velocidade e daí se dedicar uma divisão exclusiva para esta temática. Contudo, tendo em conta a lei da continuidade, deve anteceder um capítulo que explicita os conteúdos de suporte a este tema das rampas, que no caso são a tracção e resistências.

A presente investigação tem como objecto central a problemática questão geométrica dos raios de curvatura e as consequentes grandezas do traçado que derivam desta análise. Neste campo, incluem-se todos os parâmetros geométricos bem como a relação e influência que todos estes geram entre si e que perfazem as ideias de um capítulo.

Para complementar toda o conhecimento até aqui reunido, resta a descrição de outra componente fundamental da via-férrea, que se trata dos materiais de via e a discussão entre via balastrada e não balastrada.

Assim, tendo em conta toda a pesquisa programada para alcançar estas finalidades, dividiram-se as matérias seleccionadas pelos capítulos e fases que acima se explicaram. As conclusões desta tese são esclarecedoras quanto à satisfação dos objectivos propostos.

PALAVRAS-CHAVE: alta velocidade, via-férrea, rampa, raio de curvatura, traçado.

ABSTRACT

The thesis here presented aims, during all its composition, to present the World of High Speed Railways. This complex universe, which has so much to discover, is here presented through its most important elements.

It is intended to present all the information in a linear way, i.e., the contents exposed are connected with each other and are present in an orderly fashion. To allow the reader to keep up with all the subjects, every time a new topic is introduced its fundamentals and contextualization are explained.

In a dissertation related with the topic of high speed railway, it is of primary importance to present the history of this mean of transportation in order to notice its evolution in the countries which first implemented this technology.

In the next section the high speed – elevated speed dichotomy is discussed, since it generated large discussions in the past, with some of them still persisting nowadays. In the continuation of this controversial topic, new high speed projects being debated today are presented.

During the preparation of the dissertation, the topic of maximum longitudinal gradients revealed itself as one of the most important subjects, so a whole chapter is dedicated to it. However, since the topic of ramps is the follow-up of others, like traction and resistances, the preceding chapter presents those concepts.

One of the main objectives of the present research is the question of curvature radius and the consequences in terms of railway planning that derives from the analysis of those parameters. All the geometric parameters, and the relations between them, constitute a new chapter.

In order to complement all knowledge assembled until this point in the dissertation, another fundamental component of a railway is described: the materials which physically constitute the railway and the discussion between non ballasted and ballasted railways.

Considering all the research conducted to achieve the proposed objectives, the subjects were divided into the aforementioned chapters. The conclusions of this thesis clarify the accomplishment of those objectives.

KEYWORDS: high speed, railway, ramp, curvature radius, railway planning.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÕES/DOMÍNIO DE PENSAMENTO	1
1.2. CAMPO DE APLICAÇÃO	2
1.3. OBJECTO DE ESTUDO/MÉTODO DE INDAGAÇÃO	2
1.4. ESTRUTURA DA TESE.....	3

2. EVOLUÇÃO MUNDIAL DA ALTA VELOCIDADE	5
2.1. ENQUADRAMENTO	5
2.2. O QUE É ALTA VELOCIDADE?	5
2.3. VISÃO DO AUTOR	7
2.4. HISTÓRIA DA ALTA VELOCIDADE	7
2.4.1. A EVOLUÇÃO MUNDIAL DAS REDES FERROVIÁRIAS DE ALTA VELOCIDADE	8
2.4.2. LEVITAÇÃO MAGNÉTICA.....	9
2.4.3. UMA VISÃO DA ALTA VELOCIDADE EM PORTUGAL	9
2.4.4. TECNOLOGIA DA ALTA VELOCIDADE	10
2.4.5. COMPARAÇÃO COM OUTROS MEIOS DE TRANSPORTE	11
2.4.5.1. Automóvel	12
2.4.5.2. Avião.....	12
2.4.6. PAÍSES SERVIDOS PELA ALTA VELOCIDADE	13
2.4.6.1. Alemanha	13
2.4.6.2. Benelux.....	15
2.4.6.3. Países Baixos.....	15
2.4.6.4. França	15
2.4.6.5. Itália.....	17
2.4.6.6. Espanha	18
2.4.6.7. Reino Unido.....	19

2.4.6.8. China	20
2.4.6.9. Coreia	21
2.4.6.10. Japão	22
2.4.7. ALTA VELOCIDADE NO MUNDO	24
2.4.8. RECORDES DE VELOCIDADE	26

3. ALTA VELOCIDADE VS VELOCIDADE ELEVADA.....29

3.1. ENQUADRAMENTO	29
3.2. ALTA VELOCIDADE VS VELOCIDADE ELEVADA	29
3.2.1. ALTA VELOCIDADE	29
3.2.2. VELOCIDADE ELEVADA	32
3.2.3. ALTA VELOCIDADE VS VELOCIDADE ELEVADA: FACTOS E NÚMEROS	32
3.2.3.1. Alta Velocidade: Velocidades Máximas	33
3.2.3.2. Velocidade Elevada: Velocidades Máximas	33
3.2.3.3. Alta Velocidade e Velocidade Elevada na Europa: Velocidades Comerciais	33
3.3. SÍNTESE.....	35

4. RESISTÊNCIAS E TRACÇÃO.....37

4.1. ENQUADRAMENTO	37
4.2. ESFORÇO DE TRACÇÃO	37
4.2.1. DEFINIÇÃO.....	37
4.2.2. TRACÇÃO NOS COMBOIOS.....	37
4.2.3. TIPOS DE ESFORÇOS DE TRACÇÃO	38
4.2.3.1. Esforço de Tracção Máximo	38
4.2.3.2. Esforço de Tracção Contínuo	38
4.2.4. CURVAS DE ESFORÇO DE TRACÇÃO.....	39
4.2.5. VEÍCULOS FERROVIÁRIOS.....	39
4.2.6. TRACÇÃO ELÉCTRICA NOS COMBOIOS DE ALTA VELOCIDADE	40

4.2.7. PROBLEMA MECÂNICO	41
4.2.8. COMBOIOS DE TRACÇÃO ELÉCTRICA.....	42
4.2.8.1. TGV (Train Grand Vitesse) - França	43
4.2.8.2. ICE (Inter-City Express) - Alemanha	43
4.2.8.3. X2000/SJ (High Speed Train class X2) - Suécia	43
4.2.8.4. ETR (ElettroTrenoRapido) 500 - Itália	44
4.2.9. MOTORES ELÉCTRICOS VS MOTORES DIESEL	44
4.2.10. TRACÇÃO DISTRIBUÍDA POR VÁRIOS EIXOS.....	47
4.2.11. ESFORÇO DE TRACÇÃO MAIS ADEQUADO	49
4.2.12. POTÊNCIA MOTRIZ E CONSUMO ENERGÉTICO	52
4.3. RESISTÊNCIAS AO MOVIMENTO.....	54
4.3.1. DEFINIÇÃO E TIPOS DE RESISTÊNCIA	54
4.3.2. DESCRIÇÃO DE CADA TIPO DE RESISTÊNCIA	55
4.3.2.1. Resistência ao rolamento	55
4.3.2.2. Resistência aerodinâmica	57
4.3.2.3. Resistência devido às curvas do traçado	60
4.3.2.4. Resistência originada pela gravidade	61
4.3.2.5. Resistência de inércia	62
4.3.3. FÓRMULAS PROPOSTAS PARA ESTIMAR AS RESISTÊNCIAS.....	63
4.3.3.1. Conjunto de fórmulas habituais na Europa	63
4.3.3.2. Conjunto de fórmulas usadas na América Latina	65
4.3.3.3. Comparações	68
 5. DELIMITAÇÃO DE RAMPAS EM ALTA VELOCIDADE: CÁLCULO APROXIMADO	 69
5.1. ENQUADRAMENTO	69
5.2. RAMPAS MÁXIMAS EM ALTA VELOCIDADE	69
5.3. RAMPA INTEGRAL.....	71
5.4. CONCORDÂNCIAS VERTICAIS.....	71
5.5. FORÇAS DE ATRITO	73
5.6. CÁLCULOS DE INCLINAÇÕES MÁXIMAS	76
5.6.1. VELARO.....	77
5.6.1.1. Características	77

5.6.1.2. Esforço de Tracção Condicionante	78
5.6.1.3. Resistência Normal	79
5.6.1.4. Resistência devido a curvas do traçado	79
5.6.1.5. Resistência de Rampa	80
5.6.1.6. Resistência de Inércia	80
5.6.1.7. Equação do Movimento	80
5.6.1.8. Alterações a Factores Influentes	80
5.6.1.9. Situação de uma eventual paragem do veículo	81
5.6.2. CONSIDERAÇÕES	82
5.6.3. ALFA PENDULAR	82
5.6.3.1. Características	82
5.6.3.2. Resistência Normal	82
5.6.3.3. Resistência devido a curvas do traçado	83
5.6.3.4. Resistência de Rampa	84
5.6.3.5. Resistência de Inércia	84
5.6.3.6. Esforço de Tracção Condicionante	84
5.6.3.7. Equação do Movimento	85
5.6.3.8. Situação de uma eventual paragem do veículo	86
5.6.4. SNCF TGV POS	85
5.6.4.1. Características	87
5.6.4.2. Resistência Normal	87
5.6.4.3. Resistência devido a curvas do traçado	87
5.6.4.4. Resistência de Rampa	87
5.6.4.5. Resistência de Inércia	87
5.6.4.6. Esforço de Tracção Condicionante	87
5.6.4.7. Equação do Movimento	88
5.6.4.8. Situação de uma eventual paragem do veículo	88
5.6.5. AVE CLASS 102 (TALGO 150).....	89
5.6.5.1. Características	89

5.6.5.2. Resistência Normal	89
5.6.5.3. Resistência devido a curvas do traçado	90
5.6.5.4. Resistência de Rampa	90
5.6.5.5. Resistência de Inércia	90
5.6.5.6. Esforço de Tracção Condicionante	91
5.6.5.7. Equação do Movimento	91
5.6.5.8. Situação de uma eventual paragem do veículo	91
5.7. CONCLUSÕES.....	92

6. GEOMETRIA DE TRAÇADO

6.1. ENQUADRAMENTO	93
6.2. DEFINIÇÕES. TRAÇADO, DIRECTRIZ E ESPAÇO DESOBSTRUÍDO	94
6.3. DEFINIÇÃO DO TRAÇADO DE UMA LINHA FERROVIÁRIA DE ALTA VELOCIDADE	94
6.4. EFEITOS DAS CURVAS – MEDIDAS PARA A SUA REDUÇÃO	102
6.5. EXIGÊNCIAS DE RAIOS MÍNIMOS	103
6.6. GEOMETRIA – CONSIDERAÇÕES GERAIS	103
6.7. GEOMETRIA DE VIA E INTERACÇÃO VIA – VEÍCULO	104
6.7.1. COMPONENTES DA GEOMETRIA DE VIA	104
6.7.1.1. Bitola de Via	105
6.7.1.2. Escala h	105
6.7.1.3. Curva horizontal	106
6.7.1.4. Curva de transição e disfarce de sobrelevação	107
6.7.1.5. Interacção veículo – via	107
6.7.1.6. Escala teórica e velocidade de equilíbrio	109
6.7.1.7. Insuficiência de Escala e Excesso de Escala	110
6.7.1.8. Insuficiência de Escala	110
6.7.1.9. Excesso de Escala	112
6.7.1.10. Velocidades admissíveis de operação	112
6.7.1.11. Efeito de suspensão na aceleração lateral	113
6.7.1.12. Efeito de pendulação na insuficiência de escala	113
6.7.1.13. Escala Máxima	113
6.8. CURVAS DE TRANSIÇÃO	114
6.8.1. CLOTÓIDE	115

6.8.2. PARÁBOLA CÚBICA	116
6.8.3. OUTRAS CURVAS DE TRANSIÇÃO.....	118
6.8.4. CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DA CURVA DE TRANSIÇÃO	119
6.8.4.1. Variação da escala em função do tempo dh/dt	119
6.8.4.2. Variação da escala em função do comprimento dh/dl	119
6.8.4.3. Variação da insuficiência de escala em função do tempo dl/dt	120
6.8.4.4. Comprimento das curvas de transição no plano horizontal – L.....	121
6.9. CÁLCULO DE RAIOS MÍNIMOS	121
6.9.1. VELOCIDADE DE PROJECTO – 250 KM/H E BITOLA EUROPEIA	122
6.9.2. VELOCIDADE DE PROJECTO – 300 KM/H E BITOLA EUROPEIA	123
6.9.3. VELOCIDADE DE PROJECTO – 350 KM/H E BITOLA EUROPEIA	123
6.9.4. VELOCIDADE DE PROJECTO – 250 KM/H E BITOLA IBÉRICA.....	124
6.9.5. VELOCIDADE DE PROJECTO – 300 KM/H E BITOLA IBÉRICA.....	125
6.9.6. VELOCIDADE DE PROJECTO – 350 KM/H E BITOLA IBÉRICA.....	125
6.10. CONCLUSÕES	126
6.11. TROÇO POÇEIRÃO – CAIA	127
 7. PROJECTOS.....	 129
7.1. ENQUADRAMENTO	129
7.2. PROJECTOS	129
7.2.1. PORTUGAL	129
7.2.1.1. Descrição de Projecto	129
7.2.1.2. Objectivos	131
7.2.1.3. Impactos	132
7.2.2. BRASIL.....	133
7.2.2.1. Descrição de Projecto	133
7.2.2.2. Objectivos	134
7.2.2.3. Impactos	135
7.2.3. VANTAGENS DA ALTA VELOCIDADE	135

8. CONCLUSÕES	137
8.1. SUMÁRIO	137
8.2. ANÁLISE DE RESULTADOS	138
8.2.1. RAIOS DE CURVATURA	138
8.2.2. ESCALA, INSUFICIÊNCIA DE ESCALA E EXCESSO DE ESCALA	138
8.2.3. CURVAS DE TRANSIÇÃO	138
8.2.4. INCLINAÇÕES LONGITUDINAIS	139
8.2.5. CONCORDÂNCIAS VERTICAIS	139
8.2.6. SISTEMA DE TRACÇÃO	140
8.2.7. A IMPORTÂNCIA DO BALASTRO	140
8.2.8. NOTAS FINAIS	140
8.3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA ALTA VELOCIDADE	141
8.4. IMPACTO DA ALTA VELOCIDADE NA REDUÇÃO DOS TEMPOS DE VIAGEM	141
8.5. ALTA VELOCIDADE E O AUMENTO DO TRÁFEGO	142
8.6. PERSPECTIVAS DE INTERVENÇÃO	142
8.7. REFLEXÃO	142
 BIBLIOGRAFIA	 145
ANEXOS	147
ANEXO 1	149
ANEXO 2	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1. – Comboio ICE-3 na estação central Estugarda (Engenharia e Vida;2008)	14
Fig.2.2. – Comboio Thalys na estação Gare du Nord Paris (Engenharia e Vida;2008)	15
Fig.2.3. – Comboio TGV duplex (Engenharia e Vida;2008).....	17
Fig.2.4. – Comboio ETR 470 Cisalpino (Engenharia e Vida;2008).....	18
Fig.2.5. – Comboio AVE S-102 (Engenharia e Vida;2008).....	19
Fig.2.6. – Comboio Eurostar em direcção à Europa Continental (Engenharia e Vida;2008)	20
Fig.2.7. – Comboio Transrapid Xangai (Engenharia e Vida;2008)	21
Fig.2.8. – Comboio KTX coreano (Engenharia e Vida;2008).....	22
Fig.2.9. – Comboio TGV japonês (Engenharia e Vida;2008).....	24
Fig.2.10. – Rede de alta velocidade na Europa em 2025 (RAVE;2009)	26
Fig.4.1. – Curva de esforço de tracção (Esforço de Tracção[kN] em função da velocidade[m/s]) (Oliveros, Fernando;1980)	39
Fig.4.2. – Potência necessária à tracção (no plano e em movimento rectilíneo) (Vaz Guedes;1989).....	41
Fig.4.3. – Exemplo de distribuição de espaços num comboio de pequena lotação (André, José Maria;2008)	47
Fig.4.4. – Potência motriz instantânea, nas rodas, durante a fase aceleração dos comboios. A potência motriz nas rodas destes comboios, à velocidade de 250 km/h, em patamar e alinhamento recto é 241 kW (André, José Maria;2008).....	50
Fig.4.5. – Forças que se desenvolvem no movimento normal do veículo. f_t representa a resistência ao rolamento (André, José Maria;2008)	56
Fig.4.6. – Resistência mecânica e aerodinâmica em função da velocidade	59
Fig.4.7. – Resistência ao rolamento e potência de tracção requerida em função da velocidade (Profillidis;1995).....	60
Fig.4.8. – Resistência de rampa (Profillidis;1995).....	62
Fig.5.1. – Força de atrito f_{adh} (Profillidis;1995)	74
Fig.5.2. – Força de Tracção Z e força de atrito f_{adh} (Profillidis;1995).....	74
Fig.5.3. – Variação do coeficiente de atrito μ em função da velocidade V e as condições climáticas (Profillidis;1995).....	76
Fig.6.1. – Efeito da melhoria do traçado – aumento da velocidade máxima de 30 km/h – partindo de velocidades moderadas (linha hipotética – simulação teórica) (Romo Urroz;2007)	98
Fig.6.2. – Efeito da melhoria do traçado – aumento da velocidade máxima de 30 km/h – partindo de velocidades apreciáveis (linha hipotética – simulação teórica) (Romo Urroz;2007)	99

Fig.6.3. – Efeito da introdução de condições adequadas para velocidades elevadas em troços curtos (linha hipotética – simulação teórica) (Romo Urroz;2007)	100
Fig.6.4. – Prestações comparadas de comboios com velocidades máximas diferentes (linha hipotética – simulação teórica) (Romo Urroz;2007)	101
Fig.6.5. – Efeito comparado da circulação de comboios de velocidades máximas diferentes num percurso com paragens frequentes (linha hipotética – simulação teórica) (Romo Urroz;2007)	102
Fig.6.6. – Definição de bitola de via (Lindhal, Martin;2001)	105
Fig.6.7. – Escala h e ângulo correspondente ϕ (Lindhal, Martin;2001)	105
Fig.6.8. – Definição de curva circular horizontal com raio de curvatura R (Lindhal, Martin;2001)	107
Fig.6.9. – Definição da aceleração horizontal e aceleração gravítica (Lindhal, Martin;2001)	107
Fig.6.10. – Decomposição da resultante da aceleração num plano paralelo e perpendicular à via (Lindhal, Martin;2001)	108
Fig.6.11. – Evolução da curvatura na clotóide (Esvelde, Coenraad;2001)	115
Fig.6.12. – Parábola Cúbica (Profillidis;1995)	117
Fig.6.13. – Parábola Cúbica - comprimento (Esvelde, Coenraad;2001)	118
Fig.7.1. – Rede de alta velocidade planeada para a Península Ibérica (RAVE;2009)	131
Fig.7.2. – Poupança de tempos de viagem após implantação da linhas de alta velocidade projectadas (RAVE;2008)	132
Fig.7.3. – Linha ferroviária de alta velocidade Rio de Janeiro – São Paulo (ITAPLAN;2005)	134

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Alta Velocidade no Mundo (Extensões e Velocidades)	25
Quadro 2 – Relação entre PIB e População dos Países Europeus.....	30
Quadro 3 – Preços Alta Velocidade na Europa	35
Quadro 4 – Relação entre Potência de Tracção e Velocidades	51
Quadro 5 – Massa aderente mínima.....	52
Quadro 6 – Viagem Comboio de alta velocidade de Lisboa para o Porto (Traçado A).....	53
Quadro 7 – Viagem Comboio de alta velocidade de Lisboa para o Porto (Traçado B).....	53
Quadro 8 – Raio de concordância vertical em função da velocidade.....	72
Quadro 9 – Valores exigidos para o coeficiente de atrito μ na aceleração	75
Quadro 10 – Valores exigidos para o coeficiente de atrito μ na travagem	75
Quadro 11 – Resistência Normal – Componente mecânica (Alfa Pendular).....	83
Quadro 12 – Resistência Normal – Componente aerodinâmica (Alfa Pendular)	83
Quadro 13 – Resistência Normal (Alfa Pendular)	83
Quadro 14 – Resistência de Curva (Alfa Pendular)	83
Quadro 15 – Resistência de Inércia (Alfa Pendular).....	84
Quadro 16 – Esforço de tracção aderente (Alfa Pendular)	84
Quadro 17 – Resistência Normal – Componente mecânica (TGV POS)	86
Quadro 18 – Resistência Normal – Componente aerodinâmica (TGV POS)	86
Quadro 19 – Resistência Normal (TGV POS).....	87
Quadro 20 – Resistência de Curva (TGV POS).....	87
Quadro 21 – Resistência de Inércia (TGV POS)	87
Quadro 22 – Esforço de tracção aderente (TGV POS).....	88
Quadro 23 – Resistência Normal – Componente mecânica (AVE CLASS 102)	89
Quadro 24 – Resistência Normal – Componente aerodinâmica (AVE CLASS 102)	90
Quadro 25 – Resistência Normal (AVE CLASS 102).....	90
Quadro 26 – Resistência de Curva (AVE CLASS 102)	90
Quadro 27 – Resistência de Inércia (AVE CLASS 102)	91
Quadro 28 – Esforço de tracção aderente (AVE CLASS 102)	91
Quadro 29 – Valor do Raio ($V=300$ km/h).....	123
Quadro 30 – Aceleração não compensada, Excesso de escala e $V_{\min}(V=300$ km/h)	123
Quadro 31 – Valor do Raio ($V=350$ km/h).....	124

Quadro 32 – Aceleração não compensada, Excesso de escala e $V_{\min}$ ($V=350$ km/h)	124
Quadro 33 – Valor do Raio ($V=250$ km/h).....	124
Quadro 34 – Aceleração não compensada, Excesso de escala e $V_{\min}$ ($V=250$ km/h)	124
Quadro 35 – Valor do Raio ($V=300$ km/h).....	125
Quadro 36 – Aceleração não compensada, Excesso de escala e $V_{\min}$ ($V=300$ km/h)	125
Quadro 37 – Valor do Raio ($V=350$ km/h).....	125
Quadro 38 – Aceleração não compensada, Excesso de escala e $V_{\min}$ ($V=350$ km/h)	125
Quadro 39 – Características da linha de alta velocidade Lisboa – Madrid (troço Poçoirão – Caia)	127
Quadro 40 – Características da linha Lisboa – Porto	129
Quadro 41 – Características da linha Lisboa – Madrid	130
Quadro 42 – Características da linha Porto – Vigo.....	130
Quadro 43 – Características da linha Rio de Janeiro – São Paulo.....	133
Quadro 44 – Características de linhas de alta velocidade na Europa	141

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

P – potência [W]

F – força [N]

V – velocidade [m/s]

R – resistência [kN]

f_t – força de tracção [N]

f_n – carga vertical [N]

C_D – coeficiente adimensional de resistência aerodinâmica

Re – Número de Reynolds

P – massa volúmica do ar [kg/m^3]

R_g – resistência de rampa [kN]

P – peso [kN]

i – inclinação longitudinal [mm/m] ou [‰]

R_i – taxa de resistência de inércia [kg/t]

q – coeficiente de massa

a – aceleração horizontal [m/s^2]

V – velocidade [km/h]

M – massa [t]

m – massa por eixo [t]

λ – parâmetro que depende do material rolante

S – área da secção transversal da superfície frontal [m^2]

p – perímetro parcial do nível inferior do veículo [m]

k_1 – parâmetro que da forma da frente e retaguarda do veículo

k_2 – parâmetro que depende da condição da superfície

L – comprimento [m]

R_c – taxa de resistência de curva [kg/t]

R – raio de curva no plano horizontal [m]

R_{in} – taxa de resistência de inércia [kg/t]

R'_n – Taxa de resistência normal [lb/short-ton]

A – projecção da área frontal [sq.ft]

n – número de eixos do veículo

R_v – raio de curva de transição vertical [m]

a_v – aceleração vertical [m/s^2]

μ - coeficiente de atrito
 F_a – força de atrito [N]
 Q – carga vertical [N]
 Ψ – esforço de tracção [kN]
 F_c – força centrífuga [N]
 b – bitola de via [mm]
 a_y – aceleração lateral [m/s^2]
 Φ – ângulo de força lateral
 ϕ_t – ângulo correspondente à escala h
 h – escala [mm]
 h_t – escala teórica [mm]
 g – aceleração da gravidade [m/s^2]
 V_{eq} – velocidade de equilíbrio [km/h]
 I – insuficiência de escala [mm]
 E – excesso de escala [mm]
 ε – factor de suspensão
 A^2 – parâmetro da clotóide
 s – coeficiente de souplesse

AVE – Alta Velocidad Española
BR – British Railways
CLA – Coeficiente de Desgaste de Los Angeles
DB – Deutschen Bahn
EMU – Electric Multiple Unit
EN – European Norme
ETI – Especificações Técnicas de Interoperabilidade
FASTECH – Fast Technology
GPL – Gás de Petróleo Liquefeito

HST – High Speed Train

HSR – High Speed Rail

ICE – InterCity Express

KTX – Korea Train Express

PSE – Paris Sudeste

SNCF – Société Nationale des Chemins de fer Français

TAV – Treno Alta Velocità

TGV – Train à Grande Vitesse

UIC – União Internacional de Caminhos-de-ferro

1

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÕES/DOMÍNIO DE PENSAMENTO

Em primeiro lugar cabe referir o porquê da escolha deste tema de dissertação face a outros também extremamente interessantes. A escolha da tese “Disposições Técnicas de Via em Linhas Ferroviárias de Alta Velocidade” vem no âmbito das potencialidades que uma matéria como a alta velocidade pode atingir. Para esta preferência muito contribuiu o crescente interesse por caminhos-de-ferro, sua concepção, dimensionamento e evolução. As preocupações geométricas e definição do traçado constituíram outro importante factor decisivo na selecção da temática desta investigação.

O constante despertar de interesse pelo cálculo e projecto de vias-férreas assim como o gosto pela disciplina de Caminhos-de-Ferro revelaram-se razões determinantes para assumir a responsabilidade de abraçar uma investigação sobre alta velocidade extraordinariamente atraente.

Finalmente, outro aspecto que não pode deixar de ser evocado é o facto da discussão e polémica que se vive em torno da alta velocidade nomeadamente a questão do “TGV português” que paira na actualidade política. A vontade de aprofundar conhecimentos neste assunto é uma vantagem para possíveis discussões bem como uma melhor percepção dos benefícios que a alta velocidade pode proporcionar aos clientes e a um país que se pretende desenvolver, evoluir e crescer.

A nível da problemática da alta velocidade, é preciso repensar os moldes em que ela se insere, isto é, ponderar as distâncias requeridas, assim como os custos e investimentos necessários e a sua articulação com outros meios de transporte. Pensar nas linhas de alta velocidade como uma forma de transporte competitivo será proveitoso? Deve-se ter em conta a alta velocidade como uma solução/alternativa ao transporte aéreo e rodoviário, ou pretende-se gerar mais viagens, maior procura e aumento da mobilidade? Esta é uma questão mais política e do foro do planeamento de transportes, à qual se regressará na conclusão final da dissertação onde o autor expressará o seu pensamento, baseado tanto na consciência pessoal como na informação apresentada ao longo da tese.

1.2. CAMPO DE APLICAÇÃO

A presente dissertação pretende dar uma contribuição significativa para o universo da alta velocidade, isto é, procura ser um estudo que consiga conferir maior profundidade às discussões da alta velocidade. Existem inúmeras indagações sobre linhas ferroviárias de alta velocidade e esta tese aspira reunir essa informação, criticá-la, debatê-la e se possível, fornecer uma colaboração extra neste capítulo da alta velocidade.

Apesar de não ser um trabalho que sirva de base a qualquer projecto, pode muito bem ser aproveitado para experiências, testes e inclusive consulta de conteúdos relacionados com os vários subtítulos das linhas de alta velocidade. Não sendo um arquivo histórico, contém diversa informação referente aos países pioneiros em alta velocidade, seus modelos utilizados, suas tecnologias, modos de exploração, comboios desenvolvidos e linhas construídas. Não se tratando de um modelo de projecto, confina dados recentes sobre possíveis traçados em fase de aprovação. A terminar, não sendo um molde de cálculo, apresenta fórmulas matemáticas e cálculos propriamente ditos muito interessantes para se tirarem ilações seguras, conclusões aprofundadas nos respectivos capítulos e reforçadas na conclusão final.

Deste modo, a realização deste trabalho também vem tentar preencher uma lacuna existente no campo da alta velocidade, sendo que esta lacuna pauta-se pela ausência de uma concentração organizada de várias matérias relativas a este tema. Com isto, quer-se dizer que esta investigação pode não ser tão profunda em alguns assuntos mas procura ser mais abrangente que os vários estudos que se têm elaborado com um carácter muito específico.

1.3. OBJECTO DE ESTUDO/MÉTODO DE INDAGAÇÃO

Logicamente que o objecto de análise desta tese concentra-se na esfera da alta velocidade, mais especificamente em alguns aspectos deste tema. Já se referiu que procura ser uma investigação abrangente e completa, no entanto, existem conceitos que serão abordados mais pormenorizadamente pela importância que lhes foi atribuída pelo autor logo na deliberação inicial da dissertação. Deste modo, os temas centrais do presente trabalho são a questão das rampas máximas em alta velocidade e a problemática da geometria na qual se destaca mais particularmente a definição do raio de curvatura horizontal. Sendo estes os assuntos fulcrais da investigação, não se pode retirar o mínimo de importância a todos os outros temas e capítulos abordados no presente trabalho.

Na elaboração desta investigação, foi efectuada uma elevada pesquisa e fez-se várias consultas a material disponível respeitante ao tema da alta velocidade. A pesquisa bibliográfica foi operada em diversas bibliotecas através da procura de livros técnicos, teses, revistas científicas e documentos relativos à alta velocidade. Também se recorreu a sítios da internet específicos deste assunto, desde as redes que operam na alta velocidade europeia como opiniões e pareceres de especialistas no tema que expõem os seus comentários na internet. Todo o decurso da

investigação teve a sugestão do orientador e também se retirou conhecimento imprescindível através de diálogos informais com professores e técnicos experientes nesta área.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

A tese respeita uma organização ao longo de capítulos cuidadosamente estruturados. O conteúdo da presente investigação subdivide-se em oito capítulos.

O primeiro capítulo faz uma breve exposição do tema da tese, apresenta os seus objectivos principais e refere o seu contributo para um futuro próximo.

No capítulo dois efectua-se uma abordagem histórica da alta velocidade onde se faz referência aos países dianteiros nesta tecnologia, divulgam-se características e recordes da alta velocidade no Mundo.

O terceiro capítulo acolhe a polémica dicotomia entre alta velocidade e velocidade elevada, e apresentam-se alguns exemplos como comprovativo.

No capítulo quatro abrange-se toda a informação relativa a tracção e resistência. Menciona-se o esforço de tracção com especial destaque para a tracção eléctrica. Explanam-se diversas fórmulas para o cálculo das resistências ao movimento após uma explicação separada dos vários tipos de resistência.

O quinto capítulo dedica-se especialmente à questão das rampas máximas em alta velocidade. Faz um enquadramento ao perfil longitudinal e seus componentes e encerra com uma fase importante de cálculo baseado nas referências à resistência e tracção efectuadas no capítulo antecedente.

O sexto capítulo aborda um dos temas centrais que é a questão da geometria do traçado. É produzida uma explicação de todos os conceitos associados a este tema e termina-se com cálculos aproximados, mas muito úteis, do raio de curvatura horizontal jogando com todos os outros parâmetros associados.

No sétimo capítulo realiza-se uma sumária descrição e exposição de projectos recentes de alta velocidade, seus impactos e vantagens.

A terminar, o oitavo e último capítulo finaliza a tese com as conclusões finais, avaliações de resultados, perspectivas de intervenção nesta área e uma breve reflexão pessoal do autor.

2

EVOLUÇÃO MUNDIAL DA ALTA VELOCIDADE

2.1. ENQUADRAMENTO

O presente capítulo procura enquadrar o conceito de alta velocidade, descrevê-lo sucintamente e assinalar alguns marcos da alta velocidade no Mundo. Também pretende efectuar uma abordagem à história da alta velocidade referindo as suas origens e desenvolvimentos em vários países.

2.2. O QUE É ALTA VELOCIDADE?

Designa-se por comboio de alta velocidade um tipo de transporte ferroviário de passageiros interurbano que opera a velocidades superiores ao tráfego normal de veículos desta categoria. O conceito de alta velocidade é muito relativo mas existem fronteiras que se podem estipular. Um comboio de alta velocidade é essencialmente aquele que foi construído com as características específicas e o design adequado seguindo as instruções para circular a elevadas velocidades. Não existe uma velocidade definida que se possa afirmar que se trata de uma operação em alta velocidade, mas costuma-se designar por alta velocidade as circulações que excedem o valor de 200 km/h. O grupo de trabalho da União Internacional de Caminhos-de-Ferro refere que a definição de alta velocidade nasce de uma combinação de elementos que vão desde o material circulante, práticas de exploração a carris novos ou actualizados. Segundo esta instituição, são estas características que levam a considerar que determinado serviço deve ou não ser visto como alta velocidade. Deste modo, conclui-se que a velocidade que um veículo deve circular para ser qualificado de “alta velocidade” varia de país para país e oscila entre os 160 km/h e 300 km/h.

Existem diversas explicações sobre esta nuance, mas no presente trabalho será referida uma teoria que reunirá imprescindíveis considerações para ser aceite. Pode-se dizer que qualquer velocidade acima dos 160 km/h é considerada veloz e pode ser tomada como alta velocidade. Então, existe um problema, conforme se pode observar pelo caso do Reino Unido onde há vários comboios EMU (Electric Multiple Unit) que alcançam uma velocidade de 160 km/h e não são reconhecidos como veículos de alta velocidade mas sim como comboios expressos pois param em estações sem importância. Os verdadeiros comboios de alta velocidade podem argumentar que um veículo só pode ser chamado de alta velocidade quando conseguir viajar a uma velocidade mínima de 270 km/h que é o caso das linhas ferroviárias francesas. Neste caso, foram construídas linhas especiais para os comboios TGV (Train à Grande Vitesse) e as linhas

convencionais onde os comboios estão limitados à velocidade de 225 km/h não são designadas linhas de alta velocidade. De facto, foi apoiado pelos SNCF (Société Nationale des Chemins de fer Français) que um motor que atinja apenas 225 km/h não é assinalado como alta velocidade. Apenas o TGV é tido como veículo de alta velocidade. O TGV Sud-Est que é o mais lento circula a 270 km/h enquanto o TGV moderno consegue atingir uma velocidade comercial de 300 km/h e por vezes, alcança velocidades de pico superiores.

Contudo, na era dos anos 1930, do tempo dos comboios a vapor, os motores que alcançassem os 144 km/h eram utilizados unicamente para serviço de passageiros e eram considerados comboios expressos e rápidos, mas nesse tempo ainda não se idealizava a alta velocidade. Tal facto deriva dos veículos a vapor possuírem motores que raramente atingiam os 100 km/h ou 112 km/h. Seria ridículo dizer que a alta velocidade é ainda 160 km/h porque a maioria dos veículos está habilitado para circular a esta velocidade. Hoje em dia, pode não ser correcto dizer que a alta velocidade restringe-se a valores superiores a 270 km/h pois existem muitos países onde os comboios que atinjam 200 km/h já são considerados veículos de alta velocidade conforme é o caso do Inter-City 125 que sempre foi conhecido como transporte de alta velocidade. Também na Alemanha em 1999, a diesel ICE (InterCity Express) foi construída para se deslocar a 200 km/h como velocidade máxima e assim foi tida como uma máquina de alta velocidade. Perante estes factos, parece justo e claro afirmar que o sentimento geral é que o limite da alta velocidade se cifra nos 200 km/h.

Seguidamente, analisa-se a perspectiva da definição de alta velocidade na visão da UIC (União internacional dos Caminhos-de-Ferro). Segundo a UIC, as linhas de alta velocidade são o serviço que regularmente opera a uma velocidade acima dos 250 km/h nas linhas especificamente construídas ou próximo dos 200 km/h nas linhas existentes. Há um certo número de características comuns à maioria dos sistemas de linhas de alta velocidade. Grande parte são conduzidas pela via da electrificação embora não seja um aspecto definitivo e outras formas de propulsão são usadas, como a locomotiva a diesel nos serviços HST (High Speed Train) britânicos. Um aspecto decisivo é o uso de barras longas soldadas que reduzem as vibrações da linha e permitem ultrapassar as discrepâncias entre as barras contíguas a fim de possibilitar que os veículos circulem acima dos 200 km/h. O raio de curvatura é frequentemente o último factor limitativo na velocidade de um veículo com o desconforto dos passageiros a tornar-se mais importante que o risco de descarrilamento. Dependendo da velocidade projectada, a escala e as forças aceitáveis para os passageiros, as curvas excedem facilmente os 5000 m de raio. Contudo existem algumas excepções, as mudanças de via sem inclinação é uma política adoptada em quase todo o Mundo, com avançados sistemas de agulha usando uma entrada muito lenta e baixos ângulos de desvio. Aqui, os comboios de levitação magnética inclinam-se para a categoria das linhas de alta velocidade devido à sua associação com os veículos orientados pela linha; todavia, a sua incapacidade para operar em vias convencionais leva a que se incluam numa categoria distinta.

Para terminar este ponto e de acordo com os especialistas, a alta velocidade é a forma de transporte mais adequada para servir áreas de forte densidade geográfica e para distâncias compreendidas entre os 200 e os 1000 km. Acresce a este facto, a vantagem da acentuada saturação dos restantes meios de transporte concorrentes. Para distâncias inferiores a 200 km, o autocarro e o automóvel apresentam-se como sérios rivais e para além dos 1000 km ou tempos de viagem superiores a 4 horas de comboio, o avião apresenta maior sucesso.

2.3. VISÃO DO AUTOR

Neste ponto, o autor pretende expor a sua perspectiva sobre o que realmente considera tratar-se de alta velocidade. Logicamente que a sua explanação será baseada nos conteúdos, concepções e pontos de vista ressaltados no item anterior.

Para começar é necessário atentar na complexidade, relatividade e variância do conceito de alta velocidade. Sabe-se que o entendimento de alta velocidade varia de país para país e esta ideia diversifica-se na opinião e visão de vários estudiosos das linhas ferroviárias de alta velocidade. Esta questão já foi debatida nos parágrafos anteriores e explicitou-se uma visão diferenciada de vários países e inclusive da União Internacional dos Caminhos-de-Ferro.

Agora interessa manifestar a percepção do autor no que respeita à problemática da alta velocidade. Numa primeira apreciação, quero salvaguardar e frisar que o conceito de alta velocidade deve ser exigente, isto é, só se pode falar em alta velocidade quando estiverem reunidas determinadas condições e particularidades que a alta velocidade deve ostentar. A meu ver, a alta velocidade deve conciliar importantes características que considero absolutamente centrais. Não posso dizer que existe uma velocidade limite ou padrão a partir da qual se fala em alta velocidade, mas sim um conjunto de parâmetros que devem ser alcançados para se conceber uma rede de alta velocidade. Deste modo, é fundamental encontrar-se uma geometria perfeitamente enquadrada e rigorosa que compreenda a sensibilidade aos raios de curvatura, escala, insuficiência de escala, excesso de escala e outros parâmetros geométricos que conduzam a acelerações e forças laterais padronizadas de forma a garantir a segurança e conforto dos passageiros. O material circulante deve ser especialmente projectado para atingir velocidades elevadas, possuindo toda a aerodinâmica e dimensões que se coadunem com os valores exigidos de comodidade e segurança. As inclinações têm de ser restritas e far-se-á um estudo destas noutro capítulo do presente trabalho. Outro factor significativo é o modo de exploração, e uma linha ferroviária de alta velocidade deve contemplar apenas as estações principais ou pontos estratégicos da rede em projecção; ou seja, a distância entre estações deve ser suficiente para não se perder as potencialidades dinâmicas do comboio e não penalizar o tempo de aceleração e travagem da locomotiva. Assim, defendo um conceito de alta velocidade competitivo, rigoroso e exigente que tenha em vista os projectos futuros.

2.4. HISTÓRIA DA ALTA VELOCIDADE

Esta etapa do estudo incide numa alusão aos factos históricos da alta velocidade. Pretende-se efectuar uma abordagem que inclua o nascimento da alta velocidade bem como os seus principais marcos que se destacam, quer pela evolução tecnológica quer por diferentes métodos de projecto. Serão referidos os países com maior tradição neste capítulo e será feita uma comparação da alta velocidade ferroviária com os outros meios de transporte concorrentes. Para

terminar, ainda se falará nos recordes da alta velocidade por ordem cronológica e apresentar-se-á uma visão da rede ferroviária de alta velocidade no Mundo tendo em conta as velocidades comerciais e comprimentos destas linhas.

2.4.1. A EVOLUÇÃO MUNDIAL DAS REDES FERROVIÁRIAS DE ALTA VELOCIDADE

Foi o Japão, por volta dos anos 30, o pioneiro nesta solução de transporte, grande parte devido à elevada concentração populacional nas zonas urbanas. Foi também por esta altura que se iniciaram os estudos da ligação Tóquio – Osaka, com a extensão de 515 km, contudo o projecto haveria de ser interrompido com o rebentar da Segunda Guerra Mundial. O nome TGV, “Train à Grande Vitesse” é original da década de 60 em França onde se iniciam as primeiras experiências no continente europeu. O aumento de velocidade no transporte ferroviário era uma exigência para combater a concorrência do sector automóvel. Nesse começo da alta velocidade ferroviária o TGV Turbo chegou a atingir mais de 200 km/h, mas o projecto não teve continuidade devido à crise petrolífera no início dos anos 70. A alta velocidade passou então a investir na energia eléctrica. Deste modo, a primeira ligação ferroviária francesa de alta velocidade foi construída em Paris. A inauguração data de 1981 e as respectivas infra-estruturas e equipamentos conseguiram alcançar a velocidade máxima de 270 km/h. A ligação entre Paris e Lyon era feita em cerca de 2 horas (antes 4 horas e meia) e esta ligação tornou-se um sucesso comercial. Circulando a pouco mais de 300 km/h em serviço comercial e tendo em conta as 400 toneladas de peso, não deixa de ser um feito inédito para os estudos existentes na altura. A sua utilização comercial iniciou-se em 1989 e foi o precursor da terceira geração dos comboios de alta velocidade. Devido ao sucesso comercial e ao carácter inovador, em algumas linhas, a procura superava a oferta e tornava-se impossível a circulação de mais comboios. Uma das soluções foi a criação do TGV Duplex com dois pisos. Aumentou-se a capacidade de transporte de passageiros em 45% apesar da velocidade de circulação rondar os 300 km/h mesmo nestas condições. Esta solução começou a ser usada em 1996, e ainda hoje faz a ligação entre Paris e Lyon. Na actualidade, o Japão leva uma grande “distância” em relação à Europa no que respeita à alta velocidade ferroviária. Os seus resultados superam amplamente os atingidos na Europa devido à sua enorme capacidade de inovação e também evolução tecnológica. Aproximadamente 260 milhões de passageiros são transportados anualmente ao longo de mais de 2000 km de linhas de alta velocidade (Regina;2001). Um bom exemplo deste registo, é o “Comboio-Bala” japonês. Uma das invenções japonesas foi o comboio de levitação por repulsão magnética. Devido a um sistema electromagnético que faz levantar as composições, é possível atingir velocidades na ordem dos 500 km/h. Com a evolução e introdução de modificações eficazes, o sistema de levitação magnética permite atingir velocidades até 600 km/h. Enquanto o Japão se prepara para lançar uma nova versão do TGV, a francesa SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer Français) detém o recorde mundial de velocidade ao atingir 574,8 km/h no dia 3 de Abril de 2007, com um TGV concebido pela Alstom, na nova linha Paris – Estrasburgo. É notória a propagação da alta velocidade a outros países e outros continentes, especialmente a Ásia. Como exemplo, tem-se as linhas da Coreia do Sul, da República da China e do Taiwan. Em Xangai já está a ser utilizado um comboio de levitação magnética.

2.4.2. LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Não há dúvida que a levitação por repulsão magnética é uma tecnologia de relevo no âmbito dos comboios de alta velocidade. Esta tecnologia é baseada em imans supercondutores (suspensão electrodinâmica) baseada na reacção controlada de electro-imans, (suspensão electromagnética), ou mais recente e potencialmente mais económica, usando imans permanentes (indutrack) (Engenharia e Vida;2008). Os países que mais têm pesquisado esta tecnologia, tendo apresentado diversos projectos, são o Japão e a Alemanha. O comboio é levantado pela força repulsiva dos pólos idênticos ou pela força atractiva dos pólos diferentes dos imans. O comboio é impulsionado por um motor linear, colocado na linha, no comboio ou em ambos. Bobinas eléctricas são massivamente colocadas ao longo da linha de modo a produzir o esforço necessário para a movimentação do comboio e assim atingir elevadas velocidades. Não havendo fricção ou contacto físico, as perdas energéticas são baixas, mas no início do desenvolvimento dos comboios de campo magnético, os consumos energéticos eram de facto elevadíssimos, contudo, a evolução tecnológica tem permitido encontrar novas soluções em termos da criação de campos magnéticos. Actualmente existe já a linha de Xangai que liga o aeroporto à cidade percorrendo 30 km em oito minutos.

2.4.3. UMA VISÃO DA ALTA VELOCIDADE EM PORTUGAL

Na redacção deste pequeno ponto tenta-se abordar sumariamente a questão da alta velocidade em Portugal e sua ligação à Europa. Com o objectivo de ligar as principais cidades portuguesas, os seus portos, aeroportos e plataformas logísticas entre si, discute-se a possibilidade da rede de alta velocidade ferroviária em Portugal. Além dos objectivos acima referidos, existe a intenção de alterar a bitola ibérica para a bitola europeia a fim de colocar a alta velocidade como uma alternativa séria ao transporte aéreo e rodoviário. A implementação da Rede Ferroviária de Alta Velocidade em Portugal depende das ligações a Espanha, mas ao coordenar-se com a futura rede espanhola, permitirá a Portugal melhorar as suas ligações com o resto da Europa, facilitando a livre circulação de passageiros e mercadorias para o território da União Europeia. O sector dos transportes tem vindo a ser alvo de uma análise profunda no seio da Comissão Europeia, por razão do seu peso excessivo na degradação do ambiente, nomeadamente na emissão de gases poluentes, em que o dióxido de carbono (CO₂) é responsável por cerca de 80% dessas emissões de maneira que a introdução de corredores de alta velocidade, a nível nacional e europeu, visa também a redução da poluição ambiental, o consumo de energia e os acidentes de viação. Porém, a realidade das décadas de 70 e 80, na Europa em geral, declarou um incentivo claro às infra-estruturas destinadas ao transporte rodoviário com especial incidência no transporte individual enquanto na década de 90 se dá início a uma viragem desta política havendo uma reflexão séria sobre as diferentes políticas de transporte alternativo, com relevo para o transporte marítimo e ferroviário. As directivas da Comissão Europeia apontam, sem hesitação e depois de muita ponderação, para a prioridade do desenvolvimento da rede ferroviária, como modo alternativo ao transporte rodoviário de mercadorias e passageiros. Existe uma directiva da Comissão Europeia, a Directiva 96/48/CE, respeitante à interoperabilidade do sistema ferroviário transeuropeu de Alta Velocidade, que divide as linhas de alta velocidade em três tipos:

- Tipo I – linhas especialmente construídas para alta velocidade, equipadas para velocidades geralmente iguais ou superiores a 250 km/h;
- Tipo II – linhas especialmente adaptadas para alta velocidade, equipadas para velocidades da ordem dos 200 km/h;
- Tipo III – linhas especialmente adaptadas para alta velocidade de carácter específico devido a entraves topográficos, cuja velocidade deve ser adaptada em cada caso.

