

PEDRO HENRIQUE STECH

**PARÂMETROS DO PROJETO GEOMÉTRICO PARA TRENS DE
PASSAGEIROS DE ALTA VELOCIDADE E LONGO PERCURSO**

São Paulo

2012

PEDRO HENRIQUE STECH

**PARÂMETROS DO PROJETO GEOMÉTRICO PARA TRENS DE
PASSAGEIROS DE ALTA VELOCIDADE E LONGO PERCURSO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Ana Paula Camargo Larocca

São Paulo

2012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de fevereiro de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Stech, Pedro Henrique

Parâmetros do projeto geométrico para trens de passageiros de alta velocidade e longo percurso / P.H. Stech. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.

103 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Ferrovias 2. Infra-estrutura de transportes I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

Agradecimentos

A minha querida esposa Maria Claudia, fiel companheira e grande fonte de inspiração, por estar sempre ao meu lado com muito entusiasmo, amor e união, me incentivando para que eu consiga alcançar meus objetivos e fazer meus sonhos tornarem-se realidade.

Aos meus pais, por terem sempre me tratado com muito amor e carinho, batalhando fortemente, ao longo de toda a vida, para me ensinar a ser uma pessoa educada, honesta e empenhada, que procura agir sempre pelos caminhos do bem.

Aos meus sogros, por me acolherem na família como se fosse um filho e pelo apoio, dedicação e carinho oferecidos a mim ao longo de todos esses anos que nos conhecemos.

Aos meus familiares, pela compreensão e respeito com relação ao tempo despendido com os estudos e pelos conselhos motivacionais ao longo do curso.

Aos meus cunhados, pela paciência e idéias sugeridas para o desenvolvimento da dissertação, as quais me auxiliaram muito para dar prosseguimento ao estudo.

A Deus, por ter estado sempre ao meu lado nos bons momentos e também nos mais difíceis, me iluminando e dando a sabedoria necessária para que eu conseguisse seguir pelos caminhos corretos.

Ao amigo Luis Eduardo Russo, pelos anos de companheirismo e compartilhamento de informações ao longo de todo o curso de mestrado, tanto nas disciplinas cursadas quanto no desenvolvimento da dissertação.

Ao amigo Edson Massicano, pela amizade e por sempre ter contribuído para a pesquisa com todo seu conhecimento teórico e experiência profissional, resultando, assim, num aumento da qualidade técnica e conceitual da dissertação, bem como de meu crescimento profissional.

Ao Prof. Ettore Bottura, cuja amizade, confiança e suporte oferecido durante os últimos anos foram fundamentais para meu desenvolvimento pessoal e também profissional.

A amiga e orientadora Ana Paula C. Larocca, pelo acompanhamento e tempo investido que, juntamente à sua postura exigente e disponibilidade irrestrita, foram essenciais para o direcionamento das pesquisas da dissertação.

A Vetec Engenharia Ltda, pela oportunidade de cursar o mestrado paralelamente às minhas funções de engenheiro na empresa, possibilitando, dessa maneira, que eu pudesse me desenvolver pessoalmente e profissionalmente, através do aprimoramento técnico absorvido durante as pesquisas e disciplinas cursadas.

Ao Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e aos professores das disciplinas cursadas, por compartilharem seu conhecimento.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal direcionar a tomada de decisões para a escolha dos diferentes parâmetros que envolvem o alinhamento horizontal e vertical do projeto geométrico ferroviário de trens de alta velocidade (TAV) e de longo percurso, bem como descrever conceitos teóricos para parâmetros de segurança e conforto, baseados em normas internacionais. A pesquisa se desenvolve através de consultas em revistas especializadas, artigos, publicações, normas técnicas e livros. Pela escassez de dados em língua nacional e material bibliográfico desatualizado, as pesquisas se concentram essencialmente em material internacional. Apesar do Brasil ser um dos países em desenvolvimento com maior ascensão no cenário global, tem apresentado, nas últimas décadas, sérios problemas de infra-estrutura devido a uma distribuição desequilibrada na área de transportes, com altíssima concentração no modo rodoviário, com aeroportos e rodovias operando acima da capacidade satisfatória, além de um leque limitado de alternativas de transporte. Devido à falta de investimentos no setor ferroviário, grande parte da malha ferroviária brasileira tornou-se inoperante ou até mesmo inexistente, resultando numa enorme diminuição da mão de obra qualificada e formação acadêmica nesse ramo. Como consequência, os estudos relacionados ao projeto ferroviário também foram afetados diretamente. Nesse contexto, é importante que se resgate normas, publicações, especificações técnicas e experiências adotadas em outros países com sólidas tradições ferroviárias, de modo a incorporar em nossa formação acadêmica tais conceitos, como é um dos objetivos dessa dissertação.

Palavras-chave: Parâmetros de projeto geométrico ferroviário, infraestrutura, trem de Alta Velocidade (TAV), trem de longo percurso, sistemas de transportes e normas internacionais.

Abstract

This dissertation has as main objective to guide in taking decisions for the selection of different parameters which involve the horizontal and vertical railway geometric design of high speed (HST) and long distance trains as well as theoretical concepts for describing security parameters and comfort, based on international standards. The research is developed through consultations in specialized magazines, articles, publications, standards and technical books. Due to the scarcity of data in the national language and outdated library materials, the research focuses primarily on international material. Although Brazil is a developing country with one of the highest rises in the global scene, the country has faced in recent decades serious infrastructure problems due to an uneven distribution in the area of transport, with high concentration in the road, and airports and roads operating above satisfactory capacity, resulted by a limited range of transportation alternatives. Due to the lack of investment in the railway sector, much of the Brazilian railway system became inoperative or even nonexistent, resulting in a tremendous decrease of skilled labor and academic training in this field. As a result, studies related to the railway project have also been directly impacted. In this context, it is important to rescue standards, publications, experiences and technical specifications adopted in other countries with strong tradition in railways in order to incorporate these concepts into our academic formation, which is one of the purposes of this dissertation.