A alta velocidade não é factor primordial das redes ferroviárias, mas a sua interoperabilidade é um factor determinante na afirmação desse tipo de transporte como modo alternativo. A interoperabilidade das redes portuguesa e espanhola, e destas com a europeia é, também ela, condição necessária ao enorme esforço de investimento que irá ser feito na construção da nova rede ferroviária com os parâmetros de interoperabilidade de alta velocidade. Deste modo, a harmonização das normas técnicas e a coerência entre as características das infra-estruturas e as do material circulante devem ser asseguradas. As regulamentações nacionais, os regulamentos internos e as especificações técnicas apresentam divergências importantes, que não permitem que a exploração normalizada das redes e que as indústrias produtoras de material de transporte europeias, trabalhem num mercado aberto e concorrencial. Exigem-se garantias a nível do projecto, da construção, das infra-estruturas e do material circulante para a interoperabilidade do sistema ferroviário transeuropeu. Com este propósito, são deliberadas especificações técnicas de interoperabilidade no domínio das infra-estruturas (plataformas, pontes e túneis, via-férrea, aparelhos de via e estações), da energia (subestação, catenárias, postos de catenária, pantógrafos e sistema de telecontrolo e supervisão técnica), controlo de tráfego (comando e sinalização – equipamentos de sinalização na via e embarcados, telecomunicações fixas e móveis, sistemas de informação aos passageiros e centros de comando centralizados), da sinalização, do material circulante e das oficinas de manutenção.

2.4.4. TECNOLOGIA DA ALTA VELOCIDADE

Grande parte da tecnologia utilizada nos comboios de alta velocidade é simplesmente a aplicação melhorada da tecnologia já existente adaptada a um sistema avançado de electrificação. Para se tornar possível manter altas velocidades entre 250-300 km/h quando se constrói uma nova infra-estrutura ferroviária com a engenharia do século XX, é necessário eliminar constrangimentos tais como os cruzamentos nivelados com estradas, paragens frequentes, uma sucessão de curvas e contra-curvas e não se dar prioridade aos comboios de mercadorias e comboios lentos. O custo total do domínio do sistema de caminhos-de-ferro de alta velocidade é geralmente inferior aos custos totais das alternativas concorrentes (nova auto-estrada ou espaço aéreo). Os sistemas japoneses são frequentemente mais caros do que as contrapartidas financeiras, no entanto, torna-se compreensível porque têm o seu próprio consagrado e elevado padrão, não existindo cruzamentos de tráfego e sistemas de monitorização desastrosos. Contudo, a maioria dos custos do sistema japonês, está relacionado com as perfurações em túnel através das montanhas, como no Taiwan. No montanhoso Japão, a maior

parte dos custos de extensão das linhas de alta velocidade envolvem o rebentamento de túneis através de montanhas e não o desenvolvimento de tecnologia de ponta ou o direito de passagem. Os recentes avanços no material circulante nas últimas décadas aumentaram os limites de velocidade para cima dos 400 km/h, de todos os progressos alcançados destacam-se o sistema de pendulação, as características aerodinâmicas (redução de resistência, atrito e ruído), travões pneumáticos, recuperação de travagem, motores mais potentes e o peso dinâmico deslocável (Railway Technology – Internet). A velocidade máxima para um comboio com rodados e tracção eléctrica é 574,8 km/h e é detida por um TGV encurtado e num longo alinhamento recto. A velocidade máxima para um veículo comercial não modificado é de 403,7 km/h, pertencendo ao alemão Velaro E. Os traçados de linhas de alta velocidade europeus combinam segmentos de novas vias onde o comboio circula à máxima velocidade comercial com secções de carris antigos nas extremidades do percurso, como é o caso das cidades. Em França, o custo é minimizado ao adoptarem-se linhas mais inclinadas, em vez de se construírem túneis e viadutos. Contudo, nas regiões montanhosas da Suíça, os túneis são inevitáveis. Como as linhas são dedicadas a passageiros, são usadas inclinações de 3,5% em vez das anteriores 1-1,5% usadas para o tráfego misto. Possivelmente adquirem-se terrenos mais caros de modo a construírem-se linhas rectas, o que minimiza a construção da linha tal como os custos de operação e manutenção. Noutros países as linhas dos comboios de alta velocidade eram construídas sem essas economias de modo a que a linha também pudesse receber outro tipo de tráfego, como o de mercadorias. No entanto, a experiência comprova que os comboios de velocidades significativamente diferentes reduzem drasticamente a capacidade da linha. Como resultado, as linhas de tráfego misto são vulgarmente reservadas para serviços de alta velocidade de passageiros durante o dia enquanto os comboios de mercadorias circulam à noite. Nalguns casos, os comboios de alta velocidade são desviados para linhas de velocidade mais baixa a favor do tráfego de mercadorias.

2.4.5. COMPARAÇÃO COM OUTROS MEIOS DE TRANSPORTE

Os caminhos-de-ferro de alta velocidade são frequentemente vistos como um sistema isolado e simples com vantagens e desvantagens quando comparado com outros sistemas de transporte, mas todos os meios de transporte devem trabalhar e organizar-se em conjunto para maximizar os benefícios. Uma boa rede de alta velocidade tem capacidade para efectuar serviços pontuais e sem paragens, e terá de garantir uma boa conectividade com os outros sistemas de transporte. A alta velocidade, como qualquer outro sistema de transporte, não é inerentemente conveniente, rápido, perfeito e confortável. Estas características dependem da concepção/projecto, implementação, manutenção e conservação, operação e gestão. A regularidade operacional costuma ser mais indicativa de disciplina organizacional do que a inovação tecnológica. O crescimento da procura dos sistemas aéreos e infra-estruturas rodoviárias que já não possuem capacidade para se expandir em muitos países, veio trazer sérios constrangimentos à circulação que atinge os limites de capacidade durante as horas de ponta nas grandes cidades. Os aeroportos têm uma capacidade limitada para servir passageiros durante as épocas de maior movimento, tal como as auto-estradas. O sistema de comboios de alta velocidade tem assim um potencial de grande capacidade nos seus corredores fixos, sendo uma eficaz alternativa para aliviar a congestão de outros sistemas. Antes da Segunda Guerra Mundial, o sistema de caminhos-de-ferro convencional era o principal meio de transporte entre cidades mas o serviço de passageiros começou a perder influência na sua função de transporte à custa da redução de

quota no mercado mesmo nos sítios onde a frequência de comboios aumentou. Os comboios de alta velocidade exibem a vantagem de serem mais inofensivos para o ambiente do que o transporte aéreo e rodoviário. Esta vantagem deve-se ao menor consumo de combustível/energia por passageiro e quilómetro percorrido, ao menor espaço de terreno ocupado para uma dada capacidade transportada e ao desvio dos passageiros de outros meios de transporte mais poluentes.

2.4.5.1. Automóvel

Os comboios de alta velocidade têm a vantagem sobre os automóveis de permitir transportar passageiros a velocidade muito superiores às possíveis num carro, evitando simultaneamente o congestionamento da hora de ponta das auto-estradas. O limite inferior para as linhas de alta velocidade (200 km/h) é substancialmente mais elevado que o máximo limite rodoviário em qualquer país, que raramente atinge 130 km/h. Em trajectos que liguem os centros de duas cidades, os comboios de alta velocidade podem ser três vezes mais rápidos que um carro. Noutro tipo de viagens, no caso de subúrbio para subúrbio, o tempo de deslocação “porta-a-porta” e o custo total (sem contabilizar os custos ambientais) dos comboios de alta velocidade pode ser comparável ao da condução de um carro, um facto mencionado pelos críticos dos comboios de alta velocidade apesar de este custo depender da infra-estrutura do local de transporte e das áreas a serem servidas. Quanto maior a viagem, maior a vantagem do comboio sobre o automóvel. As viagens de comboio têm custos ambientais muito inferiores pois os automóveis são responsáveis por grande parte das emissões de gases poluentes na atmosfera. Viajar usando o transporte ferroviário torna-se menos cansativo, mais produtivo e também mais fiável que as viagens de automóvel. Pode-se acrescentar que os carris de comboio possibilitam um fluxo de passageiros por hora superior a uma estrada da mesma largura.

2.4.5.2. Avião

Os comboios de alta velocidade apresentam vantagens e são mais eficientes em relação ao transporte aéreo para distâncias relativamente curtas embora não consigam ser tão rápidos como os aviões. Para viagens cujas distâncias são inferiores a 650 km, o processo de check-in e passagem por todos os postos de segurança nos aeroportos bem como as viagens para o próprio aeroporto, convertem a totalidade do tempo de viagem comparável e competitivo com o de um comboio de alta velocidade. A rapidez e facilidade de acesso a um comboio numa zona central da cidade podem eliminar a celeridade do transporte aéreo. A fim de competir directamente com o tempo de viagem do transporte aéreo, as viagens de comboio não devem ultrapassar as três horas de viagem. Em termos de distância podem ir até aos 900 km admitindo viagens de comboio a 300 km/h sem paragens intermédias. As linhas de comboio permitem uma capacidade e frequência superiores ao transporte aéreo, e os respectivos horários são menos susceptíveis a interrupções provocadas pelas condições atmosféricas do que os horários das linhas aéreas. A possibilidade do passageiro não ter de efectuar escala de viagem, estar menos tempo de pé e os lugares sentados serem mais espaçosos, no que diz respeito ao conforto,

constitui uma vantagem do transporte ferroviário comparativamente com o transporte aéreo. Na perspectiva do operador, um só comboio pode efectuar várias paragens, algo que é raro nas viagens de avião. Resulta desta evidência que um padrão de paragem de um comboio pode permitir uma amplitude de possíveis viagens, aumentando assim o potencial do mercado.

2.4.6. PAÍSES SERVIDOS PELA ALTA VELOCIDADE

Nesta fase e de acordo com o que foi referido no início do presente capítulo, pretende-se executar uma descrição sucinta das linhas de alta velocidade presentes em alguns países do Mundo. Serão referidos os países com maior tradição nesta tecnologia, ou seja, aqueles a que se pode chamar países na vanguarda da alta velocidade.

Nas décadas posteriores à Segunda Guerra Mundial, a Europa e o Japão deram ênfase à reconstrução das linhas ferroviárias, enquanto os Estados Unidos apostaram na construção de um enorme sistema de auto-estradas inter-estaduais e aeroportos. O petróleo barato, juntamente com melhoramentos nos automóveis, auto-estradas e aviação, tornaram estes meios mais práticos para uma grande porção da população. Os caminhos-de-ferro dos Estados Unidos foram-se tornando cada vez menos competitivos. Contrariamente, na Europa, Coreia e Japão, a ligação entre as densas redes de metropolitano e de comboios convencionais às linhas de comboio de alta velocidade é sinónimo de competitividade.

2.4.6.1. Alemanha

A construção das primeiras linhas alemãs de alta velocidade iniciou-se pouco tempo depois do TGV francês. No entanto, inúmeras batalhas legais motivaram atrasos significativos de modo que os comboios InterCity Express (ICE) iniciaram a sua circulação dez anos após a rede TGV ter sido implementada. Os caminhos-de-ferro alemães iniciaram em 1965 serviços comerciais a 200 km/h entre Munique e Augsburg, contudo, esta experiência não teve continuidade, até que a partir de 1970 foram aumentados estes serviços. Nos finais da década de 70, estes serviços de alta velocidade estruturaram-se numa rede InterCity que é autenticamente moderna com serviços a cada hora. Em paralelo, os alemães consideraram a partir de 1972 a conveniência de criar novas linhas de alta velocidade. O planeamento inicial era algo diferente dos franceses, enquanto estes tinham pensado a sua nova rede com uma forma radial, os alemães tinham-na concebido como um eixo norte-sul. Além disso, os alemães adoptaram um traçado mais favorável que os franceses com rampas de menor inclinação e raios de curva maiores. Deste modo, todo o traçado obriga à construção de numerosos túneis e viadutos. Esta solução é sem dúvida melhor do ponto de vista técnico e da exploração que a dos franceses mas em contrapartida, tem o inconveniente de custar o dobro. Os trabalhos de construção iniciaram-se em 1973 a norte do país, na cidade de Hannover e três anos depois avançou para a zona sul entre Mannheim e Estugarda em 1976. Depois de uma longa e pesada construção, o primeiro novo trecho de alta velocidade alemão foi inaugurado entre Fulda e Wurzburg (94 km) em Maio de 1988 que era percorrido por comboios convencionais a 200 km/h. Em 1991, foram colocados em circulação os comboios ICE expressamente construídos para a alta velocidade. Posteriormente à construção da linha de alta velocidade norte-sul, a seguinte linha construída foi a este-oeste. A rede ICE está muito mais integrada com as linhas de caminho-de-ferro já existentes como resultado de uma estrutura de concepção na Alemanha que tem como destino a Áustria e a Suíça ao aproveitar o facto da tensão usada nestes países ser a mesma. A partir do ano 2000, o sistema múltiplo de comboios ICE de terceira geração entrou na Bélgica e nos

Países Baixos. Os ICE de terceira geração são capazes de atingir velocidades de 363 km/h. Foi formalmente pedida, em 2001, a admissão de comboios ICE nas linhas francesas de TGV, mas os testes de circulação só foram completados em 2005. Ao contrário do TGV e Shinkansen, a primeira geração ICE teve um acidente fatal a alta velocidade, seguido de numerosas queixas de trepidação excessiva. Desde o acidente, as rodas dos comboios ICE tiveram de ser redesenhadas. A Alemanha também se encontra a desenvolver o comboio de levitação magnética, o Transrapid, que alcança velocidades na ordem dos 550 km/h. Existe uma linha de testes com um total de 31,5 km de extensão a operar em Emsland, no entanto, a 22 de Setembro de 2006 houve um grave acidente onde faleceram 23 pessoas quando este comboio de levitação magnética colidiu contra um equipamento de manutenção da linha, próximo de Lathen no noroeste da Alemanha. Na China, o Shanghai Maglev Train, baseado na tecnologia “maglev” do Transrapid construído em colaboração com a Alemanha ficou operacional desde Março de 2004. As linhas de alta velocidade existentes na Alemanha são:

- Linha Fielda – Wurzug, 1990 (ICE);
- Linha Hannover –Wurzug, 1991 (ICE);
- Linha Hamburgo – Frankfurt – Munique, 1991 (ICE);
- Linha Mannheim – Estugarda, 1991 (ICE);
- Linha Hamburgo – Wurzug – Munique, 1992 (ICE);
- Linha internacional de Lucerna, 1994 (ICE 1);
- Linha Bremen – Frankfurt, 1996 (ICE 2);
- Linha Colónia – Berlim, 1997 (ICE 2);
- Linha Hannover – Berlim, 1998 (ICE 2);
- Linha Estugarda – Zurique, 1999 (ICE T);
- Linha Dresden – Nuremberga, 2000 (ICE VT).



Fig.2.1 – Comboio ICE-3 na estação central Estugarda (Engenharia e Vida;2008)

2.4.6.2. Benelux

Os comboios de alta velocidade Thalys, derivados do TGV francês já circulam entre a Bélgica, França, Alemanha e Países Baixos. O alemão ICE também opera na linha Amsterdão-Frankfurt onde inclui passagens pela Suíça e Bruxelas.



Fig.2.2 – Comboio Thalys na estação Gare du Nord, Paris (Engenharia e Vida;2008)

2.4.6.3. Países Baixos

A linha holandesa HSL-Zuid está actualmente em construção e vai ligar os Países Baixos à Bélgica e França. Nesta linha circularão comboios derivados do TGV Thalys tal como os comboios de alta velocidade holandeses. Também se encontra em análise uma linha de alta velocidade até Groningen.

2.4.6.4. França

A França tem provavelmente a rede ferroviária mais avançada e desenvolvida da Europa. Porém, a vanguarda da alta velocidade padeceu de inúmeros problemas, nomeadamente o desconhecimento completo dos efeitos da alta velocidade nas infra-estruturas. A rede espalhou-se gradualmente para as principais cidades e para outros países como a Suíça, Bélgica, Holanda e Reino Unido. Os comboios que atravessam fronteiras nacionais podem necessitar de características especiais das quais se destacam a capacidade de se adaptarem a diferentes potências de tensão e sistemas de sinalização distintos. Pode afirmar-se que nem todos os TGV's são os mesmos, isto é, têm de existir condições de interoperabilidade. As redes de alta velocidade francesas combinam algumas secções de carris antigos, onde circulam à velocidade padrão, com segmentos de novos carris para fornecer uma alta velocidade, com viagens directas para muitos destinos. Como as linhas são dedicadas a passageiros, são usadas inclinações na

ordem dos 3,5% em detrimento de 1-1,5% utilizadas para o tráfego misto, ou seja, adoptou-se linhas mais inclinadas em vez de se construírem túneis e viadutos e assim consegue-se minimizar o custo da construção. A primeira linha de alta velocidade construída na Europa foi a linha francesa Paris – Lyon. Esta linha nasceu de um conjunto de factores diferentes: de um lado, a linha clássica Paris – Lyon encontrava-se totalmente saturada e antes de se estabelecer uma via múltipla com as mesmas limitações que tinha a existente, preferiu-se construir uma linha com um traçado mais curto e que permitisse velocidades mais elevadas; do outro lado, os caminhos-de-ferro franceses que haviam sido pioneiros da velocidade na Europa, tinham dedicado um extenso programa de muitos estudos de alta velocidade com numerosos testes e diversos protótipos. É sabido que nos anos 60, começou-se a pensar num novo meio de transporte que ligasse Paris ao sudeste francês e que resolvesse a falta de capacidade dos existentes, no entanto, as decisões não estavam muito claras quanto à eleição da solução mais conveniente. Havia defensores do avião, de uma nova auto-estrada, mas seguramente ninguém pensava apostar numa solução ferroviária tão clássica como a que finalmente foi adoptada. Foi difícil para os defensores do caminho-de-ferro demonstrar que uma linha ferroviária de alta velocidade podia ser rentável não só para a SNCF, mas também para a colectividade social. O primeiro projecto da nova linha ferroviária foi apresentado em 1969 mas foi só em 1974 que o conselho de ministros deu luz verde para que se iniciasse o projecto técnico. Assim, em 1976 abriu-se o primeiro troço da nova linha Paris – Lyon também chamada Paris – Sudeste (PSE). O êxito do TGV-PSE, maior do que o inicialmente esperado, incitou os franceses a abordar outros projectos similares. Assim, a SNCF escolheu o TGV Atlântico (TGV-A) que compreende uma linha de Paris com destino a Oeste. A decisão da construção desta nova linha foi tomada em 1983. Enquanto os projectos do PSE e TGV-A foram exclusivamente franceses, os seguintes projectos TGV foram calibrados com uma colaboração internacional entre os franceses e as administrações ferroviárias de outros países, como são o TGV norte (em colaboração com a Bélgica), o TGV eurostar (em colaboração com a Inglaterra) e o TGV este (com a colaboração da Alemanha e Holanda). A França tem 1200 km de linhas de alta velocidade e possui neste momento quatro linhas em fase de construção/acabamento. As linhas existentes e as em construção, podem ser agrupadas em quatro rotas tendo como centro a cidade de Paris. As linhas mais importantes da alta velocidade francesa encontram-se distribuídas da seguinte forma:

- Linha Sul – Este, desde 1981 com velocidade de circulação de 270 km/h;
- Linha TGV – Atlântico, desde 1989 com velocidade de circulação de 300 km/h;
- Linha Réseau, desde 1993 ligando as zonas norte de Paris e sul;
- Linha Eurostar, desde 1994 que liga Paris, Bruxelas e Londres;
- TGV Thalys, desde 1996 que liga França, Bélgica, Alemanha e Holanda.



Fig.2.3 – Comboio TGV duplex (Engenharia e Vida;2008)

2.4.6.5. Itália

Em Itália, a primeira linha de alta velocidade foi construída entre Roma e Florença. Esta linha conhecida como a “Direttissima” tem uma extensão de 236 km, isto é, menos 53 km que a linha convencional que chegava quase aos 300 km. Este traçado foi executado praticamente ao lado do traçado clássico e tal como no caso da linha Paris – Lyon, inicialmente pensou-se o desdobramento rápido da linha antiga que se encontrava saturada de tráfego. O parlamento italiano aprovou a construção em 1968 e os trabalhos começaram em 1970. A execução desta linha foi-se dilatando ao longo do tempo e o primeiro tramo de 122 km só foi inaugurado em Fevereiro de 1977. Em Setembro e Outubro de 1985 inauguraram-se outros dois trechos de 51 e 20 km respectivamente, seguidos do penúltimo troço com 32 km no Verão de 1990. Ficou para uma fase posterior a inauguração do último trecho visto que este foi utilizado para provas e testes no ensaio do comportamento das linhas de alta velocidade a construir no futuro. A linha está concebida para tráfego misto de passageiros e mercadorias. Para o tráfego de passageiros existem dois tipos de circulações: uma de veículos especialmente preparados para a alta velocidade que alcançam 250 km/h; outra de comboios convencionais que operam entre 180 e 200 km/h. No caso do tráfego de mercadorias, os comboios circulam a velocidades na ordem dos 120 km/h. Uma particularidade da “Direttissima” é que o seu traçado comporta um grande número de viadutos bastante extensos mas de baixa altura. A Treno Alta Velocità (TAV) está a construir uma nova rede de alta velocidade nas rotas Milão-Bolonha-Florença-Roma-Nápoles e Turim-Milão-Verona-Veneza-Trieste. Algumas linhas já estão abertas enquanto algumas ligações internacionais com a França, Suíça, Áustria e Eslovénia ainda estão em construção. A linha Roma-Nápoles abriu ao serviço em Dezembro de 2005 e a linha Turim-Milão abriu

parcialmente em Fevereiro de 2006. Estas linhas permitem uma velocidade de circulação próxima dos 300 km/h.



Fig.2.4 – Comboio ETR 470 Cisalpino (Engenharia e Vida;2008)

2.4.6.6. Espanha

Na Espanha o principal serviço de alta velocidade é o AVE. Em algumas linhas os comboios conseguem ultrapassar os 300 km/h. Existem outros serviços de alta velocidade na Espanha tais como o Alaris, o Talgo, o Altaria, o Arco, o Euromed e o Trenhotel. A origem da linha de alta velocidade Madrid-Sevilha está na saturação que representa o troço dos “Despeñaperros” na linha clássica da Andaluzia. Este trecho, por uma via estreita, era percorrido por uma via única com extensão de 13 km em que a velocidade dos comboios não podia ser superior a 70 km/h. Por isso começou a pensar-se na solução de um traçado alternativo. Deste modo, em 1986, o governo tomou a decisão de construir um novo acesso à Andaluzia partindo de Brazatortas na linha Ciudad Real-Badajoz. Ao começar a realizar-se o projecto técnico surge a questão de realizar um traçado novo onde possa atingir velocidades de 200 km/h em detrimento de uma linha sinuosa que limite a velocidades. Este foi o primeiro passo para se criar a linha de alta velocidade, com um traçado de concepção moderna, que permitisse velocidades elevadas. Seguidamente com a influência dos planos de construção de novas linhas de alta velocidade

noutros países da Europa, forçou-se a tomada de decisão que o troço Brazahortas-Córdoba fosse apto para uma velocidade de 250 km/h e que tivesse uma via larga. Então entraram em jogo dois factores decisivos, de um lado a Exposição Universal a realizar em Sevilha e de outro o traçado entre Brazatortas e Córdoba que aparecia somente como uma parte de um todo com que se havia de construir a linha de alta velocidade desde Madrid. Uma vez decidida a construção da linha de alta velocidade entre Sevilha e Madrid, estava-se perante um problema de tempo. Num primeiro momento, pretendia-se que a tecnologia fosse espanhola, porém não havia tempo para desenvolver novos projectos e teve-se de usar tecnologia estrangeira, adaptando-se finalmente a uma bitola de via internacional. Desta forma, a implantação da via começou oficialmente no dia 2 de Outubro de 1989 e a 20 de Abril de 1992 teve lugar a inauguração oficial desta linha de alta velocidade no mesmo dia em que abriu as portas a Exposição Universal de Sevilha. O tempo total dispendido na construção, de apenas dois anos e meio, constitui um recorde mundial de rapidez na execução de uma linha ferroviária de alta velocidade.



Fig.2.5 – Comboio AVE S-102 (Engenharia e Vida;2008)

2.4.6.7. Reino Unido

No Reino Unido, os comboios Eurostar que circulam entre o Reino Unido, França e Bélgica através do túnel do canal da mancha são versões significativamente distintas dos veículos característicos da alta velocidade. Estes comboios, nas suas particularidades, permitem a utilização de várias tensões, podem ligar-se à fonte de alimentação por pantógrafo ou através da utilização do terceiro carril, têm a capacidade de se adaptar a várias alturas de plataformas e conseguem ainda lidar com sete modos de sinalização diferentes. Estes comboios operam nas

maiores velocidades previstas no Reino Unido, usando uma linha especialmente construída entre o túnel do canal da Mancha e a cidade de Londres. A restante rede de caminhos-de-ferro britânico é de qualidade consideravelmente inferior em que a maioria do tráfego inter-cidades está restrita a uma velocidade máxima de 200 km/h usando linhas antigas estabelecidas em meados do século XIX. A causa principal deste condicionamento reside no facto de, ao contrário de outros países europeus, o Reino Unido nunca investiu na construção de linhas para serviços inter-cidades, o que implica a junção do tráfego de mercadorias e de passageiros, inclusive nas linhas principais. Qualquer aumento da velocidade de circulação nas linhas existentes requereria uma actualização muito cara para sinalização. Ultimamente, existem recentes propostas para várias linhas de alta velocidade, encontrando-se o governo a ponderar a execução de uma linha norte-sul.



Fig.2.6 – Comboio Eurostar em direcção à Europa Continental (Engenharia e Vida;2008)

2.4.6.8. China

A China é uma potência emergente no cômputo da alta velocidade tendo neste momento uma rede menos desenvolvida do que países como a França ou Japão. Apesar de ainda não possuir um serviço de alta velocidade entre grandes cidades, encontra-se a trabalhar profundamente para ultrapassar esta situação. Conforme já foi abordado ao longo desta investigação, o comboio maglev de Xangai é um projecto importado da Alemanha, o Transrapid maglev é um veículo

capaz de uma velocidade operacional de 430 km/h atingindo uma velocidade máxima de 501 km/h na ligação de Xangai ao aeroporto de Pudong. Já se encontra em curso a construção de um segundo Transrapid maglev com 160 km de extensão entre Xangai e Hangzhou com previsão de término a tempo da Expo 2010 em Xangai, e assim tornar-se a primeira linha inter-cidades de maglev em serviço comercial no Mundo. Em 2006, a China apresentou uma versão modificada da série E2-1000 do Shinkansen japonês e confirmou-se a encomenda de sessenta conjuntos de oito carruagens, onde três conjuntos serão entregues pela Kawasaki Heavy Industries e as restantes cinco a serem construídas pela Nanche Sifang Qing-Tao na China.



Fig.2.7 – Comboio Transrapid Xangai (Engenharia e Vida;2008)

2.4.6.9. Coreia

A Coreia do Sul foi a segunda nação fora da Europa Ocidental a possuir um serviço inter-cidades de alta velocidade após o Japão. As linhas especiais que se encontram em funcionamento desde Abril de 2004, são operadas por comboios coreanos de alta velocidade KTX (Korea Train Express). Este tipo de veículo, cuja tecnologia deriva directamente do TGV francês, atinge uma velocidade máxima de 300 km/h. A Coreia do Sul tem o mérito de ter desenvolvido a sua própria tecnologia de alta velocidade à mercê de outro comboio, o HSR-350x (High Speed Rail -350x) que foi desenhado independentemente do KTX por engenheiros sul-coreanos muitos anos antes do programa de transferência de tecnologia francesa. O comboio é um produto de cerca de dez anos de pesquisa e desenvolvimento pela companhia coreana Rotem e o National Rail Technology Institute of Korea. Este comboio estudado ambiciona circular a velocidades superiores ao TGV e incorpora várias tecnologias que o protótipo francês não dispõe. A sua concepção inclui uma carroçaria em alumínio, controlo de tráfego digital e um sistema de compensação de pressão. Outra grande inovação é capacidade que oferece aos seus passageiros de rodarem os assentos e assim poderem escolher se vão contra ou a favor do sentido da viagem.



Fig.2.8 – Comboio KTX coreano (Engenharia e Vida;2008)

2.4.6.10. Japão

Os japoneses foram os pioneiros da alta velocidade ferroviária no mundo. Tudo começou em meados dos anos cinquenta quando projectaram construir uma nova linha ferroviária entre Tóquio e Osaka, as duas principais cidades do país. Esta linha tinha o objectivo de resolver o duplo problema da saturação da linha existente e da melhoria substancial dos tempos de percurso. Precursor da alta velocidade moderna, actualmente o Japão possui a maior e mais utilizada rede de alta velocidade em serviço. A sua aposta neste serviço advém da elevada densidade populacional que possui e assim tornar impróprias as viagens de automóvel bem como o seu estacionamento. Deste modo, a única possibilidade de transporte é o caminho-de-ferro e o reconhecimento da sua importância levou a que em 1970 fosse lançada uma lei para a construção de uma rede de comboios Shinkansen a nível nacional. No caso da linha Tóquio-Osaka, umas das primeiras decisões foi construir a nova linha ferroviária em via de bitola internacional. Esta decisão foi considerada necessária para poder elevar substancialmente as velocidades dos comboios, pois existem maiores problemas de ventos laterais nas vias estreitas. Nas linhas de bitola curta, os comboios Shinkansen não podiam atingir com segurança as maiores velocidades apesar de serem desenhados para se inclinarem quando descrevem uma curva. Mas os japoneses foram bastante mais além dos conceitos tradicionais e planearam pela primeira vez no Mundo a exploração comercial de comboios acima dos 200 km/h. A linha Tóquio-Osaka (515 km), conhecida como linha “Tokaido”, foi aberta ao público no ano de 1964 com os comboios a circular a uma velocidade máxima de 210 km/h. O seu êxito comercial foi impressionante e animou os japoneses a executar uma rede de alta velocidade por todo o país entre 1970 e 1973. No entanto, a crise de 1974 e alguns problemas económicos internos do

Japão estagnaram este projecto e só se terminaram as linhas cuja construção já se tinha iniciado. As dificuldades na construção destas linhas foram impressionantes visto que as zonas planas do Japão estavam sobrepovoadas e as zonas desertas são muito acidentadas. Basta referir que a linha “Tokaido” tem 46% do seu percurso em túneis ou viadutos, proporção que chega aos 99% na linha Joetsu. Quando a situação económica dos caminhos-de-ferro melhorou notavelmente a partir de 1987, ano em que a rede ferroviária japonesa se repartiu em seis empresas privadas, houve uma exigência imediata que o caminho-de-ferro fosse competitivo com os outros meios de transporte. Deste modo, torna-se imprescindível a construção de linhas ferroviárias de alta velocidade. A pensar no futuro, os japoneses constataram a necessidade de aumentar a sua rede de alta velocidade, contudo, a um custo reduzido; por isso, vão transformar as vias de bitola 1067 mm em bitola internacional para que os comboios possam circular por alguns troços de alta velocidade e outros por troços convencionais transformados. A singularidade japonesa também assenta na concepção de comboios de inclinação activa para fazerem as curvas mais rapidamente e os novos desenvolvimentos incluem um redesenho aerodinâmico, motores mais potentes e a utilização de materiais mais leves. Em relação às linhas ferroviárias de alta velocidade, existem duas particularidades que merecem ser destacadas: uma delas é o clima agressivo que se faz sentir nas regiões do norte do Japão, o que obriga que as linhas desta zona tenham um sistema de eliminação de neve da via por meio de jactos de água quente; outra é que o sistema de segurança da via está conectado a uma rede de sismógrafos situados a uma distância de 40 a 100 km das linhas de tal forma que quando estes detectarem o avanço de uma onda sísmica rapidamente actuem sobre a circulação, reduzindo automaticamente a velocidade (Hood;2006). Actualmente, o Japão tem desenvolvido novos sistemas ferroviários de alta velocidade baseados na levitação magnética, embora os altos custos permaneçam como barreiras ao seu desenvolvimento imediato. A produção de uma nova geração de Shinkansen convencionais FASTECH 360 está a ser desenvolvida com uma velocidade máxima de 405 km/h e uma velocidade de cruzeiro de 360 km/h enquanto as tecnologias de travagem regenerativa e electricidade híbrida estão também a ser estudadas para os comboios Shinkansen. As linhas de alta velocidade que existem neste momento no Japão são:

- Linha Tokaido. Liga Tóquio a Osaka, desde 1964, com velocidade de circulação de 270 km/h;
- Linha Sanyo. Liga Osaka e Hakata, desde 1975, com velocidade de circulação de 300 km/h;
- Linha Tohoku. Liga Omiya e Morroka, desde 1982, com velocidade de circulação de 275 km/h;
- Linha Joetsu. Liga Omiya e Niigata, desde 1982, com velocidade de circulação de 275 km/h;
- Linha Hokuriku. Liga Tóquio e Nagano. Previsão de abertura para 2015.



Fig.2.9 – Comboio TGV japonês – (Engenharia e Vida;2008)

2.4.7. ALTA VELOCIDADE NO MUNDO

Em seguida irá ser apresentado um quadro/tabela onde se dará uma visão global da alta velocidade em todo o Mundo com informações sobre os comprimentos das linhas, as velocidades praticadas em serviço comercial e também os recordes de velocidade em cada país.

Para os propósitos deste quadro, as linhas apresentadas são definidas como serviços de passageiros que circulam numa velocidade máxima de 200 km/h ou superior. Efectivamente, os países que apresentam linhas de alta velocidade são a China, Coreia do Sul, Espanha, França e Japão. No quadro 1 pode-se então observar uma perspectiva das linhas de alta velocidade já construídas pelos vários países que apostaram neste serviço.

Quadro 1 – Alta Velocidade no Mundo (Extensões e Velocidades) (Fonte: Eng. Henrique Oliveira Sá)

País	Comprimento Total da Rede (km)	Velocidade Comercial (km/h)	Velocidade Máxima atingida (km/h)
Alemanha	1290	300,280,250,230 (Convencional)	550 (Levitação Magnética) 406 (Convencional)
Áustria	50	230	275
Bélgica	326	300,250	347
China	6003	431 (Levitação Magnética) 350,300,250,220 (Convencional)	501 (Levitação Magnética) 394 (Convencional)
Coreia do Sul	240,4	300,240	355
Espanha	1272,3	350,300,250	404
Estados Unidos	0	240,200	264
Finlândia	60	220	255
França	1700	320,300,280,210	574
Itália	814,5	300,260,200	368
Japão	2459	300,275,260 (Convencional)	581 (Levitação Magnética) 443 (Convencional)
Noruega	60	210	260
Portugal	314	220	275
Reino Unido	1400	300,200	335
Rússia	649,7	210	260
Suécia	0	200	303
Taiwan	335,5	300,240	315
Turquia	245	250	303

Para termos uma ideia geral da configuração das linhas europeias de alta velocidade no futuro, apresenta-se a figura 2.10 onde se vê a projecção de vias de alta velocidade para o ano de 2025. Segundo dados de finais de 2008 e de acordo com a Ordem dos Engenheiros, existiam 5.598 km de linhas de alta velocidade na Europa em exploração, prevendo-se a construção de mais 3.474 km.



Fig.2.10 – Rede de alta velocidade na Europa em 2025 (RAVE;2008)

2.4.8. RECORDES DE VELOCIDADE

O termo velocidade máxima possui vários significados na alta velocidade. Pode exprimir:

- Máxima velocidade comercial que um comboio pode atingir entre duas paragens;
- Máxima velocidade permitida a um comboio que circule em segurança de acordo com a norma ou política num alinhamento recto com os mínimos condicionamentos;
- Máxima velocidade que um comboio não modificado é capaz de circular;
- Máxima velocidade que um comboio especialmente modificado é capaz de circular.

Deve-se subentender que um comboio modificado é um veículo especialmente concebido para testes ou comboios encurtados atingindo maior velocidade.

O recorde de velocidade para uma composição especialmente modificada foi atingido pelo TGV tripulado. Este comboio alcançou uma velocidade máxima de 574,8 km/h, contudo, não foi uma situação típica. O desvio total de fumo emitido pelo comboio evidencia a sua concepção para esta experiência e não para a circulação de passageiros. O custo, a segurança, a fiabilidade e a produção em massa são as principais preocupações dos engenheiros e designers das linhas de alta velocidade que devem ter os maiores cuidados na avaliação destas características. A velocidade máxima que um comboio não modificado conseguiu atingir foi de 581 km/h. Este resultado foi alcançado por um comboio de levitação magnética, o JR-Maglev MLX01, no ano de 2003. Contudo, não é necessariamente a situação ideal para o serviço de passageiros e podem existir preocupações como o ruído, o custo, a desaceleração numa emergência, entre outros. A maior velocidade de operação que algum segmento de alta velocidade logrou atingir, foi conseguido pelos chineses onde foram percorridos 117 km em 30 minutos, numa velocidade comercial de 350 km/h. Na fase de testes, estes comboios mostraram capacidade para circular a velocidade comercial de 394 km/h, e por isso foram programados para viajar a 350 km/h em condições normais de operação. Cronologicamente enumeram-se alguns recordes de velocidade alcançados pelos vários países na vanguarda da alta velocidade:

- 1963 – Japão – Shinkansen – 256 km/h (primeiro país a desenvolver a tecnologia da alta velocidade);
- 1965 – Alemanha de Leste – locomotiva classe 103 – 200km/h (segundo país a desenvolver a tecnologia de alta velocidade);
- 1967 – França – TGV 001 – 318km/h (terceiro país a desenvolver a tecnologia de alta velocidade);
- 1972 – Japão – Shinkansen – 286km/h;
- 1974 – Alemanha de Leste – EET-01 – 230km/h;
- 1979 – Japão – Shinkansen – 319km/h;
- 1979 – Japão – ML 500R (não tripulado) – 517km/h;
- 1981 – França – TGV – 380km/h;
- 1985 – Alemanha de Leste – InterCityExperimental – 324km/h;
- 1987 – Japão – MLU001 (tripulado) – 400,8km/h;
- 1988 – Alemanha de Leste – InterCityExperimental – 406km/h;
- 1988 – Itália – ETR 500-X – 319km/h (quarto país a desenvolver a tecnologia de alta velocidade);
- 1988 – Alemanha de Leste – TR-06 – 412,6km/h;
- 1989 – Alemanha de Leste – TR-07 – 436km/h;
- 1990 – França – TGV – 515,3km/h;
- 1992 – Japão – Shinkansen – 350km/h;
- 1993 – Japão – Shinkansen – 425km/h;
- 1993 – Alemanha – TR-07 – 450 km/h;
- 1994 – Japão – MLU002N – 431km/h;
- 1996 – Japão – Shinkansen – 446km/h;
- 1997 – Japão – MLX01 – 550km/h;
- 1999 – Japão – MLX01 – 552km/h;
- 2002 – Espanha – AVE classe 330 – 362km/h (quinto país a desenvolver a tecnologia de alta velocidade);
- 2002 – China – China Star – 321 km/h (sexto país a desenvolver a tecnologia da alta velocidade);
- 2003 – China – Transrapid08 – 501km/h;

- 2003 – Japão – MLX01 – 581km/h (recorde do mundo actual);
- 2004 – Coreia do Sul – HSR-350x – 352,4km/h;
- 2006 – Alemanha – Siemens Velaro – 404km/h (composição comercial não modificada);
- 2007 – França – TGV V150 – 574,8km/h;
- 2008 – China – CRH3 – 394,3km/h.

3

ALTA VELOCIDADE VS VELOCIDADE ELEVADA

3.1. ENQUADRAMENTO

Este capítulo procura abordar a temática e polémica discussão da alta velocidade. Pretende-se debater a questão da dicotomia entre velocidade elevada e alta velocidade e para isso serão referidos alguns exemplos europeus. Esta discussão será analisada com base em características de ambas as modalidades e debater-se-á a questão dos custos e retornos da implementação da alta velocidade e velocidade elevada.

3.2. ALTA VELOCIDADE VS VELOCIDADE ELEVADA

Neste momento aspira-se discutir a questão da divergência entre alta velocidade e velocidade elevada. Este tema será abordado de uma forma muito sintética recorrendo-se à exposição e interpretação de exemplos patentes mais concretamente na Europa.

3.2.1. ALTA VELOCIDADE

A configuração geográfica de muitos países europeus e a distância entre as grandes cidades é propícia à alta velocidade, a qual tendo o seu custo muito elevado (cerca de 20 a 40 milhões de euros por km só para infra-estruturas) é acessível a uma parte substancial das suas populações. Além do que veio facilitar a complementaridade entre países diferentes, mas vizinhos, sendo essa complementaridade por vezes indispensável. Porém, em Espanha, ao ligar-se Madrid com todas as capitais regionais, o principal e claro objectivo visa tornar mais coerente e coeso o conjunto do território. Não foi por acaso que a alta velocidade se implantou inicialmente em países com elevado nível de vida e com altas densidades populacionais. Pode-se exemplificar com dados bastante significativos relativos ao PIB/hab e respectiva população em milhões de habitantes, referentes ao ano de 2007.

Quadro 2 – Relação entre PIB e População dos Países Europeus (Atlas Enciclopédico Mundial – Edições do Jornal Público)

País	PIB/hab	População (milhões de habitantes)
França	22.0	59.0
Bélgica	22.0	10.3
Holanda	23.0	16.0
Alemanha	23.0	82.5
Reino Unido	24.0	60.0
Áustria	24.0	8.2
Itália	19.0	58.0
Suíça	33.0	1.2
...	...	...
Espanha	14.5	40.0
Portugal	10.5	10.0

De todos estes países, em termos de densidade populacional, destaca-se a Holanda com 376 hab/km², uma das maiores densidades populacionais do Mundo; seguidamente a Bélgica com 333 hab/km², próxima do Japão. Contudo, a alta velocidade tem como consequências negativas o aumento do ruído, das vibrações, do custo da conservação dos comboios e das vias, assim como o consumo de energia; este aumento cresce brutalmente e é da ordem dos 50% entre os 300 e os 350 km/h. Também aumentam significativamente os desafios técnicos, alguns de difícil solução como sucede quando se atingem velocidades superiores a 300 km/h em que o contacto do cabo eléctrico com o pantógrafo gera frequências de tal potência que estas oscilam o cabo e desconectam o fluido eléctrico. Muitas vezes obtém-se um ganho de tempo pouco expressivo face aos custos apreciáveis descritos anteriormente.

Numa opinião pessoal, e na óptica de Portugal, pode-se considerar que a alta velocidade, pelos elevados custos que acarreta e os meios financeiros que absorve, poderá fomentar as desigualdades num país ferroviário a dois tempos. Além disso, irá relegar rigidamente para segundo plano as linhas clássicas destacando as assimetrias e desequilíbrio económico-social existente entre as várias regiões. Os montantes exagerados que seriam investidos neste projecto teriam um melhor aproveitamento se fossem aplicados no desenvolvimento de todo o transporte

ferroviário de mercadorias e passageiros no intento de travar a expansão do tráfego dos camiões e autocarros que tanto custam e penalizam o país.

Neste parágrafo, e como interesse da política nacional, será dada uma sumária perspectiva sobre custos da alta velocidade em Portugal. A nível de investimento, é sabido que todos os estudos de rentabilidade sócio-económica dos projectos, bem como a sua realização progressiva, não permite atingir o retorno desejado. É fundamental procurar e analisar as possíveis sinergias com a rede existente no sentido de melhorar a oferta global e assim contribuir para um equilíbrio de todo o território.

Pode-se revelar que o custo das infra-estruturas já executadas ou com estimativas recentes, nomeadamente na Espanha e na França, assumem valores mais elevados que os apresentados pelos técnicos portugueses. No caso da rede espanhola, sabe-se que o verdadeiro investimento no AVE (Alta Velocidad Española) foi superior ao inicialmente previsto, provocando críticas públicas. Logicamente que um projecto deste calibre e com as conhecidas restrições, depende fortemente de condições tais como a orografia do terreno, as suas características geológicas, das obras de arte a construir e expropriações a efectuar. É preciso não esquecer, que a acrescentar a todas estas despesas, existe o pesado custo do material rolante que ronda os 15 milhões de euros por composição. Há também a reter o custo de conservação deste material e da própria via, que dado o rigor exigido não é menos preponderante. Olhando para a natureza de Portugal, atentando na sua vertente montanhosa e acidentada particularmente nas regiões Norte e Centro, seria de considerar a alternativa da velocidade elevada. Neste caso, a velocidade elevada permitia, em percursos sinuosos, melhorar de modo faseado os principais eixos ferroviários. Acrescentando a este fundamento, acresce a realidade de Portugal ser aproximadamente um rectângulo em que os principais pólos relativamente importantes (Lisboa e Porto) distam cerca de 320 km. Noutro capítulo, atendendo às relativas baixas distâncias a vencer, à reduzida importância das suas concentrações urbanas, o baixo nível de vida das populações e as fracas densidades populacionais que se verificam junto da fronteira espanhola, constata-se a inadequação da criação da alta velocidade em Portugal. Mesmo no lado espanhol e junto à fronteira portuguesa, o panorama é semelhante. Ao observar o mapa da RENFE (Red Nacional de Ferrocarriles Españoles), vê-se que apenas existe uma via electrificada sendo as restantes por electrificar.

Estudos efectuados sobre os tempos de percurso de comboios que percorrem as linhas clássicas em comparação com os que percorrem linhas de velocidade elevada e alta velocidade demonstra que para distâncias relativamente curtas e procura pouco significativa, os eventuais benefícios da alta velocidade face aos seus elevados custos não apresentam a importância ambicionada. Ainda nesta vertente, deve-se esclarecer que não se pode confundir os comboios de alta velocidade com o TGV (Train à Grande Vitesse). O TGV foi pioneiro na rede de alta velocidade em França e funciona segundo o princípio da composição-bloco em que cada composição comporta sempre o mesmo número de carruagens, ligadas sempre na mesma ordem e com um motriz em cada uma das extremidades que lhe permite circular em cada um dos sentidos sem perdas de tempo em manobras para a constituição dos comboios ou na inversão de marcha. Todas as carruagens são solidárias e não se inclinam mais do que um grau umas em relação às outras. Esta limitação explica a dificuldade deste tipo de composições circularem numa via clássica onde existem curvas e contra-curvas de reduzido raio. Mais à frente nesta investigação, será realizada uma abordagem aos vários veículos que operam na alta velocidade referindo-se as suas principais características e operações.

3.2.2. VELOCIDADE ELEVADA

O presente ponto vai versar sucintamente sobre a velocidade elevada através da apresentação de alguns exemplos existentes na Europa e actualmente a operar em Portugal.

A velocidade elevada é uma área de influência dos ETR (ElettroTrenoRapido) 460 italianos aptos a atingir os 250 km/h, do American Flyer (Bombardier e Alstom) que atinge os 240 km/h e dos ICT (Inter-City – Triebwagen), pendulares alemães, capazes de deslizar a 230 km/h sobre uma linha clássica. Em França, a SNCF adaptou, há já alguns anos, a tecnologia pendular ao TGV, que se revela particularmente difícil visto que as carruagens são solidárias formando um bloco. Inicialmente, pensou-se que seria possível lançar o TGV Limousin, ligando Paris ao Maciço Central, via Limoges; porém, verificada a ausência de rentabilidade do projecto, optou-se por uma linha de velocidade elevada mediante o programa POLT (Paris/Orléans/Limoges/Toulouse), o qual prevê a modernização das infra-estruturas e a utilização de material pendular. Igualmente sucede na ligação Stuttgart/Zurich desde 1999 com material ICT, a última versão da tecnologia alemã na utilização do sistema pendular. No Reino Unido, a Virgin recebeu 53 comboios da Fiat Ferrovia associada com a GEC-Alstom, a qual também forneceu mais alguns pendulares para a Finlândia. Presentemente a Alstom está a desenvolver o seu protótipo de TGV pendular sob licença da Fiat Ferrovia e que consiste numa solução muito difícil. No Sudeste da Ásia, frente ao Japão, a Alstom e a Siemens partilham as suas experiências sobre material ferroviário em parceria. Também a Eslováquia, através da respectiva sociedade dos caminhos-de-ferro, decidiu lançar conjuntamente com os checos um plano para a aquisição e exploração agregada de comboios tipo Pendolino; estes comboios, de chassis inclinável foram encomendados Alsthom Ferrovia SpA, e as primeiras unidades entraram ao serviço na rede eslovaca em 2004.

Em Portugal, como é sobejamente conhecido, a CP (Caminhos de Ferro Portugueses) encomendou e recebeu há já alguns anos comboios pendulares que podem atingir 220 km/h. Todavia, devido ao elevado congestionamento e estado de conservação da linha do Norte, limita-se a passear calmamente a uma velocidade comercial compreendida entre os 100 e os 112 km/h, não atingindo metade das suas potencialidades.

3.2.3. ALTA VELOCIDADE VS VELOCIDADE ELEVADA: FACTOS E NÚMEROS

Por fim e para encerrar esta discussão que opõe a alta velocidade à velocidade elevada serão expostos dados referentes a linhas existentes em termos de velocidades máximas e velocidades comerciais. Igualmente serão referidos preços e outras características a fim de averiguar e distinguir as várias velocidades praticadas nos caminhos-de-ferro bem como as suas implicações de ordem técnica e económica.

3.2.3.1. Alta Velocidade: Velocidades Máximas

Apresentam-se alguns exemplos de linhas europeias de alta velocidade mencionando-se a sua designação, velocidade máxima, origem-destino e material.

- AVE – Madrid / Sevilha (300 km/h); material Gec-Alstom;
- AVE – Madrid / Lleida (200km/h, velocidade imposta por limitações da via enquanto se aguarda a homologação da sinalização ERTMS (European Rail Traffic Management System); material Série S-102 de Talgo/Bombardier;
- ES – ETR 450/460/500 (250 – 300 km/h); material italiano;
- ICE – velocidades entre 250 – 300 km/h; material alemão;
- TGV – velocidades entre 250 – 300 km/h; material francês;
- Eurostar – Londres / Paris / Bruxelas (300 km/h); derivado do TGV;
- Thalys – Paris / Bruxelas / Amsterdão / Colónia (300 km/h); derivado do TGV.

Acima referiram-se as velocidades máximas de exploração das respectivas linhas ferroviárias.

3.2.3.2. Velocidade Elevada: Velocidades Máximas

Abaixo seguem exemplos de velocidade elevada.

- CIS – pendular ETR 470 (200 km/h); material italiano;
- X2000 – pendular (210 km/h); material sueco;
- Northern Corridor – Washington / Boston (220 km/h); material Americano;
- Virgin Trains – Londres / Manchester (225km/h); material Alstom Ferroviária SpA.

Como se pode concluir pelas enumerações acima, o Reino Unido (com excepção da parte da via onde circula o EuroStar), a Irlanda, a Dinamarca, a Suécia, a Noruega, a Áustria e Grécia não dispõem de linhas de alta velocidade.

3.2.3.3. Alta Velocidade e Velocidade Elevada na Europa: Velocidades Comerciais

Seguidamente mostram-se características de linhas ferroviárias europeias de alta velocidade e velocidade elevada e apresentam-se detalhes tais como paragens, cidades de partida e chegada e velocidades comerciais mais elevadas. Esta listagem será dividida em linhas nacionais (dentro do mesmo país) e internacionais (entre diferentes países europeus).

i) Linhas internacionais

- Eurostar Londres / Paris (495 km) – 192 km/h sem paragens intermédias; 175km/h com duas paragens. No túnel sob a Mancha (50 km), a velocidade máxima não pode exceder 160 km/h por razões de segurança;
- Eurostar Londres / Bruxelas (381 km) – 169 km/h sem paragens intermédias; 161 km/h com uma paragem e 151 km/h com duas paragens intermédias;
- Thalys Paris / Bruxelas (313 km) – 221 km/h sem qualquer paragem intermédia;
- Thalys Paris / Amesterdão (540 km) – 130 km/h com quatro paragens intermédias a partir de Bruxelas;
- Thalys Paris / Colónia (544 km) – 142 km/h com cinco paragens intermédias.

ii) Linhas nacionais

a) Suécia

- Estocolmo / Göteborg (445 km) – 150 km/h com três paragens intermédias;
- Estocolmo / Malmö (597 km) – 135 km/h com duas paragens intermédias;
- Estocolmo / Carlstad (311 km) – 136 km/h com seis paragens intermédias.

b) Áustria

- Viena / Salzburg (311 km) – ICE, 113 km/h com três paragens intermédias;

c) Espanha

- Madrid / Sevilha (471 km) – GEC-Alstom, 202 km/h sem paragens intermédias e 188 km/h com uma paragem;
- Madrid / Lleida (447 km) – AVE S-102, 160 km/h com uma paragem intermédia e 151 km/h com três paragens intermédias.

d) Itália

- Florença / Roma (316 km) – ES, 197 km/h sem paragens intermédias e 172 km/h com uma paragem intermédia;
- Roma / Nápoles (214 km) – ES, 122 km/h sem qualquer paragem intermédia;
- Milão / Veneza (258 km) – ES, 102 km/h com cinco paragens intermédias.

c) Alemanha

- Berlim / Wolfsburg (197 km) – ICE, 185 km/h sem paragens intermédias 170 km/h com uma paragem intermédia;
- Sieburg / Frankfurt (180 km) – ICE, 156 km/h com uma só paragem e 135 km/h com duas paragens intermédias;
- Hannover / Würzburg (328 km) – ICE, 164 km/h com duas paragens intermédias;
- Mannheim / Stuttgart (129 km) – ICE, 204 km/h sem paragens intermédias e 198 km/h com quatro paragens intermédias.

e) França

- Paris / Lille (227 km) – TGV, 220 km/h sem paragens intermédias;
- Paris / LeMans (202 km) – TGV, 216 km/h sem paragens intermédias e 195 km/h com uma paragem intermédia;
- Paris / St. Pierre dês Corps (221 km) – TGV, 236 km/h sem paragens intermédias e 210 km/h com uma paragem intermédia;
- Paris / Marseille (750 km) – TGV, 250 km/h sem paragens intermédias, 237 km/h com uma só paragem e 229 km/h com duas paragens intermédias.

Destes dados deve-se reter as elevadas médias comerciais em velocidade elevada de países desenvolvidos como a Suécia, Itália, Áustria, Alemanha e França, sendo que não se referiu o Reino Unido.

Finalizando este tema, deixa-se aqui uma tabela com uma vaga ideia dos preços praticados na alta velocidade existente na Europa. As tarifas são uma aproximação e referem-se apenas a uma viagem de ida.

Quadro 3 – Preços Alta Velocidade na Europa (2007)

Origem / Destino (distância)	Preço (€)	Preço (€)
	Confort 2	Confort1
Paris / Bruxelas (313 km)	71,5	112,0
Paris / Anvers (358 km)	76,0	123,5
Paris / Liège (419 km)	74,5	119,0
Paris / Aix la Chapelle (474 km)	78,0	123,0
Paris / Colónia (544 km)	83,0	130,0
Paris / Rotterdam (458 km)	82,5	134,0
Paris / Haia (480 km)	84,5	137,0
Paris / Amsterdam / Schiphol (540 km)	94,0	152,0

3.3. SÍNTESE

Em seguida aspira-se efectuar um breve resumo da dicotomia existente entre alta velocidade e velocidade elevada. São dois conceitos que não se podem confundir e já foram dados bons exemplos destes dois aspectos na Europa. No entanto, existe sempre uma discussão polémica que envolve estas duas noções e cujas conclusões motivam a opção por um determinado projecto. Assim, muitas vezes debate-se a requalificação das linhas convencionais ou a elaboração de linhas projectadas para a alta velocidade. É necessário ter consciência que, para se atingir a alta velocidade, as linhas devem ser especialmente concebidas para este fim. Contudo, a reabilitação de linhas clássicas permite alcançar velocidades elevadas sempre que as características da linha assim o exijam.

Esta controversa questão entre a definição de alta velocidade e velocidade elevada e qual a solução a adoptar numa futura linha, é fundamental pelos custos e consequências que pode acarretar. As linhas de alta velocidade impõem um traçado bem mais exigente e consequentemente mais caro. A alta velocidade leva a maiores custos de implantação, conservação, manutenção, exploração e consumo de energia. Ora, é frequente, que para distâncias curtas e procura pouco significativa, as linhas projectadas não apresentarem a importância ambicionada e o ganho de tempo ser pouco expressivo face aos custos apreciáveis. Na velocidade elevada observa-se o sistema de pendulação e existe alguma facilidade em atingir velocidades comerciais na ordem dos 200 e 250 km/h. Há que notar que muitos países desenvolvidos não possuem linhas de alta velocidade, mas há necessidade pertinente de avaliar o estado de conservação das linhas existentes e prever o futuro congestionamento destas. Concluindo, é imperioso ponderar os factores de custo, procura, exploração e funcionalidade na decisão a adoptar em relação a linhas novas de alta velocidade ou linhas transformadas para velocidade elevada.

4

RESISTÊNCIAS E TRACÇÃO

4.1. ENQUADRAMENTO

Neste capítulo procura-se estudar o esforço de tracção como força que produz movimento e faz mover os comboios. Começa-se por definir esforço de tracção e serão referidos os vários tipos de tracção existentes. Também haverá uma breve referência à história da tracção eléctrica nos comboios e serão descritos alguns comboios pioneiros neste sistema de tracção eléctrica.

Ainda no presente capítulo será feita uma análise às resistências que se opõem ao movimento. Estas resistências serão expostas, explicadas e serão fornecidas determinadas fórmulas/métodos para as calcular.

4.2. ESFORÇO DE TRACÇÃO

4.2.1. DEFINIÇÃO

Aplicada ao caso dos transportes, tracção refere-se à força necessária para fazer deslocar um veículo, nomeadamente um veículo ferroviário, vencendo assim o atrito existente entre o comboio e a superfície sobre a qual assenta. Factores como as propriedades de cada um dos materiais em contacto, a rugosidade dos mesmos, a força e área de contacto são determinantes para o cálculo da tracção. Esforço de tracção é um sinónimo de força motriz e esta terminologia é usada na engenharia dos caminhos-de-ferro quando se pretende descrever o poder de arranque de uma locomotiva. O valor do esforço de tracção pode ser obtido teoricamente ou por via experimental e é normalmente referido segundo condições normais de operação. O valor do esforço de tracção efectivo para uma locomotiva específica varia em função da velocidade e das condições da via, sendo influenciado por outros factores já referidos.

4.2.2. TRACÇÃO NOS COMBOIOS

Num comboio, a locomotiva que fornece a força de tracção é geralmente distinguível dos outros veículos que são rebocados. A locomotiva pode ser movida por motor de combustão interna, que neste caso se designa por tracção a diesel, ou por motores eléctricos a que chamamos tracção eléctrica. Os veículos rebocados formam uma organização que se pode

chamar corpo do veículo, incluindo o transporte de passageiros e/ou mercadorias. O corpo do veículo é suportado pelos rodados directamente nos seus eixos ou nos bogies. Os rodados que fornecem tracção são referidos como rodados condutores, enquanto os que não fornecem tracção são designados como rodados rebocados. A distinção entre os veículos que puxam e os que são puxados não é tão clara nos veículos de motor diesel-eléctrico, onde apenas certos veículos de passageiros têm rodados condutores. Para assegurar a operação de veículos numa velocidade específica, a força de tracção adequada deve ser fornecida para vencer várias forças de resistência ao movimento do comboio.

4.2.3. TIPOS DE ESFORÇOS DE TRACÇÃO

Quando o valor do esforço de tracção é fixado num qualquer documento técnico, tanto se pode referir ao esforço de tracção de arranque (impulso na partida sem que os rodados derrapem) como ao esforço de tracção que pode corresponder a uma velocidade específica.

4.2.3.1. Esforço de tracção máximo

O esforço de tracção máximo é a máxima força de impulso que um veículo consegue exercer em quaisquer condições sem produzir danos no mesmo. Geralmente, o máximo valor do esforço de tracção será obtido quando o veículo está parado ou para baixas velocidades. Existe uma variedade de factores que podem limitar o máximo valor do esforço de tracção que se enumeram:

- O máximo valor do esforço de tracção não pode exceder o valor “Peso aderente”, $[P] \times \text{Coeficiente de fricção ou aderência } [\mu]$. Se um veículo necessitar de mais força de tracção ($F_{\text{tracção}} > P \times \mu$), haverá escorregamento dos rodados;
- Relação de desmultiplicação da caixa de velocidades;
- A máxima potência capaz de ser fornecida aos sistemas de tracção;
- Os binários exequíveis dos componentes de tracção.

4.2.3.2. Esforço de tracção contínuo

O esforço de tracção contínuo é a força solicitada para uma dada velocidade. Pode referir-se ao esforço de tracção requerido para manter o veículo em circulação sem ser necessário aceleração ou a máxima força que consegue produzir a dada velocidade. Segundo a relação entre potência (P), velocidade (v) e força (F), nasce a expressão:

$$P = F \times V \quad (4.1.)$$

O esforço de tracção contínuo é inversamente proporcional à velocidade para uma potência constante; o esforço de tracção contínuo é portanto dependente da potência de alimentação. Nos veículos em que a potência de alimentação é fornecida a diesel ou pela corrente eléctrica e que é

limitada pela força total desenvolvida, o máximo esforço de tracção contínuo é, para uma dada velocidade, fixado pelo poder do motor. O esforço de tracção contínuo é tido como a força correspondente a uma determinada velocidade e pode ser representado através de um gráfico numa faixa de velocidades como parte da curva de esforço de tracção.

4.2.4. CURVA DE ESFORÇO DE TRACÇÃO

As especificações técnicas das locomotivas incluem frequentemente as curvas de esforço de tracção que mostram a relação entre o esforço de tracção e a velocidade. Uma aproximação desta curva é representada na figura 4.1 como se pode observar:

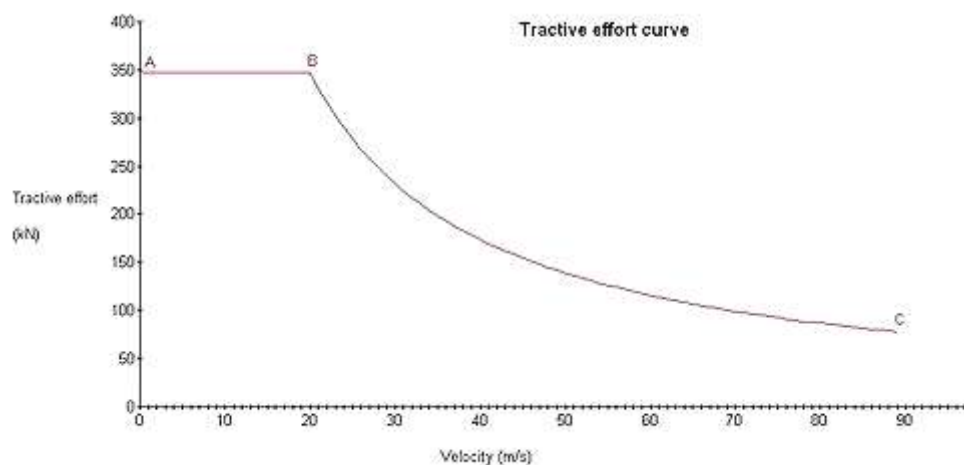


Fig.4.1 – Curva de esforço de tracção (Esforço de Tracção[kN] em função da velocidade[m/s]) (Oliveros, Fernando;1980)

A configuração básica do gráfico está acima representada esquematicamente. A linha AB mostra a operação no máximo esforço de tracção. A curva BC representa a relação entre o esforço de tracção contínuo que é inversamente proporcional à velocidade. As curvas de esforço de tracção têm quase sempre um gráfico de resistência ao rolamento sobreposto. A intersecção do gráfico da resistência ao rolamento com a curva de esforço de tracção indica a velocidade máxima que se pode atingir.

4.2.5. VEÍCULOS FERROVIÁRIOS

Num comboio longo e pesado, para acelerar de uma posição imóvel até um determinado valor de aceleração, a locomotiva necessita de aplicar uma elevada força. Em geral, as forças de resistência aumentam com a velocidade de modo a que numa dada altura do movimento, o esforço de tracção iguale as forças de resistência e o comboio não consegue acelerar mais. Isto faz determinar um limite de velocidade para qualquer veículo. Para um comboio que circule a uma velocidade desejada, a locomotiva apenas precisa de transmitir uma força suficiente para contrariar as forças de atrito (rodados nos carris, eixos de rolamentos) e a resistência aerodinâmica (uma força de valor baixo quando comparado com as outras forças actuates), no caso de trajecto plano. Também é necessário vencer a componente da gravidade paralela ao movimento, aquela que se designa por resistência de rampa. Esta resistência pode ser

considerada positiva ou negativa consoante a inclinação do terreno. Mas sobre resistências ao movimento, versará mais aprofundadamente a segunda parte deste capítulo onde serão propostas fórmulas para a estimativa de cada parcela destas forças de oposição ao movimento. Tal como pode ser calculado teoricamente pelas características do motor, sistema de transmissão, diâmetro dos rodados e massa da locomotiva, o esforço de tracção também pode ser obtido experimentalmente através de combinações de sensores e carros dinamómetros.

4.2.6. TRACÇÃO ELÉCTRICA NOS COMBOIOS DE ALTA VELOCIDADE

Actualmente, quando se pretende atingir altas velocidades, é indispensável que os comboios possuam um sistema de tracção eléctrica. E por isso, neste capítulo, será dado um especial destaque a este tipo de tracção bem como uma ênfase aos primeiros comboios de tracção eléctrica que ainda hoje são uma referência da alta velocidade no Mundo.

Os comboios eléctricos de grande velocidade desenvolveram-se para tentar ultrapassar o problema da saturação de algumas linhas de caminhos-de-ferro. Procurou-se, desta forma, oferecer aos utilizadores um comboio que apresentasse uma melhor qualidade de serviço, baseado em soluções novas mas muito ensaiadas constituindo uma unidade fiável. Quando se começou a executar esta nova forma de tracção, foi clara a enorme satisfação dos passageiros ao atingirem velocidades elevadas (250 – 300km/h), mas a tracção eléctrica trouxe vantagens de ordem técnica e económica. Uma dessas vantagens resulta da possibilidade de utilização da energia cinética armazenada no comboio em movimento para vencer rampas com inclinações elevadas. Na tracção eléctrica clássica os percursos eram traçados atendendo a que o comboio não poderia vencer rampas de inclinação superiores a 12 ‰, porque a potência instalada na locomotiva era limitada e assim o aumento do esforço de tracção que as rampas de inclinação impunham não podia ser satisfeito (Vaz Guedes;1989). Com a utilização de velocidades elevadas é possível, mediante uma redução da velocidade, aproveitar a energia cinética armazenada no comboio para o fazer percorrer uma rampa com uma maior inclinação ($\approx 35\text{‰}$) sem a necessidade de aumentar a potência total instalada (Vaz Guedes;1989). Além desta importante mais-valia técnica, a utilização de velocidades elevadas possui ainda as seguintes vantagens económicas:

- Com uma maior velocidade e para o mesmo percurso há um ganho de tempo, o que aumenta o serviço prestado pelo comboio;
- A maior velocidade permite uma melhor utilização do parque de comboios, o que leva à redução desse parque para um mesmo tráfego, e diminui as despesas com a condução e o acompanhamento do comboio, melhorando a produtividade da exploração do sistema de tracção eléctrica.

A circulação de comboios de grande velocidade, em segurança, levou à utilização de um conjunto de técnicas que constituem verdadeiras inovações em tracção eléctrica. Essas novas técnicas foram aplicadas na solução dos problemas mecânicos, no circuito eléctrico de potência e nos circuitos auxiliares dos comboios de alta velocidade.

4.2.7. PROBLEMA MECÂNICO

Apesar de estarem inicialmente previstos para circular em uma via própria, exclusivamente destinada ao tráfego de passageiros, os comboios de grande velocidade apresentam soluções dos problemas mecânicos que permitem reduzir o desgaste da via, a resistência à tracção apresentada pelo veículo e diminuir o consumo de energia (Vaz Guedes;1989). Para reduzir o desgaste da via, a carga por eixo dos comboios de alta velocidade deve rondar os 16-17 toneladas inferior à admitida pelos outros tipos de veículos como os vagões de mercadorias (20 toneladas). Desta forma, a linha não se degrada tão depressa como para os outros tipos de comboios. Também os esforços dinâmicos verticais e transversais que o comboio exerce sobre a via são diminuídos, o que permite que se evitem problemas de alteração da geometria de linha. A resistência à tracção de um comboio, no plano e em linha recta, em função da velocidade linear v , exprime-se por uma fórmula do tipo:

$$R = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \quad (4.2.)$$

para valores de velocidade v inferiores a 380 km/h. Os parâmetros desta fórmula assumem valores consoante o tipo de comboio; mas este assunto será alvo de discussão noutra parte deste capítulo conforme já foi referido. Para esta fase, apenas interessa referir que um comboio TGV adopta valores dos parâmetros a, b e c bastante inferiores a um comboio composto por duas locomotivas com quatro eixos tractores e seis carruagens Corail. Atendendo à fórmula acima exposta e após as considerações tecidas na frase anterior, verifica-se que o esforço à tracção de um comboio de grande velocidade é reduzido quando comparado com o de um comboio normal. A diminuição do esforço de tracção acarreta uma correspondente diminuição da energia consumida por um comboio de grande velocidade.

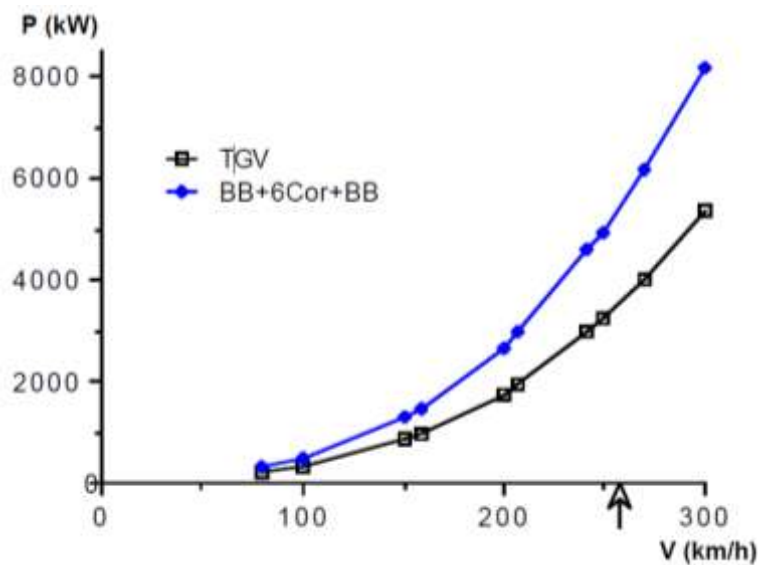


Fig.4.2 – Potência necessária à tracção (no plano e em movimento rectilíneo) (Vaz Guedes;1989)

No plano e em movimento rectilíneo, observa-se que para as velocidades que os comboios normalmente circulam em serviço comercial ($\approx 260\text{km/h}$) o consumo de energia no TGV diminui face a um comboio eléctrico clássico correspondente. Esta observação é baseada na figura 4.2 quando se compara a potência nos rodados em função da velocidade linear. A adopção de novas soluções em tracção eléctrica na construção de comboios de alta velocidade nasce da preocupação com a resolução dos problemas mecânicos (Faure Bento;2004). Uma primeira solução foi o abandono da separação entre locomotiva e carruagens para aparecer o comboio como uma entidade única com os seus problemas globais e projectado como uma unidade. O comboio típico começou a ser constituído por vários veículos: normalmente dois veículos motrizes que enquadram os restantes veículos rebocados. Cada veículo motoriz (B_0B_0) possui dois bogies com dois motores eléctricos cada e alimenta um outro bogie motoriz situado sob o veículo precedente para aumentar a aderência. O conjunto dos restantes veículos rebocados é articulado, ou seja, cada ligação inter-reboques apoia-se sobre um bogie transportador. Tendo em conta determinadas condições de ergonomia e conforto, os veículos motrizes têm uma cabina de condução cómoda e climatizada. Os pantógrafos situam-se no tecto da cabina enquanto alguma outra aparelhagem se encontra no chassis; no compartimento dos equipamentos existem blocos de aparelhagem eléctrica e pneumática. A estrutura deste tipo de veículos é feita em aço semi-inoxidável e é concebida com uma boa capacidade de resistência ao choque. Com o objectivo de diminuir os esforços aplicados à via através da redução do valor das massas não suspensas, o motor e o respectivo redutor encontram-se fixos à caixa. A junção entre os diversos veículos puxados é conseguida por meio de duas peças ligadas a cada uma das caixas adjacentes. Uma dessas peças encontra-se ligada à respectiva caixa enquanto a outra apoia-se sobre as molas helicoidais do bogie e liga-se à peça fixa por acção de uma rótula. O conjunto tem ainda vários sistemas amortecedores das diferentes solicitações mecânicas. Um pivô flutuante que elimina a transmissão de vibrações efectua a ligação entre o bogie e a caixa. Estes veículos são construídos com o intuito de afastar a transmissão de ruído do exterior para o interior além do ruído provocado pelas estruturas dos próprios veículos. Deste modo, consegue-se um elevado grau de comodidade para os passageiros e o ambiente circundante à linha de caminho-de-ferro é pouco afectado pela passagem dos comboios.

Em jeito de conclusão, os comboios eléctricos de grande velocidade cuja utilização se estendeu a diversos países europeus estão baseados em concepções novas no domínio da tracção eléctrica. No entanto, o êxito comercial que tem sido a exploração deste tipo de comboios obriga a uma atenção cuidadosa sobre as diversas soluções adoptadas e em desenvolvimento para este tipo de comboios.

4.2.8. COMBOIOS DE TRACÇÃO ELÉCTRICA

Na escrita deste ponto serão descritos alguns comboios de tracção eléctrica mais conhecidos no Mundo. A maioria dos comboios que se vão referir já foram enunciados no primeiro capítulo

deste trabalho onde se versou sobre a história da alta velocidade. Contudo, nesta fase, a abordagem terá como principal objectivo incidir sobre o modo de tracção eléctrica. Nas redes internacionais de comboios eléctricos existem vários veículos de alta velocidade. Os principais, pela sua implementação, e pelo desenvolvimento do conceito de tracção eléctrica que apresentam, vão ser explicados nos próximos pontos.

4.2.8.1. TGV (Train Grand Vitesse) – França

Trata-se de uma composição de duas locomotivas e de várias carruagens, que já vai na terceira geração de desenvolvimento tecnológico. Assim, a primeira geração foi o TGV Sud-Est que liga Paris a Lyon. É accionado por motores série de colectores de lâminas alimentada por uma ponte mista ou por um tracejador conforme as características da tensão eléctrica da catenária. A segunda geração é accionada por motores síncronos auto-pilotados, tem menos rodas motoras, mas reboca mais carruagens. Desloca-se na linha TGV Atlantique para a Bretagne e a Aquitaine com uma velocidade comercial 300 km/h. Nesta segunda geração de TGV, a informática tem um papel importante que através de microprocessadores desempenha uma função de controlo, vigilância e ajuda à manutenção. A terceira geração de TGV é accionada por motores assíncronos trifásicos, controlados por efeito de campo. Esta terceira linha, TGV Trans-Manche, dirige-se para a Mancha e já circula em Inglaterra. Esta composição possui uma velocidade comercial de 350 km/h.

4.2.8.2. ICE (Inter-City Express) – Alemanha

Este comboio desloca-se em via especial entre Hanôver e Estugarda em serviço comercial desde 2 de Junho de 1991. Na fase de ensaios atingiu a velocidade máxima de 406,9 km/h, o que constituiu o recorde do Mundo de velocidade sobre carris na altura (Maio de 1988). A composição deste comboio é formada por duas locomotivas que enquadram doze e catorze carruagens. Desde o início do seu desenvolvimento que o ICE foi accionado por motores de indução trifásicos controlados por um regulador de quatro quadrantes, com circuito intermédio de tensão contínua e um ondulador de impulsos do lado dos motores. Possui um sistema de travagem regenerativa e tensão de catenária de 15 kV. Nesta composição, a circulação de informação é feita através de fibra óptica. Os modelos mais recentes deste comboio estão adaptados para funcionar com os quatro sistemas de tensão de alimentação de catenária disponíveis na Europa.

4.2.8.3. X2000/SJ (High Speed Train class X2) – Suécia

É uma composição formada por uma locomotiva, quatro carruagens e uma carruagem final com capacidade de dirigir o comboio e possui 292 lugares sentados. É accionado por motores assíncronos trifásicos. Atinge uma velocidade máxima comercial de 200 km/h, sendo a sua velocidade média próxima de 135 km/h. Este comboio tem a particularidade das carruagens se adaptarem à inclinação da via nas curvas através de um sistema electro-hidráulico activado por acelerómetros transversais. Com este sistema de controlo activo da posição da carruagem, sistema pendular, o comboio pode deslocar-se nas curvas com uma velocidade superior a um comboio clássico. Por isso, este comboio desloca-se em vias normais em bom estado de conservação. Revelou-se um tipo de comboio que foi boa solução para o transporte ferroviário rápido com investimentos reduzidos.

4.2.8.4. ETR (ElettroTrenoRapido) 500 – Itália

É uma composição formada por duas locomotivas, uma na frente e outra na retaguarda, e doze carruagens com 700 lugares sentados. É accionado por motores assíncronos trifásicos e circula a uma velocidade comercial de média de 175 km/h. O dispositivo de tracção eléctrica é formado por dois módulos independentes composto por motores assíncronos trifásicos. Também neste comboio os sistemas de controlo e regulação utilizam microprocessadores. Este veículo possui um sistema de travagem regenerativa embora possa dissipar a energia num reóstato ventilado, ou alimentar, com esta energia os serviços auxiliares do comboio.

4.2.9. MOTORES ELÉCTRICOS VS MOTORES DIESEL

Após ter sido feita uma abordagem mais pormenorizada aos comboios de tracção eléctrica, que hoje em dia são considerados por muitos autores, preferíveis aos motores diesel, far-se-á uma comparação entre estes dois tipos de motores nas suas características gerais. Foi dado especial ênfase à tracção eléctrica por esta ser encarada como vantajosa desde que o volume de tráfego justifique os investimentos necessários. Para as companhias ferroviárias, um dos atractivos da tracção eléctrica é a maior disponibilidade do equipamento, mercê da reduzida manutenção necessária e fiabilidade comparativamente elevada. Outro aspecto, relacionado com o anterior, é a menor complexidade mecânica e a ausência de caixa de velocidades. Geralmente, as locomotivas eléctricas possuem uma relação potência/peso mais favorável em relação ao material diesel. Esta diferença resulta do facto de os motores diesel serem geralmente usados para mover um gerador eléctrico que, por sua vez, fornece energia aos motores eléctricos que accionam as rodas. Obviamente que existe um agravar do peso da locomotiva devido à conversão de energia referida que facilita o controlo motriz. As caixas de velocidades de engrenagem não são apropriadas para as elevadas potências características das aplicações ferroviárias e por isso é usual recorrer à tracção diesel-eléctrica pois estas caixas apresentam um bom rendimento. Na perspectiva da operação, os motores eléctricos possuem um controlo mais acessível e as suas relações de potência/velocidade não só permitem dispensar a caixa de velocidades como propiciam um melhor domínio sobre as condições de aderência (André,J.;2008). Quando uma roda perde momentaneamente a aderência, o motor do respectivo eixo não embala, ajudando portanto que a roda readquira as condições normais de rolamento. Os motores diesel já não têm tantas flutuações do binário instantâneo como os clássicos motores a vapor mas, ainda assim, são menos suaves que os motores eléctricos e, em condições limites de aderência, um aumento de força aplicada pode produzir um escorregamento muito maior mesmo durante um intervalo relativamente curto. A capacidade de trabalho em sobrecarga dos motores eléctricos constitui uma vantagem muito apreciada deste tipo de motores. Neste tipo de motores costuma distinguir-se a potência nominal, a potência horária (sobrecarga que é possível manter durante esse período) e a potência máxima que se pode atingir em ocasiões isoladas. Sabe-se que a potência máxima de um motor eléctrico pode ser cerca de 20% superior à sua potência

nominal. De forma geral, os motores eléctricos são mais silenciosos que os diesel, embora esta diferença seja fruto da distância de idades entre estes dois tipos de material circulante. Como exemplo, consegue-se atenuar significativamente o ruído produzido pelos motores diesel através da instalação de silenciadores nos seus tubos de escape. O equipamento eléctrico também é mais limpo que os motores de combustão, que mais facilmente se sujam de óleo, ganham fuligem, entre outros processos. Embora a tracção eléctrica incite à construção de instalações fixas muito caras ao longo da linha, os custos de investimento podem ser compensadores de várias formas. Mesmo quando o investimento não é acertadamente rentável, costuma ser benéfico para os operadores ferroviários porque geralmente não custeiam o investimento. Neste caso, o investimento é suportado directa ou indirectamente pelo Orçamento Geral do Estado e por isso, os operadores ferroviários só devem ter em conta os custos operacionais. Neste ponto de vista os motores eléctricos são imbatíveis: têm menos manutenção, costumam durar mais que os motores diesel, alcançam um bom rendimento de transformação da energia extraída da catenária e possuem a vantagem económica decisiva de utilizarem uma forma de energia mais barata uma vez que está sujeita a menos taxas. Em termos de produção energética nacional, os motores eléctricos têm a vantagem da fonte energética não se encontrar tão dependente do petróleo e a poluição que produzem na geração de energia eléctrica ocorre de forma mais controlada e afastado de centros urbanos (André,J.;2008). Existem situações onde os motores diesel têm algumas limitações como são os casos dos túneis. A disposição que os motores eléctricos têm de aproveitar a energia cinética da travagem para a devolver à catenária afirma-se como outra vantagem destes motores. Apesar do elevado rendimento das máquinas eléctricas, quer como motores quer como geradores, este processo de recuperação de energia tem uma eficiência muito baixa e certas limitações práticas significantes. Usualmente, torna-se necessário transformar a corrente em tensão e frequência antes de a injectar na catenária, mas a potência energética fornecida à catenária numa travagem é bastante elevada e a dissipação por efeito de Joule consome uma fatia significativa da energia disponível na travagem (Faure Bento;2004). Na prática, não se consegue reaproveitar por devolução à catenária mais de 30% da energia cinética.

No parágrafo anterior referiu-se essencialmente as vantagens dos motores eléctricos, no entanto, os motores diesel também os seus pontos fortes; senão nem fazia sentido esta discussão e comparação.

Em primeiro lugar, os comboios movidos por motores de combustão interna podem circular em qualquer linha, seja esta electrificada ou não. A tracção diesel exige investimentos expressivamente menores na execução da linha. Os motores eléctricos podem invocar algumas vantagens em caso de embargo petrolífero, mas além de que os motores diesel também podem queimar outros combustíveis, têm a seu favor a possibilidade de serem independentes da catenária e da infra-estrutura de alimentação eléctrica. Logo, quando acontece alguma avaria na linha ferroviária, os veículos com motores diesel são os únicos que podem circular. As locomotivas diesel precisam, em geral, de mais manutenção que as eléctricas, contudo, a catenária e toda a infra-estrutura de alimentação de energia eléctrica necessitam de manutenção frequente. No que respeita ao tráfego entre diferentes países, as locomotivas com motor a diesel podem mais facilmente percorrer regiões distintas, enquanto os comboios de tracção eléctrica obrigam a uma adaptação da tensão e frequência de alimentação de cada zona. Para transitarem indistintamente em vários países, é forçada a duplicação, ou até mesmo quintuplicação de um conjunto de elementos dos comboios eléctricos, com os correspondentes aumentos de peso, de custo e de quebras de fiabilidade e exigências de manutenção. Conforme já foi mencionado no

texto acima, o motor eléctrico é geralmente mais silencioso que o diesel, no entanto tal significa que na alta velocidade os motores eléctricos tenham um impacto acústico menor. Nos comboios mais lentos, as maiores fontes de ruído têm origem no contacto roda/carril ou provém directamente dos motores. Trata-se de fontes emissoras a baixa cota, em relação ao chão, e portanto as barreiras acústicas tradicionais, construídas ao lado das linhas ferroviárias, constituem uma opção eficaz de protecção. Nos comboios de alta velocidade, uma fonte importante de ruído, por vezes predominante, é o chamado ruído aerodinâmico, produzido em toda a superfície exterior do comboio e em particular no pantógrafo. Como este ruído aerodinâmico produzido pelos comboios de alta velocidade resulta de fontes emissoras a cotas elevadas em relação ao chão, as barreiras acústicas tradicionais mostram-se pouco eficazes para atenuar este ruído. Mediante este facto, os comboios movidos a diesel podem ter alguma vantagem de impacto acústico e devido a não possuírem pantógrafo. A ausência de catenária e de pantógrafo é origem de um bom lote de vantagens para os motores a diesel. O contacto entre o pantógrafo e o fio condutor da catenária tem muitos problemas eléctricos e de comportamento dinâmico, que só parcialmente se resolvem substituindo completamente as catenárias, os postes e toda a infra-estrutura, quando se quer que a linha fique acessível a comboios eléctricos de alta velocidade. À parte estas dificuldades, que costumam envolver medidas tão drásticas e caras como a substituição de toda a infra-estrutura fixa, os pantógrafos são um elemento muito delicado do ponto de vista aerodinâmico: são fontes importantes de ruído, de vibração, de resistência ao avanço e de instabilidade, em virtude das forças aerodinâmicas transversais que produzem. Em comboios leves e baixos pode não ser irrelevante que o pantógrafo suba o centro de massas e que as forças de contacto entre o fio e o pantógrafo sejam variáveis no tempo e incluam, ocasionalmente, componentes não alinhadas com a direcção da marcha. O rendimento dos motores a diesel é superior à eficiência associada à produção e transmissão de energia necessária para a tracção eléctrica, nas situações em que a energia eléctrica tem origem em centrais térmicas não nucleares. Por outro lado, os caminhos-de-ferro têm uma aptidão especial para diversificar as suas fontes energéticas, mesmo dos comboios com motores de combustão interna. Enquanto a introdução de um novo combustível no mercado rodoviário implica montar uma rede de distribuição extensa, com cobertura nacional e internacional, para abastecer todos os comboios basta equipar uma ou poucas estações ferroviárias com os depósitos correspondentes. Tendo em conta a conjuntura económica e tempos de crise que hoje se enfrentam, é bom lembrar que os caminhos-de-ferro são abertos a todas as possibilidades de combustíveis alternativos: o biodiesel, o metanol, o etanol, o GPL, o gás natural ou o hidrogénio sem a necessidade da criação de uma rede complexa de abastecimento. Alguns destes combustíveis alternativos são menos poluentes que a gasolina ou o gasóleo e alguns permitem um funcionamento particularmente suave e silencioso. Em todo o caso, um elemento valioso é o facto de se poder conceber o sistema de modo a existirem alternativas reais de abastecimento. A diversidade de combustíveis que hoje em dia se podem utilizar equivale, de certo modo, à possibilidade de produzir energia eléctrica de muitas formas, incluindo a partir de fontes renováveis de energia.

4.2.10. TRACÇÃO DISTRIBUÍDA POR VÁRIOS EIXOS

Neste subtítulo intenta-se analisar a questão da distribuição de tracção. Assim, será discutido e analisado até que ponto é vantajoso dividir o esforço de tracção pelos vários eixos do veículo. A avaliação do interesse em distribuir a tracção pelos diferentes eixos será complementada por um exemplo prático de um comboio tradicional de alta velocidade.

Como se sabe, a capacidade de aceleração dos comboios condiciona o atraso que se produz em cada paragem e, por sua vez, a aceleração máxima tem relação com a proporção de eixos motores, porque depende da aderência das rodas. Não sendo de esperar melhorias radicais do coeficiente de atrito, sem incorrer em risco de aumentar o desgaste, a forma de maximizar o esforço de propulsão é distribuir a tracção por mais eixos (André,J.;2008). A dificuldade de alcançar uma eficaz e correcta repartição de potência pode ser uma das objecções à eventual tracção distribuída. Na prática, não parece que isso constitua um grande problema, visto que a maioria das locomotivas possuem múltiplos eixos tractores não ligados entre si por nenhuma transmissão mecânica, e algumas composições têm várias locomotivas independentes. O sincronismo do movimento é conseguido pelo próprio atrito das rodas com os carris bem como um determinado equilíbrio das potências dos diversos motores. No caso de o comboio ser formado por um só veículo, com dois eixos ou dois bogies, os motores poderiam instalar-se do lado de fora dos rodados, como se mostra na figura 4.3, sem necessidade de terem ligação mecânica entre si.

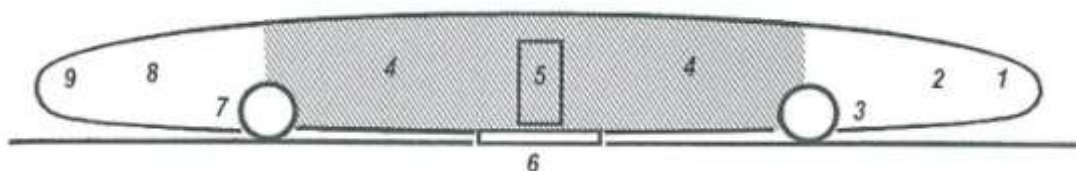


Fig.4.3 – Exemplo de distribuição de espaços num comboio de pequena lotação (André, José Maria;2008)

Nota: o equipamento de tracção, 3 e 7, localiza-se para além dos rodados, a cota baixa.

Para avaliar o interesse de distribuir a tracção por todos os eixos será abaixo exemplificado um simples cálculo para um veículo tradicional de alta velocidade.

Os comboios tradicionais de alta velocidade, com tracção pouco distribuída, têm tipicamente uma proporção de eixos motores $\alpha \approx 0,2$ (note-se que α representa a percentagem de eixos tractores em toda a composição; por exemplo, $\alpha = 1$ para uma composição com todos os rodados tractores), segundo (André,J.;2008). Em contrapartida, a massa é elevada, $M \approx 400$ toneladas, e a área frontal e a resistência aerodinâmica são relativamente baixas mas elevadas em termos absolutos $AC_D \approx 25 \text{ m}^2$ (A – significa superfície frontal do comboio; C_D – representa o coeficiente adimensional de resistência aerodinâmica que, neste caso, ronda o valor 2,5), de acordo com (André,J.;2008). Com um coeficiente de atrito de 0,1 entre as rodas e os carris e considerando uma potência instalada de 6000 kW, segundo a equação (4.3.), a velocidade

máxima destes comboios é $v_{max} = 260 \text{ km/h}$ e a aceleração está limitada pela aderência até $v^* = 276 \text{ km/h}$, conforme a equação (4.3.). Apresentam-se em seguida as expressões que nos permitiram calcular os valores das velocidades.

$$v_{max} \leq \sqrt{\frac{\lambda g (\alpha M)}{AC_D \frac{1}{2} \rho}} \quad (4.3.)$$

$$v^* = \frac{P_{max}}{\lambda g (\alpha M)} \quad (4.4.)$$

em que:

v_{max} – velocidade máxima praticável por limitação do atrito entre a roda e o carril;

v^* - velocidade correspondente à potência máxima;

λ – coeficiente de atrito;

g – aceleração da gravidade;

P_{max} – potência máxima utilizável (limitada pelo esforço de tracção máximo condicionado pela aderência e também pela potência disponível no comboio e catenária);

M – massa do comboio;

C_D – coeficiente adimensional de resistência aerodinâmica;

a – área frontal do comboio;

α – Massa aderente da composição.

Portanto, se este coeficiente de atrito não pudesse ser ultrapassado, este comboio teria algum excesso de potência, que não conseguiria transmitir utilmente às rodas. Com um coeficiente de atrito estático maior $\lambda > 0,1$, a potência máxima instalada de 6000 kW pode levar o comboio, em linha horizontal, sem vento adverso, até uma velocidade de 265 km/h. Com $\alpha = 0,2$, a velocidade máxima pode chegar a cerca de 500 km/h só em condições de vento muito fraco ou favorável e atrito ótimo entre a roda e o carril (considera-se atrito ótimo quando o coeficiente de atrito λ está próximo de 0,40). De qualquer modo, como se trata de um grande comboio, a potência instalada teria de ser da ordem dos 40000kW, o que ultrapassa largamente a potência usualmente disponível na catenária. Um problema grave destes comboios é a sua fraca capacidade de aceleração e os factores limitativos são a aderência e a potência dos motores. Para os dados acima, com uma potência máxima de 6000kW e um coeficiente de atrito de 0,1, a aceleração máxima em alinhamento recto e em patamar é dada pelas fórmulas:

$$M \frac{dv(t)}{dt} + AC_D \frac{1}{2} \rho v^2(t) + igM \leq \lambda g(\alpha M) \quad v \leq v^* \quad (4.5.)$$

$$M \frac{dv(t)}{dt} + AC_D \frac{1}{2} \rho v^2(t) + igM \leq \frac{P_{max}}{v(t)} \quad v \geq v^* \quad (4.6.)$$

Substituindo na equação os seguintes valores:

$i = 0$, supondo o movimento em patamar, não existe inclinação

$P_{max} = 6000 \text{ kW}$

$M = 400 \text{ ton}$

$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$

Sabendo que dv/dt é a aceleração, a expressão toma a seguinte forma:

$$\frac{dv}{dt} \leq 0,196 - 3,75 \times 10^{-5} v^2, \text{ e } v \leq v_{max} = 72 \frac{m}{s} \left(260 \frac{km}{h} \right) < v^*$$

Efectuando os cálculos chegam-se a valores de acelerações muito baixos: $0,196 \text{ m/s}^2$ no arranque; $0,131 \text{ m/s}^2$ a 150 km/h e uma velocidade limite de 260 km/h . Com melhores condições de aderência (um coeficiente de atrito igual a $0,2$), obter-se-ia um valor de aceleração igual a $0,392 \text{ m/s}^2$ no arranque e $0,132 \text{ m/s}^2$ a 300 km/h , se a potência motriz fosse suficiente para isso (André,J.;2008).