Keywords: Geometric design parameters of railway infrastructure, high speed train (HST), long-distance train, transport systems and international standards.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Justificativa	3
1.3 Metodologia	4
2. ELEMENTOS PRIMÁRIOS PARA A CONCEPÇÃO DE UM TRAÇADO FERROVIÁRIO.....	5
2.1 Parâmetros Ferroviários de Segurança e Conforto	5
2.2 Conceitos de Velocidade	7
2.1.1 Velocidade Nominal dos Trens	7
2.1.2 Velocidade Específica dos Elementos de uma Seção	7
2.1.3 Velocidade de Projeto	8
2.1.4 Velocidade de Deslocamento.....	9
2.3 Segurança	10
2.4 Conforto do passageiro	11
3. TRAÇADO EM PLANTA.....	14
3.1 Superelevação	14
3.1.1 Justificativa para a superelevação	15
3.1.2 Superelevação Teórica	16
3.1.3 Superelevação Prática	18
3.1.4 Insuficiência de Superelevação.....	18
3.1.5 Excesso de Superelevação.....	20
3.2 Curvas de Transição	22
3.3 Recomendações e Limitações do Traçado em Planta	24
3.3.1 Limitações nos valores da superelevação.....	24

3.3.1.1	Trens de alta velocidade.....	26
3.3.1.2	Trens em baixa velocidade	30
3.3.1.3	Trens parados.....	33
3.3.2	Raio mínimo das curvas circulares	36
3.3.3	Comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares.....	38
3.3.4	Comprimento mínimo das transições	41
3.3.4.1	Limitações Geométricas	41
3.3.4.2	Limitação dinâmica ou da variação da superelevação com o tempo ..	43
3.3.4.3	Limitações por razão de conforto.....	46
3.3.4.4	Comprimento mínimo da curva de transição	50
4.	TRAÇADO EM PERFIL	52
4.1	Recomendações e Limitações do Traçado em Perfil	54
4.1.1	Limitações da rampa máxima	54
4.1.2	Limitações da máxima aceleração vertical.....	57
4.1.3	Limitações para o raio vertical mínimo	60
4.1.4	Limitações das variações bruscas de aceleração	63
5.	SEÇÃO TRANSVERSAL.....	67
5.1	Bitola da Via	67
5.2	Entrevia	68
5.2.1	Via em tangente	69
5.2.2	Via em curva	69
5.2.2.1	Efeito do comprimento do veículo na entrevista para vias em curva.....	70
5.2.2.2	Efeito da superelevação na entrevista.....	71
5.2.2.3	Efeito da elasticidade transversal das suspensões na entrevista.....	72
5.2.2.4	Efeito das folgas transversais da via e do veículo na entrevista	73

5.2.3 Sobrelargura da via em curva	73
5.3 Definição do ponto de referência do greide em relação à seção.....	74
5.3.1 Análise dos critérios de definição do ponto de referência do greide	75
5.3.1.1 Implantação da via.....	75
5.3.1.2 Funcionalidade da via.....	75
5.3.1.3 Variação das características do tráfego ferroviário.....	76
5.3.1.4 Utilização habitual.....	76
6. EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL – TRENS DE ALTA VELOCIDADE	77
6.1 Panorama Internacional	79
6.2 Japão.....	80
6.3 França	83
6.4 Alemanha	86
6.5 Itália.....	90
6.6 Espanha	92
6.7 China	94
6.8 Coreia.....	95
6.9 Taiwan.....	96
6.10 Turquia	97
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros a serem estabelecidos na definição de um traçado ferroviário	6
Tabela 2.2 – Critério de conforto da SNCF a respeito da aceleração transversal admitida pelo passageiro.....	13
Tabela 3.1 – Valores da aceleração não compensada – UIC-703R	27
Tabela 3.2 – Valores da Especificação Técnica de Interoperabilidade para insuficiência de superelevação (I)	28
Tabela 3.3 – Valores da ADIF para insuficiência de superelevação e aceleração não compensada.....	28
Tabela 3.4 – Máxima insuficiência de superelevação (em mm) – ENV 13803-1 ...	29
Tabela 3.5 – Insuficiência de superelevação (I) – UIC-703R.....	30
Tabela 3.6 – Máximo excesso de superelevação (E) – N.R.V. 0-2-0.0.....	32
Tabela 3.7 – Máximo excesso de superelevação (E) – UIC-703R.....	33
Tabela 3.8 – Máxima superelevação admissível (em mm) – ENV 13803-1.....	35
Tabela 3.9 – Máxima superelevação admissível –UIC-703R.....	35
Tabela 3.10 – Raio mínimo das curvas circulares (em m) – N.R.V. 0-2-0.0	37
Tabela 3.11 – Comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares (em m) – SNCF.....	38
Tabela 3.12 – Comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares (em m) – ENV 13803-1.....	39
Tabela 3.13 – Comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares (em m) – N.R.V. 0-2-0.0	40
Tabela 3.14 – Comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares (em m) – ADIF	40
Tabela 3.15 – Máxima rampa de superelevação R_S (mm/m) – N.R.V. 0-2-0.0	42