Os comboios de alta velocidade com tracção mais distribuída, como os ICE alemães, apresentam características gerais semelhantes, mas podem praticar acelerações maiores, enquanto a potência instalada não for condicionante. Em velocidades baixas, a potência não constitui a principal limitação pelo que a vantagem dos ICE é significativa neste caso: como reduzem para cerca de um quarto o tempo de aceleração, em distâncias reduzidas, em que o tempo de aceleração conta, têm velocidades médias superiores, para a mesma velocidade máxima.

4.2.11. ESFORÇO DE TRACÇÃO MAIS ADEQUADO

Em patamar e a velocidade constante, a resistência aerodinâmica é claramente dominante em todos os transportes que se desloquem a velocidade elevada, e mais ainda nos comboios porque as rodas metálicas sobre carris metálicos têm uma resistência de rolamento muito pequena (Faure Bento;2004). Experiências numéricas demonstram que a potência necessária durante o período de aceleração pode ultrapassar largamente a potência exigida para manter apenas a velocidade, em linha horizontal e sem vento. O gráfico da figura 4.4 abaixo ilustra bem esta constatação.

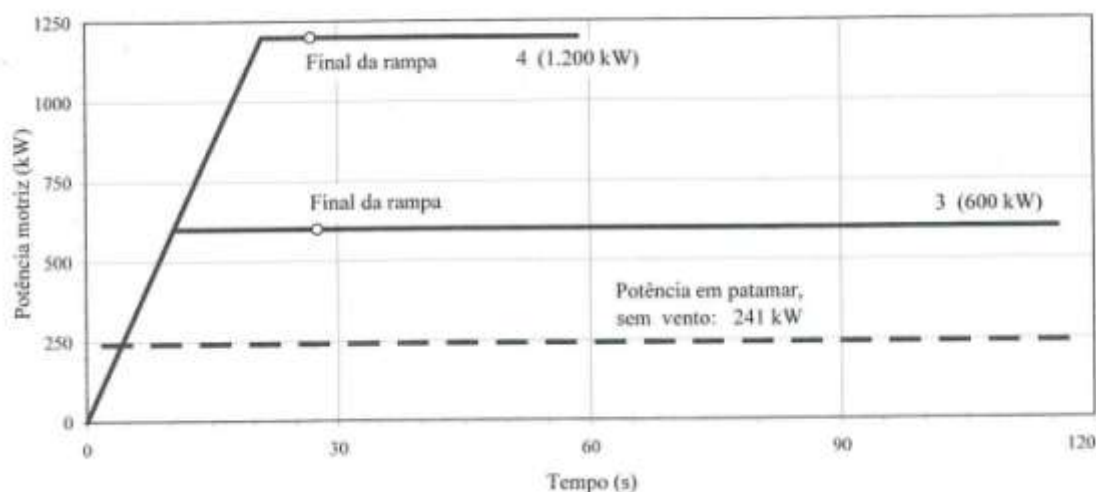


Fig.4.4 – Potência motriz instantânea, nas rodas, durante a fase de aceleração dos comboios. A potência motriz nas rodas destes comboios, à velocidade constante de 250 km/h, em patamar e alinhamento recto é 241 kW (André, José Maria;2008)

Porém, como a resistência aerodinâmica depende do quadrado da velocidade do comboio em relação ao vento instantâneo, a correspondente parcela do esforço de tracção tem uma grande amplitude de variação conforme as condições meteorológicas. Considerando as limitações de aderência das rodas e de potência instalada, pode-se contar com uma aceleração motriz relativamente pequena. Esta aceleração não excede o equivalente a uma rampa de 10% e com excepção para velocidades muito baixas, a aceleração produzida é bastante inferior à de uma rampa de 10% à deriva (André,J.;2008).. Deste modo, é absolutamente oportuno concluir que a inclinação do trainel tenha um papel evidente no dimensionamento do esforço de tracção. A selecção da potência motriz mais adequada envolve aspectos económicos que só é fácil examinar perante dados concretos que se refiram aos custos do equipamento, ao preço de energia e aos itinerários que o comboio se destina a servir. Esta análise ultrapassar amplamente o objectivo desta investigação e por isso, o estudo pretendido cingir-se-á a relacionar e comparar valores de velocidade, resistência ao rolamento, resistência aerodinâmica, aceleração e potência de tracção. Através destas grandezas procura-se concluir qual a potência/esforço de tracção mais apropriado tendo em conta as variações de velocidade e restrições existentes. O quadro seguinte foi construído a partir das fórmulas (4.3.) e (4.4.) e vai permitir tirar algumas conclusões importantes. Calcula-se o esforço de tracção para uma secção de $8m^2$, uma massa total da ordem 30 ton e um coeficiente de atrito de rolamento de 10^{-4} . Optou-se por considerar um veículo de pequenas dimensões e assim extrapolar os resultados para os comboios mais longos. Para um veículo de dimensões relativamente pequenas considera-se um valor do coeficiente de resistência aerodinâmica $C_D \approx 0,15$ devido ao facto deste veículo oferecer grandes possibilidades de optimização aerodinâmica.

Quadro 4 – Relação entre Potência de Tracção e Velocidades (André,J.;2008)

Velocidade do Comboio	Resistência Aerodinâmica Vento -100 km/h	Resistência Aerodinâmica Vento 0 km/h	Resistência Aerodinâmica Vento 100 km/h	Resistência de Rolamento (M=30 ton)	Força de Aceleração (0,1m/s ²)	Potência de Tracção (kW)
100 km/h	0 N	556 N	2.222 N	29 N	3.000 N	84 – 100 – 146
150 km/h	139 N	1.250 N	3.472 N	29 N	3.000 N	132 – 178 – 271
200 km/h	556 N	2.222 N	5.000 N	29 N	3.000 N	199 – 292 – 446
250 km/h	1.250 N	3.472 N	6.806 N	29 N	3.000 N	297 – 451 – 683
300 km/h	2.222 N	5.000 N	8.889 N	29 N	3.000 N	438 – 669 – 993
350 km/h	3.472 N	6.806 N	11.250 N	29 N	3.000 N	632 – 956 – 1.388

Para o comboio manter alguma capacidade de aceleração à velocidade máxima considerou-se ainda o acréscimo de tracção correspondente a uma aceleração de 0,1 m/s², por ser aquele que permitia vencer um trainel de 10‰ sem redução da velocidade. A coluna da direita do quadro 8 indica a potência de tracção necessária para cada uma das três condições de vento indicadas no quadro. Não seria difícil encontrar motores com a potência suficiente para cumprir os requisitos mais exigentes do quadro 8, contudo, o esforço de tracção está limitado pela aderência das rodas e esta depende do peso do veículo, pelo que, a partir de certa velocidade do comboio e certas condições de vento, é imperioso reduzir a área frontal e/ou aumentar o peso. Com um factor de atrito estático de 0,05 e uma massa total de 30 ton consegue-se chegar a uma força propulsora máxima de 14,7 kN, que é sensivelmente a força necessária para as condições mais desfavoráveis previstas no quadro 8, de um comboio a 350 km/h com vento adverso de 100 km/h. No entanto, um comboio mais leve não poderia aplicar a mesma força nas rodas sem garantir um coeficiente de atrito estático superior a 0,05. Alternativamente, para a mesma velocidade, um comboio mais leve poderia ser projectado para ter menor resistência aerodinâmica, isto é, menor área transversal e/ou um coeficiente de resistência aerodinâmica mais pequeno. A fim de estudar a força equivalente que um comboio deve aplicar nas rodas para equilibrar as resistências a vencer sem necessidade de ultrapassar um coeficiente de atrito estático de 0,05, elabora-se o quadro 9. O quadro 9 procura indicar qual a massa mínima que o comboio deve possuir para determinada velocidade tendo em conta a força equivalente na frase anterior explicada.

Quadro 5 – Massa aderente mínima (André,J.;2008)

Velocidade (km/h)	Vento adverso de 100 km/h	Sem Vento
100	6 ton	2 ton
150	9 ton	3 ton
200	13 ton	6 ton
250	18 ton	9 ton
300	23 ton	13 ton
350	29 ton	18 ton

A conclusão que se extrai do quadro é que, embora um comboio não possa aumentar indefinidamente a sua velocidade máxima, a massa previsível será suficiente para assegurar a tracção necessária, dentro da gama de velocidades indicada. A potência de tracção está relacionada com o consumo energético de uma forma que parece paradoxal para o público não especializado. Como a conveniência de melhorar o consumo se reflecte no dimensionamento da potência disponível, a próxima secção destina-se a abordar esta relação entre potência motriz e consumo energético.

4.2.12. POTÊNCIA MOTRIZ E CONSUMO ENERGÉTICO

Vale a pena frisar que o consumo de energia aumenta com a velocidade máxima mas, à parte diferenças de rendimentos dos motores, não aumenta com a potência. É possível mostrar que dois comboios de características gerais semelhantes para vencerem o mesmo desnível terão praticamente o mesmo consumo energético, conquanto o comboio de motorização mais potente fosse muito mais rápido a acelerar. Considerando uma velocidade média de 250 km/h e um intervalo de 70 km entre paragens, para um comboio recuperar um atraso de 1 minuto é necessário que a velocidade média aumente 16 km/h, isto é, é preciso um aumento de 25 km/h na velocidade máxima, se a capacidade de aceleração do comboio a essa velocidade for da ordem de $0,1 \text{ m/s}^2$ (André,J.;2008).. Para acelerações muito inferiores a este valor, o comboio tem de ser capaz de atingir velocidades de ponta substancialmente maiores. Para se conseguir evitar o acumular e agravar de atrasos na totalidade do percurso, é fundamental que os veículos possuam um suplemento aceitável de potência. Por outro lado, não se pode descurar que o vento pode ampliar consideravelmente a resistência ao avanço, porque esta varia quadraticamente com a velocidade relativa ao ar, e não directamente com a velocidade no referencial terrestre. Este aspecto está perfeitamente ilustrado nos resultados do quadro 8 quando se variou significativamente a velocidade do vento. Nas condições práticas de serviço dos comboios,

muito em particular no caso dos comboios de alta velocidade, as distâncias que se podem percorrer à velocidade máxima costumam ser muito mais curtas que o intervalo entre paragens. Os constrangimentos no dimensionamento das linhas ferroviárias, quer em planta quer em perfil longitudinal, são de tal forma rigorosos que o comboio acaba por circular, na maioria do trajecto, em túnel, em ponte ou em viaduto. Os comboios, sobretudo os mais pesados, ao terem de transpor estas obras de arte a velocidade reduzida, passam a realizar a viagem em sucessivas travagens e acelerações.

Um exemplo destas simulações está patente nos diagramas de simulação dos tempos de viagem dos comboios de alta velocidade (tipo TGV) que circulariam numa linha nova, projectada pela Consulgal/Transmark, entre Lisboa e o Porto. Apresentam-se nos quadros 10 e 11, as informações globais relativas a algumas alternativas estudadas. Pretende-se discutir a influência da alteração da velocidade máxima nos tempos de viagem e o seu efeito no consumo energético.

Quadro 6 – Viagem Comboio de alta velocidade de Lisboa para o Porto (Traçado A)

Velocidade Máxima	Tempo Total de Viagem	Velocidade Máxima	Tempo Total de Viagem	Tempo Poupado	Variação do Tempo de Viagem (%)	Variação do Consumo Energético (%)
225 km/h	89 m e 3s	300 km/h	77 m e 4s	12m e 1s	- 13	≈ + 100

Quadro 7 – Viagem Comboio de alta velocidade de Lisboa para o Porto (Traçado B)

Velocidade Máxima	Tempo Total de Viagem	Velocidade Máxima	Tempo Total de Viagem	Tempo Poupado	Variação do Tempo de Viagem (%)	Variação do Consumo Energético (%)
250 km/h	85 m e 40s	300 km/h	80 m e 36s	5m e 5s	- 6	≈ + 50

Os valores do quadro reportam-se à viagem no sentido ascendente (os tempos previstos para o sentido oposto diferem em menos de um minuto), sem nenhuma paragem desde Santa Apolónia até à nova estação prevista para o Porto (Porto Parkway). Como é óbvio, se os planos de viagem incluíssem paragens intermédias, o tempo total seria maior para todas as velocidades máximas e as diferenças de tempo seriam ainda mais pequenas, seja em tempos relativos sejam em tempos absolutos. Casos destes, em que o aumento da velocidade máxima não se reflecte praticamente em melhoria da velocidade média, mas afecta substancialmente o consumo, já eram comuns nas experiências ferroviárias, mesmo antes do advento da alta velocidade.

A explicação para o consumo comparativamente exagerado a velocidade ligeiramente mais alta está em que o regime de marcha tensa dissipa energia em numerosas travagens, necessária para cumprir as limitações de velocidade de alguns pontos do percurso. A razão de o tempo de viagem se reduzir pouco é a fraca capacidade de aceleração destes comboios que só atingem a

velocidade máxima ao fim de um trajecto longo e têm de começar a travagem com grande antecedência. Para rendimento constante do motor e igual velocidade média, um comboio com maior potência instalada pode tirar partido da sua maior capacidade de aceleração para reduzir a velocidade máxima e, por isso, poupar energia. Em contrapartida, as curvas de rendimento dos motores não são sempre necessariamente planas. Geralmente, o estado de rendimento máximo verifica-se abaixo do ponto de potência máxima. Como tal, para funcionar mais tempo com melhor rendimento, o motor deve ter excesso de potência à velocidade de cruzeiro. Um comboio que possua dois ou mais motores independentes pode otimizar o rendimento por escalões, interrompendo a acção de alguns desses motores. Poderia dispor de 400 kW em condições de rendimento máximo, com um só motor, ou 800 kW, com o mesmo rendimento, se dois motores estivessem em funcionamento.

Para dimensionar a potência motriz de um comboio deve-se levar em conta as circunstâncias mais exigentes mas também esta conveniência de que os motores operem a maior parte do tempo com o rendimento máximo. Por exemplo, de acordo com o quadro 8, para a velocidade de 250 km/h, a potência de tracção em condições de rendimento máximo deveria ser aproximadamente igual a 450 – 500 kW e a potência máxima cerca de 700 kW; segundo o mesmo quadro, para 300 km/h, o rendimento óptimo deveria atingir-se para uma potência de tracção de 650 – 700 kW e a potência máxima deveria poder chegar a 1000 kW.

Pode-se concluir que existe uma optimização económica a analisar, pois um comboio mais potente será mais caro, mas poderá consumir menos energia e prestar um serviço mais flexível em termos energéticos e funcionais.

4.3. RESISTÊNCIAS AO MOVIMENTO

4.3.1. DEFINIÇÃO E TIPOS DE RESISTÊNCIA

Nesta parte do capítulo pretende-se abordar a questão das resistências que os comboios têm de vencer para haver movimento. Já foi referido logo no início do capítulo que para assegurar a operação de veículos numa dada velocidade específica, a força de tracção adequada deve ser fornecida para vencer várias forças de resistência ao movimento do comboio. Por definição muito simples, resistência ao movimento são as forças de oposição criadas durante o movimento e que devem ser ultrapassadas pelo esforço de tracção.

Geralmente, as forças de oposição são devidas a:

- Resistência (mecânica e aerodinâmica) no movimento horizontal e rectilíneo;
- Resistência causada pelas curvas do traçado;
- A componente da gravidade nas inclinações, positivo no sentido ascendente e negativo no percurso descendente;
- Inércia pela aceleração no arranque e quando a velocidade não é constante.

Portanto, a força motriz do comboio tem de vencer a resistência aerodinâmica, a resistência de rolamento, a força de inércia correspondente à aceleração pretendida e, no caso de rampas, tem de contar com a componente do peso oposta ou a favor do movimento. Em muitos casos, verifica-se ainda um acréscimo de resistência, devido ao atrito do verdugo das rodas contra um dos carris. Esta força é conhecida por resistência em curva, por se observar sobretudo nas curvas mais apertadas.

Ainda não costuma ser quantificada, mas hoje em dia, como os caudais de ventilação dos motores e do ar condicionado das carruagens de passageiros são muito elevados, a chamada resistência de quantidade de movimento constitui uma percentagem não desprezável da resistência total, nitidamente superior à resistência de rolamento. Não se trata de uma resistência a vencer para accionar os ventiladores, mas uma oposição, propriamente dita, ao avanço do comboio relacionada com a admissão de ar a baixa velocidade e a sua restituição à atmosfera numa direcção ortogonal ao movimento do comboio. Contudo, pode-se estimar um valor para esta resistência; sendo Q o caudal volúmico do ar, ρ a sua massa volúmica e v a velocidade do comboio, a resistência de quantidade de movimento é, no mínimo, ρQv . Esta resistência é particular dos comboios longos, porque pode suprimir-se em comboios pequenos. Existe um conjunto de fórmulas empíricas (dimensionais) usadas para estimar as necessidades de propulsão dos comboios. Mais à frente, referir-se-ão algumas destas fórmulas, aquelas que se pensa serem mais eficazes embora as expressões variem frequentemente de país para país. Algumas das fórmulas referem-se a material circulante antigo, mas continuam hoje a ser utilizadas, frequentemente com alguma adaptação. Seguidamente passa-se a descrição de cada uma destas resistências justificando as suas causas e implicações no movimento dos veículos.

4.3.2. DESCRIÇÃO DE CADA TIPO DE RESISTÊNCIA

4.3.2.1. Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento de um comboio em deriva é tão baixa, comparada com as outras forças que se torna difícil medi-la directamente e, pelo mesmo motivo, não é necessário conhecê-la com exactidão, para calcular devidamente a resistência total do comboio. Como se sabe, a resistência de rolamento depende das deformações das superfícies em contacto e não tem propriamente a ver com os fenómenos de aderência modelados como atritos de Coulomb. Se a distribuição da tensão normal fosse absolutamente simétrica relativamente a um eixo perpendicular à velocidade, como a prevista pelo modelo de Hertz, a resistência ao avanço de uma roda livre seria nula. Na verdade, existe alguma resistência de rolamento devido à histerese inelástica dos materiais e devido a micro-fluências plásticas. Embora as cargas sejam moderadas, alguns pontos das rodas e dos carris ficam sujeitos a tensões de corte muito altas. Por essa razão, mesmo que o material não chegue a entrar em fluência plástica, verifica-se uma certa histerese elástica durante o ciclo de deformação, em virtude da qual a deformação normal na parte de trás da zona de contacto é inferior à pressão na parte da frente. Por outras palavras, introduzem-se assimetria na distribuição de pressão e a componente vertical da resultante adianta-se à vertical do eixo da roda, produzindo um momento que se opõe ao rolamento. A figura que se apresenta mostra as forças que se desenvolvem no rolamento.

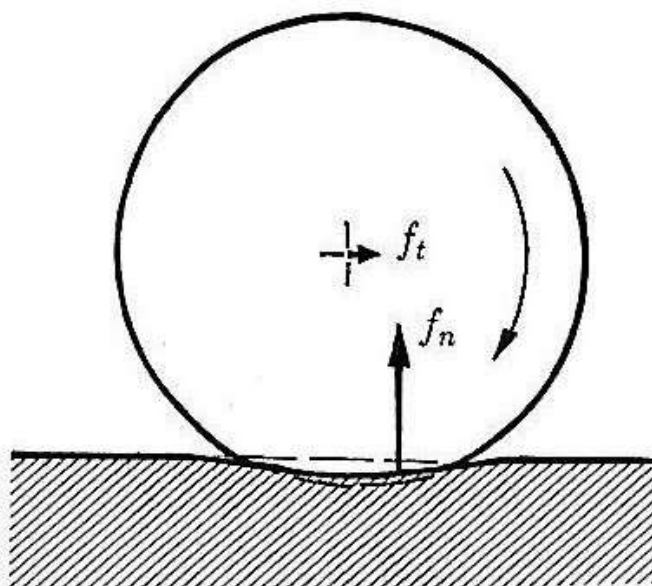


Fig.4.5 – Forças que se desenvolvem no movimento normal do veículo. f_t representa a resistência ao rolamento (André, José Maria;2008)

A força de tracção f_t que é necessário aplicar sobre o eixo para vencer este momento é proporcional à carga vertical f_n da roda:

$$f_t = C\alpha \frac{a}{R} f_n \quad (4.7.)$$

em que $C=2/(3\pi)$ para um cilindro, $C=3/16$ para a esfera; a é o semi-comprimento da zona de contacto na direcção do rolamento e α é um factor empírico de histerese elástica. Para duas superfícies metálicas duras, $\alpha \approx 1\%$. Para rodas de caminho-de-ferro, em que $a/R \approx 5 \times 10^{-2}$, a expressão anterior dá um coeficiente de resistência ao rolamento $f_t/f_n \approx 10^{-4}$. Quando a tensão limite de elasticidade é excedida, a resistência de rolamento aumenta muito. Em geral, não há fluência plástica apreciável se a pressão máxima de Hertz não exceder cerca de quatro vezes a tensão de cedência ao corte do material menos duro. A situação complica-se quando há fenómenos dinâmicos. O fenómeno da resistência de rolamento exhibe uma elevada complexidade e a hipótese de quase-linearidade com a força normal, vulgarmente aceite, estabelece somente uma primeira aproximação das observações empíricas. Segundo outros autores, seria mais correcto afirmar que a resistência ao avanço é proporcional à potência 0,9 do

carregamento vertical f_n . Para a mesma deformação da interface roda/carril, a resistência de rolamento seria inversamente proporcional ao diâmetro da roda, no entanto, a distribuição de tensões também se altera com o diâmetro, a afirmação não é exacta. Por outro lado, insere-se normalmente na resistência ao rolamento o binário de atrito nos rolamentos dos veios, que não depende do diâmetro da roda. Mediante tais constatações, as estimativas não são unânimes e nem todas apresentam uma distribuição inversamente linear com o raio R ; geralmente considera-se que a resistência de rolamento varia com $1/R^n$, com $0,5 < n < 1$. Para o caso de comboios modernos, o expoente n estará mais próximo de 1, pois o binário resistente no eixo é relativamente pequeno. Muito embora a dificuldade de enquadrar todas as situações numa só expressão ser visível, pode-se adoptar a proporção $f_r/f_n \approx 10^{-4}$ como característica do coeficiente de rolamento de comboios modernos. Este tipo de estimativa serve essencialmente para evidenciar que a resistência de rolamento é necessariamente muito baixa e comumente desprezável em relação às outras resistências.

4.3.2.2. Resistência aerodinâmica

É sabido que os assuntos da aerodinâmica são frequentemente os mais interessantes e debatidos no âmbito da engenharia. Trata-se de um tema muito complexo e de árduo trabalho e como tal, no presente estudo far-se-á uma abordagem muito simples uma vez que é difícil para um não-especialista acompanhar detalhadamente a explicação. É necessário compreender as importantes relações entre as forças aerodinâmicas e o peso dos comboios. Se a aerodinâmica for descurada, não é possível reduzir a massa dos comboios de alta velocidade, porque as rodas perdem a aderência necessária para vencer a resistência aerodinâmica. Por conseguinte, não só a aerodinâmica condiciona directamente o esforço de tracção, como obriga a deslocar uma massa maior, o que também influi sobre o consumo energético e a poluição. Deste modo, é fundamental reter que a aerodinâmica é duplamente, uma chave para a redução do consumo energético e das emissões poluentes do transporte ferroviário. Como não se pretende analisar exaustivamente a questão da aerodinâmica, aqui fica uma breve referência às principais variáveis que afectam a resistência aerodinâmica dos comboios. Nas condições típicas dos comboios, as únicas variáveis relevantes para a força de resistência aerodinâmica, D (do inglês *drag*), de um determinado comboio, com vento relativo de um determinado quadrante são:

- ρ – a massa volúmica do ar, uniforme e constante, a menos de variações meteorológicas;
- ν – a viscosidade cinemática do ar, também uniforme e constante;
- v_∞ – o módulo da velocidade do comboio relativamente à atmosfera;
- l – a escala do comboio, representada por uma dimensão.

Nestas condições, a Análise Dimensional mostra que é possível formar apenas dois números adimensionais independentes, relacionados entre si por meio de uma única função f . Tradicionalmente, eles são o coeficiente adimensional de resistência aerodinâmica (C_D) e o número de Reynolds (Re):

$$C_D = f(Re), \text{ sendo } C_D = \frac{D}{A \frac{1}{2} \rho v_\infty^2} \text{ e } Re = \frac{l v_\infty}{\nu} \quad (4.8.)$$

em que A é uma área de referência, normalmente a área da secção transversal do comboio. Note-se que em condições de semelhança geométrica, o aparecimento de A na definição de C_D não aumenta o número de variáveis independentes, pois $A \approx l^2$. No cálculo da resistência, a dimensão de referência costuma ser a largura l do comboio e A é a área frontal. Analogamente, a força de sustentação aerodinâmica, L (do inglês *lift*), pode exprimir-se sob a forma de um coeficiente adimensional de sustentação, C_L :

$$C_D = f(Re), \text{ sendo } C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2} \quad (4.9.)$$

e também se podem escrever relações análogas para as outras componentes das forças aerodinâmicas e para os momentos. A relação mais importante diz respeito à velocidade. Uma vez que C_D é praticamente constante nesta gama de Re , a própria definição do C_D , em (4.8)., mostra que a resistência varia com o quadrado da velocidade. Na última etapa deste capítulo, dedicado às fórmulas propostas para calcular as resistências, apresentar-se-ão fórmulas que incluem a parcela da resistência aerodinâmica.

Para terminar este ponto apresentam-se duas figuras que demonstram perfeitamente o aumento da resistência ao movimento com o aumento da velocidade. A figura 4.6 ilustra o aumento da resistência mecânica e aerodinâmica em função da velocidade. Pode-se observar que, para altas velocidades, a resistência aerodinâmica é decisiva e deve ser dado ao comboio uma forma aerodinâmica adequada para a reduzir. A figura 4.7 ilustra a resistência ao rolamento em função da velocidade bem como a potência requerida para vencer esta resistência. Deve-se constatar que para um aumento de velocidade de 200 para 300 km/h, a potência do motor tem de ser aumentada 200%.

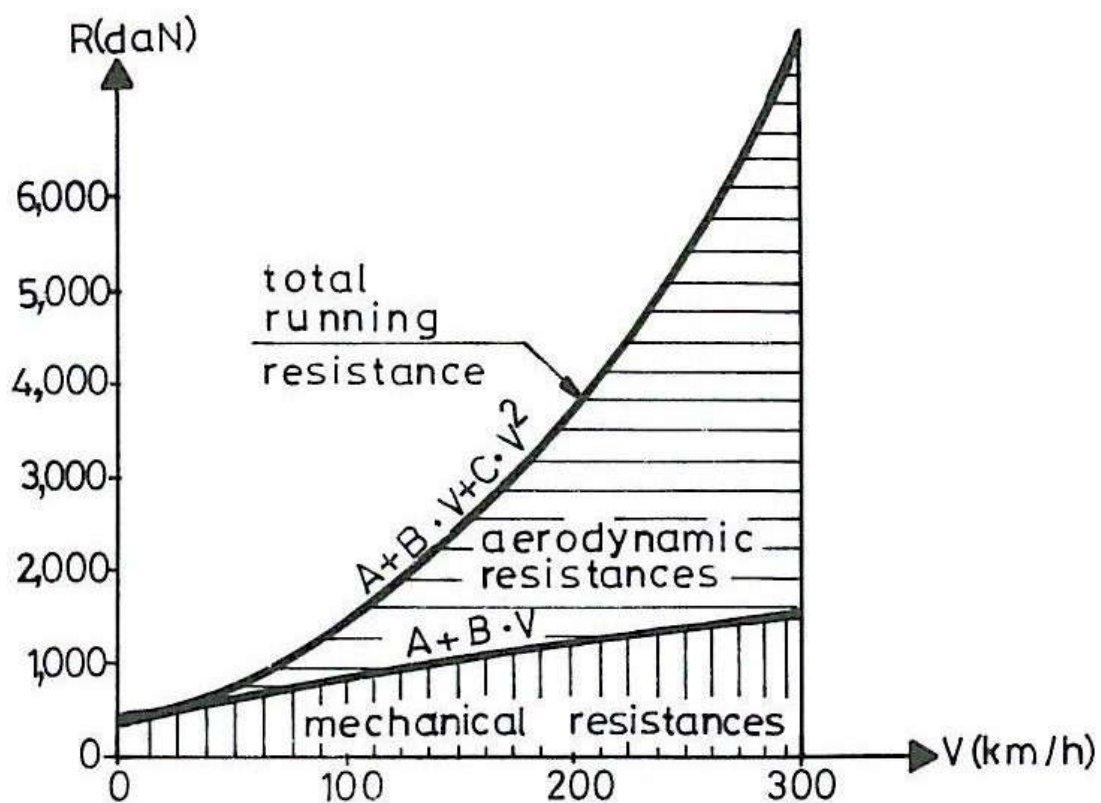


Fig.4.6 – Resistência mecânica e aerodinâmica em função da velocidade (Profillidis;1995)

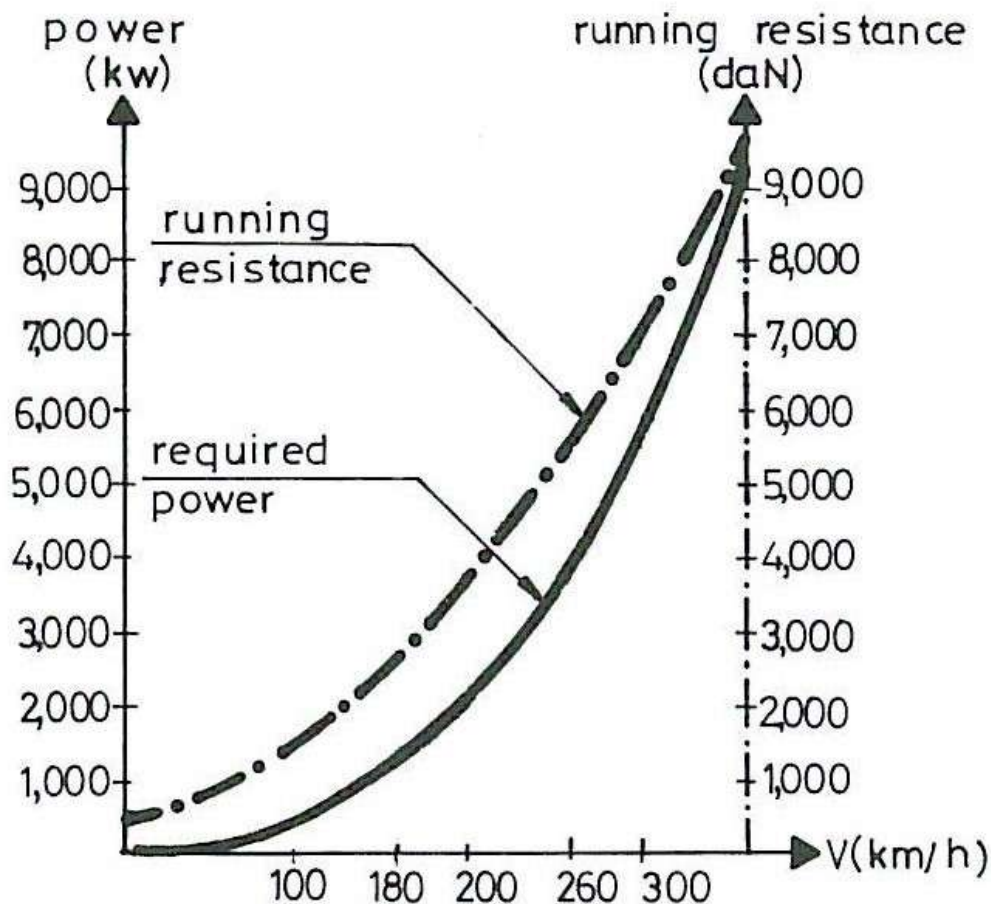


Fig.4.7 – Resistência ao rolamento e potência de tracção requerida em função da velocidade
(Profillidis;1995)

4.3.2.3. Resistência devido às curvas do traçado

Alguns comboios apresentam um certo acréscimo de oposição ao movimento, a denominada resistência de curva, que na maioria das vezes encontra-se implicitamente contabilizada nas várias relações empíricas. Nesta exposição, no próximo assunto, fornecer-se-á uma expressão que permite aproximar a grandeza deste tipo de resistência. A resistência de curva adicional é causada por:

- Atrito entre o verdugo da roda e o carril;
- O deslizamento das rodas no carril, desde que os eixos de um bogie ou dois eixos do comboio sejam sempre paralelos.

Tal resistência em curva, que, por vezes se confunde indevidamente com uma resistência de rolamento, só ocorre se a geometria das rodas e as características da suspensão não estiverem ajustadas ao traçado da linha e/ou se esta tiver curvas demasiado apertadas. A melhoria do guiamento lateral de alguns comboios produziu reduções expressivas do esforço total de tracção, da ordem de 10%, mesmo em comboios relativamente modernos, indicativas de que grande parte da resistência de contacto com o carril era devida a atrito do verdugo. Também se pode tentar reduzir a resistência de curva através da lubrificação da via ou lubrificação do bordo (parte mais saliente) do rodado. O objectivo principal destas medidas, é contudo, reduzir o desgaste dos carris e do bordo dos rodados. Nota-se um importante progresso neste campo e, como tal, os comboios mais recentes já não exibem esta resistência em curva e também são mais silenciosos. De qualquer modo, o problema apenas se soluciona totalmente aumentando os raios das curvas e este é justamente uma das razões para o traçado das actuais linhas de alta velocidade exigir curvas tão largas.

4.3.2.4. Resistência originada pela gravidade

Num caminho-de-ferro circulando em alinhamento recto sem desnível longitudinal, a componente da força da gravidade perpendicular à direcção do movimento é nula. Contudo, quando o plano do movimento é inclinado (por exemplo, quando o comboio circula numa subida ou descida), a componente da força da gravidade paralela ao plano da via desenvolve uma resistência adicional que deve ser vencida (Profillidis;1995). Esta resistência é habitualmente designada por resistência de rampa. Regularmente, o gradiente longitudinal não deve exceder 20‰, e o ângulo α é muito pequeno, por isso, pode-se assumir que $\sin \alpha = \tan \alpha$ (Profillidis;1995). E assim, como se presenciara com cálculos no próximo capítulo, a resistência pode ser determinada através da expressão:

$$R_g = P \cdot \sin \alpha = P \cdot i \quad (4.10.)$$

onde i é a inclinação longitudinal.

Resistências devidas às curvas do traçado e à gravidade são comumente unificadas num conceito de rampa integral (rampa fictícia, cuja inclinação introduziria uma resistência específica igual à soma das resistências específicas devidas à rampa real e à curva em rampa que lhe está associada) ajustado ao gradiente e usualmente expresso em kg/ton. A seguinte figura realça o efeito da inclinação orográfica no acrescentar de resistência ao movimento.

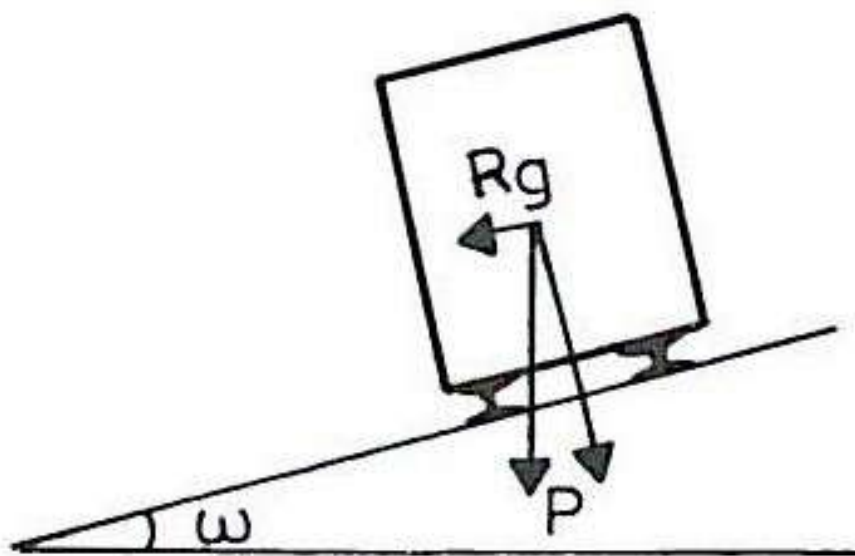


Fig.4.8 – Resistência de rampa (Profillidis;1995)

4.3.2.5. Resistência de inércia

As forças de resistência que surgem da aceleração de um comboio são dadas pela clássica equação da dinâmica e dependem das características geométricas e do material de que os veículos são feitos. Se a for a aceleração imprimida pelo motor de tracção, a resistência específica de inércia pode ser:

$$R_i = \frac{a}{g} \cdot q \quad (4.11.)$$

onde:

q – coeficiente de massa retirado de acordo com as massas fixas e rotativas do material circulante.

Experiências têm mostrado que a aceleração de 1cm/s^2 resulta numa força de resistência incremental de 1kg/ton , que é aproximadamente equivalente a uma subida com uma inclinação de 1% .

4.3.3. FÓRMULAS PROPOSTAS PARA ESTIMAR AS RESISTÊNCIAS

Como mencionado no início do capítulo, aqui fica a explanação de algumas expressões/fórmulas que permitem aproximar as resistências de tracção. Serão apresentadas dois tipos de fórmulas, isto é, um conjunto de expressões mais usado na Europa (SNCF) e outro grupo usado na América Latina. As fórmulas mais usadas na Europa derivam da criação do TGV, enquanto as expressões usadas na América Latina servirão de base aos cálculos do já referido trem-bala. Existe uma enorme quantidade de fórmulas empíricas para a avaliação das resistências que variam consoante o país. No presente trabalho apenas interessa referir dois conjuntos de fórmulas que se distinguem claramente a nível de enunciação, modelos experimentais e até unidades utilizadas.

4.3.3.1. Conjunto de fórmulas habituais na Europa

A maioria das equações que se apresentam são empíricas ou semi-empíricas e incluem coeficientes com valores determinados para um tipo específico de material rolante (exemplo, BR: British Railways; DB: Deutschen Bahn; SNCF: Société Nationale des Chemins de Fer Français).

No que diz respeito à resistência ao movimento, cuja definição segundo os europeus consiste na força que deve ser aplicada para vencer as várias resistências ao deslocamento do comboio (também aplicável a outro qualquer meio de transporte terrestre) é dado pela equação:

$$R = A + B.V + C.V^2 \quad (4.12.)$$

nesta equação:

- Os termos $A + B.V$ incluem as várias resistências mecânicas. O primeiro termo A (que não depende da velocidade, mas apenas das características do material circulante) representa as resistências ao movimento e aquelas geradas por atrito entre o rodado e o carril nas curvas. O segundo termo $B.V$ caracteriza as várias resistências mecânicas que são proporcionais à velocidade (rotação de eixos e veios, transmissão mecânica e travagem);
- O terceiro termo $C.V^2$ exprime as resistências aerodinâmicas.

Os parâmetros A , B e C podem ser expressos como função das características do material circulante através das seguintes expressões: (R em daN, V em km/h, outras grandezas em unidades SI)

$$A \text{ (daN)} = \lambda.M \sqrt{\frac{10}{m}} \quad (4.13.)$$

em que:

M – massa total do comboio (tons);

m – massa por eixo (tons);

λ – parâmetro com valores que dependem do tipo de material rolante;

Para caminhos-de-ferro com boa qualidade da via e material circulante em bogies, a parcela $B.V$ pode ser aproximada:

$$B.V(daN) = 0,01M.V \quad (4.14.)$$

A parte $C.V^2$ é estimada pela expressão:

$$C.V^2(daN) = k_1.S.V^2 + k_2.p.L.V^2 \quad (4.15.)$$

Na equação (4.15), o primeiro termo representa a resistência aerodinâmica decorrente da frente e retaguarda do comboio enquanto o segundo termo estima a resistência aerodinâmica gerada ao longo da superfície $p.L$, onde:

k_1 – um parâmetro que depende da forma da frente e retaguarda do veículo;

S – área da secção transversal da superfície frontal (em m^2);

k_2 – parâmetro que depende da condição da superfície $p.L$;

p – perímetro parcial (em metros) do nível inferior do veículo;

L – comprimento do comboio (em metros).

A resistência específica adicional r_c que ocorre ao longo das curvas pode ser expressa pela seguinte equação:

$$r_c \left(\frac{kg}{ton} \right) = \frac{k}{R} \quad (4.16.)$$

Repara-se que esta expressão fornece uma taxa de resistência, por isso chamada resistência específica onde:

k – parâmetro com valores entre 500 e 1200, usando-se 800 para valor médio;

R – raio de curva no plano horizontal (em metros).

A taxa de resistência de curva ainda pode ser aproximada mediante a grandeza do raio. Assim, expressa em N/kN ou $\%$, podem-se considerar as seguintes fórmulas:

$$R'_C = \frac{650}{R-55} \text{ ‰}, \text{ para } R > 400 \text{ m} \quad (4.17.)$$

$$R'_C = \frac{750}{R} \text{ ‰}, \text{ para } 150\text{m} < R < 400 \text{ m} \quad (4.18.)$$

$$R'_C = 5 \text{ ‰}, \text{ para } R < 150 \text{ m} \quad (4.19.)$$

A resistência causada pela gravidade, isto é, a resistência de rampa, é calculada directamente a partir de uma equação de equilíbrio, conhecido o peso do comboio e o declive da rampa. Então:

$$R_g = P \cdot i \quad (4.20.)$$

onde i é o gradiente longitudinal.

Mediante o que foi exposto no ponto anterior, a resistência de inércia é determinada segundo a seguinte fórmula que fornece uma taxa de resistência:

$$r_{in} \left(\frac{kg}{t} \right) = \frac{\alpha}{g} \cdot q \quad (4.21.)$$

em que:

q – um coeficiente de massa relacionado com as massas fixa e rotativa do material circulante (veios, motores eléctricos, transmissões). Se M_{rot} for a massa rotatória e M a massa total do comboio, então:

$$q = 1 + \frac{M_{rot}}{M} \quad (4.22.)$$

4.3.3.2. Conjunto de fórmulas usadas na América Latina

Como seria de prever, as equações usadas do outro lado do Atlântico serão de certo modo diferentes das consideradas na Europa. Não seria de esperar outra situação dado o carácter empírico destas fórmulas. Contudo, pensa-se que será de maior interesse analisar e perceber as divergências no modo de abordar esta questão.

Para começar pode-se referir que existe uma pequena diferença na nomenclatura e divisão das resistências. Consideram uma resistência normal que actua sempre, sendo composta por atrito do ar e das peças móveis; e a resistência accidental que engloba a resistência de rampa, a

resistência de curva e a resistência de inércia. No entanto, em termos de conceitos, estes são exactamente os mesmos, onde a resistência de rampa reporta-se à componente do peso no sentido oposto ao movimento, a resistência de curva deriva da dificuldade de inscrição dos bogies e a resistência de inércia considera uma reserva de potência ligada à necessidade de aceleração.

Neste caso, as fórmulas propostas remetem sempre para uma taxa de resistência pois as resistências que compõem R_{total} dependem de características específicas de cada tipo de veículo, inclusive peso. Como este último é variável para um mesmo veículo (depende da carga), as resistências acidentais e normal são determinadas de forma específica para um dado tipo de veículo:

$$R' = \frac{F_{resistência}}{P_{veículo}} \quad (4.23.)$$

Esta resistência específica ou taxa de resistência é expressa em kgf/ton ou kg/ton.

A resistência normal que actua sobre o veículo ao longo de todo o percurso é muito complexa e de difícil tratamento racional. Para determiná-la, utiliza-se a fórmula experimental de Davis. Cada tipo de veículo possui uma expressão nos moldes da apresentada abaixo:

$$R'_n = 1,3 + \frac{29}{w} + 0,03.V + \frac{0,0024.A.V^2}{w.n} \quad (4.24.)$$

(para locomotivas com peso por eixo acima de 5 ton)

onde:

R'_n – taxa de resistência normal em lb/short-ton;

w – peso médio por eixo em short-ton;

n – número de eixos do veículo;

V – velocidade em mi/h;

A – projecção da área frontal em sq.ft .

A nível da resistência de rampa, correspondente à parcela de potência das locomotivas que é destinada a contrabalançar a componente peso que actua no sentido oposto ao do movimento, a taxa de resistência é, novamente dada por uma equação de equilíbrio:

$$R'_R = 10.i \quad (4.25.)$$

sendo:

R'_R – taxa de resistência de rampa, em kgf/tf;

i – rampa em %.

A resistência de curva indica a dificuldade de inscrever o veículo numa curva e depende da configuração do bogie (distância entre eixos), da bitola da via (distância entre carris) e do raio de curva. Também devido à complexidade do fenómeno, esta resistência também é obtida empiricamente (fórmula de Stevenson).

$$R'_C = 0,2 + \frac{100}{R} \cdot (p + b + 3,8) \quad (4.26.)$$

em que:

R'_C – taxa de resistência de curva, em kgf/tf;

R – raio de curva, em m;

p – base rígida (distância entre eixos consecutivos), em m;

b – bitola, em m.

Finalmente, a resistência de inércia associada à reserva de potência que se pretende da locomotiva para uma eventual aceleração do comboio. A expressão deriva da lei do trabalho-energia e após alguns ajustes, a equação fica:

$$R'_i = \frac{4.(V_f^2 - V_i^2)}{l} \quad (4.27.)$$

onde:

R'_i – taxa de resistência de inércia, em kgf/tf;

V_i – velocidade anterior, em km/h;

V_f – velocidade após aceleração, em km/h;

l – trecho percorrido em aceleração.

4.3.3.3. Comparações

Uma pequena conclusão que se pode tirar é o facto da diferença em termos de unidades nos dois conjuntos de fórmulas que se apresentou. As equações que derivam do equilíbrio são naturalmente iguais e exactas enquanto as resistências mais complexas e difíceis de determinar resultam de fórmulas empíricas e por isso bastante distintas.

No próximo capítulo dedicado ao cálculo destas mesmas resistências usar-se-ão as expressões europeias visto serem mais testadas e derivarem dos pioneiros na alta velocidade, nomeadamente os caminhos-de-ferro franceses.

5

DELIMITAÇÃO DE RAMPAS EM ALTA VELOCIDADE: CÁLCULO APROXIMADO

5.1. ENQUADRAMENTO

Este capítulo destina-se, na sua mensagem principal, a procurar restringir as rampas em alta velocidade. Conforme se pode prever, e é comprovado, a questão das inclinações no plano do traçado de linhas ferroviárias é bastante sensível. A nível da alta velocidade, esta questão ainda se torna mais delicada. Este é o primeiro capítulo que terá uma elevada componente de cálculo, contudo, procurou-se que este não seja “pesado” nem exagerado para a compreensão do leitor. Diga-se que a primeira metade do capítulo se destinará a fornecer elucidações muito sumárias sobre o problema das rampas máximas em alta velocidade e o conceito de rampa integral. Ainda nesta primeira parte, haverá um debruçar sobre as concordâncias verticais, raios mínimos verticais e variações de inclinação.