Tabela 3.16 – Máxima rampa de superelevação R_S (mm/m) – ENV 13803-1	42
Tabela 3.17 – Máxima rampa de superelevação R_S (mm/m) – ADIF.....	43
Tabela 3.18 – Máxima variação da superelevação com o tempo d_z/d_t (mm/s) – ADIF	44
Tabela 3.19 – Máxima variação da superelevação com o tempo d_z/d_t (mm/s) – ENV 13803-1.....	44
Tabela 3.20 – Máxima variação da superelevação com o tempo d_z/d_t (mm/s) – N.R.V. 0-2-0.0	45
Tabela 3.21 – Máxima variação da superelevação com o tempo d_z/d_t (mm/s) – UIC-703R	45
Tabela 3.22 – Máxima variação aceleração não compensada d_{anc}/d_t (m/s ³) – N.R.V. 0-2-0.0	46
Tabela 3.23 – Máxima variação aceleração não compensada d_{anc}/d_t (m/s ³) – ADIF	47
Tabela 3.24 – Máxima variação aceleração não compensada d_{anc}/d_t (m/s ³) – UIC-703R.....	47
Tabela 3.25 – Máxima variação da insuficiência de superelevação d_l/d_t (mm/s) – N.R.V. 0-2-0.0	48
Tabela 3.26 – Máxima variação da insuficiência de superelevação d_l/d_t (mm/s) – ADIF	48
Tabela 3.27 – Máxima variação da insuficiência de superelevação d_l/d_t (mm/s) – ENV 13803-1.....	49
Tabela 3.28 – Máxima variação da insuficiência de superelevação d_l/d_t (mm/s) – UIC-703R	50
Tabela 4.1 – Rampa máxima (‰) – N.R.V. 0-2-0.0	56
Tabela 4.2 – Rampa máxima (‰) – AREMA	56
Tabela 4.3 – Rampa máxima (‰) – ADIF	57

Tabela 4.4 – Máxima aceleração vertical (m/s ²) – SNCF.....	57
Tabela 4.5 – Máxima Aceleração Vertical (m/s ²) – N.R.V. 0-2-0.0.....	58
Tabela 4.6 – Máxima aceleração vertical (m/s ²) – AREMA.....	58
Tabela 4.7 – Máxima aceleração vertical (m/s ²) – ENV 13803-1	59
Tabela 4.8 – Máxima Aceleração Vertical (m/s ²) – ADIF	60
Tabela 4.9 – Máxima Aceleração Vertical (m/s ²) – UIC-703R.....	60
Tabela 4.10 – Raio mínimo vertical (m) – N.R.V. 0-2-0.0.....	61
Tabela 4.11 – Raio mínimo vertical (m) – ENV 13803-1	62
Tabela 4.12 – Raio mínimo vertical (m) – SNCF.....	63
Tabela 4.13 – Raio mínimo vertical (m) – AREMA.....	63
Tabela 4.14 – Comprimento mínimo da tangente vertical (m) – N.R.V. 0-2-0.0.....	65
Tabela 4.15 – Comprimento mínimo de curvas e tangentes verticais (m) – ADIF	66
Tabela 5.1 – Sobrelargura (m) – N.R.V. 7-3-2-0	73
Tabela 6.1 – Impacto da adoção da rampa máxima nos custos de implantação ...	78
Tabela 6.2 – Sistemas de alta velocidade em operação, construção e planejamento em 2009.....	80
Tabela 6.3 – Parâmetros geométricos da linha Tóquio - Osaka	81
Tabela 6.4 – Parâmetros geométricos da linha Osaka - Okayama.....	82
Tabela 6.5 – Parâmetros geométricos da linha Paris - Lyon.....	85
Tabela 6.6 – Parâmetros geométricos das linhas de alta velocidade da França ...	85
Tabela 6.7 – Parâmetros geométricos das linhas TGV-Este e TGV-Mediterrâneo	86
Tabela 6.8 – Parâmetros geométricos das primeiras linhas de alta velocidade da Alemanha	87
Tabela 6.9 – Linhas de alta velocidade alemãs abertas ao serviço comercial no período de 2000 - 2008	87

Tabela 6.10 – Parâmetros geométricos da linha Colônia - Frankfurt.....	88
Tabela 6.11 – Parâmetros geométricos da linha Roma - Florença	91
Tabela 6.12 – Parâmetros geométricos para novas linhas de alta velocidade na Itália em 1986.....	91
Tabela 6.13 – Parâmetros geométricos para a linha Madrid - Sevilha.....	92
Tabela 6.14 – Parâmetros geométricos para linhas de alta velocidade na Espanha no período 2003-2008	93
Tabela 6.15 – Parâmetros geométricos para linhas de alta velocidade na China..	95
Tabela 6.16 – Parâmetros geométricos na linha Seúl - Pusan	96
Tabela 6.17 – Parâmetros geométricos na linha Tapei - Kaohsiung.....	96
Tabela 6.18 – Parâmetros geométricos na linha de alta velocidade Ancara – Istambul.....	97

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Diagrama V x t para determinação da Vm.....	9
Figura 3.1 – Forças atuantes no carro ferroviário.....	17
Figura 3.2 – Determinação da insuficiência de superelevação (I)	19
Figura 3.3 – Determinação do excesso de superelevação (E)	21
Figura 3.4 – Sistema amortecedor do veículo ferroviário parado e em movimento	25
Figura 5.1 – Bitola Ferroviária	67
Figura 5.2 – Entrelaço ferroviária para via dupla	69
Figura 5.3 – Diminuição da entrelaço efetiva nas curvas	70
Figura 5.4 – Esquema do princípio de cálculo da sobrelargura devido ao efeito da curva.....	71
Figura 5.5 – Diminuição da entrelaço efetiva devido à superelevação	72

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ADIF: Administrador de Infraestructuras Ferro Viarias;

AREMA: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association;

AVE: Alta Velocidad Española;

BNDES: Banco Nacional do Desenvolvimento;

CEN: European Committee for Standardization;

DB: Deutsch Bahn;

ENV: European Standard;

ETI: Especificación técnica de interoperabilidad;

FNJ: Ferrovía Nacional do Japão;

FRA: Federal Railroad Administration

GIF: Gestor de Infraestructuras Ferroviárias;

ICE: InterCity Express;

LGV: Ligne à Grande Vitesse;

N.R.V: Normativa Renfe Vía;

RENFE: Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles;

RFI: Rete Ferroviaria Italiana;

SNCF: Société Nationale des Chemins de fer Français;

TAV: Trem de Alta Velocidade;

TGV: Train à Grande Vitesse;

TSI: Especificação Técnica de Interoperabilidade do sistema ferroviário de alta velocidade Trans-Europeu;

UIC: International Union of Railways.

1. INTRODUÇÃO

A ferrovia se destaca como um dos principais meios de transporte e locomoção terrestre em todo o mundo seja para cargas ou passageiros. Sua utilização, tanto no âmbito urbano quanto na ligação de cidades, estados, países e até continentes, permite a realização de diversas atividades direta e indiretamente relacionadas ao desenvolvimento de uma sociedade ou nação.

A necessidade do transporte em massa e com rapidez apresenta-se desde o início do século XIX, a partir da Revolução Industrial que se processava na Europa, com o propósito de aprimorar a forma de se transportar mercadorias, uma vez que havia grande aumento do volume de produção. É, principalmente, com essa mesma finalidade inicial que a ferrovia vem atuando até os dias de hoje nos deslocamentos com grande volume de pessoas e insumos.

O avanço tecnológico permitiu a inovação dos equipamentos e a utilização de novas fontes de energia para o funcionamento das máquinas, mantendo-se apenas a idéia original do deslocamento sobre trilhos permanentemente fixados em um traçado, com o transporte feito em compartimentos denominados vagões. Tais avanços surgiram, dentre outros motivos, por consequência da necessidade do aumento da velocidade no deslocamento entre as regiões, bem como pela preocupação crescente com a qualidade, a segurança e o bem estar dos usuários.

Na atual era da globalização, em que a agilidade na realização dos serviços e a rapidez na locomoção das pessoas são fatores determinantes para o desenvolvimento, torna-se importante a aplicação de tecnologias que associem um sistema de alta velocidade com qualidade e segurança. Sendo assim, o setor de infra-estrutura de transportes foca, cada vez mais, no investimento de sistemas modernos capazes de atender as necessidades atuais com grande eficiência, como é o caso dos trens de alta velocidade e longo percurso, os quais são temas de estudo dessa dissertação.

Os trens de alta velocidade vêm sendo utilizados intensamente em diferentes regiões do mundo com elevado potencial de desenvolvimento, tais como Japão,

China, Coréia e diversos países na Europa, dentre os quais se podem citar, principalmente, França, Alemanha, Itália e Espanha. Entende-se, logo, que a aplicação de modernas tecnologias nos meios de transportes, como é o caso do TAV, é de fundamental importância para a continuidade do desenvolvimento do país perante o resto do mundo.

Apesar do Brasil ser um dos países em desenvolvimento com maior ascensão no cenário global, tem-se apresentado, nas últimas décadas, sérios problemas de infra-estrutura devido a uma distribuição desequilibrada na área de transportes, com altíssima concentração no modo rodoviário, com aeroportos e rodovias operando acima da capacidade satisfatória, além de um leque limitado de alternativas de transporte. Devido à falta de investimentos no setor ferroviário, grande parte da malha ferroviária brasileira tornou-se inoperante ou até mesmo inexistente, resultando numa enorme diminuição da mão de obra qualificada e formação acadêmica nesse ramo. Como consequência, os estudos relacionados ao projeto ferroviário também foram afetados diretamente. Nesse contexto, é importante que se resgate normas, publicações, especificações técnicas e experiências adotadas em outros países com sólidas tradições ferroviárias, de modo a incorporar em nossa formação acadêmica tais conceitos, como é um dos objetivos desta dissertação.

Sendo assim, um estudo que reúna diversas informações acerca dos parâmetros de projeto geométrico para trens de alta velocidade e longo percurso, além de contribuir para melhora do conhecimento e aumento do interesse sobre esse assunto no Brasil, poderá também ser utilizado como referência bibliográfica, visto a pouca disponibilidade de material em linguagem nacional.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é direcionar a tomada de decisões para a escolha dos diferentes parâmetros que envolvem o alinhamento horizontal e vertical do projeto geométrico ferroviário de trens de alta velocidade (TAV) e longo percurso, bem como descrever conceitos teóricos para parâmetros de segurança e conforto, baseados em normas internacionais.

Secundariamente, a pesquisa busca resgatar os estudos relacionados ao projeto ferroviário no Brasil, visto os poucos estudos realizados no país durante as últimas décadas. Com isso, ao final da dissertação, espera-se fornecer uma base de conceito teórico acerca dos parâmetros de projeto geométrico, associado a normas ferroviárias já consolidadas em outros lugares do mundo.

Por último, objetivando demonstrar os parâmetros geométricos mais comumente utilizados em ferrovias de alta velocidade e longo percurso, será apresentado um resumo acerca da experiência internacional de diversos países do mundo.

1.2 JUSTIFICATIVA

A motivação para a escolha do tema está relacionada à possível implantação do TAV no Brasil, prevendo uma ligação entre as cidades de Campinas, São Paulo e Rio de Janeiro, as quais compõem um dos mais importantes eixos econômicos do país. Outro motivo se dá pela escassez de materiais bibliográficos atualizados referentes ao transporte ferroviário, sendo este um importante recurso para o desenvolvimento do país.

Na Europa, continente onde se localizam grande parte dos países mais desenvolvidos no mundo, o transporte ferroviário é amplamente difundido, ligando muitas cidades inclusive de diferentes países, como é o caso, por exemplo, de Paris, na França e Londres, na Inglaterra. Já no Brasil, a ligação entre regiões com elevado fluxo de pessoas, como é o caso do eixo São Paulo – Rio de Janeiro,

citado anteriormente, não conta com o transporte ferroviário, sendo o deslocamento de pessoas realizado, basicamente, por automóveis, ônibus e aviões. Por isso, a utilização do modal ferroviário para ligação dessas cidades seria uma alternativa de fundamental importância para alívio de rodovias e aeroportos, visto o alto grau de saturação desses modais.

No caso do TAV, além de trazer novas tecnologias para o país, tornar-se-ia também um atrativo turístico adicional. Além disso, do ponto de vista do meio ambiente, é importante dizer que, a utilização de um sistema moderno como o TAV, conta com vantagens ambientais perante os demais modais, devido a não emissão de poluentes no ar e a menor utilização do solo, quando comparado ao modal rodoviário.