A fracção mais importante do capítulo aborda o tema das rampas em alta velocidade sustentado pelo calculo baseado nas fórmulas descritas no capítulo anterior, onde se leva em conta as resistências ao movimento e o esforço de tracção disponível ou necessário. No fundo, este capítulo é uma aplicação prática da teoria exposta no capítulo antecedente, com especial ênfase para o problema das inclinações em alta velocidade. Para o referido objectivo, usou-se comboios congratulados de alta velocidade, e conhecidas as suas características e potencialidades, procurou-se enquadrar as rampas adequadas em alta velocidade.

5.2. RAMPAS MÁXIMAS EM ALTA VELOCIDADE

Tal como se expôs no capítulo transacto, o esforço de tracção aplicável é limitado e a questão das rampas máximas é uma especificidade que determina a carga máxima a rebocar. Rampas muito íngremes não devem ser aplicadas nas linhas primárias pois constituirão trechos em que a velocidade é restritiva. É norma das redes ferroviárias limitar a pendente máxima das linhas a cerca de 20‰ e, normalmente, este valor já é considerado excessivo, pelas seguintes razões, intrinsecamente associadas à concepção clássica do comboio:

- as potências instaladas nos comboios são pequenas comparadas com a massa deslocada, pelo que não seria possível rebocá-lo ao longo de um trainel de forte inclinação;
- o atrito entre a roda e o carril é baixo e limita severamente as forças de tracção, mesmo na hipótese dos motores debitarem a potência necessária;
- as forças de tracção estão ainda limitadas pelo peso da locomotiva, que não seria viável aumentar para além dos níveis actuais. Esta limitação não se verifica nos sistemas de tracção distribuída.

Outra consideração fundamental para compreender a importância das limitações de trainel nos caminhos-de-ferro é o facto de os comboios estarem tradicionalmente concebidos para uma manobra à vista, não automática. As linhas ferroviárias foram projectadas para que o veículo possa parar e retomar a marcha em qualquer ponto do percurso. Portanto, já não é só na aviação que existem condicionamentos de paragem: qualquer transporte que atinja uma velocidade de várias centenas de quilómetros por hora necessita de uma infra-estrutura apta a garantir uma marcha confiada ao longo de distâncias grandes. Se esta estrutura for viável, pressuposto indispensável de qualquer projecto de alta velocidade, deixa de ser importante permitir que o comboio possa parar e retomar facilmente a marcha em qualquer local da via. Aceite este princípio, torna-se possível encarar a hipótese de trainéis íngremes, sem comprometer as condições gerais de segurança e operacionalidade da linha.

No que diz respeito a valores e de acordo com a ETI (Especificações Técnicas de Interoperabilidade), nas linhas ferroviárias de alta velocidade, com exclusividade de tráfego de passageiros, o valor da inclinação máxima poderá atingir os 25/30‰ e até pode alcançar os 35‰ desde que se façam cumprir as seguintes delineações:

- a inclinação do perfil longitudinal médio em 10 km deverá ser inferior ou igual a 25‰;
- a extensão máxima de um trainel contínuo com inclinação de 35‰ não deverá exceder 6000m.

Com a diminuição da aderência como resultado da humidade nos túneis e o agravamento da resistência do ar, recomenda-se uma redução de 20% nos limites a estabelecer para as rampas perante estes casos. Outras situações a ter cuidado especial é o caso das estações onde não se devem adoptar inclinações superiores a 2,5‰. Em condições onde tal não seja possível, nas regiões montanhosas, é necessário ter a atenção de deduzir à rampa máxima o valor correspondente à resistência específica devida às acelerações.

Nas linhas de alta velocidade, segundo mencionado acima, estipulam-se inclinações máximas de rampas entre os 1,5 e 3,5%, dependente do tipo de tráfego previsto. Os máximos valores das inclinações nas linhas principais com tráfego misto e velocidades acima dos 200 km/h oscilam entre 12‰ - 15‰. O máximo valor de inclinação nos caminhos-de-ferro alemães é 12‰, mas no TGV francês (com tráfego exclusivo de passageiros) ascende-se a 35‰. Deste modo, as condições são mais exigentes para o tráfego de exclusivo de passageiros onde as pendentes são

mais restritivas; enquanto para o tráfego misto podem-se aliviar estas limitações devido à menor velocidade de projecto geralmente adoptada. Por razões de aderência, as rampas máximas excepcionalmente excedem o valor limite de 40‰. No entanto, alguns sistemas de caminho-de-ferro mais leves, que operam veículos com 50% dos eixos motorizados, concebem gradientes acima dos 40‰.

5.3. RAMPA INTEGRAL

O conceito de rampa integral já foi referido no capítulo anterior deste estudo, mas tendo em conta o tema do presente capítulo, não poderia deixar de ser elaborada uma menção a esta importante noção. A rampa integral, também denominada rampa fictícia, tenta equilibrar a resistência de rampa na presença simultânea de uma curva em planta. Por outras palavras mais simples, em caso de rampas coincidentes com curvas em planta, a rampa máxima deve ser reduzida com o aumento da resistência de curva envolvida. Assim, o conceito de rampa integral consiste na inclinação que produz uma resistência específica que representa a confluência das resistências específicas devidas à rampa verdadeira e à curva horizontal que lhe está interligada. Em termos práticos e para finalidades de cálculo, pode-se concluir que se deve limitar a rampa máxima em tantos mm/m quantos os N/kN que a resistência específica de curva origina.

5.4. CONCORDÂNCIAS VERTICAIS

Ao analisar-se a questão das rampas máximas e suas implicações, convém efectuar uma pequena abordagem ao perfil longitudinal, mais concretamente as concordâncias verticais.

As concordâncias verticais, ou curvas de transição vertical, usam-se para fazer a transição entre dois trainéis com gradientes diferentes. Nestes casos, a transição é efectuada pela interposição de uma curva de raio adequado. A curva de transição não é necessária sempre que a diferença das respectivas inclinações de trainéis (no caso de rampas de mesmo sentido) ou a sua soma (se forem rampas de sentido oposto) for inferior a 2,5‰, isto é, desde que:

$$\Delta i < 2,5\text{‰} \quad (5.1.)$$

O raio R_V da curva de transição vertical é aproximadamente calculado segundo a relação:

$$R_V \approx \frac{V^2 \left(\frac{km}{h} \right)}{2} \quad (5.2.)$$

onde em casos excepcionais pode ser reduzido a:

$$R_V \approx \frac{V^2 \left(\frac{km}{h} \right)}{4} \quad (5.3.)$$

O quadro 12 fornece o mínimo valor do raio das concordâncias verticais em função da velocidade.

Quadro 8 – Raio da concordância vertical em função da velocidade (Profillidis;1995)

Velocidade (km/h)	Valor normal(m)	Valor limite(m)
$V < 100$	5000	2500
$100 < V < 150$	10000	5000
$150 < V < 200$	20000	10000
$V > 200$	25000	15000

Os valores dados pelo quadro derivam da experiência e da reunião de informação das linhas existentes. Em relação à alta velocidade, estes valores ainda são bastante discutidos e os seus intervalos são mais restritos. Nos anexos deste trabalho apresenta-se uma tabela com os valores normativos em função da velocidade e do tipo de tráfego permitido.

Estas curvas de transição vertical são formadas por arcos de circunferência ou de parábola do 2º grau, contudo, as parábolas do 2º grau são geralmente mais empregadas devido à facilidade de cálculo de coordenadas.

Outro aspecto importante a reter é a interpretação da aceleração vertical que é uma medida de conforto para os passageiros. Sendo assim, a aceleração vertical pode ser calculada através da equação (5.4.).

$$a_v = \frac{v^2}{R_V} = \frac{V^2}{12,96.R_V} \quad (5.4.)$$

Para uma menor incomodidade dos passageiros, deve-se limitar a aceleração vertical de acordo com os valores presentes na norma portuguesa. Estes valores encontram-se tabelados em anexos a este estudo.

A definição do raio de concordância vertical nasce da conjugação da velocidade de projecto e o valor da aceleração vertical adequada. Para tal, existe um valor máximo de $(a_v)_{lim}$ que é adoptado considerando o conforto no rolamento e a eventualidade de instabilidade na plataforma da via.

Podia-se abordar o conceito de sobreaceleração vertical e efeito de escala mas não se trata do objectivo principal deste trabalho, e para encerrar este ponto deixam-se algumas recomendações e justificações das curvas de transição vertical nas mudanças de inclinação:

- O contacto roda-carril deve ser mantido. Se o valor da aceleração vertical no cimo da curva for muito elevado, a carga suspensa no veículo pode ser distribuída de forma irregular fazendo com que os rodados subam os carris e assim resultar em descarrilamento;
- O conforto deve ser garantido, com a aceleração ascensional a ser mais facilmente sentida que a aceleração descendente. Este requisito apenas se aplica no caso das linhas de alta velocidade;
- Uma boa geometria de via é necessária. O uso de curvas extensas é desejável. Curvas muito extensas são todavia muito difíceis de construir e manter, especialmente em novas vias devido aos assentamentos;
- Uma boa visão/observação deve ser garantida. O objectivo é assegurar que uma pessoa agachada (nível de olho 0,50m + superfície do carril) deve ser capaz de ver os sinais frontais (altura 1,50m + superfície do carril) de um veículo que circule à velocidade máxima trinta segundos antes de este passar.

As concordâncias convexas são mais limitativas que as curvas de transição verticais côncavas e segundo a bibliografia (Esveld;2001), os valores mínimos aconselhados, nas inclinações superiores a 5 ‰, são:

- $R_v = 20000$ m nas concordâncias convexas;
- $R_v = 10000$ m nas concordâncias côncavas.

5.5. FORÇAS DE ATRITO

Falando-se em rampas, resistências e esforço de tracção, é imprescindível realizar uma alusão muito curta às forças de aderência também chamadas forças de atrito. Estas forças são limitativas e este aspecto será mais pormenorizadamente focado na parte de cálculo deste capítulo.

Uma característica fundamental do transporte ferroviário é o contacto entre metais, entre o metal dos rodados e o metal dos carris que ocorre segundo uma superfície elíptica conhecida como a elipse de Hertz (Profillidis;1995). Este contacto é pormenorizado pela figura 5.1 abaixo indicada.

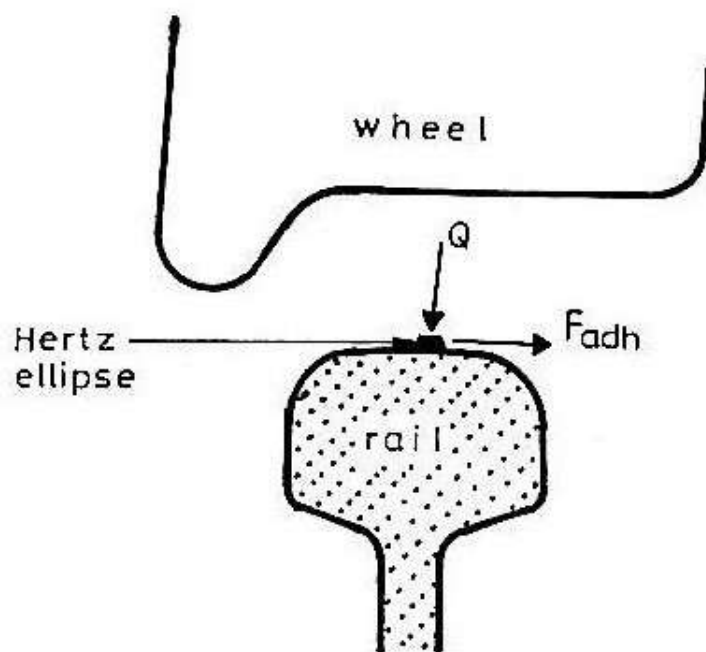


Fig.5.1 – Força de atrito F_{adh} (Profillidis;1995)

Ao longo da superfície elíptica de Hertz surgem as forças de atrito F_a que garantem a contínua rotação das rodas. Assim, a força de atrito F_a tem de ser igual ou superior ao esforço de tracção ψ conforme se mostra na figura 5.2. que segue.

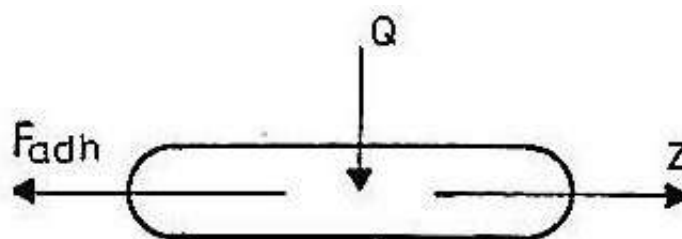


Fig.5.2 – Força de Tracção Z e força de atrito F_{adh} (Profillidis;1995)

O coeficiente de atrito μ é definido pela razão entre a força de atrito horizontal F_a e a carga vertical nos rodados Q . A expressão (5.5.) retrata esta relação.

$$\mu = \frac{F_a}{Q} \quad (5.5.)$$

O coeficiente de atrito μ depende essencialmente das condições climatéricas mas também da velocidade do comboio. Para satisfazer a condição $F_a \geq \psi$, o valor exigido do coeficiente de atrito μ foi estudado e apresenta-se nos quadros 13 e 14. Estes quadros sugerem valores aproximados para as circunstâncias de aceleração e travagem.

Quadro 9 – Valores exigidos para o coeficiente de atrito μ na Aceleração (Profillidis;1995)

Velocidade (km/h)	Coeficiente de atrito ($\mu_{\min}$)
160	0,3
200	0,1
300	0,07

Quadro 10 – Valores exigidos para o coeficiente de atrito μ na Travagem (Profillidis;1995)

Velocidade (km/h)	Coeficiente de atrito (μ_{normal})
0 – 200	0,3
200 – 300	0,1

Como seria de esperar, o coeficiente de atrito diminui à medida que aumenta a velocidade no caso da aceleração, pois esta apresenta um valor menor consoante o aumento de velocidade. No caso da travagem, o coeficiente de atrito necessário é menor pois normalmente todos os eixos do comboio possuem capacidade de travar. A figura 5.3. representa a variação do coeficiente de atrito em função da velocidade e condições climatéricas, figura esta que foi muito utilizada nos cálculos das rampas máximas em alta velocidade.

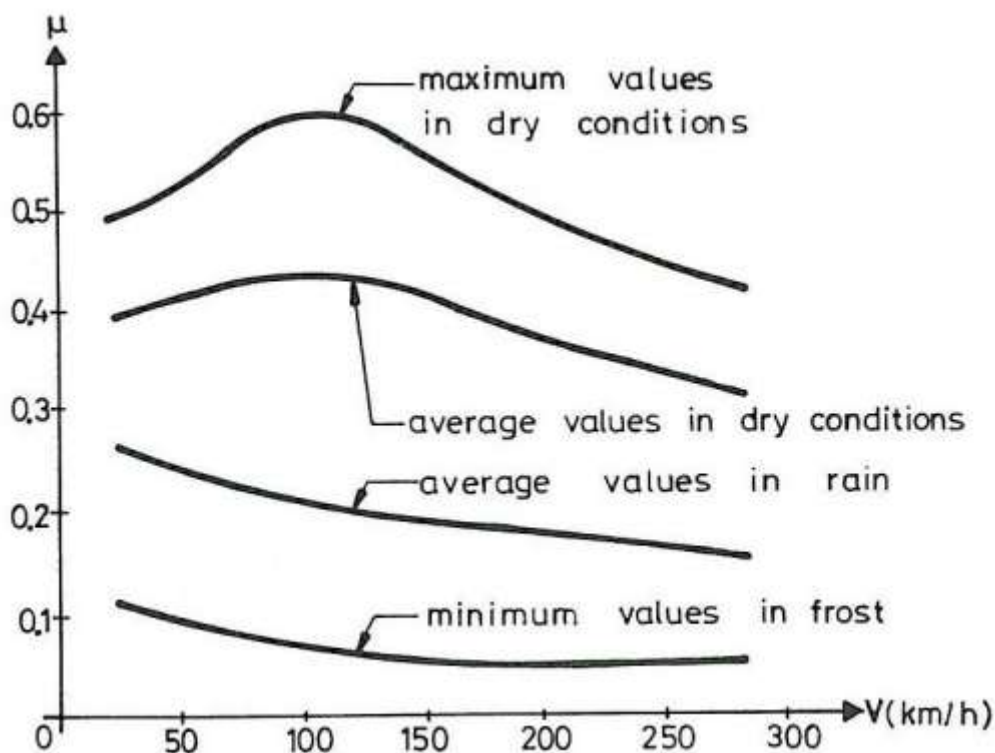


Fig.5.3. – Variação do coeficiente de atrito μ em função da velocidade V e as condições climáticas (Profillidis;1995)

5.6. CÁLCULOS DE INCLINAÇÕES MÁXIMAS

Este é considerado o ponto central do presente capítulo. Todas as explicações anteriores, servem de base ao cálculo que se expõe em seguida. Os cálculos foram baseados nas fórmulas e considerações apresentadas sobre resistências, esforço de tracção, forças de aderência e relação entre estes conceitos. A fim de tecer conclusões sobre os resultados obtidos, é necessário ter uma vasta gama de soluções e por isso, procurou-se variar as condições de circulação e características da via. Deste modo, utilizaram-se vários comboios com provas dadas na alta velocidade, como o caso do TGV, AVE e até o Alfa Pendular. Depois, experimentou-se diversas condições de circulação, mudando as condições de aderência, os raios de curva e a velocidade de operação dos comboios.

O princípio fundamental diz que, para haver movimento, o esforço de tracção tem de ser igual ou superior ao somatório de todas as resistências que se opõem ao movimento. Em notação matemática, esta lei resulta na equação (5.6.).

$$\psi_{tracção} = \sum R \quad (5.6.)$$

onde:

$\Psi_{tracção}$ – esforço de tracção [kN];

R – resistência [kN].

O esforço de tracção deve ser analisado separadamente, isto é, pode ser condicionado pela potência do motor, pela potência eléctrica ou pela força de atrito. Um destes factores limitará o esforço de tracção e para efeitos de cálculo deste trabalho, usar-se-á a seguinte notação:

$\Psi_{potência}$ – esforço de tracção limitado pela potência;

$\Psi_{aderência}$ – esforço de tracção limitado pelas condições de atrito.

Assim, antes de aplicar a equação (5.6.), é forçoso analisar qual é o tipo de esforço de tracção que vai condicionar o movimento.

No caso do somatório das resistências, há que ter o cuidado de compreender se esta é uma força de resistência pronta a somar ou se é uma taxa de resistência tornando-se necessário multiplicar pelo peso do veículo. Para simplificar esta questão, e tendo em conta que serão empregues as fórmulas europeias, converte-se as resistências de rampa, de curva e de inércia em taxas de resistência e utiliza-se a resistência aerodinâmica e mecânica em unidades de força [N]. Daqui para a frente e a fim de evitar dúvidas, chamar-se-á de resistência normal (aproveitando a terminologia brasileira) ao conjunto de resistências mecânica, aerodinâmica e ao rolamento. Desta forma, a equação (5.6.) toma a seguinte simplificação:

$$\psi_{tracção} = R_n + P(R'_i + R'_c + R'_i) \quad (5.7.)$$

Nos próximos pontos será exposto o cálculo de uma forma simples e sistemática para posteriormente se tirarem ilações. O procedimento será aplicado a cada tipo de comboio separadamente, lembrando que o grande propósito é a determinação da rampa máxima.

A força de tracção de cada locomotiva depende do seu peso e potência conforme foi referido sendo o peso decisivo para garantir a aderência roda-carril, evitando que a máquina derrape. O cálculo da inclinação será feito para o pior trecho do traçado, ou seja, aquele que apresentar maior somatório de resistência, no entanto, analisar-se-ão outras condições para se poder avaliar a influência de diversos factores.

5.6.1. VELARO

O Velaro é considerado um dos comboios mais rápidos do mundo em serviço comercial.

5.6.1.1. Características

Velocidade Máxima = 350 km/h;

Aceleração (0 – 320 km/h) = (320 km/h) / 380s = 0,234s;

Bitola = 1435 mm;

Tara = 425 t;

Peso por eixo = 17 t;

Configuração: $B'_0B'_0 + 2'2' + B'_0B'_0 + 2'2' + 2'2' + B'_0B'_0 + 2'2' + B'_0B'_0$;

Número de eixos: 32 (16 motores);

Número de bogies: 16

Largura = 2950 mm = 2,950 m;

Altura = 3890 mm = 3,890 m;

Comprimento = 200 m;

Potência = 8800 kW = 8,8 MW;

Esforço de Tracção = 283 kN;

Bitola = 1435 mm.

5.6.1.2. Esforço de Tracção Condicionante

Tendo em conta as características do comboio:

$$\Psi_{\text{potência}} = 283 \text{ kN}$$

Para determinar o esforço de aderência consideram-se condições húmidas, e efectuou-se uma média de valores do coeficiente de atrito longitudinal. Sendo que a figura 5.3. não refere para a velocidade de 350 km/h, o valor do coeficiente de atrito longitudinal, por extrapolação, define-se o valor de 0,10 para este coeficiente. Segundo (Esveld;2001), para estas circunstâncias, o valor fixa-se também nos 0,10. Logo, a média toma o valor 0,10.

A equação (5.8.) afirma que:

$$\psi_{\text{aderência}} = f \cdot P_{\text{aderente}} \quad (5.8.)$$

onde:

f – coeficiente de atrito longitudinal;

P_{aderente} – Peso aderente que é uma percentagem do Peso total.

Pode-se calcular o Peso aderente da seguinte forma, sabendo que o comboio possui 16 eixos motores de um total de 32.

$$P_{\text{aderente}} = 16/32 \times 425 \times 9,81 = 2084,625 \text{ kN}$$

$$\Psi_{\text{aderente}} = 0,10 \times 2084,625 = 208,4625 \text{ kN}$$

Perante os cálculos, verifica-se que é o esforço aderente que vai limitar o movimento.

5.6.1.3. Resistência Normal

Como realçado acima, a resistência normal engloba a resistência ao rolamento, a resistência aerodinâmica e a resistência mecânica. Abaixo indica-se um procedimento para a sua determinação.

$$R_n = A + B.V + C.V^2$$

Sendo A, a resistência ao rolamento por fricção, é calculado da seguinte forma:

$$A \text{ (daN)} = \lambda \cdot M \cdot \sqrt{(10/m)}$$

Considerando $\lambda = 1,0$, pois depende do material circulante e para os veículos da SNCF este parâmetro oscila entre 0,9 e 1,5.

$$A = 1,0 \times 425 \times \sqrt{(10/17)} = 325,96 \text{ daN}$$

$B.V \text{ (daN)} = 0,01.M.V$, para uma via em boas condições e material circulante em bogies.

$$B.V = 0,01 \times 425 \times 350 = 1487,5 \text{ daN}$$

$C.V^2 \text{ (daN)} = k_1.S.V^2 + k_2.p.L.V^2$, representa a resistência.

Segundo Profilidis, para o TGV, $k_1 = 9 \times 10^{-4}$, logo considera-se o mesmo valor para o Velaro.

$$S = h \times l = 2,950 \times 3,890 = 11,4755 \text{ m}^2$$

$k_2 = 20 \times 10^{-6}$, seguindo novamente a sugestão para o TGV.

$p = 10 \text{ m}$, não existindo dados, assume-se que ronda os 10 metros. (Profilidis)

$$L = 200 \text{ m}$$

$$C.V^2 \text{ (daN)} = 9 \times 10^{-4} \times 11,4755 \times 350 + 20 \times 10^{-6} \times 10 \times 200 \times 350^2 = 4903,61 \text{ daN}$$

Finalmente,

$$R = 325,96 + 1487,5 + 4903,61 = 6717,07 \text{ daN}$$

5.6.1.4. Resistência devido a curvas do traçado

Neste ponto determina-se a resistência específica de curva do traçado. Para primeiro cálculo sugere-se uma curva larga, isto é, com raio de 20000 metros.

$$R'_c = k/R$$

Para um Raio $R = 20\,000 \text{ m}$

K varia entre 500 e 1200 (Profilidis) – adopta-se o valor médio de 800

$$R'_c = 800/20000 = 0,04 \text{ kg/t}$$

5.6.1.5. Resistência de Rampa

A inclinação da rampa é o que se pretende saber neste cálculo. Por isso, a resistência de rampa ficará em função de i .

$$R_g = P \cdot \sin \alpha = P \cdot \tan \alpha = P \cdot i$$

$$P = 425 \text{ t} = 4169,250 \text{ kN}$$

$$R_g = 4169,250 \cdot i$$

5.6.1.6. Resistência de Inércia

Neste caso, também se efectua a determinação de uma taxa de resistência.

$$R'_{in} = (\alpha/g) \cdot q$$

$$q = 1 + (M_{rot}/M) = 1 + 16/32 = 1,5$$

$$\alpha = 320000/(3600 \times 380) = 0,234 \text{ m/s}^2$$

Considerando a aceleração da gravidade $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$$R'_{in} = (0,234/9,81) \times 1,5 = 0,036 \text{ kg/t}$$

5.6.1.7. Equação do Movimento

$$\Psi_{tracção} = \Psi_{aderência} = \sum R = R_n + P (i + R'_c + R'_{in})$$

Substituindo na equação com as unidades adequadas:

$$208,4625 = 6717,07 \times 10^{-2} + 4169,25 \times (i + 0,04 \times 10^{-3} + 0,036 \times 10^{-3})$$

Como solução **$i = 0,0338 \text{ m/m} = 33,8\text{‰}$**

5.6.1.8. Alterações a factores influentes

i)

Fazendo variar as condições climáticas, altera-se significativamente o coeficiente de atrito longitudinal. Considere-se uma situação de gelo/geada. Voltando a consultar (Profillidis;1995) e a figura 5.3., na média pode-se tomar $f = 0,07$.

$$P_{aderente} = (16/32) \times 4169,250 = 2084,625 \text{ kN}$$

$$\Psi_{aderente} = 0,07 \times 2084,625 = 145,92375 \text{ kN}$$

Substituindo novamente na equação do movimento:

$$145,92375 = 6717,07 \times 10^{-2} + 4169,25 \times (i + 0,04 \times 10^{-3} + 0,036 \times 10^{-3})$$

Tendo como solução **$i = 0,0188 \text{ m/m} = 18,8\%$**

ii)

Mantendo as condições mais desfavoráveis, ou seja, gelo/geada, e sugira-se uma curva mais apertada com um raio de 10000 metros.

$$\Psi_{\text{aderente}} = 0,07 \times 2084,625 = 145,92375 \text{ kN}$$

$$R'_c = k/R = 800 / 10\,000 = 0,08 \text{ kg/t}$$

Voltando à equação de movimento:

$$145,92375 = 6717,07 \times 10^{-2} + 4169,25 \times (i + 0,08 \times 10^{-3} + 0,036 \times 10^{-3})$$

Da resolução em ordem à incógnita, fica **$i = 0,0188 \text{ m/m} = 18,8\%$**

5.6.1.9. Situação de uma eventual paragem do veículo

Neste caso considera-se um possível cenário de interrupção de marcha do comboio e vai-se analisar a capacidade do veículo retomar a marcha nas condições mais desfavoráveis a este readquirir de movimento.

Nas circunstâncias mais adversas, tem-se em conta a geada/gelo que pode aparecer na linha ferroviária e considera-se uma curva de raio 10000 metros.

Então:

$$P_{\text{aderente}} = (16/32) \times 4169,250 = 2084,625 \text{ kN}$$

$$\Psi_{\text{aderente}} = 0,07 \times 2084,625 = 145,92375 \text{ kN}$$

$$R'_c = k/R = 800 / 10\,000 = 0,08 \text{ kg/t}$$

$$R_g = 4169,250 \cdot i$$

$$R'_{\text{in}} = (0,234/9,81) \times 1,5 = 0,036 \text{ kg/t}$$

Conforme se observa as resistências de inércia, de curva e de rampa permanecem iguais, uma vez que praticamente não dependem da velocidade. O que se vai atentar a seguir é na alteração da resistência normal, pela significativa influência que a velocidade possui na componente aerodinâmica desta resistência.

$$R_n = A + B.V + C.V^2$$

Como na situação de paragem, admite-se que o veículo está no estado de repouso, a sua velocidade é nula, e portanto a resistência normal reduz-se à sua primeira parcela.

$$R_n = A = \lambda \cdot M \cdot \sqrt{(10/m)} \text{ (daN)} = 1,0 \times 425 \times \sqrt{(10/17)} = 325,96 \text{ daN}$$

Aplicando a equação de movimento:

$$\Psi_{\text{tração}} = \Psi_{\text{aderência}} = \sum R = R_n + P (i + R'_c + R'_{\text{in}})$$

$$145,92375 = 325,96 \times 10^{-2} + 4169,250 \times (i + 0,08 \times 10^{-3} + 0,036 \times 10^{-3})$$

Resolvendo em ordem à incógnita i , obtém-se **$i = 0,03388 \text{ m/m} = 33,88 \%$**

5.6.2. CONSIDERAÇÕES

Neste primeiro cálculo procurou-se efectuar um procedimento completo e faseado, isto é, pretendeu-se ilustrar os passos todos de forma a não deixar dúvidas ao leitor. De forma a evitar um processo massivo e exaustivo, nos passos que se seguem, apresentam-se os cálculos de forma esquemática organizados por quadros. Estes quadros contêm todas as informações a nível de dados, resultados intermédios e soluções finais.

Como se percebeu, deixa-se para o final deste capítulo as ilações a tirar. No fim, compreender-se-á porque se fez variar as condições climatéricas e o raio de curva na procura de resultados.

5.6.3. ALFA PENDULAR

O Alfa Pendular é um veículo eléctrico de alta velocidade concebido pela Siemens/Fiat Ferroviária em 1999.

5.6.3.1. Características

Composição múltipla – 2 carruagens;

Velocidade Máxima = 220 km/h;

Potência = 4000 kW;

Capacidade de Transporte = 301 lugares;

Configuração: 1A + A1 + A1 + 1A + 2' + 2' + 2' + 2' + 1A + A1 + A1 + 1A ;

Peso: 299 t;

Altura = 3630 mm = 3,630 m;

Largura = 2920 mm = 2,920 m;

Comprimento = 158,9 m;

Esforço de Tracção = 21,414 tf;

Bitola = 1668 mm.

5.6.3.2. Resistência Normal

Em seguida apresentam-se quadros com os parâmetros necessários à determinação da resistência normal. Tal como foi explicado anteriormente, existem factores que são aproximados e outros extrapolados. Todos os cálculos são baseados nas características dos comboios em análise. Para a informação não ficar muito compacta, optou-se por separar as parcelas da resistência normal em quadros correspondentes a cada componente da resistência.

Quadro 11 – Resistência Normal – Componente mecânica (Alfa Pendular)

λ	M(t)	m(t)	A(daN)	V(km/h)	B.V(daN)
1,3	299	12,5	348,245	220	657,800

Repare-se que, de acordo com a configuração do Alfa Pendular, e tendo em conta os seus 24 eixos totais, sua massa por eixo obtém-se dividindo a massa total (299t) pelo total número de eixos. Visto que não se dispõe de informação complementar, considerou-se o peso do comboio igualmente distribuído pelos eixos. Assim, obteve-se 12,5 t por cada eixo.

Quadro 12 – Resistência Normal – Componente aerodinâmica (Alfa Pendular)

k_1	l(m)	h(m)	$S(m^2)$	k_2	p(m)	L(m)	$C.V^2(daN)$
25×10^{-4}	2,920	3,630	10,5996	35×10^{-6}	10	158,9	3974,318

Após a determinação das parcelas, define-se então a resistência normal como mostra o quadro 17.

Quadro 13 – Resistência Normal (Alfa Pendular)

A(daN)	B.V(daN)	$C.V^2(daN)$	$R_n(daN)$
348,245	657,800	3974,318	4980,360

5.6.3.3. Resistência devido a curvas do traçado

Para a avaliação da resistência de curva consideram-se diferentes raios, cujos valores cifram-se em 20000 metros e 10000 metros.

Quadro 14 – Resistência de Curva (Alfa Pendular)

k	R(m)	$R'_c(kg/t)$	M(t)	$R_c(N)$
800	20000	0,04	299	117,3276
800	10000	0,08	299	234,6552

5.6.3.4. Resistência de Rampa

A resistência de rampa apenas depende do peso do veículo no presente caso de estudo e, por isso, toma sempre a forma:

$$R_g = P \cdot i = 299 \times 9,81 \times i = 2933,19 \cdot i \text{ kN}$$

5.6.3.5. Resistência de Inércia

No campo da resistência de inércia, e mais precisamente nesta situação, em que não é conhecida a aceleração do comboio, esta grandeza será estimada pela fórmula já descrita (4.1.) que relaciona a potência com a força e a velocidade. Determinada a força por esta fórmula, calcula-se a aceleração do movimento pela 2ª lei de Newton.

$$\text{Pot} = F \times V, \text{ logo } F = 4 \times 10^6 \times 3600 / 220 \times 10^3 = 65454,5 \text{ N}$$

$$F = m \cdot a, \text{ então, } a = 65454,5 / 299 \times 10^3 = 0,2189 \text{ m/s}^2$$

Após esta preparação, pode-se apresentar o quadro da resistência de inércia (Quadro 19).

Quadro 15 – Resistência de Inércia (Alfa Pendular)

$\alpha(\text{m/s}^2)$	$g(\text{m/s}^2)$	M_{rot}	M	q	$R'_{\text{in}}(\text{kg/t})$	M(t)	$R_{\text{in}}(\text{N})$
0,2189	9,81	8	24	1,33	0,030	299	87,9957

5.6.3.6. Esforço de Tracção Condicionante

Neste contexto, pelas características do comboio que são fornecidas, o esforço de tracção apresenta-se em kgf. Sabendo que 1 kgf vale 9,80665 N, uma simples proporção resolve esta conversão.

$$\Psi_{\text{potência}} = 21,414 \times 9,80665 = 210,000 \text{ kN}$$

Para situações de humidade nos carris adopta-se um coeficiente de atrito longitudinal de 0,10. Já nas condições de gelo/geada, este factor assume o valor de 0,07.

Esboçando os resultados no quadro 20 onde se calcula o esforço de tracção aderente.

Quadro 16 – Esforço de tracção aderente (Alfa Pendular)

P(kN)	Eixos Motores	Eixos Rebocados	Eixos Totais	$P_{\text{aderente}}(\text{kN})$	f	$\Psi_{\text{aderente}}(\text{kN})$
2933,19	8	16	24	977,73	0,10	97,7730
2933,19	8	16	24	977,73	0,07	68,4411

Mais uma vez, em ambas as situações, o esforço de tracção aderente é limitativo.

5.6.3.7. Equação do Movimento

Por aplicação da equação do movimento, determinam-se as rampas máximas para os diferentes casos:

i)

$$\Psi_{\text{tracção}} = 97,7730 \text{ kN e } R = 20000 \text{ m} \rightarrow i = 0,01628 \text{ m/m} = 16,28\%$$

ii)

$$\Psi_{\text{tracção}} = 97,7730 \text{ kN e } R = 10000 \text{ m} \rightarrow i = 0,01624 \text{ m/m} = 16,24\%$$

iii)

$$\Psi_{\text{tracção}} = 68,4411 \text{ kN e } R = 20000 \text{ m} \rightarrow i = 0,00628 \text{ m/m} = 6,28\%$$

iv)

$$\Psi_{\text{tracção}} = 68,4411 \text{ kN e } R = 10000 \text{ m} \rightarrow i = 0,00624 \text{ m/m} = 6,24\%$$

5.6.3.8. Situação de uma eventual paragem do veículo

Os cálculos efectuados são elaborados segundo o modelo adoptado no correspondente ponto anterior referente ao Velaro.

Deste modo:

$$\Psi_{\text{tracção}} = \Psi_{\text{aderência}} = P_{\text{aderente}} \times f = 8/24 \times 2933,19 \times 0,07 = 68,4411 \text{ kN}$$

$$R_g = P \cdot i = 299 \times 9,81 \times i = 2933,19 \cdot i \text{ kN}$$

$$\text{Para } R=10000 \text{ metros, } R'_c = 0,08 \text{ kg/t}$$

$$\text{Sendo } \alpha = 0,2189 \text{ m/s}^2, R'_{in} = 0,030 \text{ kg/t}$$

$$R_n = A = 1,3 \times 299 \times \sqrt{(10/12,5)} = 348,245 \text{ daN}$$

Recorrendo à equação de movimento:

$$68,4411 = 348,245 \times 10^{-2} + 2933,19 \times (i + 0,08 \times 10^{-3} + 0,03 \times 10^{-3})$$

Da resolução em ordem a i , determina-se $i = 0,02200 \text{ m/m} = 22,00 \%$

5.6.4. SNCF TGV POS

O TGV POS (Paris-Ostfrankreich-Süddeutschland) detém o recorde de velocidade sobre carris conforme foi mencionado no primeiro capítulo. Logicamente que para este estudo, utilizar-se-á a sua velocidade comercial. Como o próprio nome indica, este veículo opera entre França (Paris) e sul da Alemanha.

5.6.4.1. Características

Data – 2007;

Velocidade = 320 km/h;

Alimentação – 31 kV;

Peso = 383 t;

Potência = 19,6 MW;

Configuração: $B'_0 B'_0 + B'_0 2' 2' B'_0 + B'_0 B'_0$;

Largura = 2900 mm = 2,900 m;

Altura = 3000 mm = 3,000 m (arbitrado);

Comprimento = 200 m.

5.6.4.2. Resistência Normal

À semelhança do ponto anterior respectivo à resistência normal, traça-se o quadro 21.

Quadro 17 – Resistência Normal – Componente mecânica (TGV POS)

λ	M(t)	m(t)	A(daN)	V(km/h)	B.V(daN)
0,9	383	24	222,800	320	1225,600

Atente-se que esta composição possui 16 eixos dos quais 12 são tractores.

A componente aerodinâmica da resistência normal é calculada no quadro 22.

Quadro 18 – Resistência Normal – Componente aerodinâmica (TGV POS)

k_1	l(m)	h(m)	S(m ²)	k_2	p(m)	L(m)	C.V ² (daN)
9×10^{-4}	2,900	3,000	8,7000	20×10^{-6}	10	200	4897,792

O quadro seguinte mostra a resistência normal após adição das suas parcelas.

Quadro 19 – Resistência Normal (TGV POS)

A(daN)	B.V(daN)	C.V ² (daN)	R _n (daN)
222,800	1225,600	4897,792	6346,190

5.6.4.3. Resistência devido a curvas do traçado

Novamente escolhem-se dois tipos de raios usados em alta velocidade, 10000 e 20000 metros. Neste caso, como a resistência praticamente só depende do raio, os resultados idênticos para todos os comboios. Apresenta-se no quadro 24 as resistências de curva.

Quadro 20 – Resistência de Curva (TGV POS)

k	R(m)	R' _c (kg/t)	M(t)	R _c (N)
800	20000	0,04	299	117,3276
800	10000	0,08	299	234,6552

5.6.4.4. Resistência de Rampa

A resistência devido à gravidade apenas depende do peso do veículo uma vez que pretende-se calcular a inclinação.

$$R_g = P \cdot i = 383 \times 9,81 \times i = 3757,23 \cdot i \text{ kN}$$

5.6.4.5. Resistência de Inércia

Como sucedeu no respectivo ponto referente à resistência de inércia do comboio Alfa Pendular, nesta situação utiliza-se exactamente a mesma estratégia.

$$\text{Pot} = F \times V, \text{ logo } F = 19,6 \times 10^6 \times 3600 / 320 \times 10^3 = 220500 \text{ N}$$

$$F = m \cdot a, \text{ então, } a = 220500 / 383 \times 10^3 = 0,5757 \text{ m/s}^2$$

A resistência de inércia encontra-se determinada no quadro abaixo.

Quadro 21 – Resistência de Inércia (TGV POS)

$\alpha(\text{m/s}^2)$	$g(\text{m/s}^2)$	M _{rot}	M	q	R' _{in} (kg/t)	M(t)	R _{in} (N)
0,5757	9,81	12	16	1,75	0,103	383	386,9947

5.6.4.6. Esforço de Tracção Condicionante

Relacionando a potência, a velocidade e a força, consegue-se determinar o esforço de tracção do motor, isto é, o esforço de tracção correspondente à potência desenvolvida pelo veículo.

$$\Psi_{\text{potência}} = F = 19,6 \times 10^6 \times 3600 / 320 \times 10^3 = 220,5 \text{ kN}$$

Consideram-se os mesmos valores do coeficiente de atrito longitudinal para o cálculo do esforço aderente que se mostra no quadro 26.

Quadro 22 – Esforço de tracção aderente (TGV POS)

P(kN)	Eixos Motores	Eixos Rebocados	Eixos Totais	P _{aderente} (kN)	f	Ψ _{aderente} (kN)
3757,23	12	4	16	2817,92	0,10	281,7900
3757,23	12	4	16	2817,92	0,07	197,2550

Na primeira situação, isto é, condições de humidade, o esforço de tracção do motor é condicionante enquanto nas condições de gelo/geada torna-se limitativo o esforço de tracção aderente.

5.6.4.7. Equação do Movimento

O emprego da equação do movimento para as diferentes situações resulta nas seguintes soluções:

i)

$$\Psi_{\text{tracção}} = 220,500 \text{ kN e } R = 20000 \text{ m} \rightarrow i = \mathbf{0,04165 \text{ m/m} = 41,25\%}$$

ii)

$$\Psi_{\text{tracção}} = 220,500 \text{ kN e } R = 10000 \text{ m} \rightarrow i = \mathbf{0,04161 \text{ m/m} = 41,61\%}$$

iii)

$$\Psi_{\text{tracção}} = 197,255 \text{ kN e } R = 20000 \text{ m} \rightarrow i = \mathbf{0,03547 \text{ m/m} = 35,47\%}$$

iv)

$$\Psi_{\text{tracção}} = 197,255 \text{ kN e } R = 10000 \text{ m} \rightarrow i = \mathbf{0,03543 \text{ m/m} = 35,43\%}$$

5.6.4.8. Situação de uma eventual paragem do veículo

Adoptando a metodologia respectiva dos referentes pontos a esta situação, o cálculo prossegue da seguinte forma:

$$\Psi_{\text{tracção}} = \Psi_{\text{aderência}} = P_{\text{aderente}} \times f = 12/16 \times 3757,23 \times 0,07 = 197,2550 \text{ kN}$$

$$R_g = P \cdot i = 383 \times 9,81 \times i = 3757,23 \cdot i \text{ kN}$$

Para $R=10000$ metros, $R'_c = 0,08$ kg/t

Sendo $\alpha = 0,5757$ m/s², $R'_{in} = 0,103$ kg/t

$R_n = A = 0,9 \times 383 \times \sqrt{(10/24)} = 222,800$ daN

Substituindo na expressão:

$197,2550 = 222,800 \times 10^{-2} + 3757,23 \times (i + 0,08 \times 10^{-3} + 0,103 \times 10^{-3})$

Da resolução em ordem a i , determina-se **$i = 0,05172$ m/m = 51,72 ‰**

5.6.5. AVE CLASS 102 (TALGO 150)

O AVE Class 102 (Talgo 350) foi construído pela Talgo em associação com a Bombardier e opera nas linhas de alta velocidade espanholas.

5.6.5.1. Características

Data – 2005;

Velocidade = 330 km/h;

Alimentação – 25 kV;

Potência = 8000 kW;

Peso = 322 t;

Configuração: $B'_0 B'_0 + 2' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2' + B'_0 B'_0$;

Largura = 2940 mm = 2,940m;

Altura = 3360 mm = 3,360m;

Comprimento = 200,11m;

Bitola = 1435 mm.

5.6.5.2. Resistência Normal

Seguindo um procedimento idêntico para o cálculo da resistência normal por partes. No quadro 27 vê-se os passos intermédios que levam ao cálculo desta resistência.

Quadro 23 – Resistência Normal – Componente mecânica (AVE CLASS 102)

λ	M(t)	m(t)	A(daN)	V(km/h)	B.V(daN)
1,10	322	16	279,149	330	1062,600

Este veículo possui um total de 20 eixos dos quais 8 são eixos motores.

O próximo quadro mostra o cálculo da parcela correspondente à resistência aerodinâmica.

Quadro 24 – Resistência Normal – Componente aerodinâmica (AVE CLASS 102)

k_1	$l(m)$	$h(m)$	$S(m^2)$	k_2	$p(m)$	$L(m)$	$C.V^2(daN)$
15×10^{-4}	2,940	3,360	9,9456	25×10^{-6}	10	200,11	7061,631

Então, a resistência normal do AVE CLASS 102 está exposta no quadro 29.

Quadro 25 – Resistência Normal (AVE CLASS 102)

A(daN)	B.V(daN)	C.V ² (daN)	R _n (daN)
279,149	1062,600	7072,610	8403,380

5.6.5.3. Resistência devido a curvas do traçado

Para se poderem tirar conclusões mais ajustadas, voltam-se a experimentar os mesmos raios de curva que nos pontos anteriores. Veja-se o quadro abaixo.

Quadro 26 – Resistência de Curva (AVE CLASS 102)

k	R(m)	R' _c (kg/t)	M(t)	R _c (N)
800	20000	0,04	299	117,3276
800	10000	0,08	299	234,6552

5.6.5.4. Resistência de Rampa

A resistência de rampa respeita a seguinte equação de equilíbrio:

$$R_g = P \cdot i = 322 \times 9,81 \times i = 3158,82 \cdot i \text{ kN}$$

5.6.5.5. Resistência de Inércia

Para determinar a resistência de inércia usam-se as seguintes fórmulas já explicadas anteriormente.

$$Pot = F \times V, \text{ logo } F = 8,0 \times 10^6 \times 3600 / 330 \times 10^3 = 87272 \text{ N}$$

$$F = m \cdot a, \text{ então, } a = 87272 / 322 \times 10^3 = 0,271 \text{ m/s}^2$$

Assim, pode-se calcular o valor desta resistência que se mostra no quadro 31.

Quadro 27 – Resistência de Inércia (AVE CLASS 102)

$\alpha(\text{m/s}^2)$	$g(\text{m/s}^2)$	M_{rot}	M	q	$R'_{\text{in}}(\text{kg/t})$	M(t)	$R_{\text{in}}(\text{N})$
0,271	9,81	8	20	1,4	0,04	322	122,1668

5.6.5.6. Esforço de Tracção Condicionante

Como se sabe, o esforço de tracção correspondente à potência imprimida pode ser obtido a partir da potência e velocidade, através da seguinte igualdade:

$$\Psi_{\text{potência}} = F = 8,0 \times 10^6 \times 3600 / 330 \times 10^3 = 87,27 \text{ kN}$$

Calcula-se o esforço de tracção aderente à semelhança do que se verificou no respectivo subtítulo anterior.

Quadro 28 – Esforço de tracção aderente (AVE CLASS 102)

P(kN)	Eixos Motores	Eixos Rebocados	Eixos Totais	$P_{\text{aderente}}(\text{kN})$	f	$\Psi_{\text{aderente}}(\text{kN})$
3158,82	8	12	20	2105,88	0,10	210,558
3158,82	8	12	20	2105,88	0,07	147,4116

Pode-se atentar aqui numa situação nova em que para as diferentes condições climatéricas, o esforço de tracção condicionante será sempre o correspondente à potência. Deste modo, no ponto que se segue basta calcular inclinações máximas para dois tipos de raios de curva.