Desta maneira, evidencia-se que é extremamente positivo que haja um material atualizado, em linguagem nacional, que reúna os principais parâmetros de projeto geométrico para trens de alta velocidade e longo percurso, baseados em materiais internacionais com sólidas tradições ferroviárias.

1.3 METODOLOGIA

O desenvolvimento desta dissertação se concentra essencialmente na pesquisa de parâmetros de projeto geométrico ferroviários de trens de alta velocidade e longos percursos já citados em normas, livros, artigos, publicações e especificações técnicas adotadas em outros países com sólidas tradições ferroviárias.

Adicionalmente, para um direcionamento apropriado das linhas de pesquisa e da coleta de material bibliográfico, um fator de fundamental importância no desenvolvimento da dissertação se estabelece a partir do contato com experientes profissionais da área de engenharia ferroviária.

2. ELEMENTOS PRIMÁRIOS PARA A CONCEPÇÃO DE UM TRAÇADO FERROVIÁRIO

A definição do traçado de uma via férrea é uma fase crucial para os projetos de infra-estrutura, pois a maior parte das decisões tomadas nesta fase terá importantes repercussões nos projetos, seja para infra-estruturas novas ou adaptadas. Tanto fatores técnicos e ambientais, quanto os custos de implantação e manutenção da ferrovia já devem ser levados em conta na definição do traçado.

Uma característica básica do modo de transporte ferroviário é a rigidez da trajetória durante a circulação de uma composição ferroviária, se diferenciando completamente do modo rodoviário. Enquanto que, no modo rodoviário, os motoristas têm liberdade para modificação da trajetória de seu veículo e alternância da velocidade de acordo com o cenário e o nível de tráfego, na ferrovia é impossível pensar que cada maquinista possa modificar seu traçado e adaptar a velocidade do trem de acordo com a sua percepção de insegurança ou conforto.

Na seqüência da dissertação, serão apresentados alguns dos principais conceitos e parâmetros para a adequada definição do traçado ferroviário, do ponto de vista da segurança e do conforto dos passageiros.

2.1 PARÂMETROS FERROVIÁRIOS DE SEGURANÇA E CONFORTO

O traçado de uma linha ferroviária é definido por seu eixo, com projeção nos planos horizontal (traçado em planta) e vertical (traçado em greide). De maneira geral, os parâmetros necessários para a definição desse traçado são limitados pelas exigências dos critérios de segurança, conforto do passageiro e conservação da via, tais como se pode observar na tabela 2.1 a seguir:

Tabela 2.1 – Parâmetros a serem estabelecidos na definição de um traçado ferroviário

Parâmetros que afetam a Segurança	Parâmetros que afetam o Conforto
- Raio horizontal	- Raio de curva vertical
- Superelevação	- Comprimento das curvas com raio constante
- Insuficiência de superelevação	- Variação da superelevação em função do tempo
- Aceleração lateral não-compensada e no plano de via	- Variação da insuficiência de superelevação em função do tempo
- Variação da superelevação em função do comprimento	
- Velocidade	

Fonte: PITA (2006)

A utilização de valores máximos ou mínimos leva a uma redução do nível de conforto dos passageiros, podendo também gerar custos de manutenção da via mais elevados. Por isso, quando se projeta o traçado de uma nova linha ferroviária utilizando os valores limites recomendados e a velocidade máxima não pode ser alcançada em certas seções da linha devido a custos proibitivos, então se permite utilizar valores limites máximos ou mínimos definidos em norma. No entanto, deve-se fazer o possível para que no projeto seja utilizado o mínimo de valores que extrapolem os limites recomendados.

Algumas normas estabelecem um valor limite excepcional, o qual é mais desfavorável que o valor limite normal e que somente deve ser utilizado em caso de circunstâncias excepcionais ao longo do traçado. Nesse caso, denomina-se margem excepcional de um parâmetro a diferença entre os valores limite excepcional e limite normal.

2.2 CONCEITOS DE VELOCIDADE

O projeto do traçado de uma linha ferroviária está intrinsecamente ligado a velocidade de circulação dos trens. Sendo assim, é necessário esclarecer alguns conceitos dos diferentes tipos de velocidade empregados num projeto de ferrovias.

2.1.1 Velocidade Nominal dos Trens

A velocidade nominal de um trem é a máxima que se pode desenvolver nas condições mais favoráveis do traçado. Seu valor depende de diversos condicionantes, sendo os principais o tipo de vagões que constituem o trem, a natureza do trem (carga ou passageiros) e a classe da via. Certos veículos ferroviários admitem maior tolerância nas curvas, então, por consequência, a velocidade máxima numa mesma curva é diferente de um trem para outro tipo de trem, com diferentes sensações da máxima aceleração não compensada (PITA, 2010).

Desta forma, ao se projetar um traçado de uma linha ferroviária deve-se conhecer os tipos de trem que circularão na via. Para os trens com maior velocidade nominal deve-se limitar a insuficiência de superelevação, enquanto que para os trens com menor velocidade nominal será necessário limitar o excesso de superelevação, como será visto mais adiante.

2.1.2 Velocidade Específica dos Elementos de uma Seção

A velocidade específica em uma seção do traçado pode ser fixada como máxima ou mínima, dependendo do cenário encontrado.

No caso da velocidade específica máxima de um elemento do traçado, esta é a máxima que se pode circular nesse elemento com determinadas condições de segurança e conforto, de maneira que essa velocidade seja a mais uniforme

possível nos elementos de um tramo. Assim, consegue-se evitar que a velocidade máxima alcançada em um elemento do traçado seja prejudicada pelo elemento posterior do traçado, como, por exemplo, no caso de uma curva com raio grande situada junto a outra de raio pequeno, onde se terá uma velocidade muito inferior comparada a uma situação de curvas com raios parecidos (PITA, 2010).

Já a velocidade específica mínima deve ser fixada para que se possa circular com um excesso de superelevação admissível, garantindo condições de segurança e conforto adequadas nos trens lentos (PITA, 2010).