5.6.5.7. Equação do Movimento

Para as duas situações acima referidas, isto é, para raios de 10000 e 20000 metros, substituindo-se as resistências e esforço de tracção na equação do movimento, chega-se ao valor das rampas máximas.

i)

$$\Psi_{\text{tracção}} = 87,27 \text{ kN e } R = 20000 \text{ m} \rightarrow \mathbf{i = 0,00946 \text{ m/m} = 9,46\%}$$

ii)

$$\Psi_{\text{tracção}} = 87,27 \text{ kN e } R = 10000 \text{ m} \rightarrow \mathbf{i = 0,00906 \text{ m/m} = 9,06\%}$$

5.6.5.8. Situação de uma eventual paragem do veículo

Seguindo um procedimento análogo ao ponto 5.6.4.8., chega-se aos seguintes resultados:

$$\Psi_{\text{tracção}} = \Psi_{\text{potência}} = 87,27 \text{ kN}$$

$$R_g = P \cdot i = 322 \times 9,81 \times i = 3158,82 \cdot i \text{ kN}$$

$$\text{Para } R=10000 \text{ metros, } R'_c = 0,08 \text{ kg/t}$$

$$\text{Sendo } \alpha = 0,271 \text{ m/s}^2, R'_{in} = 0,04 \text{ kg/t}$$

$$R_n = A = 1,10 \times 322 \times \sqrt{(10/16)} = 279,149 \text{ daN}$$

Substituindo na expressão:

$$87,27 = 279,149 \times 10^{-2} + 3158,82 \times (i + 0,08 \times 10^{-3} + 0,04 \times 10^{-3})$$

Determinando i na equação, resulta **$i = 0,02662 \text{ m/m} = 26,62 \text{ ‰}$**

5.7. CONCLUSÕES

A primeira conclusão que se pode tirar no final destes cálculos é que na alta velocidade as inclinações são realmente mais baixas que em outro qualquer meio de transporte terrestre. Os valores são efectivamente reduzidos quando comparados com as linhas ferroviárias convencionais e com o transporte rodoviário. Já se tinha referido que as rampas oscilariam entre os 15 e 35‰ nas linhas de alta velocidade e os cálculos vieram comprovar esta situação. Logicamente que existem excepções no cálculo efectuado, ou seja, como se esperava o TGV pode ultrapassar estas inclinações e o AVE, segundo o exposto, não conseguiria ultrapassar estas rampas. No entanto, é preciso realçar que os cálculos não são exactos, procurou-se dar uma ideia e enquadrar este tipo de rampas. As fórmulas utilizadas são aproximadas e não levam em conta muitos factores que afectam a circulação dos comboios. Em termos de esforço de tracção aderente, pretendeu-se exagerar no coeficiente de atrito longitudinal para levar ao limite a inclinação máxima que os veículos podem vencer. Ou seja, o objectivo era tentar avaliar por baixo a questão das rampas, favorecendo sempre as condições adversas. Esta meta foi atingida na medida em que se atingiram resultados próximos dos previstos e ficou patente o carácter específico deste problema das rampas na alta velocidade.

Outra ilação que interessa abordar é tentar perceber quais os factores que mais interferem no cálculo das rampas máximas. Assim sendo, pode-se constatar uma elevada influência das forças de atrito, isto é, as condições climatéricas influem fortemente no esforço de tracção aderente e pode reduzir as inclinações de uma forma significativa. Em contrapartida, repara-se a pouca sensibilidade à variação dos raios de curva horizontal, ou seja, a resistência de curva representa uma parcela de pouco relevo na determinação das inclinações. A velocidade tem uma importância relativamente expressiva na parcela da resistência aerodinâmica, conforme foi conjecturado. A resistência de inércia é bastante sensível ao valor da aceleração do comboio e também depende da quantidade de eixos tractores. Daqui pode-se retirar que a resistência de rampa é a componente mais decisiva e fundamental no movimento das composições e por isso tem um papel basilar na definição do traçado em planta e perfil longitudinal.

6

GEOMETRIA DE TRAÇADO

6.1. ENQUADRAMENTO

Este é um dos capítulos mais importantes na presente investigação pois vai abordar o assunto mais especializado da alta velocidade que é a geometria de via. O principal estudo deste tema é a problemática dos raios de curvatura das curvas horizontais em alta velocidade. Num tema tão específico como as linhas de alta velocidade, a temática das curvas em planta assume uma importância significativa pelos outros parâmetros decisivos geométricos que acarreta como a escala, insuficiência de escala e excesso de escala. Associados a estes parâmetros estão grandezas fundamentais que importa analisar como são o caso da aceleração lateral, a velocidade, a bitola e a sobreaceleração. Ao longo do desenvolvimento deste capítulo, irão ser fornecidas fórmulas que relacionam estas grandezas, bem como limites normativos exigidos pela norma.

A primeira parte incidirá numa perspectiva de definição de traçado, directriz, a questão do espaço desobstruído e os efeitos provocados pelas curvas horizontais. Seguidamente entrar-se-á na explicação e justificação teórica apoiada em equações e gráficos que elucidarão sobre o funcionamento do projecto de linhas ferroviárias em alta velocidade. Neste contexto, torna-se sempre necessário levar em conta qual o tipo de linha que se concebe, tráfego exclusivo de passageiros ou tráfego misto, pois no dimensionamento é essencial considerar os veículos rápidos como também os veículos mais lentos. É tão preciso garantir a segurança de passageiros e carga como também o desconforto causado pela aceleração e sobreaceleração.

A terminar este título, haverá novamente uma parte de cálculo onde se procura encontrar valores para o raio de curvatura horizontal para várias velocidades de projecto. Este estudo será efectuado com base nos valores normativos e pretende-se alcançar o valor mínimo para os raios a definir numa linha de alta velocidade. Claro que estes valores são sempre uma referência, porquanto na prática as condicionantes topográficas, geológicas e habitacionais obrigam a aumentar estes raios ou então até alterar a escolha do percurso. No entanto, o que interessa frisar é que a determinação do raio mínimo de acordo com a norma, é dos primeiros e decisivos passos, juntamente com a definição das rampas máximas, para se seleccionar o traçado da directriz, bem como o perfil longitudinal de uma linha de alta velocidade. Ainda haverá espaço para se dar uma ideia dos valores adoptados no projecto da linha de “TGV” em Portugal, nomeadamente no troço Poçoirão – Caia.

6.2. DEFINIÇÕES. TRAÇADO, DIRECTRIZ E ESPAÇO DESOBSTRUÍDO

Para se iniciar a explanação do fulcral e específico da geometria de traçado, terá de se abranger as simples definições de traçado, directriz e espaço desobstruído.

Para abreviar, entende-se por traçado de uma linha ferroviária a linha que constitui o projecto geométrico da linha ferroviária em planta e em perfil. Contudo, não se obriga ao rigor académico, pode-se imaginar o traçado como sendo uma linha que representa espacial e fisicamente a linha ferroviária.

No que respeita à directriz de uma linha ferroviária, a sua definição consiste num itinerário, compreendendo uma ampla faixa de terreno, ao longo e ao largo da qual se presume que possa ser lançado o traçado da linha em projecto.

O projecto de uma linha ferroviária pressupõe sempre a existência de dois pontos, um de origem e outro de destino, que serão ligados pela linha. No estudo de alternativas visando a ligação entre esses pontos de início e de fim, podem ser identificadas várias directrizes para lançar o traçado da linha ferroviária. O reconhecimento é a etapa dos estudos de traçado que tem por objectivo a escolha da directriz que permita o lançamento do melhor traçado que seja técnica e economicamente viável.

Junto ao traçado deve ser reservado um certo espaço desobstruído para garantir a passagem de veículos que habitualmente se designa por corredor de circulação. As dimensões desta desobstrução são baseadas numa aprovação internacional da bitola dos caminhos-de-ferro tendo em conta o material circulante. Neste corredor de circulação, há outros efeitos a serem considerados tais como:

- Desvio do correcto traçado geométrico;
- Movimento oscilatório/pendulante;
- Desvio devido à força do vento;
- Inclinação devido à escala;
- Tolerância devido à tolerância dos veículos.

6.3. DEFINIÇÃO DO TRAÇADO DE UMA LINHA FERROVIÁRIA DE ALTA VELOCIDADE

Como já se relatou acima, o traçado é uma linha geométrica de natureza abstracta que estabelece a direcção do viajante no seu trajecto. A sua materialização pressupõe a implantação no território de uma infra-estrutura que deve resolver a compatibilidade entre áreas de valor ambiental e de carácter urbano. Os benefícios que oferece, tempo de viagem e conforto, devem equilibrar o custo generalizado. No caso dos caminhos-de-ferro, por se tratar de um sistema guiado, o traçado coincide com a trajectória do veículo pelo que se pode pré-determinar as condições de comodidade cinemática dos passageiros. O fenómeno físico tridimensional que representa pode expressar-se mediante parâmetros geométricos que caracterizam o traçado. A análise dinâmica do conjunto destes parâmetros permite interpretar e completar as normas de

traçado disponíveis sob uma desejável perspectiva a longo prazo coerente com a prolongada vida útil deste tipo de infra-estruturas. A influência das velocidades máximas de circulação nos tempos de viagem está condicionada pela geometria do conjunto do traçado, o tipo de comboio e o modo exploração.

No planeamento do traçado de uma linha de alta velocidade deve-se perceber que os tempos de percurso finais são o resultado da combinação de três factores como a geometria da infra-estrutura, as características dos veículos e o modo de exploração, uma vez que se trata de um sistema com um elevado nível de integração. Com esta visão global, o traçado deve ser uma solução que, garantindo os exigentes níveis de segurança exigidos pelos caminhos-de-ferro, ofereça um nível de conforto que satisfaça os requisitos estabelecidos para este tipo de linhas compensando os níveis de custo de construção e manutenção com os tempos de percurso proporcionados. Este é o principal objectivo entre a origem e o destino de um certo corredor. A complexidade que reveste o traçado exhibe um certo antagonismo onde existem fenómenos regidos pela velocidade, outros pela aceleração, sempre influenciados pela geometria e na compatibilidade entre a sensibilidade de organismo humano e a gravidade. A exigência irreduzível de tempos de viagem cada vez mais rápidos só pode aspirar-se mediante o desenvolvimento de velocidades superiores.

A circulação de um móvel a velocidades crescentes ao longo de uma trajectória não rectilínea gera solicitações sobre o veículo e os passageiros no seu interior que devem limitar-se com um duplo objectivo: garantir a segurança do veículo a nível de inscrição contínua na via, ou seja, evitando descarrilamentos, e um certo grau de conforto dos viajantes. A realização destes dois objectivos alcança-se definindo diferentes valores de um conjunto de parâmetros que permitem decompor os diversos fenómenos dinâmicos que aparecem na circulação dos comboios, facilitando a sua análise. Os fenómenos que produzem solicitações dinâmicas actuam sobre o agregado de massas que integram o comboio, isto é, o veículo propriamente dito e os passageiros. A sua aplicação sobre o veículo pode ter consequências na sua inscrição estável deste na via. Quanto aos passageiros, pode haver a introdução de distorções no seu nível de conforto cujo máximo se atinge em repouso. Um terceiro factor a considerar são os efeitos sobre o custo de manutenção a que estas solicitações conduzem nomeadamente sobre os materiais que suportam o veículo e os rodados dos comboios. Em primeira instância, são as condições de segurança e conforto que deliberam os valores limite dos parâmetros geométricos que determinam a geometria do traçado. A diferente natureza destes fenómenos, juntamente com o contacto entre o verdugo das rodas e o carril, desenhados expressamente para permitir uma boa inscrição do veículo, e a sensibilidade de alguns órgãos da anatomia humana, fazem com que os limites aplicados para alcançar bons níveis de conforto sejam naturalmente mais exigentes que os requeridos para evitar descarrilamentos. Por isso, o desenho geométrico do traçado está orientado principalmente para garantir o nível de conforto adequado para o viajante e assim também se assegura a estabilidade do veículo. Este critério pode estar programado, de maneira pontual, para reduzir os custos de manutenção, especialmente da via. As acções que introduzem factores de desconforto no organismo humano são representadas fundamentalmente pelas acelerações e seus derivados. Apesar da trajectória do veículo e dos passageiros ser estritamente tridimensional, bem como todos os fenómenos associados, actualmente não existe metodologia nem capacidade de cálculo disponível para analisar o conjunto de fenómenos a três dimensões. Devido ao actual e exigido carácter linear da trajectória e a existência de rampas longitudinais marcadamente moderadas nos traçados, é admissível a precisão que se obtém ao decompor as solicitações em componentes paralelas e transversais à directriz da trajectória assim como

analisar a geometria do traçado independentemente quanto à sua projecção em planta e seu perfil longitudinal. Os parâmetros físicos cujos valores devem limitar-se para cumprir os exigentes requisitos de conforto consolidados no âmbito ferroviário não têm apenas o objectivo de evitar sensações de desconforto mas sim possibilitar um elevado nível de mobilidade no interior do comboio, que é conseguido pelo elevado desenvolvimento tecnológico do material circulante.

Conclusivamente, trata-se da aceleração transversal não compensada, a aceleração vertical e suas derivadas que experimenta o passageiro. Todas elas estão directamente relacionadas com a velocidade e vinculam-se a um conjunto de características geométricas das quais fazem parte a curvatura, escala, insuficiência de escala, excesso de escala, inclinação longitudinal, comprimento de elementos de curva. Todas estas grandezas caracterizam os elementos que compõem o traçado. Todos eles estão integrados num fenómeno tridimensional dinâmico em que participam o traçado da via, o veículo de trajectória coincidente com o traçado e cujo comportamento introduz uma notável complexidade dinâmica, e o passageiro sujeito ao nível de conforto representado pelo seu centro de gravidade.

Os valores limites que se devem aplicar para estes parâmetros estão definidos em diversas normas. Existem diversas normas europeias que delimitam estes valores. Nos anexos deste trabalho, são fornecidas algumas tabelas da norma europeia e até portuguesa que regem os valores de muitos parâmetros geométricos.

Em relação à interpretação destas normas é recomendável destacar que os valores ali representados têm carácter limite, pressupondo-se que o seu emprego generalizado, mesmo que aceitável, iria induzir um custo de manutenção muito exigente. No exercício da engenharia, por vezes é possível utilizar valores acima do limite, no entanto, sob justificação adequada e quando tal decisão não incrementará significativamente os custos. Mas além da compreensão e aplicação destas normas, existem casos onde se deve recorrer ao modelo físico do fenómeno dinâmico completo nomeadamente para resolver o problema de situações não previstas com rigor e precisão. Neste caso, torna-se necessário ajustar os cálculos a soluções mais estritas se as condições locais assim o exigirem. Trata-se, por exemplo, do traçado de linhas para velocidades superiores a 300 km/h para o qual está redigido nas normas um enquadramento de valores para os diversos factores geométricos. Contudo, o emprego de comboios de caixa inclinável, as diferentes tecnologias, geometrias e comportamentos dinâmicos podem permitir a modificação dos valores normativos salvaguardando-se sempre a segurança e conforto dos veículos e passageiros respectivamente. O desenho do traçado deve ser planeado com uma perspectiva adicional que teve ter em conta a vida útil dos veículos e outras variáveis integradas no conceito “modo de exploração”. É preciso prever se a linha é projectada para, ao longo do seu serviço, circularem comboios com o mesmo critério de exploração, isto é, velocidade, frequência e sequência de paragens ou se, pelo contrário como é o caso dominante, por uma mesma linha operam comboios de tecnologias bastante díspares, velocidades crescentes e modos de exploração diferentes.

A evolução das velocidades máximas numa mesma linha ferroviária facilitada pela evolução da tecnologia faz levantar a recomendação de não se sobrestimar os valores dos parâmetros geométricos do traçado a fim de se poderem praticar velocidades superiores no futuro se a tecnologia de tracção evoluir. Dentre os parâmetros críticos, existem alguns que são facilmente alteráveis para proporcionar o aumento da velocidade na linha, outros não. Alguns são ajustáveis economicamente se as circunstâncias assim obrigarem como é o caso da escala. No entanto, componentes da geometria como as curvas de transição e concordâncias verticais, produzem um aumento significativo dos custos para além da sua difícil adaptação para velocidades superiores à projectada (Romo Urroz;2007). Por isso, deve ter-se o cuidado de dimensionar as linhas ferroviárias com uma visão a longo prazo, atentando-se nas características geométricas mais críticas, principalmente se existir a possibilidade futura do aumento da velocidade de circulação na linha.

Nos próximos parágrafos aborda-se a questão da influência das velocidades instantâneas no tempo de viagem para se tentar descortinar até que ponto vale a pena projectar troços de velocidade muito elevada numa linha ferroviária.

Da sua própria definição deduz-se que para minimizar os tempos de percurso devem desenvolver-se velocidades superiores. A experiência no âmbito da engenharia reforça que, em geral, infra-estruturas aptas para velocidades mais altas supõem custos mais elevados. Optimizar este binómio requer uma análise que integre o conjunto do sistema:

- Geometria do traçado;
- As características do comboio;
- O modo de exploração.

Com efeito, a velocidade instantânea de circulação de um comboio não depende só do raio de curvatura horizontal que o traçado definiu em determinado troço mas da potência que o veículo desenvolve e das velocidades em trechos anteriores e posteriores que podem ser impostas pelo modo de exploração, por exemplo, como consequência de uma paragem comercial.

A definição da geometria rigorosa do traçado em cada ponto deve ser consequência portanto de uma análise integrada devendo ter-se presente, não obstante o critério da homogeneidade, o grau de heterogeneidade admissível e considerando a sua influência real na circulação de um comboio (Romo Urroz;2007). Daqui resulta que se deve incluir nos cálculos tanto os comboios actuais como hipotéticos comboios mais desenvolvidos que possam surgir. É inevitável a conjugação de velocidades superiores e inferiores num mesmo traçado, frequente em percursos de elevada extensão, nesse caso deve analisar-se o conjunto do percurso e em particular, os trechos específicos adjacentes do projecto. É ilustrativo analisar as heterogeneidades resultantes da introdução da circulação de comboios a velocidades superiores em linhas existentes, respeitando as condições de segurança e conforto definidas pelo traçado.

Em seguida apresentam-se resultados de ensaiar um comboio a circular a velocidades elevadas num traçado hipotético, para ser possível efectuar comparações entre diferentes situações relativas à própria velocidade, aos traçados e ao modo de exploração assim como o efeito de melhorar o traçado das linhas com diferentes intervalos de velocidade de partida.

Na figura 6.1 pode-se analisar um exemplo de introdução de melhorias no traçado de uma linha para incrementar as velocidades máximas de circulação. Considera-se um caso em que as velocidades máximas encontram-se por troços num intervalo 120 – 160 km/h. O melhoramento da geometria de modo a que a velocidade aumente em 30 km/h dá lugar a um acréscimo da

velocidade média de 130,4 km/h para 154,7 km/h e a redução de tempo em 4 minutos e 20 segundos, que é uma redução de 16% relativamente aos 27:36 iniciais.

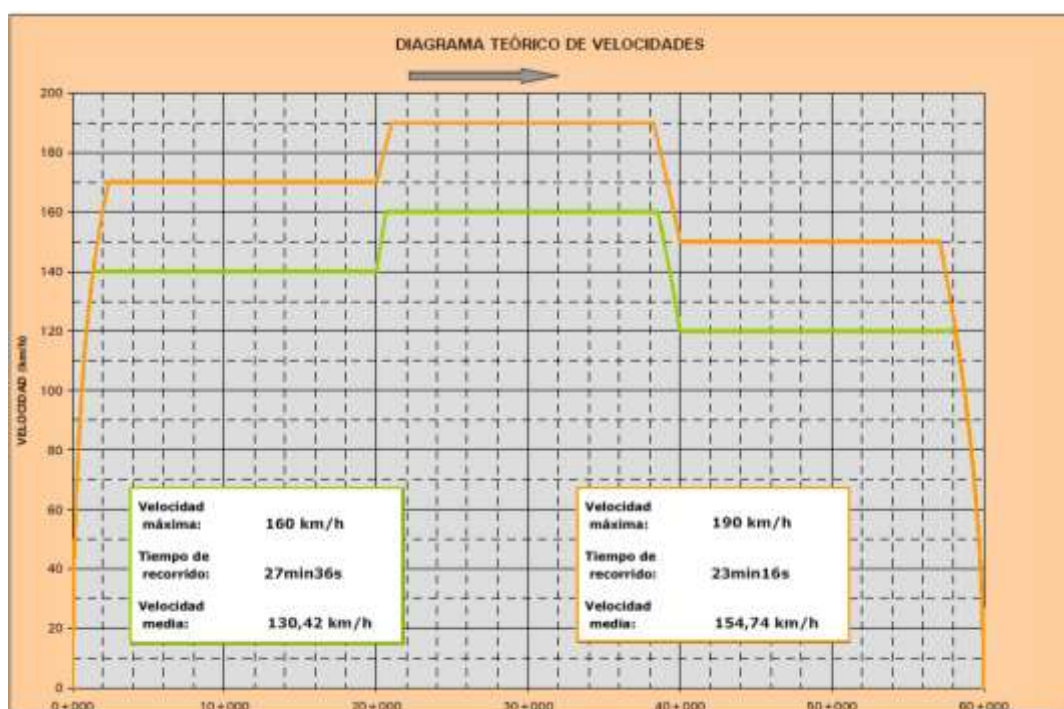


Fig.6.1 – Efeito da melhoria do traçado – aumento da velocidade máxima de 30 km/h – partindo de velocidades moderadas (linha hipotética – simulação teórica) (Romo Urroz;2007)

Para uma linha de extensão semelhante, realizam-se melhorias que permitem aumentar a velocidade em 30 km/h, mas partindo de velocidades iniciais compreendidas entre 300 e 330 km/h. Este ensaio está apresentado na figura 6.2 e pode-se afirmar que os resultados são bastante mais modestos pois o tempo de viagem passa de 16.26 para 15:48 equivalendo a uma redução de 38 segundos que representam apenas 4%.

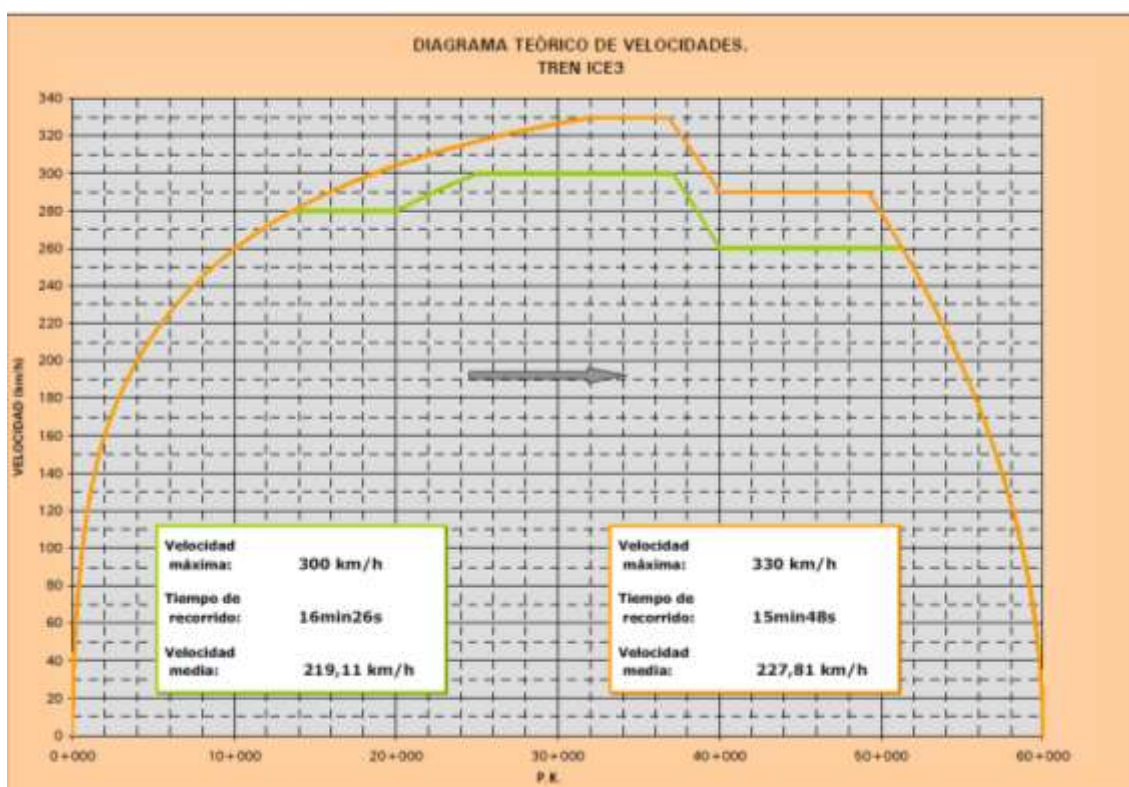


Fig.6.2 – Efeito da melhoria do traçado – aumento da velocidade máxima de 30 km/h – partindo de velocidades apreciáveis (linha hipotética – simulação teórica) (Romo Urroz;2007)

Agora importa analisar a influência da extensão do troço na eficiência das altas velocidades. A performance atingida por um comboio num traçado está condicionada pelas características geométricas do mesmo e pelas características de tracção de veículo. Nas figuras 6.3 e 6.4 observa-se a diferença de comportamento de um comboio capaz de circular a 300 km/h por traçados que lhe são apropriados em termos geométricos. No primeiro caso, definiu-se um trecho de 30 km de comprimento, e verifica-se que o veículo nem consegue atingir a velocidade de ponta. Na segunda hipótese, adoptou-se um troço de 200 km para se poder alcançar todas as potencialidades do veículo e simulam-se duas velocidades elevadas diferentes para se tirar ilações.

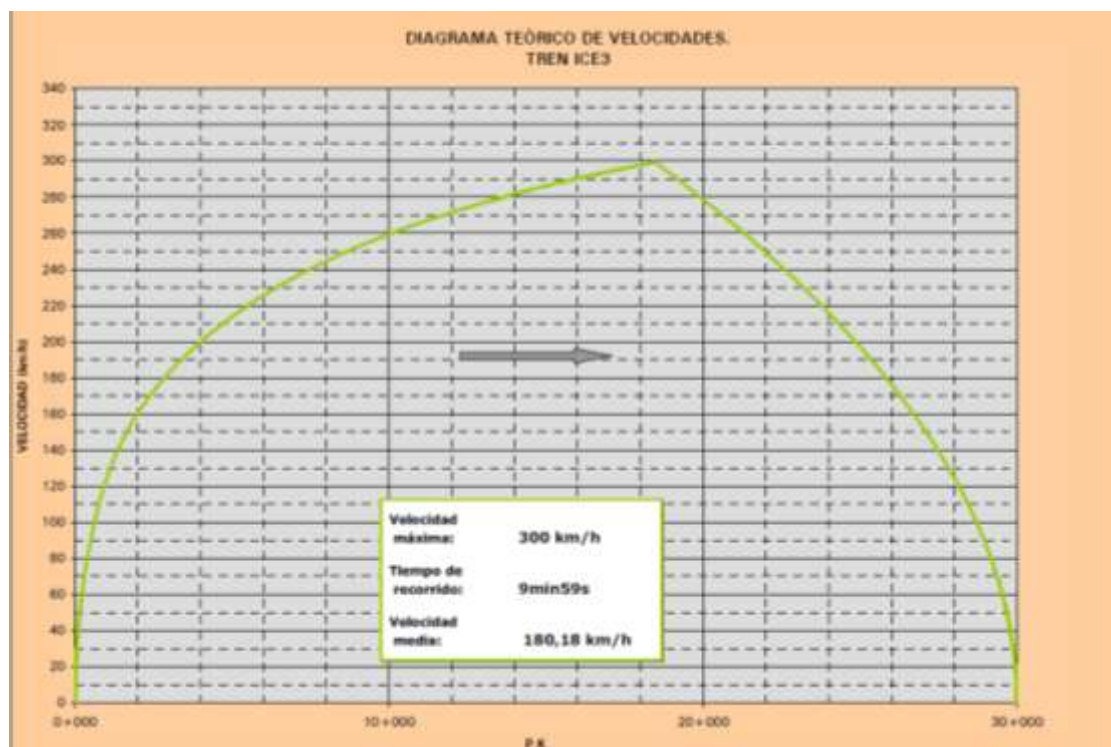


Fig.6.3 – Efeito da introdução de condições adequadas para velocidades elevadas em troços curtos (linha hipotética – simulação teórica) (Romo Urroz;2007)

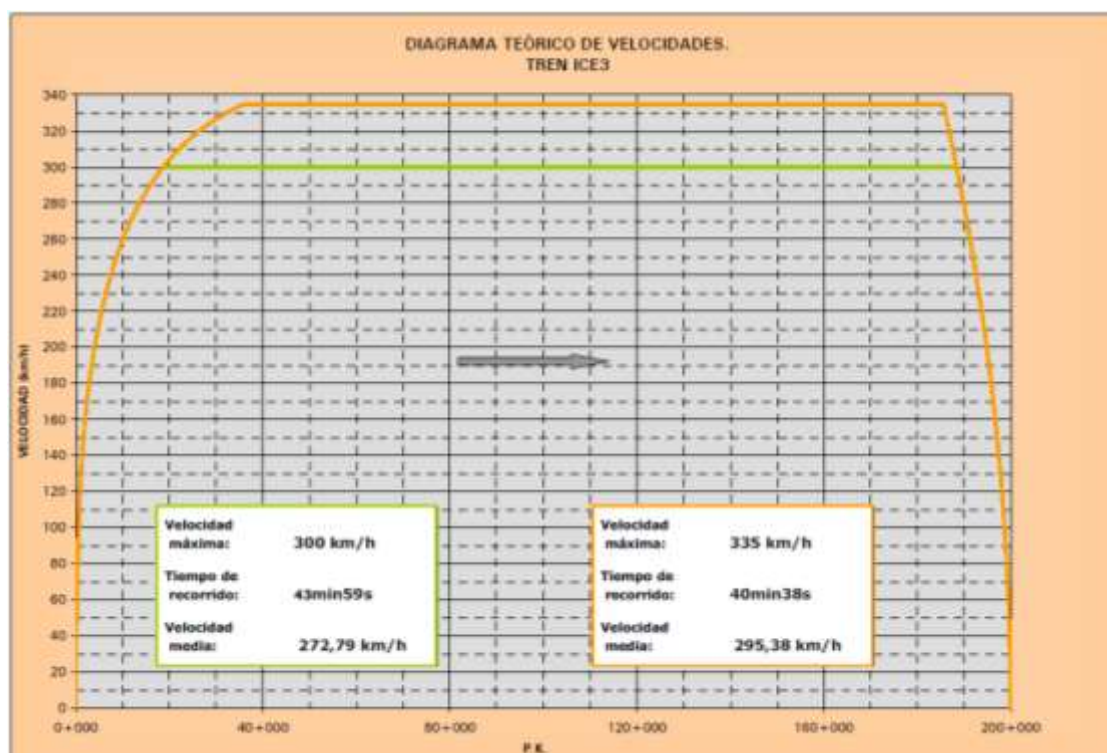


Fig.6.4 – Prestações comparadas de comboios com velocidades máximas diferentes (linha hipotética – simulação teórica) (Romo Urroz;2007)

A consideração conjunta destes dois componentes permite otimizar tanto o desenho da infra-estrutura como a gestão do parque do material circulante. Deve ter-se em conta também nesta análise do factor tempo, o facto de as infra-estruturas serem inalteráveis a longo prazo e a dependência das prestações dos comboios e sua evolução tecnológica.

O modo de exploração também deve ser considerado pela influência que induz no binómio velocidade/tempo de viagem. Se no mesmo traçado da figura 6.4, se fizesse circular um comboio com características idênticas prestando um serviço de paragens intermédias ao invés de ser directo, pode apreciar-se uma importante redução das velocidades médias: de 272 km/h para 222 km/h, sendo uma diferença de 50 km/h. A realização deste serviço em comboios de velocidade máxima mais modesta, por exemplo 250 km/h, produz uma diferença de tempos de viagem bastante inferior, efectuando o percurso num tempo superior em apenas 5%. A figura seguinte ilustra perfeitamente esta constatação.

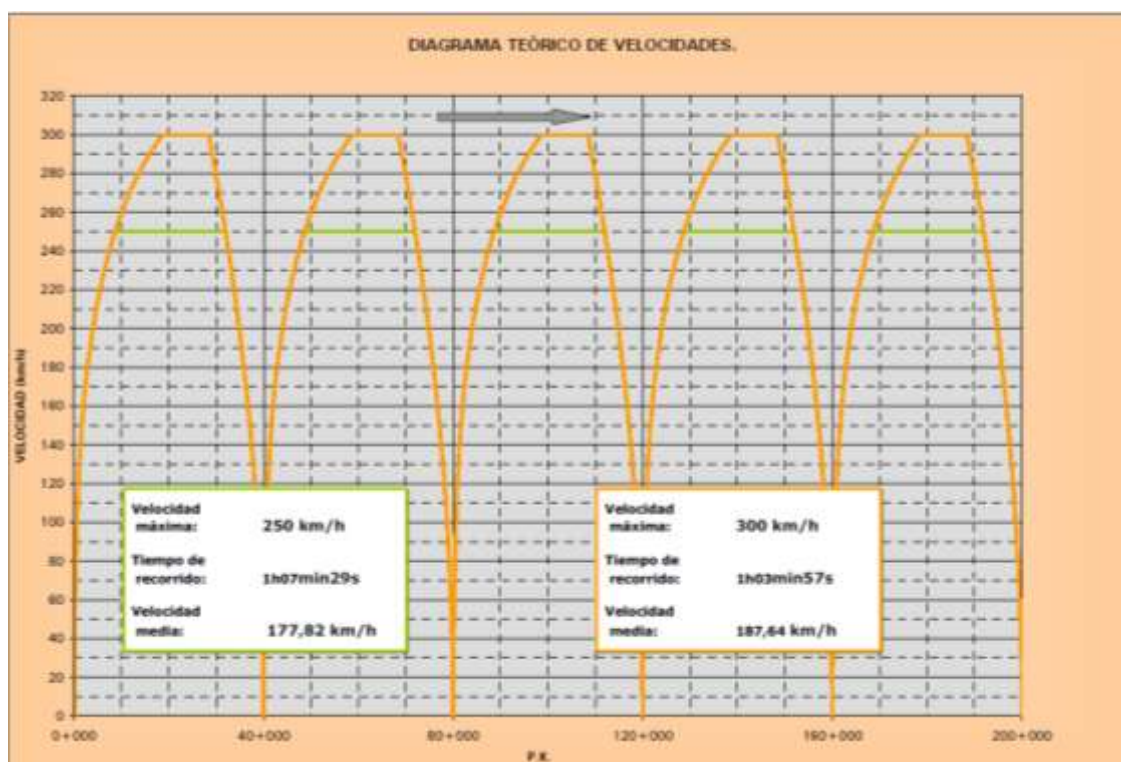


Fig.6.5 – Efeito comparado da circulação de comboios de velocidades máximas diferentes num percurso com paragens frequentes (linha hipotética – simulação teórica) (Romo Urroz;2007)

Todos estes casos são exemplos de carácter teórico que manifestam a transcendência da análise, nas primeiras fases do projecto, do trinómio que relaciona o traçado, os comboios e o modo de exploração num processo de optimização do desenho e gestão das linhas ferroviárias de alta velocidade.

6.4. EFEITOS DAS CURVAS – MEDIDAS PARA A SUA REDUÇÃO

De acordo com a física elementar, um veículo circulando à velocidade V numa curva de raio R , desenvolve uma aceleração centrífuga $a_c = V^2/R$ e uma força centrífuga $F_c = m.V^2/R$ com as seguintes consequências adversas:

- Redução do conforto dos passageiros;
- Forças transversais significativas favorecendo o descarrilamento;
- Risco de capotagem dos veículos;
- Possível deslocamento da carga dos vagões;

- Aumento do carregamento transversal na via e no material circulante, resultando num considerável desgaste;
- Ruído incomodativo;
- Acréscimo da vibração.

A fim de reduzir efeitos desfavoráveis acima referidos, as próximas medidas podem ser aplicáveis:

- Usar um raio de curvatura elevado se possível. Como medida, não é de fácil implantação, contudo, devido às condicionantes topográficas que frequentemente afectam o lançamento do traçado, o aumentar do raio não é significativo face aos caros projectos de engenharia civil (pontes, túneis, grandes taludes de aterro);
- Inclinação transversal do carril externo em relação ao carril interno, para equilibrar as forças centrífugas. A inclinação transversal reduz drasticamente os efeitos transversais, que contudo, em certos casos são completamente neutralizados desde que inclinação transversal não exceda certos valores para os quais o desgaste da via e do material circulante pode ser proibitivo;
- Redução da velocidade do comboio, que constitui a última solução recursiva, sendo que a tendência é para aumentar a velocidade.

6.5. EXIGÊNCIAS DE RAIOS MÍNIMOS

Neste ponto dá-se uma ideia dos valores de raios mínimos exigidos nas redes de alta velocidade. São valores mínimos usados a partir de uma certa velocidade, no entanto, na realidade e nos novos projectos, a propensão é para aplicar valores muito mais elevados de raios de curvatura dos que aqui serão mencionados. Numa das partes deste capítulo far-se-á os cálculos de raios mínimos para várias velocidades de projectos e os valores encontrados são baixos em relação ao que se costuma definir nas linhas de alta velocidade, contudo respeitam os valores limite da norma.

As exigências actuais das linhas de alta velocidade passam pela adopção de raios mínimos de curvatura entre os 4000 e os 7250 metros, pela utilização de camadas de balastro com espessura da ordem dos 30 cm, das quais resulta uma capacidade de carga e de estabilidade superior à das linhas de velocidade alta (até 250 km/h) e por um alinhamento do traçado, mais preciso e rigoroso do que nas redes de velocidade normal.

Ao longo deste capítulo, será notada a elevada discussão que se envolve em torno dos raios de curvatura, pois trata-se de uma característica fundamental da geometria e do traçado das linhas ferroviárias de alta velocidade. A definição do raio mínimo depende de parâmetros geométricos decisivos e fixados pelas normas como a velocidade, escala, insuficiência de escala, excesso de escala e bitola de via.

6.6. GEOMETRIA – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nesta fase pretende-se entrar mais especificamente no tema da geometria, isto é, daqui para a frente começar-se-á a abordar os parâmetros geométricos do traçado através das suas fórmulas e impondo os seus valores limite. No próximo ponto estas grandezas geométricas serão descritas pormenorizadamente, contudo, agora procura-se fazer uma síntese da geometria em geral.

O alinhamento longitudinal do traçado consiste nos seguintes elementos:

- Na direcção transversal, são as secções onde há menos esforços e existe menor resistência;
- Na direcção horizontal – curvas, escala, curvas de transição e transição de inclinações;
- Na direcção vertical – rampas e concordâncias verticais.

O aparecimento físico destes elementos é determinado pelas características do comportamento do veículo, traduzidas em simples instruções para prática e cálculo baseados na segurança, conforto e critério benefício-custo.

De um ponto de vista comercial, é desejável aumentar velocidades o máximo que for possível. É essencial, a este respeito, que a carga na via e as acelerações no veículo, que são os factores determinantes para o conforto dos viajantes, não excedam os valores limite específicos em prol do controlo da segurança ao descarrilamento e ao deslocamento lateral (Esveld;2001).

No caso das linhas modernas, os requerimentos operacionais podem ser aplicados no esboço da plataforma enquanto nas linhas existentes, as possibilidades para aumentar a velocidade são geralmente restritas.

Para prevenir os efeitos de incomodidade e insegurança podem ser implementados os seguintes princípios:

- Usar o máximo raio de curvatura possível preferencialmente senão for necessário sobrelevação;
- Usar escala nas curvas em que a aceleração lateral seja totalmente ou parcialmente compensada pela componente da gravidade;
- Restrições à velocidade. Esta não é uma medida atractiva porque tem como consequência um aumento do tempo de percurso e uma perda da capacidade de transporte.

6.7. GEOMETRIA DE VIA E INTERACÇÃO VIA – VEÍCULO

Tal como já tinha sido mencionado, esta parte da investigação vai aprofundar o estudo da geometria de traçado onde se procura demonstrar para o leitor como funciona a interacção entre a via e o veículo e os esforços que lhes estão associados. Também se pretende fazer ver ao leitor como jogam entre si as velocidades, acelerações, forças, sobrelevações, bitolas, curvaturas, transições, entre outros. É desta interligação que nasce a definição do raio de curva horizontal e se consegue determinar a escala, limitar a insuficiência e excesso de escala e descobrir a aceleração não compensada que lhe corresponde. Será percebido como estas grandezas têm influência na segurança do veículo e segurança dos passageiros.

6.7.1. COMPONENTES DA GEOMETRIA DE VIA

A geometria de via é muito importante no comportamento dos veículos. Nesta secção elabora-se uma pequena introdução às mais comuns grandezas da geometria de via. Estas grandezas são:

- Bitola de via;
- Inclinação de via;
- Curva de transição e sobrelevação;
- Raio de curva horizontal;
- Raio de curva vertical e rampas.

O raio de curva vertical, rampas e concordâncias verticais foram temas já abordados suficientemente no capítulo anterior e por isso, não figurarão na explicação proposta no presente capítulo.

6.7.1.1. Bitola de Via

A bitola de via, normalmente designada por b , define-se como o espaçamento entre os carris da mesma via, ou com mais rigor, trata-se da distância entre as faces interiores das cabeças dos carris, medida 14 mm abaixo da mesa de rolamento e em esquadria com eles. Para ilustrar a definição de bitola, segue a figura 6.6 abaixo. Embora haja outras bitolas de via, a bitola europeia normalizada é de 1435 mm.

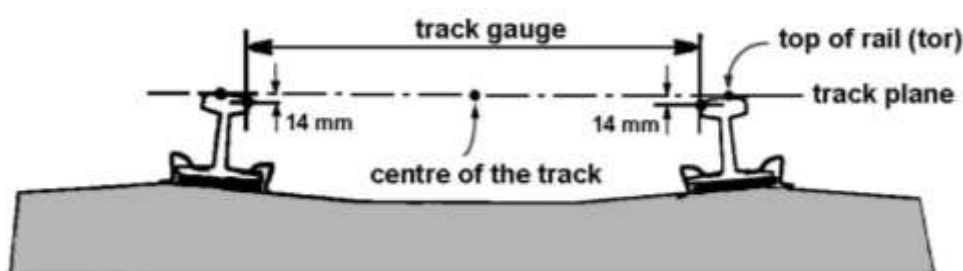


Fig.6.6 – Definição de bitola de via (Lindhal, Martin;2001)

6.7.1.2. Escala h

A diferença entre o nível dos carris numa curva horizontal é chamada de escala h , ou sobrelevação, e é inserida para compensar parte da aceleração centrífuga como se pode ver na figura 6.7.

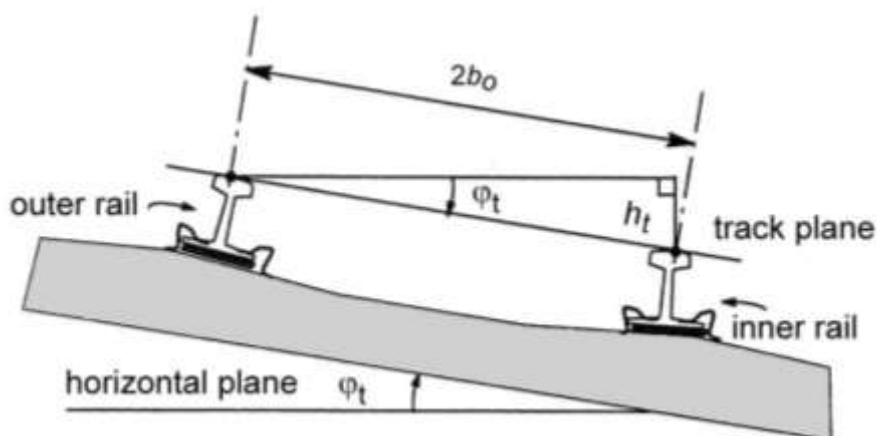


Fig.6.7 – Escala h e ângulo correspondente ϕ (Lindhal, Martin;2001)

O ângulo correspondente à escala surge quando a sobrelevação é introduzida. O ângulo pode ser determinado por:

$$\varphi_t = a \sin \frac{h_t}{2b_0} \quad (6.1.)$$

onde $2b_0 = 1,500$ m na bitola de via europeia.

A escala é maximizada tendo em conta condições estacionárias e os comboios mais lentos. O máximo valor da escala é definido por causa dos seguintes problemas que surgem para os comboios forçados a parar ou que circulam mais lentamente na curva. Estes inconvenientes são:

- Desconforto para os passageiros por ocasião de paragem ou nos comboios lentos;
- Risco de descarrilamento dos comboios de carga nas curvas rápidas devido ao efeito combinado da elevada força lateral e baixa carga vertical no rodado externo a baixa velocidade;
- Possível deslocação das cargas dos vagões.

6.7.1.3. Curva horizontal

O parâmetro mais importante para uma curva circular é o raio R, onde neste caso R é constante. O raio R é inversamente proporcional à curvatura, seja $k=1/R$. O raio está relacionado com o centro da trajectória. Sabe-se dos conceitos de física, que um veículo circulando à velocidade v numa curva de raio R, está submetido a uma aceleração centrífuga lateral $a=V^2/R$ que resulta numa série de efeitos indesejáveis. Estes efeitos podem ser:

- Possível desconforto para os passageiros;
- Possível deslocação de cargas dos vagões;
- Risco do veículo capotar em combinação com um forte vento lateral;
- Risco de descarrilamento causado pela ascensão do verdugo do rodado no carril externo ou por perda de fixação dos carris;
- Elevadas forças laterais na via.

Pode-se observar na figura 6.8 a configuração da curva horizontal e marcação do raio de curvatura R.

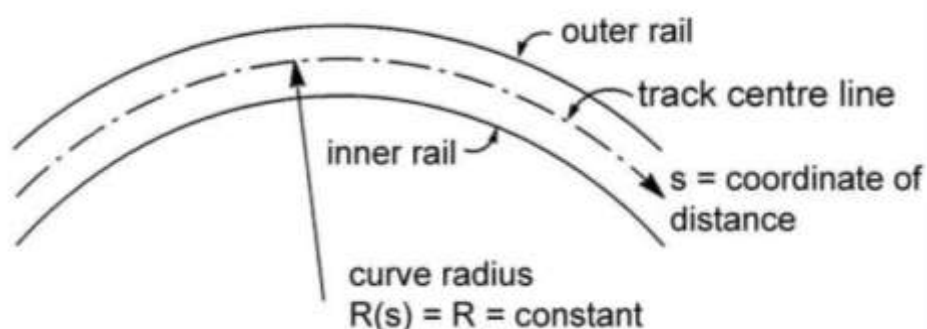


Fig.6.8 – Definição da curva circular horizontal com raio de curvatura R (Lindhal, Martin;2001)

6.7.1.4. Curva de transição e disfarce de sobrelevação

A curva de transição com uma variação linear da curvatura é chamada de clotóide. As curvas de transição são usadas entre alinhamento recto e curva circular ou entre duas curvas adjacentes para permitir uma gradual evolução da curvatura e da aceleração centrífuga. As curvas de transição também introduzem sobrelevação. A rampa de sobrelevação é uma secção da via onde a inclinação varia gradualmente. A clotóide e restantes curvas de transição terão uma parte deste capítulo dedicada ao seu estudo mais aprofundado e por isso, nesta fase apenas interessou referir a sua existência e principal objectivo.