2.1.3 Velocidade de Projeto

A velocidade de projeto permite definir as características mínimas do traçado de maneira que as condições de segurança e conforto sejam adequadas. Para isso, ao se projetar o traçado de um tramo ferroviário é necessário conhecer as velocidades máximas e mínimas de projeto.

A velocidade máxima de projeto deve ser menor ou igual ao menor valor da velocidade específica máxima dos elementos de um tramo. Tendo que o traçado deve se adaptar ao relevo do terreno, quanto maior for a velocidade máxima de projeto maior será o impacto sobre o meio ambiente e os custos de construção e da infra-estrutura. Portanto, em lugares com relevo acentuado estes fatores podem obrigar a limitar a velocidade máxima de projeto. Além disso, é necessário se ter em conta que caso a velocidade nominal do trem seja superior a máxima velocidade de projeto, o trem terá a sua velocidade limitada nesse tramo (PITA, 2010).

Já a velocidade mínima de projeto deve ser maior ou igual à maior velocidade específica mínima dos elementos do tramo. Os trens cuja velocidade nominal seja inferior a velocidade mínima de projeto não poderão circular na via (PITA, 2010).

2.1.4 Velocidade de Deslocamento

A chamada velocidade de deslocamento é a velocidade média de uma composição ferroviária ao percorrer um determinado trajeto, sem considerar as paradas realizadas. No caso de um traçado sinuoso, com curvas freqüentes e raios pequenos, não é fácil se conseguir velocidades médias interessantes, já que, mesmo se aumentando sensivelmente a velocidade nos trechos em tangente, acaba se perdendo muito tempo nos trechos mais sinuosos (RIVES, PITA, PUENTE, 2007).

Supondo uma via com seções de comprimento " L_i " (m) e velocidades de deslocamento nessas seções " V_i " (m/s), é possível obter a aceleração obtida (m/s^2) em cada trecho através do tempo de viagem " t_i " (s) para cada uma dessas seções, conforme pode ser observado no diagrama da figura 1.1 abaixo:

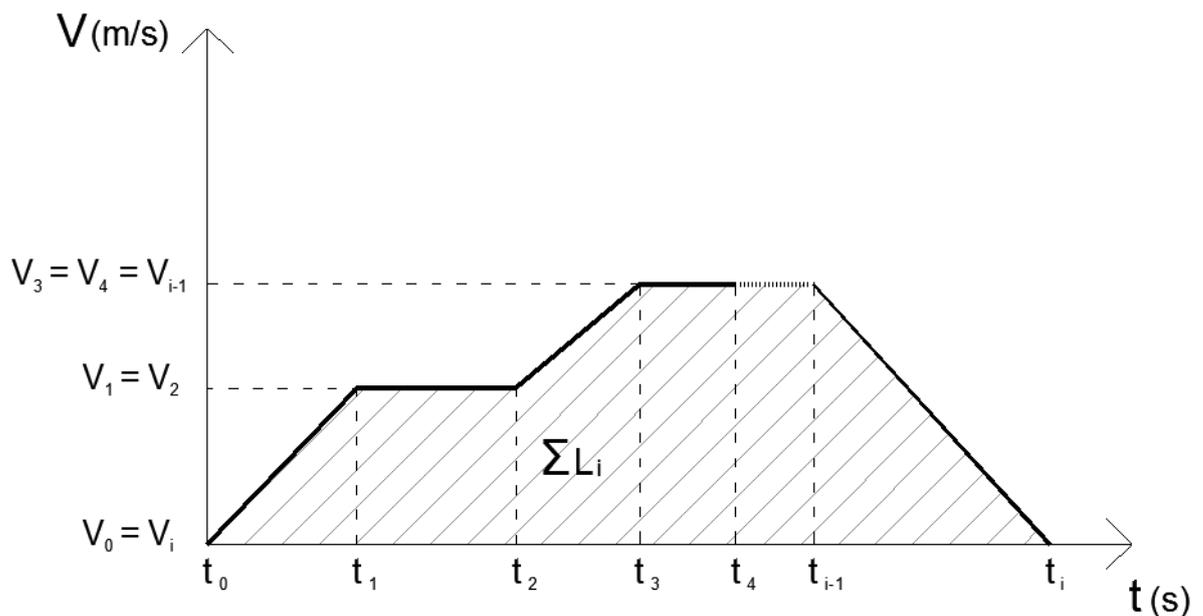


Figura 1.1 – Diagrama $V \times t$ para determinação da V_m

Como a área do gráfico representa a somatória das distâncias percorridas pela composição ferroviária em cada trecho, é possível definir a velocidade média " V_m ", através da equação expressa na equação (1) a seguir:

$$V_m = \frac{\sum_{i=0}^i L_i}{t_{total}} = \frac{\sum_{i=0}^i \left(V_{i-1} \times (t_i - t_{i-1}) + \left(\frac{(V_i - V_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \times (t_i - t_{i-1})^2 \right) \right)}{t_{total}} \quad (1)$$

Portanto, a velocidade de deslocamento resultante é a média harmônica, que está mais próxima do valor da velocidade mínima do que da máxima para seções de mesma extensão. Com isso, um pequeno aumento da velocidade na seção mais lenta pode resultar numa melhora do tempo de viagem semelhante a um considerável aumento de velocidade no trecho mais rápido.

2.3 SEGURANÇA

O projeto de um traçado ferroviário deve levar em conta que a circulação das composições ferroviárias seja realizada em condições de segurança ao longo de todo o percurso. Para isso, os dois principais aspectos a serem considerados, do ponto de vista do traçado, estão apresentados a seguir (PITA, 2006):

- **Segurança ao tombamento nas curvas:** os parâmetros estabelecidos para garantir o conforto dos passageiros, vistos mais adiante, impedem que os esforços desestabilizadores alcancem os valores para o tombamento da composição ferroviária, como um amplo coeficiente de segurança.
- **Segurança contra o descarrilamento:** o fator condicionante para que haja o descarrilamento da composição ferroviária são as irregularidades existentes na via. Por isso, os trabalhos de conservação da via são essenciais para evitar o descarrilamento, sendo o efeito do traçado, desde que dentro das normas, menor para a possibilidade desse tipo de acidente.