6.7.1.5. Interação veículo – via

No caso de uma curva quase-estática, isto é, uma curva percorrida com velocidade constante, com um raio constante e dotada de escala teórica, o veículo encontra-se exposto a duas acelerações: aceleração centrífuga horizontal e aceleração da gravidade conforme se pode observar na figura 6.9.

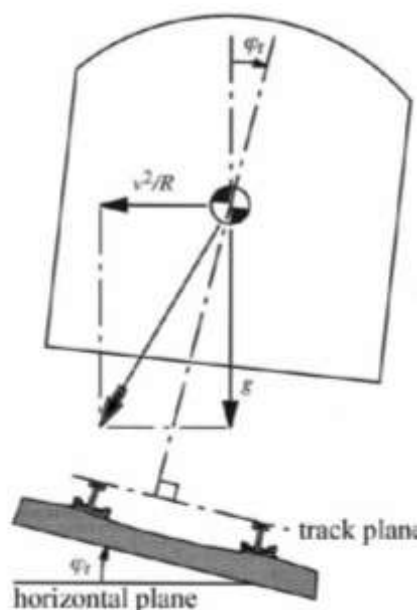


Fig.6.9 – Definição da aceleração horizontal e aceleração gravítica (Lindhal, Martin;2001)

A resultante do vector aceleração pode ser decomposta em duas componentes: a_y paralelo ao plano da via e a_z perpendicular ao plano da via. A figura 6.10 mostra o resultado desta decomposição.

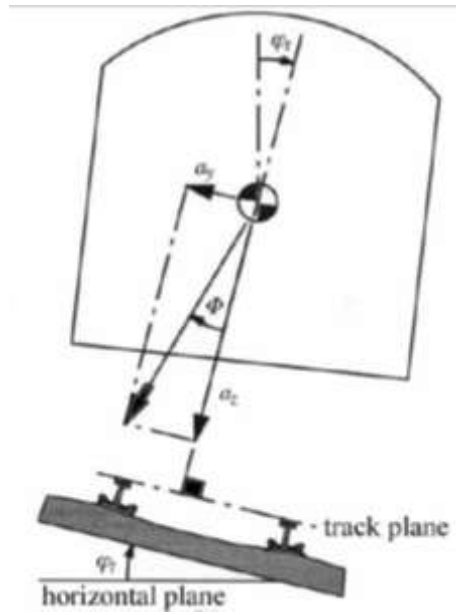


Fig.6.10 – Decomposição da resultante da aceleração num plano paralelo e perpendicular à via (Lindhal, Martin;2001)

A aceleração a_y é designada aceleração no plano da via ou simplesmente aceleração lateral. Para determinar o seu valor aproximado, podem-se escrever as seguintes equações:

$$a_y = \frac{v^2}{R} \cdot \cos\varphi_t - g \cdot \sin\varphi_t = \frac{v^2}{R} \cdot \cos\varphi_t - g \cdot \frac{h_t}{2b_0} \quad (6.2.)$$

$$a_z = \frac{v^2}{R} \cdot \sin\varphi_t + g \cdot \cos\varphi_t \quad (6.3.)$$

Assumindo valores do ângulo φ_t muito pequenos ($\varphi_t \leq 0,15$ rad), a equação pode ser aproximada a:

$$a_y \cong \frac{v^2}{R} - g \cdot \sin \varphi_t = \frac{v^2}{R} - g \cdot \frac{h_t}{2b_0} \quad (6.4.)$$

$$a_z \cong g \quad (6.5.)$$

O ângulo de força lateral Φ na figura 6.9 está relacionado com as acelerações a_y e a_z pela seguinte expressão:

$$\Phi = \arctan \frac{a_y}{a_z} \quad (6.6.)$$

6.7.1.6. Escala teórica e velocidade de equilíbrio

A escala que produz $a_y=0$, para um dado raio de curvatura R e uma determinada velocidade v , é chamada a escala teórica. A escala teórica pode ser determinada de acordo com equação (6.7.):

$$h_t \cong \frac{2b_0}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \quad (6.7.)$$

A equação acima é baseada em unidades do Sistema Internacional (Unidades SI), mas na prática é usual que a velocidade venha expressa em km/h e a escala em mm, por isso como mostra a expressão (6.8.).

$$h_{t,mm} \cong \frac{2b_{0,mm}}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \quad (6.8.)$$

A equação pode ainda ser simplificada quando se substitui o valor de $2b_0$ pelo valor da bitola europeia e quando se utiliza a aceleração da gravidade para g , logo fica:

$$h_{t,mm} \cong \frac{1500}{9,81} \cdot \frac{V^2}{3,6^2 R} \cong 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \quad (6.9.)$$

É muito comum escrever a fórmula da escala teórica como se expôs acima na equação (6.9.), no entanto, é necessário ter cuidado com as unidades.

A velocidade do veículo que proporciona $a_y=0$, para um determinado raio de curvatura e uma dada escala, é a chamada velocidade de equilíbrio que é definida pela fórmula:

$$v_{eq} = \sqrt{\frac{R \cdot g \cdot h_t}{2b_0}} \quad (6.10.)$$

Assim, para a velocidade de equilíbrio a aceleração lateral no plano da via a_y é nula. Com a velocidade expressa em km/h e a escala em mm, a equação transforma-se: (para a bitola europeia)

$$V_{eq} = \sqrt{\frac{R \cdot h_{t,mm}}{11,8}} \quad (6.11.)$$

6.7.1.7. Insuficiência de Escala e Excesso de Escala

Por diversas razões, compensar totalmente a aceleração no plano da via pode não ser sempre conseguido nos casos relacionados com:

- Existe a possibilidade de o veículo parar ou circular muito lentamente na curva. Por isso, a escala máxima tem de ser limitada. Então, é desejável permitir uma insuficiência de escala, isto é, uma determinada quantidade de aceleração lateral não compensada a_y no plano da via.
- Nem todos os comboios circulam à mesma velocidade. Por conseguinte, não é possível equilibrar toda a aceleração lateral para todos os comboios.

6.7.1.8. Insuficiência de escala

Quando a escala h é menor que a escala teórica h_t surge a chamada insuficiência de escala. A insuficiência de escala é a escala adicional que é necessária para alcançar a escala teórica. Então, a insuficiência de escala I , pode ser definida como a diferença entre a escala teórica e a escala actual h e por isso é determinada pela seguinte equação:

$$I = h_t - h \quad (6.12.)$$

Com a equação (6.7.) substituída na (6.12.), fica em unidades SI:

$$I = \frac{2b_0}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - h \quad (6.13.)$$

Uma forma comum de escrever a fórmula da insuficiência de escala é como mostra a expressão (6.14.). A velocidade V é expressa em km/h e a escala e insuficiência de escala em mm.

$$I_{,mm} = 11,8 \frac{V^2}{R} - h_{,mm} \quad (6.14.)$$

Um formato adicional para expressar a insuficiência de escala é resolver a equação (6.4.) para v^2/R e substituir a expressão na equação (6.13.), relacionando-se a insuficiência de escala aceleração no plano da via cuja expressão mostra em unidades SI:

$$I = \frac{2b_0}{g} \cdot a_y \quad (6.15.)$$

onde $a_y > 0$.

Pode-se efectuar relações interessantes entre a aceleração no plano da via, o ângulo de força lateral e a insuficiência de escala vê-se que a insuficiência aumenta na mesma proporção que a aceleração lateral para a mesma bitola de via. Um quadro com estes resultados é colocado nos anexos deste trabalho.

A insuficiência de escala permitida na prática em operações de comboios é determinada pelos seguintes factores:

- Construção da via-férrea (na sua capacidade de resistir a elevadas forças);
- Estado dos componentes da via-férrea;
- Alinhamento da via (grandeza e forma das irregularidades da geometria);
- Tipo de veículo e características de circulação (tipo de suspensão, centro de gravidade e sensibilidade ao vento lateral);
- Carga por eixo e massas não suspensas;
- Estado de manutenção do material circulante;
- Conforto dos passageiros.

Se valores elevados são permitidos para a insuficiência de escala (aceleração lateral), os componentes da via devem ser projectados nesse sentido, e não deve haver risco de se exceder a resistência lateral de via imediatamente após carregamento (Lindhal;2001).

Uma elevada insuficiência de escala causa um grande aumento do desgaste da cabeça do carril mais elevado. Além disso, um aumento da insuficiência de escala leva a uma rápida deterioração da geometria de via.

6.7.1.9. Excesso de escala

Se a escala adoptada h é superior à escala teórica h_t aparece o denominado excesso de escala. O excesso de escala consiste na diferença entre a escala adoptada e a escala teórica e é definido como:

$$E = h - h_t \quad (6.16.)$$

O excesso de escala surge quando o veículo circula a uma velocidade inferior que a velocidade projectada para a via. O excesso de escala pode ser relacionado com a aceleração no plano da via da mesma forma que a insuficiência de escala como mostra a equação (6.17.):

$$E = - \frac{2b_0}{g} \cdot a_y \quad (6.17.)$$

em que $a_y < 0$ e $E > 0$.

Um elevado excesso de escala produz uma grande carga no carril inferior no caso dos veículos de carga mais lentos e por isso, existem valores limite para o excesso de escala que se apresentam em anexo.

6.7.1.10. Velocidades admissíveis de operação

Com uma determinada curva horizontal de raio R , e uma aceleração lateral permissível $a_{y,lim}$, ou uma insuficiência de escala tolerável I_{lim} , uma expressão para a velocidade admissível v_{lim} é apresentada em unidades SI:

$$v_{lim} = \sqrt{R \left(a_{y,lim} + g \cdot \frac{h}{2b_0} \right)} = \sqrt{\frac{R \cdot g}{2b_0} (I_{lim} + h)} \quad (6.18.)$$

Alternativamente, na equação (6.19.), a velocidade admissível, V_{lim} é expressa em km/h enquanto a escala h e a insuficiência de escala I_{lim} são dadas em mm. O raio é sempre dado em metros e a bitola de via assume-se como a europeia.

$$V_{lim} = \sqrt{R(I_{lim} + h) \cdot \frac{12,96 \cdot g}{2b_0}} \cong \sqrt{\frac{R(I_{mm} + h)}{11,8}} \quad (6.19.)$$

6.7.1.11. Efeito da suspensão na aceleração lateral

Com a aceleração não compensada lateral, a força centrífuga actuante no centro de gravidade vai causar um momento de derrube que significa que o sistema de suspensão do corpo do veículo é comprimido irregularmente e o veículo/corpo inclina-se um pouco em direcção à parte externa:

$$a_{ys} = (1 + \varepsilon)a_y \quad (6.20.)$$

A aceleração a_y deve ser, em todos os casos, abaixo de $1,5 \text{ m/s}^2$ e preferencialmente inferior a 1 m/s^2 . A insuficiência de escala deve ser adaptada para o factor de suspensão ε . Para material circulante moderno, este valor é de 0,4 e pode ser reduzido por medidas especiais até 0,2.

6.7.1.12. Efeito da pendulação na insuficiência de escala

Para ser viável circular numa secção de curva lenta a alta velocidade, a carruagem é por vezes projectada para se inclinar artificialmente. Certamente, em semelhantes mecanismos de pendulação, a insuficiência de escala nas curvas a alta velocidade pode ser compensada pela h_c , como resultado da velocidade que pode ser aumentada de 50% em comparação com as carruagens sem pendulação (Esveld;2001). A restante aceleração lateral nos passageiros e na carga é agora:

$$a_{yp} = a_y - \frac{g}{b_0} h_p = \frac{g}{b_0} (I - h_p) \quad (6.21.)$$

O único aperfeiçoamento é aumentar o conforto dos passageiros e a redução do risco de capotagem. A via-férrea, por outro lado, é mais lentamente esforçada pelas elevadas forças laterais.

6.7.1.13. Escala Máxima

É fixado para a escala um valor máximo, pois quando o veículo é forçado a parar ou circular lentamente numa curva, podem surgir os seguintes problemas:

- Desconforto dos passageiros;
- Risco de descarrilamento dos comboios de carga devido ao desigual carregamento nos carris;
- Possível deslocamento da carga dos veículos;

- Possível separação dos veículos de carga na paragem por causa do elevado nível de atrito dos rodados contra o carril interior;

Estes problemas podem ser agravados pelos elevados ventos. Por esta razão, a máxima escala adoptada nas curvas é:

- $h = 120 \text{ mm}$ – via balastrada;
- $h = 150 \text{ mm}$ – via não balastrada.

Com um único tipo de tráfego, valores de escala acima dos 180 mm podem ser usados. Elevada escala pode também resultar num deslocamento lateral em direcção ao centro da curva durante carregamento a baixas temperaturas. Uma escala inferior aos valores acima expostos, é por este motivo preferível quando possível. O máximo valor da escala também se encontra restringido pela norma que se apresenta em anexo.

6.8. CURVAS DE TRANSIÇÃO

Basicamente, as curvas de transição são usadas entre alinhamentos rectos e curvas horizontais ou entre duas curvas adjacentes para permitir uma mudança gradual nas acelerações laterais. Conforme é sabido, num alinhamento recto a curvatura é zero, enquanto numa curva de raio R , a curvatura é o inverso do raio, isto é, $1/R$. A súbita mudança de curvatura é sentida pelos passageiros como um movimento brusco. Um arco de transição de raio variável, com valor zero de curvatura no início e $1/R$ no fim, é interposto por uma transição plana do movimento rectilíneo para o movimento curvilíneo.

A linha central da curva da transição tem a mesma tangente nos pontos de conexão como na parte adjacente, visto que a curvatura varia gradualmente desde o valor do primeiro ponto de conexão até ao outro ponto. As curvas de transição também introduzem escala por meio de transições de inclinação e, se necessário, alargamento da bitola.

As curvas de transição não são usadas se:

- Se o raio da curva for superior a 3000m;
- O cálculo demonstrar que não é necessária escala;
- Entre duas curvas adjacentes na mesma direcção caso o intervalo das acelerações permaneça no limite $0,2 - 0,3 \text{ m/s}^2$.

As curvas de transição, como já se referiu, podem inserir a escala através de rampas de sobrelevação, e o valor da escala crescerá de forma contínua, ao longo da curva, até se atingir o valor h que se deve implementar na curva circular. Sendo o raio o inverso da curvatura, tal como acima mencionado, no desenrolar da curva de transição, o raio evoluirá progressivamente de um valor ∞ no alinhamento recto para o valor R em plena curva circular. Visto que o raio varia na razão inversa do desenvolvimento da curva de transição, a força centrífuga aumenta gradualmente e com a evolução da escala de forma idêntica para que, em cada ponto da curva a escala progrida em proporção com o incremento da curvatura, deste modo ocasionará uma aceleração transversal nula, para a velocidade de projecto (Gonzalez Fernandez;2008).

Neste ponto aborda-se a clotóide, a parábola cúbica e referem-se muito sumariamente outros tipos de curva de transição presentes na norma mas ainda pouco estudadas. Também se dá um especial destaque aos critérios de dimensionamento de curvas de transição, onde se evidencia a variação da escala, insuficiência de escala e critério de sobreaceleração.

6.8.1. CLOTÓIDE

Entre um alinhamento recto e uma curva, a curvatura da curva de transição $1/r$, deve aumentar gradualmente desde zero no alinhamento recto até ao valor $1/R$ na curva circular. Isto pode ser efectuado desde o início da curva de transição através da relação linear:

$$\frac{1}{r} = k \cdot l \quad (6.22.)$$

Aqui $1/r$ é a curvatura sobre o comprimento da curva de transição l desde a origem conforme é mostrado na figura 6.11.

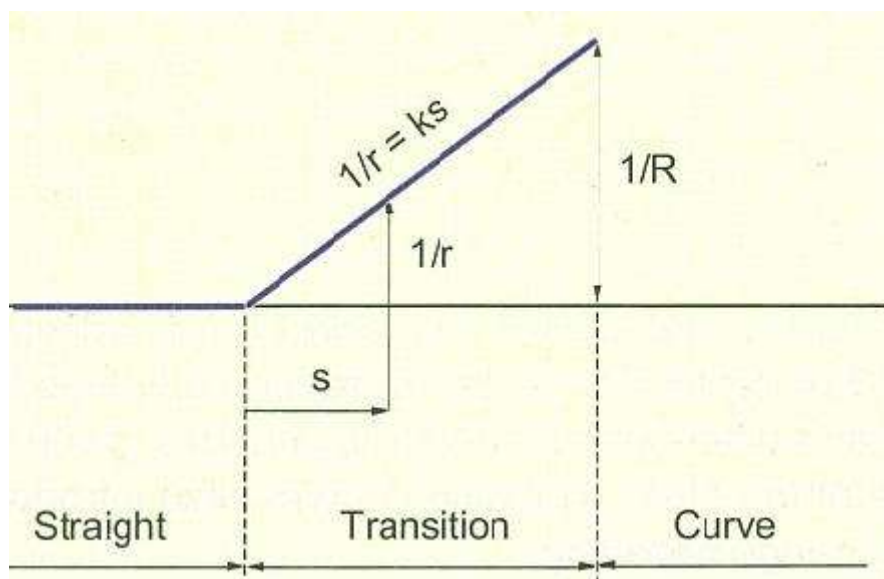


Fig.6.11 – Evolução da curvatura na clotóide (Esveld, Coenraad;2001)

r é o raio num ponto genérico da curva de transição e l o desenvolvimento da respectiva curva até esse mesmo ponto. A equação (6.23.) é uma equação inerente da clotóide que é habitualmente apresentada da seguinte forma:

$$A^2 = r \cdot l \quad (6.23.)$$

Para o ponto de tangencia entre a curva de transição e a curva circular tem-se $A^2 = R \cdot L$, o que implica para o desenvolvimento total da curva de transição: $L = A^2/R$.

Tal como já foi dito, na origem a curvatura é zero e por isso esta é seleccionada como ponto de tangencia com o alinhamento recto. O factor k é o coeficiente de proporcionalidade. A equação da curva de transição y é agora definida como uma função de x . A forma exacta é:

$$\frac{d\Phi}{ds} = \frac{1}{r} \quad (6.24.)$$

Usando $1/r = k.s$, Φ pode ser resolvido:

$$\Phi = \int \frac{1}{r} ds = \frac{1}{2} k.s^2 \quad (6.25.)$$

As coordenadas cartesianas são assim determinadas e interpretadas:

$$x = \int \cos\Phi ds = \int \cos \frac{k.s^2}{2} ds \quad (6.26.)$$

$$y = \int \sin\Phi ds = \int \sin \frac{k.s^2}{2} ds \quad (6.27.)$$

A curva pode por isso ser descrita unicamente numa forma paramétrica, explicitada como integrais de Fresnel. A curva é conhecida como clotóide ou espiral Cornu. Devido à dificuldade da formulação matemática e a necessidade do uso do computador, uma outra curva de transição mais simples denominada parábola cúbica, é normalmente usada para cálculos manuais.

6.8.2. PARÁBOLA CÚBICA

A clotóide é mais usada na engenharia rodoviária, nomeadamente em auto-estradas, contudo, na engenharia ferroviária a curva mais comumente utilizada pelos projectistas de caminhos-de-ferro é a parábola cúbica em que a curvatura é definida como:

$$\rho = \frac{1}{R} = -\frac{d^2y}{dx^2} \quad (6.28.)$$

Na parábola cúbica, a curvatura ρ é proporcional à projecção do arco no eixo das abcissas tal como se observa na figura 6.12.

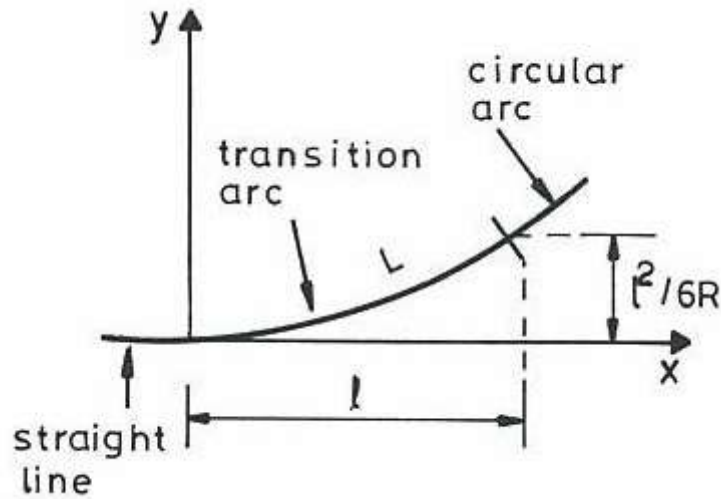


Fig.6.12 – Parábola Cúbica (Profillidis;1995)

Para obter a função que descreva a parábola cúbica, duas simplificações são introduzidas em relação à clotóide. A curva é aproximada por:

$$\frac{1}{r} = y'' \quad (6.29.)$$

O comprimento da curva é aproximado pela coordenada x . Isto aplica-se apenas para pequenos rácios L/R . Se o comportamento linear for novamente escolhido para a curva de transição, começando em zero no ponto de tangencia com o alinhamento recto, a curvatura é:

$$\frac{1}{r} = y'' = k \cdot x \quad (6.30.)$$

onde k é o factor de proporcionalidade. Após duas integrações e introdução de condições fronteira, a fórmula da parábola é determinada pela equação (6.31.).

$$y = \frac{x^3}{6 \cdot R \cdot L} \quad (6.31.)$$

Onde L representa o comprimento da curva de transição projectada no eixo dos xx , conforme mostra a figura 6.12. Esta expressão está de acordo com o primeiro termo da sucessão para a clotóide.

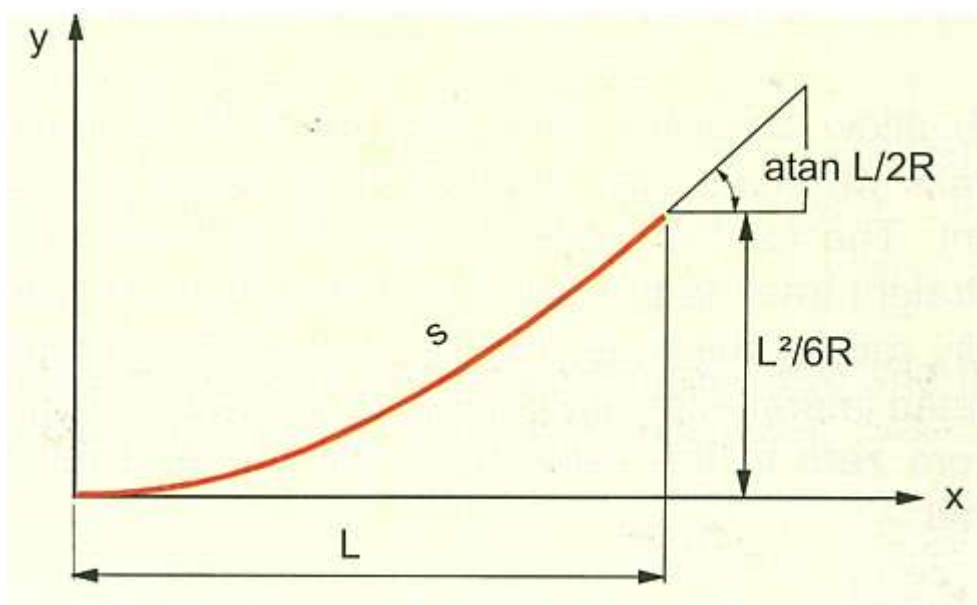


Fig.6.13 – Parábola Cúbica – comprimento (Esveld, Coenraad;2001)

6.8.3. OUTRAS CURVAS DE TRANSIÇÃO

Existem outras curvas de transição presentes na norma que não estão ainda bem incutidas no mundo da engenharia ferroviária. São curvas que exigem um estudo mais profundo e uma maior complexidade na sua análise. A grande diferença destas curvas para a clotóide e parábola cúbica já abordadas anteriormente é que estas transições não apresentam linearidade na variação da curvatura e da escala.

A norma faz alusão a estas curvas de transição e refere-as como solução ao projecto do traçado sempre que exista alguma alteração imposta à trajectória do veículo no plano transversal e torna-se necessário garantir um bom conforto de marcha. Nestes casos, o comboio fica submetido a súbitas oscilações dos gradientes de escala e de curvatura (segundas derivadas). A resposta dinâmica a este tipo de excitações subordina-se essencialmente ao tipo de suspensão concebida, no entanto, esta resposta permanece alguns segundos antes que o seu resultado se elimine num próximo componente de traçado que pode ser um alinhamento recto ou curva circular.

As curvas de transição alternativas aparecem justamente para servir de alternativa e resposta a estes efeitos dinâmicos, com o objectivo de os contornar ou atenuar em prol do conforto dos passageiros, segurança e qualidade do traçado.

Deste modo, referem-se as curvas de transição alternativas à clotóide e parábola cúbica cuja variação de curvatura e escala não são lineares:

- Curva do tipo BLOSS;
- Curva do tipo COSENO;
- Curva do tipo SCHRAMM;
- Curva do tipo KLEIN (curva sinusoidal).

Nos anexos deste trabalho, inclui-se uma tabela com as características destas curvas em relação à parábola cúbica. Este quadro foi retirado da norma portuguesa e segue em anexo, uma vez que não é uma finalidade efectuar um estudo exaustivo destas curvas de transição.

6.8.4. CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DA CURVA DE TRANSIÇÃO

Neste ponto considera-se muito importante discutir a forma como a rampa de sobrelevação é lançada e os critérios normativos a que deve obedecer. É fundamental perceber como a variação da escala e curvatura se procede ao longo da curva de transição tendo em conta os critérios e limitações de segurança, dinâmica, conforto e geometria. Finalmente, refere-se um cálculo do comprimento da curva de transição para o caso de esta ser linear baseado na limitação dinâmica e de conforto.

6.8.4.1. Variação da escala em função do tempo dh/dt

Este critério que pretende limitar a variação da escala em função do tempo também é conhecido como a limitação dinâmica. Tal como se tem vindo a referir reiteradamente, a variação de escala encontra-se na curva de transição, contudo, esta variação é feita segundo o limite imposto pela norma. Então, para variações de escala com declive uniforme, deve-se respeitar a seguinte relação onde Δh representa a variação da escala:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\Delta h \cdot V_{max}}{3,6 \cdot L} \leq \left(\frac{dh}{dt}\right)_{lim} \quad (6.32.)$$

A relação dh/dt representa a velocidade ascensional é expressa em mm/s. Os seus valores limites variam consoante as categorias de tráfego, isto é, conforme a velocidade e o tipo de tráfego. Como é frequente na Norma, existem valores limite recomendados e máximos e mais uma vez segue em anexo a tabela com os valores adoptados para este critério.

Os valores presentes na Norma para a razão dh/dt levam em conta o conforto de rolamento e a eventualidade de uma plataforma da via instável, na medida em que a circulação em zonas de variação da escala acelera os movimentos de rotação da caixa do veículo em torno do seu eixo longitudinal.

6.8.4.2. Variação da escala em função do comprimento dh/dl

Este critério pode ser referido como uma limitação de carácter geométrico e pretende evitar condições favoráveis ao descarrilamento do veículo na sequência de um deficiente apoio da roda dianteira do veículo. O confinar do disfarce da escala visa suavizar o empenamento através

do evitar de sobrecargas e descargas que podem afectar a estabilidade de circulação e o risco de descarrilamento.

No projecto, deve-se adoptar o valor mais condicionante proveniente das considerações de segurança e de conforto:

i) Observância dos requisitos relativos à segurança

Em curvas de transição de pequeno comprimento, o valor máximo do declive da escala dh/dl com transições de declive não constante ou $\Delta h/L$ no caso de transições com declive constante, deve ser definido tendo em conta a segurança do ponto de vista do descarrilamento dos comboios de mercadorias. (Anexo I da Norma EN 13803)

ii) Observância dos requisitos relativos ao conforto de rolamento

Os valores abaixo são derivados dos valores anteriores de dh/dt por intermédio da seguinte relação:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{3,6}{V_{max}} \cdot \frac{dh}{dt} \quad (6.33.)$$

De acordo com as considerações acima enunciadas e ponderando o caso mais gravoso dependendo do tipo de veículo, a Norma sugere a aplicação dos seguintes valores:

- Valor limite recomendado – 2,25 mm/m;
- Valor limite máximo – 2,5 mm/m.

6.8.4.3. Variação da insuficiência de escala em função do tempo dl/dt

A limitação da insuficiência de escala em relação ao tempo exhibe intrinsecamente uma componente de conforto e é designado como um critério de sobreaceleração. Este é um critério fundamental pois leva em conta a variação da aceleração não compensada nas rampas de transição. Para transições com variações uniformes de curvatura e da escala, pode-se empregar a relação seguinte em que ΔI corresponde à variação da insuficiência de escala:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{V_{max}}{3,6.L} \cdot \Delta I \leq \left(\frac{dl}{dt}\right)_{lim} \quad (6.34.)$$

Da mesma forma, a variação de aceleração lateral não compensada no plano da via pode ser calculada com base na variação total da aceleração lateral não compensada Δa_{nc} ao longo da totalidade da transição:

$$\frac{da_{nc}}{dt} = \frac{V_{max}}{3,6.L} \cdot \Delta a_{nc} \leq \left(\frac{da_{nc}}{dt}\right)_{lim} \quad (6.35.)$$

Os valores dI/dt e da_{nc}/dt não são constantes para transições com variações de curvatura e de escala não lineares. O seu valor máximo é alcançado a meio da curva de transição.

Para comboios rápidos de passageiros, os valores escolhidos para $(dI/dt)_{lim}$ devem ter em conta o conforto de rolamento, na eventualidade de uma plataforma de via instável.

A variação da aceleração lateral não compensada perceptível ao viajante no interior do comboio $(S_{an})_p$ é superior à da variação da aceleração não compensada no plano da via dada por:

$$S_{anP} = (1 + s) \frac{da_{nc}}{dt} \quad (6.36.)$$

onde s é o coeficiente de *souplesse* do veículo. O valor máximo admitido para S_{anP} enquadra-se no intervalo compreendido entre 0,5 e 0,8 m/s^2 . O valor de $(dI/dt)_{lim}$ deve considerar o efeito de *souplesse* dos veículos rápidos de passageiros e em anexo segue o quadro presente na Norma com as limitações aos valores da variação da insuficiência de escala em relação ao tempo.

6.8.4.4. Comprimento das curvas de transição no plano horizontal – L

O desenvolvimento das curvas de transição deve ser estabelecido a partir dos valores limite impostos pelos parâmetros seguintes:

- Variação da insuficiência da escala em função do tempo dI/dt ;
- Variação da escala em função do comprimento dD/dl ;
- E das seguintes fórmulas:

$$L \geq \frac{V_{max}}{3,6} \cdot \Delta I \cdot \left(\frac{dI}{dt}\right)^{-1} \quad (6.37.)$$

$$L \geq \Delta h \cdot \left(\frac{dh}{dl}\right)^{-1} \quad (6.38.)$$

O comprimento da curva de transição deve ser o maior dos valores calculados a partir das equações atrás referidas para os valores adoptados de dI/dt e dh/dl .

6.9. CÁLCULO DE RAIOS MÍNIMOS

Após todas as referências aos valores normativos e na continuidade das fórmulas geométricas explicitadas segue-se a fase de cálculo onde se abordará a questão dos raios mínimos a definir

para uma linha ferroviária de alta velocidade. Esta fase de cálculo é o culminar deste capítulo onde se incluirá os conceitos de escala, insuficiência e excesso de escala, velocidade admissível, velocidade de projecto e aceleração não compensada. Os resultados alcançados são projectados para velocidades de 250, 300 e 350 km/h naquelas que foram consideradas as velocidades mais utilizadas nos projectos de alta velocidade. Também se consideram bitolas diferentes, isto é, adopta-se a bitola europeia (1435 mm) e a bitola portuguesa (1668 mm) no sentido de interpretar a significância que possui na definição do raio. O procedimento elegido será aplicado de igual modo e de forma sequencial para as velocidades de projecto acima descritas. Sendo assim, a metodologia de cálculo abrange os valores limitativos da Norma e incorpora equações de equilíbrio que relacionam a velocidade, a escala teórica, o raio e a bitola. Todas as referências aos valores normativos são comprovadas no capítulo dos anexos a esta investigação onde se inserem as tabelas/quadros utilizados para fixar tais valores.

6.9.1. VELOCIDADE DE PROJECTO – 250 KM/H E BITOLA EUROPEIA

Tendo em conta a velocidade de projecto de 250 km/h, para efeitos de aplicação da Norma, sugere-se a consideração da categoria V, ou seja, linhas de alta velocidade unicamente dedicadas a tráfego de passageiros [$250 \leq V \leq 300$].

A bitola europeia de 1435 mm, quando usada na equação de equilíbrio deve ter em conta a cabeça do carril, e então:

$$b' = b + c = 1435 + 70 = 1505 \text{ mm}$$

em que b é a bitola e c é a largura da cabeça do carril.

Recorrendo ao valor normativo para a escala prática, define-se $h=160$ mm.

Mais uma vez tendo em conta a categoria de tráfego, e voltando aos valores indicados pela Norma, fixa-se o valor da insuficiência de escala $I=100$ mm.

Deste modo, e por definição, $I = h_t - h$, isto é, $h_t = I + h = 100 + 160 = 260$ mm

Calcula-se o raio pela equação de equilíbrio (6.8.) e fica:

$h_t = (V^2 \times b') / (127.R)$ e substituindo pelos valores, $260 = (250^2 \times 1505) / (127.R)$, que conduz a um valor de raio $R = 2849 \text{ m} \rightarrow \mathbf{R = 2900 \text{ m}}$

A aceleração não compensada toma o valor, $a_{nc} = (g.I) / b' = 9,81 \times 100 / 1505 = 0,65 \text{ m/s}^2$

O excesso de escala para comboios de passageiros é fixado em 110 mm, apesar da Norma não tabelar este valor. Este é um valor recomendado e aplicando a seguinte equação sugerida pela Norma:

$$E = h - 11,8 \cdot \frac{V_{min}^2}{R} \quad (6.39.)$$

Substituindo na equação o valor do raio já determinado, $R = 2900$ m, $h = 160$ mm e $E = 110$ mm, chega-se ao valor mínimo da velocidade que um comboio mais lento deve circular para não haver risco de descarrilamento ou sobrecarregar o carril interno da linha. Então:

$$V_{\min}^2 = (R \times (h - E)) / 11,8 = 110,85 \text{ km/h.}$$

Nos próximos cálculos será usada uma apresentação esquemática, visto que não se pretende martirizar o leitor com uma sequência de cálculo muito pesada. Deste modo, o procedimento é sempre o mesmo e as fórmulas a aplicar já foram descritas.

6.9.2. VELOCIDADE DE PROJECTO – 300 KM/H E BITOLA EUROPEIA

O quadro 33 indica os valores obtidos para uma velocidade de projecto de 300 km/h considerando a bitola europeia. A categoria de tráfego correspondente a esta velocidade é a V de acordo com a Norma.

Quadro 29 – Valor do Raio ($V=300$ km/h)

$V(\text{km/h})$	$b'(\text{mm})$	$h_{\text{lim}}(\text{mm})$	$l_{\text{lim}}(\text{mm})$	$h_t(\text{mm})$	$R(\text{m})$
300	1505	160	80	240	4444

Define-se o valor de **$R = 4500$ m**

O quadro abaixo mostra o valor da aceleração não compensada correspondente, o excesso de escala recomendado e o valor da velocidade mínima de circulação para os veículos mais lentos.

Quadro 30 – Aceleração não compensada, Excesso de escala e $V_{\min}$ ($V=300$ km/h)

$a_{\text{nc}}(\text{m/s}^2)$	$E(\text{mm})$	$h(\text{mm})$	$R(\text{m})$	$V_{\min}(\text{km/h})$
0,52	110	160	4500	138,09

6.9.3. VELOCIDADE DE PROJECTO – 350 KM/H E BITOLA EUROPEIA

Repete-se um procedimento análogo ao anterior, para a velocidade de 300 km/h. Assim, o quadro abaixo mostra os resultados mais uma vez com recurso aos valores da Norma.

Quadro 31 – Valor do Raio (V=350 km/h)

V(km/h)	b'(mm)	h_{lim} (mm)	l_{lim} (mm)	h_t (mm)	R(m)
350	1505	160	60	220	6599

Assim, R toma o valor **R = 6600 m**

Os valores correspondentes da aceleração não compensada e velocidade mínima seguem no quadro 36.

Quadro 32 – Aceleração não compensada, Excesso de escala e V_{min} (V=350 km/h)

a_{nc} (m/s ²)	E(mm)	h(mm)	R(m)	V_{min} (km/h)
0,39	110	160	6000	159,45

6.9.4. VELOCIDADE DE PROJECTO – 250 KM/H E BITOLA IBÉRICA

Quadro 33 – Valor do Raio (V=250 km/h)

V(km/h)	b'(mm)	h_{lim} (mm)	l_{lim} (mm)	h_t (mm)	R(m)
350	1738	160	100	260	3290

R = 3300 m

Quadro 34 – Aceleração não compensada, Excesso de escala e V_{min} (V=250 km/h)

a_{nc} (m/s ²)	E(mm)	h(mm)	R(m)	V_{min} (km/h)
0,56	110	160	3300	118,25

6.9.5. VELOCIDADE DE PROJECTO – 300 KM/H E BITOLA IBÉRICA

Quadro 35 – Valor do Raio (V=300 km/h)

V(km/h)	b'(mm)	h_{lim} (mm)	l_{lim} (mm)	h_t (mm)	R(m)
300	1738	160	80	240	5132

R = 5200 mQuadro 36 – Aceleração não compensada, Excesso de escala e V_{min} (V=300 km/h)

$a_{nc}(m/s^2)$	E(mm)	h(mm)	R(m)	$V_{min}(km/h)$
0,45	110	160	5200	148,43

6.9.6. VELOCIDADE DE PROJECTO – 350 KM/H E BITOLA IBÉRICA

Quadro 37 – Valor do Raio (V=350 km/h)

V(km/h)	b'(mm)	h_{lim} (mm)	l_{lim} (mm)	h_t (mm)	R(m)
350	1738	160	60	220	7620

R = 7700 mQuadro 38 – Aceleração não compensada, Excesso de escala e V_{min} (V=350 km/h)

$a_{nc}(m/s^2)$	E(mm)	h(mm)	R(m)	$V_{min}(km/h)$
0,34	110	160	7700	180,63

6.10. CONCLUSÕES

A primeira conclusão óbvia que se observa é que o valor do raio mínimo aumenta com o incremento da velocidade de projecto. Outra ocorrência não seria de esperar, pois o aumento da velocidade produz um crescimento da força centrífuga e só um alargar do raio de curva horizontal é que permite atenuar o valor desta força radial que pode provocar o descarrilamento do veículo e geralmente induz desconforto nos passageiros. Aplica-se a insuficiência de escala para reduzir este desconforto sentido pelos passageiros e assim aumentar a velocidade de circulação na curva, no entanto, à insuficiência de escala assumida corresponde uma aceleração lateral não compensada que deve cumprir certos valores práticos derivados da experiência. Sendo que a aceleração não compensada não deve ser superior a $1,5 \text{ m/s}^2$, e este valor admite-se para vias de alta velocidade e muito boa qualidade do traçado, nos cálculos acima efectuados ficou-se bem longe desse valor, o que garante a segurança do comboio e a comodidade dos viajantes. Os valores do raio determinados estão de acordo com os obtidos e delimitados nas redes de alta velocidade, em seguida mostra-se o exemplo do projecto do trecho Poçoirão – Caia e nota-se a concordância dos valores. Pode-se referir que em linhas de alta velocidade muito especializadas e com velocidades de serviço acima dos 300 km/h, os raios mínimos a adoptar para as curvas horizontais podem ultrapassar significativamente os valores dos raios aqui referidos e calculados.

6.11. TROÇO POÇEIRÃO – CAIA

Conforme foi referido no início deste capítulo, apresentam-se os valores de projecto e características da linha de alta velocidade Lisboa – Madrid neste troço que devem ser consideradas pela concessionária.

A linha é projectada para tráfego misto e a bitola de via adoptada é a europeia, ou seja, de acordo com a UIC 1435 mm.

Em seguida esboça-se o quadro 43 com as principais características a adoptar nesta linha.

Quadro 39 – Características da linha de alta velocidade Lisboa – Madrid (troço Poçoirão – Caia)

Parâmetros funcionais / Parâmetros geométricos	Símbolo	Unidades	Valores Normais	Valores Limite
Escala Máxima	$h_{\max}$	mm	125	140
Insuficiência de Escala	I	mm	60	70
Aceleração não compensada	a_{nc}	m/s^2	0,39	0,46
Excesso de Escala	E	mm	80	100
Variação de Escala no tempo	dh/dt	mm/s	30	40
Variação de Escala com o Comprimento	dh/dL	mm/m	1,0	1,0
Variação de Insuficiência de Escala no Tempo	dI/dt	mm/s	30	30
Variação da Aceleração não compensada no Tempo	da_{nc}/dt	m/s^3	0,20	0,20
Aceleração Vertical	a_v	m/s^2	0,22	0,22
Raio horizontal mínimo	R_h	m	9150	7250
Comprimento de Transição	L_{tc}	m	410	345
Raio vertical mínimo	R_v	m	43000	43000
Inclinação máxima	i	‰	12,5	15,0
Comprimento máximo da Inclinação máxima	L_i	m	1500	3000
Inclinação mínima em túneis	i	‰	5	5
Comprimento mínimo de alinhamento recto e curvas circulares	L	m	350	235
Adopção no Projecto			Desejável	Aceitável

7

PROJECTOS

7.1. ENQUADRAMENTO

Numa parte do presente capítulo também será analisada a controvérsia da alta velocidade em Portugal. Por último, serão referidos projectos de linhas de alta velocidade em estudo, nomeadamente em Portugal onde se vive a polémica do “TGV” e no Brasil onde se encontra em curso a concepção do chamado “Trem-Bala” que ligará São Paulo ao Rio de Janeiro.

7.2. PROJECTOS

Tal como foi enquadrado no início do presente capítulo, haverá uma breve referência a projectos de alta velocidade em discussão. Neste caso, serão abordados sumariamente o programa das linhas de alta velocidade em Portugal bem como o já famoso “Trem-Bala” que será posto em curso no Brasil.

7.2.1. PORTUGAL

Existe uma forte discussão em Portugal sobre os eixos ferroviários de alta velocidade, discussão que já se prolonga há vários anos. Para este trabalho, apenas interessa descrever os projectos em análise, seus impactos, vantagens e objectivos.

7.2.1.1. Descrição do Projecto

No momento há três linhas ferroviárias de alta velocidade consideradas prioritárias.

- Eixo Lisboa – Porto

Quadro 40 – Características da linha Lisboa – Porto (RAVE;2008)

Tipo de Tráfego	Tempo de Viagem	Extensão Total	Velocidade de Projecto	Entrada em Serviço	Investimento
Passageiros	1h15(directo)	292km	300km/h	2015	4500 M€

- Eixo Lisboa – Madrid

Quadro 41 – Características da linha Lisboa – Madrid (RAVE;2008)

Tipo de Tráfego	Tempo de Viagem	Extensão Total	Velocidade de Projecto	Entrada em Serviço	Investimento
Misto	2h45(directo)	640km	350km/h	2013	2400 M€

- Eixo Porto – Vigo

Quadro 42 – Características da linha Porto – Vigo (RAVE;2008)

Tipo de Tráfego	Tempo de Viagem	Extensão Total	Velocidade de Projecto	Entrada em Serviço	Investimento
Misto	1h00(directo)	125km	250km/h	2013	1400 M€

Após a descrição das linhas de alta velocidade projectadas e a indicação das respectivas características, mostra-se a imagem da rede de alta velocidade projectada para a Península Ibérica.

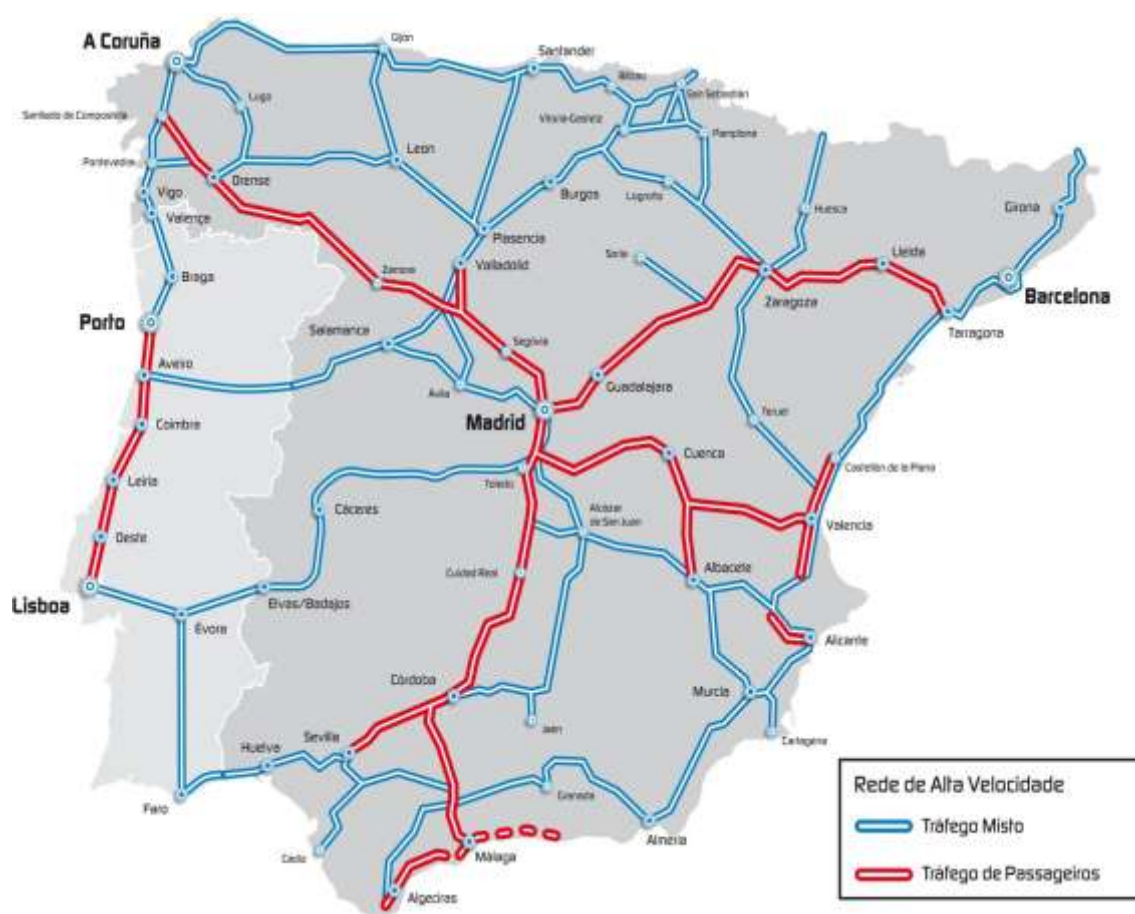


Fig.7.1 – Rede de alta velocidade planeada para a Península Ibérica (RAVE;2009)

7.2.1.2. Objectivos

A alta velocidade em Portugal tem vários objectivos estratégicos dos quais se destacam:

- Criação de um sistema de transportes moderno, sustentável e eficiente reduzindo tempos e custos de deslocação;
- Redução da situação periférica de Portugal no espaço europeu, integrando o caminho-de-ferro nacional na Rede Transeuropeia de Transportes;
- Aumento da competitividade da Fachada Atlântica Nacional;
- Contribuição para o desenvolvimento económico e tecnológico, a criação de emprego e a promoção do desenvolvimento regional;
- Melhoria de mobilidade e reequilíbrio da distribuição modal dos transportes, para passageiros e mercadorias, quebrando a hegemonia do transporte rodoviário;
- Aumento da utilização do sistema ferroviário através da articulação com o sistema convencional;
- Aumento da competitividade do sistema portuário, aeroportuário e logístico através da articulação com o comboio;
- Diminuição das emissões poluentes e de gases que provocam o efeito de estufa;
- Redução da sinistralidade rodoviária;

- Criação de uma rede de cidades alta velocidade.