2.4 CONFORTO DO PASSAGEIRO

Um fator determinante para que se consiga definir o traçado da via é proporcionar uma sensação de conforto para os passageiros no mínimo razoável. As acelerações a que os passageiros de composições ferroviárias estão submetidos durante uma viagem são resultados das somas das seguintes acelerações (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

- 1) Acelerações não compensadas produzidas pela insuficiência ou excesso de superelevação nas curvas;
- 2) As características próprias da via e as pequenas irregularidades existentes no nivelamento e alinhamento da via, em conjunto com as características estruturais da via e movimentos de balanço associados com a passagem do trem, produzem no passageiro uma faixa contínua de vibrações, chamadas mini-acelerações, as quais possuem caráter aleatório.

Tomando por base as considerações anteriores, pode-se obter a equação (2) abaixo, a qual representa a aceleração suportada pelo passageiro (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

$$\alpha_{passageiro} = \alpha_{nc,passageiro} + \alpha_{defeitos\ existentes\ na\ via} \quad (2)$$

onde " $\alpha_{passageiro}$ " é a aceleração suportada pelo passageiro (m/s^2); " $\alpha_{nc,passageiro}$ " é a aceleração não compensada que atinge o passageiro (m/s^2); " $\alpha_{defeitos\ existentes\ na\ via}$ " é a aceleração gerada devido às irregularidades e defeitos na via (m/s^2).

O valor admissível para a aceleração suportada pelo passageiro " $\alpha_{passageiro}$ " depende das seguintes condições (MANTARAS, RODRIGUES, 2003):

- **Comprimento do percurso:** quanto maior for o tempo de viagem, maior será o cansaço sentido pelo passageiro devido à fadiga da viagem;
- **Resistência dos passageiros:** é necessário levar em conta a capacidade dos passageiros menos tolerantes;
- **Variação da aceleração não compensada com o tempo:** uma via com muitas mudanças de curvatura e alinhamento causará maior cansaço no viajante, resultando em menores acelerações admissíveis.

Na medida em que as irregularidades da via são maiores, a tolerância dos passageiros frente às acelerações não compensadas será menor. No caso do passageiro estar sentado, as acelerações sentidas pelo mesmo são essencialmente aleatórias. Já se o passageiro estiver em pé, andando pelo corredor, por exemplo, os valores das acelerações geradas pelas mudanças de inclinação vertical e pela força centrífuga não compensada gerada no movimento horizontal, juntamente com a velocidade com que essas acelerações são aplicadas, criam uma impressão desagradável, a qual deve ser a mais restrita possível (PITA, 2006).

As acelerações na direção vertical e no plano horizontal produzem efeitos diferentes sobre os passageiros. No primeiro caso, se admitem acelerações muito menores que no plano horizontal, já que as acelerações verticais contínuas ou com baixo nível de frequência podem causar náuseas rapidamente, sendo que a sensação desagradável é maior quando a aceleração é direcionada para cima do que para baixo. Já no segundo caso, os problemas de equilíbrio influenciam mais, porém suportam as acelerações com maior facilidade (PITA, 2006).

Na tabela 2.2 a seguir, estão apresentados os critérios de conforto da SNCF (Société Nationale des Chemins de fer Français) a respeito da aceleração transversal admitida pelo passageiro:

Tabela 2.2 – Critério de conforto da SNCF a respeito da aceleração transversal admitida pelo passageiro

Nível de Conforto	Aceleração transversal sobre o passageiro $\alpha_{nc,passageiro}$ (m/s ²)		Variação da aceleração transversal com o tempo sobre o passageiro $d\alpha_{nc,passageiro}/dt$ (m/s ³)
	Sentado	Em pé	
Muito bom	1,00	0,85	0,30
Bom	1,20	1,00	0,45
Aceitável	1,40	1,20	0,70
Aceitável Excepcionalmente	1,50	1,40	0,85

Fonte: ALIAS (1984)

3. TRAÇADO EM PLANTA

O traçado em planta exerce grande importância em um projeto ferroviário, já que suas características geométricas estabelecem os limites de velocidade de circulação dos veículos.

No traçado ferroviário, assim como no traçado rodoviário, existe uma sucessão de alinhamentos retos, denominados tangentes, concordados por curvas horizontais, entre as quais se encontram as curvas circulares e as de transição. No caso da primeira, o valor do raio da curva é constante ao longo de todo seu desenvolvimento, enquanto que, na segunda, existe uma mudança gradual de um raio infinito para um raio finito de uma curva circular. As curvas de transição empregadas no traçado ferroviário em planta geralmente são as clotóides, em que a variação do raio de curvatura é uniforme em toda a sua extensão.

Nos projetos ferroviários, o traçado em planta é definido por um eixo, o qual está associado a um ponto da seção transversal. No caso de projetos de via singela, o eixo do traçado em planta costuma coincidir com o eixo da via, porém, quando existem duas vias, o eixo do traçado é comum para ambas as vias, coincidindo com o eixo intermediário de ambas, ou seja, o eixo da entrevia.

Na definição de um traçado ferroviário é muito importante que exista uma relação de compatibilidade entre diversos parâmetros que afetam a segurança e o conforto do passageiro, como a velocidade, o raio, a superelevação, a aceleração não compensada e o comprimento da curva de transição. A relação entre esses parâmetros será apresentada na seqüência da dissertação.

3.1 SUPERELEVAÇÃO

A superelevação é a diferença máxima entre a cota dos trilhos exterior e interior em um plano normal ao eixo da via, fornecido mediante elevação do trilho exterior sobre o inferior, com este mantendo o seu nível original.

Para a boa compreensão da superelevação e da sua importância para o traçado ferroviário é necessário conhecer as razões para a sua definição, bem como a diferença entre a superelevação teórica e real.