Sendo uma das principais finalidades a redução dos tempos de viagem e aumento da mobilidade e competitividade entre meios de transporte, coloca-se aqui uma figura que pretende dar um panorama das vantagens da alta velocidade em Portugal e Espanha.

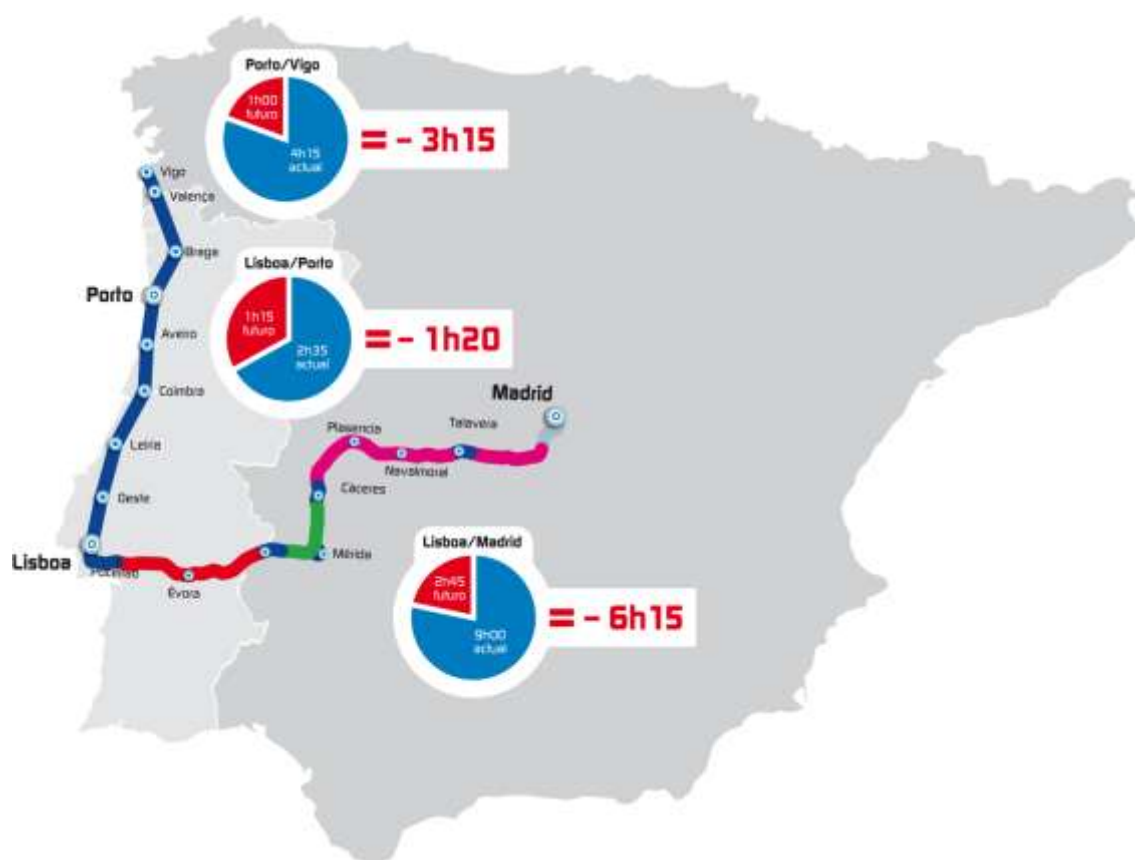


Fig.7.2 – Poupança de tempos de viagem após implantação das linhas de alta velocidade projectadas (RAVE;2008)

7.2.1.3. Impactos

Sendo a alta velocidade um investimento estratégico para estimular o crescimento económico, irá produzir impactos a nível sócio-económico, do desenvolvimento regional, da inovação e do ambiente. Em seguida, resumem-se alguns pontos onde a alta velocidade irá influir.

- A nível sócio-económico:
 - Criação de postos de trabalho permanentes;
 - Aumento do investimento privado;

- Crescimento do PIB;
 - Aumento da receita fiscal para o Estado.
- b) A nível do desenvolvimento e inovação:
- Desafio tecnológico e qualidade exigida;
 - Reestruturação, redimensionamento e capacitação da indústria;
 - Especialização e colaboração entre empresas.
- c) A nível ambiental:
- Produção de menores quantidades de Dióxido de Carbono (CO₂) do que os outros modos de transporte;
 - Mais eficiente em termos de energia;
 - Diminuição do ruído.

7.2.2. BRASIL

Para fazer frente a uma das maiores pontes aéreas do Mundo, no Brasil projecta-se uma linha ferroviária de alta velocidade conhecida como “Trem-Bala” entre as suas duas maiores cidades, São Paulo e Rio de Janeiro.

7.2.2.1. Descrição do Projecto

Os dados de projecto existentes podem-se observar no quadro abaixo:

Quadro 43 – Características da linha Rio de Janeiro – São Paulo (ITALPLAN;2005)

Tipo de Tráfego	Tempo de Viagem	Extensão Total	Velocidade de Projecto	Entrada em Serviço	Investimento
Passageiros	1h25(directo)	403km	285km/h	2013	7250 M€

Para ilustrar a exposição desta importante linha de alta velocidade pode-se consultar a imagem abaixo e assim ter uma visão do traçado a adoptar.



Fig.7.3 – Linha ferroviária de alta velocidade Rio de Janeiro – São Paulo (ITAPLAN;2005)

7.2.2.2. Objectivos

Em termos de metas a atingir, a conexão Rio de Janeiro – São Paulo apresenta características adequadas para a alta velocidade. Com uma linha ferroviária de alta velocidade entre estas duas metrópoles com um tempo de viagem entre 2-2,5 h e estações cêntricas no Rio e São Paulo poderá ser captado 50-75% da procura da ponte aérea, 20-35% da opção automóvel e cerca 10-30% da escolha do transporte por autocarro expresso. Em outros países aderentes à alta velocidade, por exemplo no caso de Espanha, estima-se que a implantação de uma linha de alta velocidade tenha provocado uma procura induzida de 35%; na situação brasileira, este número poderá ser ainda maior caso se mantenha o alto crescimento económico. Noutra vertente, o facto de existir ao longo do percurso pólos de desenvolvimento económico, vai permitir que a mesma seja um factor de equilíbrio territorial que alivie a pressão demográfica sobre as capitais (Rio de Janeiro e São Paulo). Sendo a conexão Rio – São Paulo a primeira linha de uma rede ferroviária de alta velocidade no Brasil, esta terá todas as características demográficas, económicas, sociais e geográficas (distâncias) adequadas para o seu desenvolvimento no sudeste brasileiro.

7.2.2.3. Impactos

Para rematar passam-se a enumerar os diferentes impactos que esta linha de alta velocidade poderá ter a vários níveis:

- Elevada capacidade de desenvolvimento sócio-económico;
- Elevado atendimento de procura de transporte;
- Elevado incremento ocupacional durante a construção;
- Criação de novos empregos: directos e indirectos;
- Possível utilização de empregados especializados excedentes de outros serviços de transporte;
- Criação de novas empresas;
- Criação de novas figuras profissionais;
- Elevada integração social;
- Redução do tráfego urbano e extra-urbano;
- Elevada poupança energética;
- Baixo nível de poluição e ruído;
- Baixo impacto ambiental frente a outros sistemas de transporte de massa.

7.2.3. VANTAGENS DA ALTA VELOCIDADE

Considerando a alta velocidade como o transporte de passageiros do futuro, e após as breves explanações acima dos projectos de Portugal e Brasil, revelam-se aqui algumas vantagens que a alta velocidade pode proporcionar aos seus clientes:

- Reduzidos tempos totais de viagem – proporciona mais tempo livre reduzindo o tempo porta a porta;
- Elevadas frequências – tirando partido da capacidade da infra-estrutura;
- Fiabilidade – oferece mais capacidade de gestão do tempo;
- Acessibilidade – flexibilidade total sem necessidade de longo check-in;
- Conforto – mais espaço, comodidade, liberdade de movimentação a bordo, aproveitamento do tempo de viagem, uso de equipamento electrónico, ausência de cintos de segurança, entre outros;
- Segurança – é o modo de transporte mais seguro;
- Preço – as distintas modalidades de preços praticados usualmente na alta velocidade têm assegurado uma boa adesão dos diferentes segmentos de mercado e taxas de ocupação elevadas.

Acima explicou-se os proveitos que as linhas de alta velocidade trazem para os seus clientes. Em seguida, apresentam-se, de forma pouca exaustiva, os benefícios que a alta velocidade pode introduzir em vários ramos. Esquemáticamente passa-se a explicar:

- A nível do mercado:
 - Alternativa concorrencial ao transporte rodoviário, nas médias e longas distâncias;
 - Alternativa concorrencial ao transporte aéreo no espaço peninsular.
- Em termos de ambiente e coesão territorial:
 - Mobilidade e desenvolvimento sustentável;

- Coesão dos espaços regionais, nacionais e comunitários.
- Na situação económica:
 - Maior competitividade da economia no seu conjunto;
 - Novos espaços produtivos;
 - Relações inter-industriais.
- No campo da competitividade e produtividade:
 - Crescimento da actividade produtiva;
 - Melhoria da competitividade no seu conjunto;
 - Geração de novos espaços produtivos alimentando outras actividades como oportunidades para as empresas existentes bem como criação de novas empresas e novos postos de trabalho directos.
- No círculo virtuoso de aumento de produtividade, competitividade e emprego:
 - Política consistente e dinamização da participação da indústria nacional.

8

CONCLUSÕES

8.1. SUMÁRIO

As conclusões são uma parte capital deste trabalho na medida em que percorrem todos os capítulos do trabalho e ainda conseguem ir mais além, como deixar perspectivas, efectuar reflexões, manifestar opiniões pessoais. Este capítulo é o epílogo da tese onde se pode resumir os aspectos mais importantes dos capítulos anteriores, no qual se pode versar sobre as dificuldades e facilidades encontradas ao longo deste trajecto e também se avaliam resoluções e visões sobre novos projectos.

Deste modo, começa-se por abordar um ponto mais geral onde se discute a análise de resultados, no fundo é um sintetizar das ilações verificadas no final de cada capítulo nomeadamente os temas fulcrais que envolveram bastante cálculo e análise de variáveis. Estas conclusões incidirão obviamente sobre os raios mínimos de curvatura, rampas máximas, mecanismos de tracção e superestrutura de via.

Seguidamente e numa tentativa de retrospectiva/síntese, descrevem-se as particularidades centrais das linhas ferroviárias de alta velocidade. Serão usadas linhas de alta velocidade já construídas e marcantes a nível europeu para se comparar as características fulcrais da alta velocidade.

Haverá também um ponto relacionado com os impactos da alta velocidade nomeadamente a nível do aumento de tráfego, eficácia, eficiência e conforto que proporciona. Será discutido a competitividade com o transporte aéreo ou possível comunhão.

A questão da gestão da infra-estrutura é discutida posteriormente nos moldes da gerência de recursos em alta velocidade, tais como os casos do material circulante, via, aparelhos de via, constituintes da via e modo de exploração.

Um subtítulo muito breve será um indicar/enumerar de algumas perspectivas de intervenção e futuro da alta velocidade.

Finalmente, o culminar da tese consistirá numa reflexão pessoal através de um esboço da opinião do autor. Este comentário espelhará todo o processo de construção deste trabalho bem como todos os conteúdos nele descritos.

8.2. ANÁLISE DE RESULTADOS

Conforme foi aludido, nesta fase procura-se compilar as deduções dos capítulos mais importantes e que incidiram numa vertente mais de experiência e cálculo. Não se pretende tirar novas conclusões, mas sim reforçar aqueles que se pensa serem os resultados mais preponderantes da presente dissertação. Assim, propõe-se a explanação destes resultados sob a forma de tópicos cuja ordem não implica maior supremacia de um sobre outro, uma vez que todos estes parâmetros são basilares na concepção de uma linha de alta velocidade com qualidade e respeitando todas as Normas e Especificações.

8.2.1. RAIOS DE CURVATURA

O raio de curvatura horizontal depende significativamente da velocidade de projecto de uma linha de alta velocidade. Para extenuar o efeito da força centrífuga e consequente aceleração lateral que provoca o desconforto dos passageiros é necessário o aumento do raio de curvatura. O desrespeito pelo valor do raio mínimo em alta velocidade pode até causar o descarrilamento do veículo não se cumprindo as normas de segurança. Em alta velocidade, e para projecto de novas linhas, os raios de curvatura horizontal devem situar-se acima dos 10000 metros sendo que o valor ideal centra-se nos 25000 metros. Estes valores podem ser comprovados por cálculos mas existe sempre o grave problema das condicionantes topográficas, geográficas, habitacionais e geológicas para a imposição prática destes valores para o raio de curvatura.

8.2.2. ESCALA, INSUFICIÊNCIA DE ESCALA E EXCESSO DE ESCALA

No traçado de uma linha de alta velocidade é extremamente determinante perceber e compreender o jogo entre os mais decisivos parâmetros geométricos da via, como o raio, escala, insuficiência de escala, excesso de escala, aceleração lateral, força centrífuga, velocidade, bitola e aceleração não compensada. É do relacionamento entre todos estes factores que nascem os valores limites e recomendados adoptados na projecção das linhas de alta velocidade. Torna-se necessário entender como estes parâmetros influem no comportamento da via e do veículo, a nível de segurança, conforto, carregamento, exploração e manutenção da via. Todos estes conceitos devem ser bem estudados e delimitados devido à sua forte influência no desgaste da via e dos veículos. É também importante assimilar a prioridade dos valores presentes na Norma Europeia, e acima de tudo, saber balancear os valores recomendados e os valores limite sendo que há restrições não vinculativas. Intimamente ligado com todos estes parâmetros, mais especialmente a sobrelevação, encontram-se as curvas de transição.

8.2.3. CURVAS DE TRANSIÇÃO

Ainda no objecto da geometria de traçado surge a problemática das curvas de transição. Estas curvas horizontais com variação de curvatura são decisivas no disfarce da sobrelevação. O seu dimensionamento é expressivo na qualidade de circulação e segurança de viajantes e comboios. Existe uma grande discussão sobre a melhor/mais adequada curva de transição mas não se aprofundou essa questão nesta investigação. Os países são livres de seleccionar a curva que melhor se incorpora nos seus traçados desde que esteja presente na Norma. Acima de tudo é essencial ter noção bem assente que estas curvas de transição são dimensionadas segundo critérios normativos indispensáveis que levam em conta os parâmetros geométricos deliberativos acima descritos. Estes critérios limitam a variação da escala e insuficiência de escala em relação ao tempo e ao comprimento da escolhida curva e são preceitos que consideram o carácter dinâmico, geométrico e sobreaceleração da operação em linhas de alta velocidade.

8.2.4. INCLINAÇÕES LONGITUDINAIS

Em relação às inclinações longitudinais, estas são claramente reduzidas em comparação com outros meios de transporte. Apesar da elevada potência de tracção dos comboios de alta velocidade, as rampas máximas devem ser nitidamente controladas para que os veículos não diminuam a sua velocidade e assim afectarem a velocidade comercial. Para o serviço ser fiável e atingirem-se velocidades comerciais elevadas, acima de 300 km/h, as pendentes devem enquadrar-se no intervalo de 15 a 35‰. Logicamente que estes valores são susceptíveis a alterações consoante o tipo de máquina e serviço de alta velocidade. Os cálculos efectuados ao longo do trabalho provam esta conclusão na medida em que diferentes tipos de comboios conseguem vencer diferentes rampas. Os declives máximos permitidos dependem especialmente da potência dos comboios, do tipo de tracção e tal como vimos, das resistências que se têm de ultrapassar. Estas resistências são particulares de cada veículo e dependem fundamentalmente da via, como a resistência ao rolamento, a resistência aerodinâmica, a resistência devido a curvas de traçado, a resistência de inércia devido à aceleração e a pensada resistência de rampa. Sabe-se que é devido a estas condicionantes e implicações a nível de perfil longitudinal que as linhas de alta velocidade são caracterizadas por numerosas obras de arte como túneis, viadutos e pontes, as quais aumentam o seu investimento em largos milhares e milhões de euros. Desde já é muito importante reter a determinante restrição que a resistência de rampa e consequente inclinação longitudinal máxima assume na decisão e elaboração do traçado da directriz e da rasante.

8.2.5. CONCORDÂNCIAS VERTICAIS

Aqui faz-se apenas uma breve ressalva pois as concordâncias verticais foram referidas de uma forma muito sucinta ao longo da investigação, e por isso, apraz dizer que o raio das concordâncias verticais é fortemente influenciado pela velocidade de projecto que traduz a segurança e pela grandeza da aceleração vertical que representa o conforto dos passageiros.

O raio das concordâncias verticais, vulgarmente designado apenas raio vertical, em linhas de alta velocidade, deve ser 20000 m nas concordâncias convexas e 10000 m nas concordâncias côncavas.

8.2.6. SISTEMA DE TRACÇÃO

Durante a investigação, houve vários parágrafos dedicados à discussão da tracção eléctrica face à tracção a diesel onde se fizeram variadas comparações, enumeraram-se vantagens e desvantagens destes dois modos de tracção. Conclui-se, que, a nível da alta velocidade, a tracção eléctrica considera-se mais adequada devido à maior capacidade de potência que consegue transmitir. No entanto, esta só se justifica para volumes de tráfego elevados.

8.2.7. A IMPORTÂNCIA DO BALASTRO

Embora se tenha falado escassamente em materiais de via, especialmente vias balastradas, convém reforçar a importância do balastro nas vias de alta velocidade. Os caminhos-de-ferro balastrados desde há muito que são utilizados devido à sua flexibilidade de construção e manutenção. As camadas de balastro possuem uma elevada resistência mecânica, essencial no transporte de cargas pesadas ao longo do traçado. Nos dias de hoje são várias as entidades que investigam o comportamento do balastro sob a acção dessas cargas e usam esse conhecimento para melhor fomentar estratégias de desenvolvimento de traçados de alta velocidade, prevenir manutenções futuras e reduzir custos de reparação onerosos.

Mais uma vez para redobrar a atenção dada ao balastro, disse-se que é um dos elementos que suportam a linha (carris) sendo constituído por uma camada mais ou menos homogénea de cascalhos de média dimensão. O balastro tem como função ancorar a linha lateral e longitudinal, e ainda transferir e distribuir as cargas estáticas e dinâmicas provocados pelos comboios e escoar as águas provenientes da chuva.

8.2.8. NOTAS FINAIS

Como notas finais basta reafirmar a elevada sensibilidade que todos estes parâmetros e características descritas exibem no Mundo da Alta Velocidade, ou seja, na projecção de linhas de alta velocidade deve-se ter o dobro do cuidado na análise, estudo e definição de todas estas especificidades tão particulares destas vias. É necessário haver cautela e reflexão nos cálculos, testes e ensaios pelo investimento a longo prazo que está em jogo. Mas esta perspectiva dos custos, será avaliada no último ponto da tese onde o autor poderá exprimir o seu comentário.

8.3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA ALTA VELOCIDADE

O quadro 46 mostra as principais características técnicas de uma linha ferroviária de alta velocidade. A maioria destas peculiaridades já foram sendo mencionadas ao longo do desenvolvimento do trabalho, contudo, deixa-se aqui uma síntese das características das principais linhas europeias de alta velocidade.

Quadro 44 – Características de linhas de alta velocidade na Europa (Profillidis;1995)

País	França	Alemanha	Itália	França	Espanha
Linha	Paris-Lyon (427 km)	Hannover- Wurzburg (327 km)	Roma- Florença (260 km)	Paris- Bordéus (260 km)	Madrid- Barcelona (522 km)
Velocidade de Projecto (km/h)	300	250	250	300	300
Raio de Curvatura Mínimo – $R_{\min}$ (m)	4000	7000	3000	4000	4000
Máxima Inclinação Longitudinal (‰)	35	12,5	8	25	30
Tracção (kV)	25	15	3	25	25
Alimentação	50 Hz	16 2/3 Hz	-	50 Hz	50 Hz

As diferenças importantes como inclinações de referência e sistemas de tracção eléctrica foram apresentados na tabela acima. A implementação da rede europeia de linhas de alta velocidade requer, por isso, que muitas características técnicas em que agora se notam diferenças fruto das particularidades da produção industrial e tecnológica em cada país, devem ser padronizadas. Contudo, as autoridades dos caminhos-de-ferro procuram ainda maior velocidade de circulação. Por isso, os caminhos-de-ferro franceses planeiam uma velocidade máxima de aproximadamente 400 km/h até 2010.

8.4. IMPACTO DA ALTA VELOCIDADE NA REDUÇÃO DOS TEMPOS DE VIAGEM

A redução do tempo de viagem é um objectivo constante dos caminhos-de-ferro, tal como se conhece nas principais linhas construídas para a alta velocidade. Por exemplo, na linha Paris-Lyon, demorava-se 5 horas e 15 minutos para percorrer os 515 km que separam estas duas cidades. Ao longo do faseamento da construção foi-se reduzindo este tempo de viagem, e hoje percorre-se distância de 427 km de linha em 1 hora e 50 minutos. Também no Japão, em 1963, eram necessárias 5 horas e 30 minutos para se ir de Tokyo a Osaka. Em 1965, com a introdução do Shinkansen, a mesma distância passou a ser percorrida em 3 horas e 10 minutos. Estes dois simples exemplos são suficientes para dar uma ideia do impacto da alta velocidade no tempo de viagem. Existe outra questão que é o custo, mas para já basta ficar-se com a velha máxima “tempo é dinheiro”.

Deste modo, os comboios de alta velocidade tornam-se altamente competitivos mas só para distâncias entre 400 e 700 km é que se podem tornar uma viável alternativa ao transporte aéreo a nível de tempos de viagem e segurança.

8.5. ALTA VELOCIDADE E O AUMENTO DO TRÁFEGO

A alta velocidade tem como resultado o aumento do tráfego que se fez sentir nos últimos anos, não só a nível ferroviário mas também no transporte aéreo e rodoviário, através da geração de nova procura ou então pela procura desviada.

A alta velocidade atraiu novamente para os caminhos-de-ferro (transporte ferroviário) uma parte do tráfego de passageiros perdida no passado. Contudo, para este efeito, o aumento de velocidade não chega, as acessibilidades às estações devem também ser desenvolvidas através de um eficiente serviço de autocarros e metropolitano. Em muitas circunstâncias, uma boa articulação entre as estações de caminho-de-ferro que servem a alta velocidade e os aeroportos podem contribuir para uma eficiente viagem comboio-avião em termos de tempo e custo.

8.6. PERSPECTIVAS DE INTERVENÇÃO

Este subtítulo destina-se a uma simples enumeração de alguns assuntos que a alta velocidade pretende desenvolver/intervir com vista ao aperfeiçoamento e melhoramento das novas linhas projectadas. Deste modo, os tópicos a abordar podem ser:

- Subestações de tracção;
- Instalações eléctricas e sistemas especiais das estações;
- Sinalização, telemática e fabrico de componentes electrónicas;
- Centros de comando;
- Sistemas de transmissão de telecomunicações;
- Sistemas de informação ao público;
- Sistemas de vídeo-vigilância;
- Sistemas electromecânicos de túneis;
- Conversores para material circulante;
- Serviços de manutenção e assistência.

8.7. REFLEXÃO

Para terminar, gostava de expressar a minha opinião sobre o trabalho realizado ao longo de todos estes capítulos. Pessoalmente, sou um fervoroso adepto do transporte ferroviário e mais concretamente da alta velocidade. Penso que só transporte aéreo pode competir com uma linha de alta velocidade bem concebida, estudada e enquadrada. A nível de segurança, acho que não

existe melhor solução tendo em conta todos os aspectos de sinalização, telecomunicação, transmissão de informação e automatismos a que a alta velocidade está sujeita. No que respeita aos tempos de viagem, pode concorrer fortemente com o transporte aéreo, na medida em que o transporte aéreo exige elevados cuidados de segurança e controle de passageiros e bagagens. O enorme tempo que se perde no *check-in*, despacho de bagagem, verificação de documentação e demais burocracias, pode afastar a possibilidade de escolha do transporte aéreo na óptica de um viajante mais exigente. Não tenho dúvidas que estações preparadas exclusivamente para linhas de alta velocidade, com as devidas acessibilidades e parques de estacionamento adequados, fazem do transporte ferroviário de alta velocidade uma excelente solução, cómoda e eficaz para qualquer passageiro. A nível de preços e tarifas, não posso discutir a vantagem e/ou competitividade que a alta velocidade pode proporcionar aos seus clientes em comparação com outros meios de transporte. No entanto, posso afirmar que a nível de segurança, é de longe superior ao transporte rodoviário onde se verifica uma elevada sinistralidade. A única vantagem do transporte rodoviário é de facto a mobilidade que apresenta, porém, as referidas boas acessibilidades através de transportes públicos como o metropolitano podem fazer das vias-férreas de alta velocidade o meio de transporte do futuro.

Em termos do trabalho desenvolvido, foi interessante poder experimentar calcular rampas de inclinação, acelerações, raios de curvatura, resistências, esforços de tracção e escalas. É gratificante poder compreender a variação destas grandezas na presença de alterações, por vezes até pouco significativas. Claro que existe imenso manancial de informação para estudar e desenvolver, mas é importante contribuir com análises, reunião de conhecimento e propagação de experiências.

O Mundo da Alta Velocidade é complexo, extenso, possui uma história e tem um potencial de evolução que considero enorme, quer nas disposições de via como é o tema desta tese, quer na própria tecnologia do material circulante e até na concepção e perspectiva do modo de exploração das novas linhas ferroviárias de alta velocidade que se pretendem projectar.

BIBLIOGRAFIA

- André, J. (2008). *Transporte interurbano em Portugal*. IST PRESS, Lisboa.
- Cunha, J. (2006). *A alta velocidade ferroviária em Portugal*. Transportes&Mobilidade, Lisboa.
- Suiker, A. (2002). *The mechanical behaviour of ballasted railway tracks*. Delft University Press, Delft.
- Profillidis, V. (1995). *Railway Engineering*. Avebury Technical, Hants.
- Dima, C. (2009). *TGV – Train à Grande Vitesse*. All Travel Networks, Portland.
- Esveld, C. (2001). *Modern Railway track*. Delft University of Technology, Delft.
- Bonnett, F.. (2005). *Practical railway engineering*. Imperial College Press, London.
- Oliveros Rives, F. (1980). *Tratado de ferrocarriles*. Editorial Rueda, Madrid.
- Comtois, C. (2009). *High speed trains*. Routledge, New York.
- Regina, I. (2001). *As funções da ferrovia no transporte de pessoas*. Secretaria de Transportes Metropolitanos, São Paulo.
- Hood, P. (2006). *Shinkansen – From bullet train to symbol of modern Japan*. Routledge, New York.
- Faure Bento, R. (2004). *La traccion electrica en la alta velocidad ferroviaria*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- Gonzalez Fernandez, F. (2008). *Ingenieria Ferroviaria*. Universidad Nacional de Educacion a distancia , Madrid.
- Vaz Guedes, M.(1989). *Comboios eléctricos de grande velocidade*. DEEC - FEUP, Porto.
- Lindhal, M. (2001). *Track geometry for high speed railways*. Dissertação de Mestrado, Royal Institute of Technology.
- Iwamura, N.. (2007). *A lean enterprise Approach for developing High Speed Rail in Japan and Portugal*. Dissertação de Doutoramento, Massachusetts Institute of Technology.
- Romo Urroz, E. (2007). *El trazado, en la base dele diseño*. Jornadas Tecnicas: Ingenieria para Alta Velocidad, Junho de 2007, Córdoba, Fundación Caminos de Hierro, Córdoba.
- Sanchez Doblado, M. (2007). *El desarrollo de una red ferroviária moderna*. Jornadas Tecnicas: Ingenieria para Alta Velocidad, Junho de 2007, Córdoba, Fundación Caminos de Hierro, Córdoba.
- Machado, D., Lagos, P., Lanzinha, J., Kowalczyk, R. (2008). *Infra-estruturas da rede ferroviária de alta velocidade*. Engenharia e Vida, Janeiro/2008, 44-49, Loja da Imagem, Lisboa.
- Vansteenkiste (2008). *High speed in pratice: recent achievements in Europe*. UIC world congresso n high speed rail, Amsterdam.
- RAVE (<http://www.rave.pt>). Abril de 2009.

Página pessoal Eng. Henrique Oliveira Sá (<http://caminhosferroaltavelocidade.planetaclix.pt>).
Abril de 2009.

Railway technology (<http://www.railway-technology.com>). Abril de 2009.

ANEXOS

ANEXO 1: Versão Portuguesa da Norma Europeia ENV 13803 – 1:2002

Quadro 1 – Escala D_{lim}

	I	IIa	IIb	III	IV	V
Categorias de tráfego (velocidade em km/h)	Linhas de tráfego misto $80 \leq V \leq 120$	Linhas de tráfego misto $120 < V \leq 160$	Linhas de tráfego misto $160 < V \leq 200$	Linhas de tráfego misto concebidas para velocidades de comboios de passageiros $200 < V \leq 300$	Linhas de tráfego misto com velocidades de comboios de passageiros $V \leq 230$ (ou 250) (com veículos dotados de características técnicas especiais)	Linhas de alta velocidade unicamente dedicadas a tráfego de passageiros $250 \leq V \leq 300$
Valor limite recomendado * [mm]	160	160	160	160	160	160
Valor limite máximo * [mm]	180	180	180	180	180	200
* Para evitar o risco de descarrilamento dos vagões com grande rigidez à torção em curva de pequeno raio, recomenda-se que a escala não ultrapasse o limite seguinte (ver como referência [ORE B 55/Rp 5 and 8]): $D_v = \frac{R - 50}{1,5}$ [mm]						

Quadro 2 – Insuficiência de escala limite I_{lim}

Categorias de tráfego (velocidade em km/h)		Valor limite recomendado ^a [mm]		Valor limite máximo [mm]	
		Mercadorias	Passageiros	Mercadorias	Passageiros
I – Linhas de tráfego misto $80 \leq V \leq 120$	$R < 650$ m	110	130	130	160
	$R \geq 650$ m	110	150	130	165
IIa – Linhas de tráfego misto	$120 < V \leq 160$	110	150	160 ^d	165
IIb – Linhas de tráfego misto	$160 < V \leq 200$	110	150	160 ^d	165
III – Linhas de tráfego misto concebidas para velocidades de comboios de passageiros	$200 < V \leq 250$	100	100	150 ^d	150
	$250 < V \leq 300$	80	80	130 ^e	130 ^e
IV – Linhas de tráfego misto com velocidades de comboios de passageiros $V \leq 230$ km/h (ou 250 km/h em linhas modernizadas) com veículos dotados de características técnicas especiais	$V \leq 160$	110	160 ^b	160 ^d	180 ^b
	$160 < V \leq 200$	x	140	x	160
	$200 < V \leq 230$	x	120	x	160
	$230 < V \leq 250$	x	100	x	150
V – Linhas de alta velocidade unicamente dedicadas a tráfego de passageiros	$V = 250$	x	100	x	150
	$250 \leq V \leq 300$	x	80	x	130 ^e

NOTA 1: O projectista deve procurar adoptar valores da insuficiência de escala inferiores em 20 mm ao valor limite recomendado.

NOTA 2: O quadro precedente considera a maior parte dos valores limite máximos utilizados pelas diferentes redes europeias em operação comercial, para linhas novas e para linhas existentes (tanto para aumento da velocidade da linha como para optimizar velocidades quando as mesmas vias são utilizadas por comboios de mercadorias e de passageiros). O procedimento de ensaio dos veículos do ponto de vista do seu comportamento dinâmico deve ser baseado nos valores indicados.

NOTA 3: Os valores precedentes aplicam-se aos aumentos progressivos da insuficiência de escala, apenas para velocidades superiores a 80 km/h; no caso de descontinuidades da insuficiência de escala (aplicação brusca de uma aceleração transversal) as regras específicas relativas à via desviada dos aparelhos de mudança de via (ver Parte 2) podem ser tomadas em consideração.

^a Para as vias com juntas, os valores da insuficiência de escala devem ser especificados no documento contratual.

^b Estes limites da insuficiência de escala devem ser aplicados apenas aos tipos de veículos específicos dotados de características mecânicas especiais tais como pequena massa por eixo, massas não suspensas reduzidas, baixo coeficiente de rouplesse.

^c Em vias não balastadas, para velocidades superiores a 250 km/h, pode ser utilizada uma insuficiência de escala de 150 mm.

^d Estes valores só são aplicáveis a vagões de mercadorias que apresentam características mecânicas especiais, que lhes conferem desempenhos semelhantes aos dos veículos de passageiros.

Quadro 3 – Variação da escala em função do tempo $(dD/dr)_{lim}$
(variação da escala com declive uniforme)

	I	IIa	IIb	III	IV	V
Categorias de tráfego (velocidade em km/h)	Linhas de tráfego misto $80 \leq V \leq 120$	Linhas de tráfego misto $120 < V \leq 160$	Linhas de tráfego misto $160 < V \leq 200$	Linhas de tráfego misto concebidas para velocidades de comboios de passageiros $200 < V \leq 300$	Linhas de tráfego misto com velocidades de comboios de passageiros $V \leq 230$ (ou 250) (com veículos dotados de características técnicas especiais)	Linhas de alta velocidade unicamente dedicadas a tráfego de passageiros $250 \leq V \leq 300$
Valor limite recomendado [mm/s]	50	50	50	50	50	50
Valor limite máximo [mm/s]	55	60	60	60	60	60

Quadro 3bis – Variação da escala em função do tempo $(dD/dr)_{lim}$
(variação da escala com declive variável)

	I	IIa	IIb	III	IV	V
Categorias de tráfego (velocidade em km/h)	Linhas de tráfego misto $80 \leq V \leq 120$	Linhas de tráfego misto $120 < V \leq 160$	Linhas de tráfego misto $160 < V \leq 200$	Linhas de tráfego misto concebidas para velocidades de comboios de passageiros $200 < V \leq 300$	Linhas de tráfego misto com velocidades de comboios de passageiros $V \leq 230$ (ou 250) (com veículos dotados de características técnicas especiais)	Linhas de alta velocidade unicamente dedicadas a tráfego de passageiros $250 \leq V \leq 300$
Valor limite recomendado [mm/s]	55	55	55	55	55	55
Valor limite máximo [mm/s]	70	70	70	70	70	70

NOTA 1: A escala nos elementos de transição deve variar de acordo com a lei da respectiva curvatura.

NOTA 2: Em consequência da limitada experiência com curvas de transição com declive variável, os valores do quadro são indicativos. Os valores indicados correspondem aos valores mais elevados aplicados nos países que utilizam os declives variáveis. As curvas de transição com declives variáveis garantem transições mais longas do que as que têm declives uniformes.

Quadro 4 – Variação da insuficiência de escala em função do tempo $(dI/dt)_{lim}$
(os valores seguintes aplicam-se a todas as formas de curvas de transição)

	I	IIa	IIb	III	IV	V
Categorias de tráfego (velocidade em km/h)	Linhas de tráfego misto $80 \leq V \leq 120$	Linhas de tráfego misto $120 < V \leq 160$	Linhas de tráfego misto $160 < V \leq 200$	Linhas de tráfego misto concebidas para velocidades de comboios de passageiros $200 < V \leq 300$	Linhas de tráfego misto com velocidades de comboios de passageiros $V \leq 230$ (ou 250) (com veículos dotados de características técnicas especiais)	Linhas de alta velocidade unicamente dedicadas a tráfego de passageiros $250 \leq V \leq 300$
Valor limite recomendado [mm/s]	55	55	55	50	50	50
Valor limite máximo [mm/s]	90	90	90	75	90	75

Quadro 5 – Comprimento mínimo dos elementos do traçado L_1
(curvas circulares e alinhamentos rectos)

	I	IIa	IIb	III	IV	V
Categorias de tráfego (velocidade em km/h)	Linhas de tráfego misto $80 \leq V \leq 120$	Linhas de tráfego misto $120 < V \leq 160$	Linhas de tráfego misto $160 < V \leq 200$	Linhas de tráfego misto concebidas para velocidades de comboios de passageiros $200 < V \leq 300$	Linhas de tráfego misto com velocidades de comboios de passageiros $V \leq 230$ (ou 250) (com veículos dotados de características técnicas especiais)	Linhas de alta velocidade unicamente dedicadas a tráfego de passageiros $250 \leq V \leq 300$
Valor limite recomendado ^a [m]	$\frac{V_{max}}{3}$ ^b			$\frac{V_{max}}{1,5}$		
Valor limite máximo ^a [m]	$\frac{V_{max}}{5}$ ^b			$\frac{V_{max}}{2}$		

^a Na medida do possível, recomenda-se ligar duas curvas de sentidos contrários por uma curva de transição contínua em vez de intercalar um alinhamento recto entre as duas curvas de transição. Por esta razão, neste caso, o comprimento do alinhamento recto é nulo.

^b Sem descer abaixo de 30 m. Para comprimentos menores ou traçados secantes, consultar a Parte 2 da presente Norma.

Quadro 6 – Raio das curvas verticais (R_v)_{lim}

	I	IIa	IIb	III	IV	V
Categorias de tráfego (velocidade em km/h)	Linhas de tráfego misto $80 \leq V \leq 120$	Linhas de tráfego misto $120 < V \leq 160$	Linhas de tráfego misto $160 < V \leq 200$	Linhas de tráfego misto concebidas para velocidades de comboios de passageiros $200 < V \leq 300$	Linhas de tráfego misto com velocidades de comboios de passageiros $V \leq 230$ (ou 250) (com veículos dotados de características técnicas especiais)	Linhas de alta velocidade unicamente dedicadas a tráfego de passageiros $250 \leq V \leq 300$
Valor limite recomendado [m]	$0,35 \cdot V_{\max}^2$ ^a	$0,35 \cdot V_{\max}^2$		$0,35 \cdot V_{\max}^2$	$0,35 \cdot V_{\max}^2$	$0,35 \cdot V_{\max}^2$
Valor limite máximo [m]	$0,25 \cdot V_{\max}^2$ ^c			$0,175 \cdot V_{\max}^2$ ^a	$0,25 \cdot V_{\max}^2$ ^c	$0,175 \cdot V_{\max}^2$ ^a

^a com uma tolerância +10 % numa curva convexa, +30 % numa curva côncava

^b em linhas onde os passageiros possam viajar de pé, recomenda-se que R_v seja superior a $0,77 \cdot V^2$

^c sem descer abaixo de 2000 m de raio

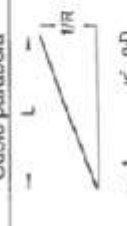
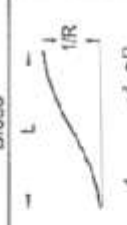
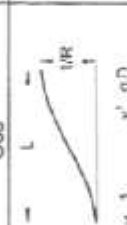
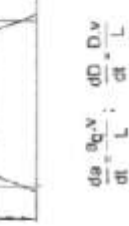
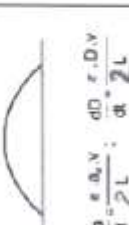
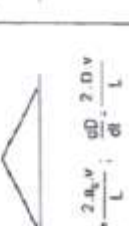
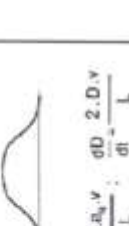
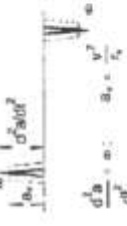
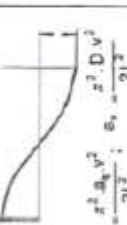
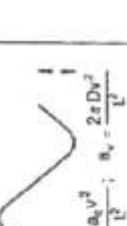
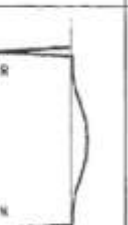
Quadro 7 – Aceleração vertical $(a_v)_{lim}$

	I	IIa	IIb	III	IV	V
Categorias de tráfego (velocidade em km/h)	Linhas de tráfego misto $80 \leq V \leq 120$	Linhas de tráfego misto $120 < V \leq 160$	Linhas de tráfego misto $160 < V \leq 200$	Linhas de tráfego misto concebidas para velocidades de comboios de passageiros $200 < V \leq 300$	Linhas de tráfego misto com velocidades de comboios de passageiros $V \leq 230$ (ou 250) (com veículos dotados de características técnicas especiais)	Linhas de alta velocidade unicamente dedicadas a tráfego de passageiros $250 \leq V \leq 300$
Valor limite recomendado [m/s ²]	0,22 ^b	0,22		0,22	0,22	0,22
Valor limite máximo [m/s ²]	0,31			0,44 *	0,31	0,44 *

^a com uma tolerância +10 % numa curva convexa, +30 % numa curva côncava

^b em linhas onde os passageiros possam viajar de pé, recomenda-se que a_v não exceda 0,1

Maximum values of transition curve (Unit length: m, Unit time: s)

	Cubic parabola	Bloss	Cos	Schramm	Klein (Sin)
Horizontal curvature K					
Non-compensated lateral acceleration in the track plane	$K = \frac{1}{R}$; $a_q = \frac{v^2}{R}$; $\frac{gD}{R}$ 1500	$K = \frac{1}{R}$; $a_q = \frac{v^2}{R}$; $\frac{gD}{R}$ 1500	$K = \frac{1}{R}$; $a_q = \frac{v^2}{R}$; $\frac{gD}{R}$ 1500	$K = \frac{1}{R}$; $a_q = \frac{v^2}{R}$; $\frac{gD}{R}$ 1500	$K = \frac{1}{R}$; $a_q = \frac{v^2}{R}$; $\frac{gD}{R}$ 1500
Cant					
Maximum rate of change of cant as function of length	$1/n_q = \frac{D}{L}$	$1/n_q = \frac{1.5D}{L}$	$1/n_q = \frac{\pi D}{L}$	$1/n_q = \frac{2D}{L}$	$1/n_q = \frac{2D}{L}$
Variation of non-compensated lateral acceleration (horiz. jerk). Rate of change of cant as function of time					
	$\frac{da}{dt} = \frac{a_q \cdot v}{L}$; $\frac{dD}{dt} = \frac{D \cdot v}{L}$	$\frac{da}{dt} = \frac{1.5 a_q \cdot v}{L}$; $\frac{dD}{dt} = \frac{1.5 D \cdot v}{L}$	$\frac{da}{dt} = \frac{\pi a_q \cdot v}{2L}$; $\frac{dD}{dt} = \frac{\pi D \cdot v}{2L}$	$\frac{da}{dt} = \frac{2 a_q \cdot v}{L}$; $\frac{dD}{dt} = \frac{2 D \cdot v}{L}$	$\frac{da}{dt} = \frac{2 a_q \cdot v}{L}$; $\frac{dD}{dt} = \frac{2 D \cdot v}{L}$
Rate of change of horizontal jerk, vertical acceleration					
	$\frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{6 a_q \cdot v^2}{L^2}$; $a_v = \frac{v^2}{L}$	$\frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{6 a_q \cdot v^2}{L^2}$; $a_v = \frac{v^2}{L}$	$\frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{\pi^2 a_q \cdot v^2}{2L^2}$; $a_v = \frac{v^2}{2L}$	$\frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{4 a_q \cdot v^2}{L^2}$; $a_v = \frac{4 D \cdot v^2}{L^2}$	$\frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{2 a_q \cdot v^2}{L^2}$; $a_v = \frac{2 D \cdot v^2}{L^2}$
Vertical jerk					
Shift f_L (m)	$f = \frac{L^2}{24R}$	$f = \frac{L^2}{40R}$	$f = \frac{L^2}{42.73R}$	$f = \frac{L^2}{43R}$	$f = \frac{L^2}{61.2R}$
Equivalent length of transition curve (f_L = f_eq)	L_eq	L_bloss = 1,29 L_eq	L_cos = 1,326 L_eq	L_schramm = 1,414 L_eq	L_klein = 1,597 L_eq
Rate of change of horizontal jerk (f_L = f_jk)	1,0	1,16	1,185	1,414	1,252
Rate of change of vertical acceleration (f_L = f_ak)	1,0	0,37	0,29	0,21	0,25

ANEXO 2: Excertos da Especificações Técnicas de Interoperabilidade

4.2.2 Bitola nominal

Linhas das categorias I, II e III

A bitola nominal deve ser de 1 435 mm.

4.2.5 Pendentes e rampas máximas

Linhas de categoria I

Na fase de projecto, o valor máximo de inclinação dos trainéis nas linhas principais poderá atingir 35 mm/m, desde que sejam respeitadas as condições seguintes:

- a inclinação do perfil longitudinal médio em 10 km deverá ser inferior ou igual a 25 mm/m
- a extensão máxima de um trainel contínuo com inclinação de 35 mm/m não deve exceder 6 000 m.

Os trainéis das linhas principais através das plataformas de passageiros não deverão ter uma inclinação superior a 2,5 mm/m.

4.2.7 Escala da via

A escala da via é a diferença máxima na altura entre o carril exterior e interior, medida ao centro da cabeça de carril (em mm). O valor depende da bitola, se este for medido em mm, mas não se este for medido em graus.

Linhas das categorias I, II e III

A escala de projecto deve ser limitada a 180 mm.

Nas vias em exploração, é admitida uma tolerância de manutenção de ± 20 mm, sem exceder uma escala máxima de 190 mm; este valor de projecto poderá ser elevado a 200 mm, no máximo, nas vias reservadas unicamente ao tráfego de passageiros.

As condições operacionais de manutenção deste parâmetro são objecto das disposições do ponto 4.5 (plano de manutenção) sobre as tolerâncias de exploração.

4.2.8.1 Insuficiência de escala em plena via e na via directa dos aparelhos de mudança de via

	Categoria de linha			
	Categoria I (a)		Categoria II	Categoria III
	1	2	3	4
Gama de velocidades (km/h)	Valor limite normal (mm)	Valor limite máximo (mm)	Valor limite máximo (mm)	Valor limite máximo (mm)
$V \leq 160$	160	180	160	180
$160 < V \leq 200$	140	165	150	165
$200 < V \leq 230$	120	165	140	165
$230 < V \leq 250$	100	150	130	150
$250 < V \leq 300$	100	130 (b)	—	—
$300 < V$	80	80	—	—

5.3.1 O carril

Linhas das categorias I, II e III

As especificações intrínsecas do componente de interoperabilidade «carril» são os seguintes:

- perfil da cabeça de carril;
- a massa linear de projecto;
- o tipo de aço.

5.3.3 Travessas

As especificações aplicáveis ao componente de interoperabilidade «travessas de betão» utilizado na via balastrada descrita no ponto 6.2.5.1 são as seguintes:

- a) a massa das travessas de betão em plena via deve ser de 220 kg, no mínimo,
- b) o comprimento mínimo das travessas em betão, em plena via, deve ser de, pelo menos, 2,25 metros.