3.1.1 Justificativa para a superelevação

Se uma composição ferroviária percorrer a uma velocidade “V” descrevendo uma trajetória circular de raio “R”, ela será submetida a uma força centrífuga de valor “F”, dirigida ao exterior da curva, perpendicular ao eixo da via e aplicada ao centro de gravidade do veículo, de acordo com a equação (3) a seguir (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

$$F = \frac{P}{g} \times \frac{V^2}{R} \quad (3)$$

onde “P” é o peso do veículo em kgf; “g” é a aceleração da gravidade em m/s²; “V” é a velocidade em m/s, “R” é o raio da curva circular em m; “F” é a força centrífuga em kgf.

Considerando H a altura do centro de gravidade até o plano dos trilhos, a força “F” cria um momento “F” x “H”, o qual acaba produzindo alguns efeitos desfavoráveis sobre o material rodante, sobre a via e sobre passageiros e cargas. No caso do material rodante, durante a entrada e a saída dos trens nas curvas são produzidos efeitos transversais devido à mudança de direção do trem, que associados aos choques da roda contra o trilho e a repetição contínua de movimentos, podem originar descarrilamento do trem e até tombamento caso a velocidade seja muito elevada. Já na via, esse momento pode gerar um trabalho excessivo da superestrutura ferroviária, ocasionando desgastes desiguais entre os trilhos e rachaduras transversais nos trilhos. Quanto aos passageiros e cargas, o momento excessivo pode implicar numa redução da sensação de conforto para os

passageiros e aumentar as chances de movimentação das cargas transportadas (STOPATTO, 1987).

Para evitar estes efeitos desfavoráveis nas curvas, mantém-se o trilho interno à curva no nível original em relação à tangente, e inclina-se transversalmente o trilho externo, de forma gradual, de maneira que as resultantes das forças que atuam sobre o veículo fiquem perpendiculares ao plano da via, anulando qualquer aceleração lateral perturbadora à circulação do trem.

A superelevação pode ser expressa por duas formas diferentes, uma a partir da medição, em milímetros, da diferença de cota “z” entre o trilho inferior e exterior, e a outra a partir da medição, em porcentagem, da inclinação transversal da via “p”. A relação para se obter a superelevação a partir da inclinação transversal está expressa na equação (4) abaixo (MANTARAS; RODRIGUES,2003):

$$z = 10 \times a \times p \quad (4)$$

onde, “z” é a superelevação expressa em mm, “a” é a distância entre o eixo dos trilhos no plano horizontal em m; “p” é a inclinação transversal em %.

3.1.2 Superelevação Teórica

Para calcular a superelevação “z” necessária para equilibrar a força centrífuga de um trem percorrendo uma curva de raio R a uma velocidade V, se estabelece a condição de que a resultante das forças na direção transversal à via seja nula. Tendo em conta que o efeito da força de atrito pode ser considerado desprezível devido ao baixo valor em relação a força centrífuga F_c , observa-se, pela Figura 3.1, que:

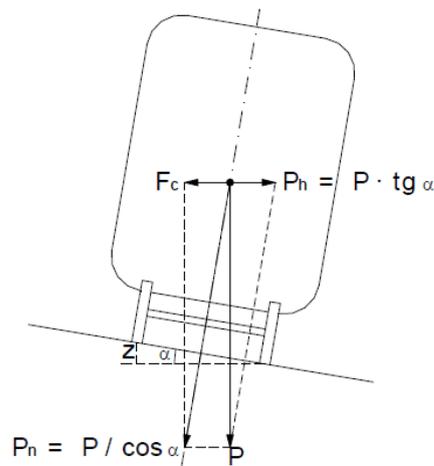


Figura 3.1 – Forças atuantes no carro ferroviário

Sabendo que a somatória das forças horizontais é nula, tem-se que:

$$\sum F_h = 0 \rightarrow F_c - P \times tg\alpha = 0 \rightarrow \frac{P}{g} \times \frac{V^2}{R} = P \times tg\alpha$$

Da Figura 3.1, se deduz que a relação existente entre a superelevação “z” e a distância entre os eixos dos trilhos no plano horizontal “a”, é dada por:

$$\alpha \cong tg \alpha \cong sen\alpha = \frac{z}{a}$$

Portanto, a fórmula teórica que proporciona a superelevação pode ser representada pela equação (5) a seguir (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

$$\frac{P}{g} \times \frac{V^2}{R} = P \times \frac{z}{a} \rightarrow z = \frac{a}{g} \times \frac{V^2}{R} \quad (5)$$

onde “P” é o peso do veículo (kgf); “g” é a aceleração da gravidade (m/s²); “V” é a velocidade (m/s); “R” é o raio da curva circular (m); “z” é a superelevação (mm), “a” é a distância entre os eixos dos trilhos (mm).

3.1.3 Superelevação Prática

A superelevação prática está relacionada com a comodidade, suavidade de rolamento e segurança do tráfego. O valor dessa superelevação necessário para compensar a força centrífuga de um trem em uma curva é função da velocidade. Desta forma, dependendo da velocidade do trem, sempre haverá uma superelevação que o equilibre. Nos trens de menor velocidade admite-se uma tolerância de superelevação maior que a teórica, enquanto que, para os trens mais velozes, tolera-se uma superelevação menor que a teórica (STOPATTO, 1987).

Em uma situação de tráfego heterogêneo, em que circulam trens com velocidades diferentes, a superelevação estabelecida em uma curva não pode se ajustar ao valor teórico necessário para cada trem. Com isso, podem surgir os casos de insuficiência ou excesso de superelevação, como será visto na seqüência da dissertação.

3.1.4 Insuficiência de Superelevação

A insuficiência de superelevação corresponde à situação de um trem circulando em uma curva com velocidade maior que a de equilíbrio para uma superelevação “z”, sendo equilibrada a partir do contato entre os frisos laterais das rodas e o trilho externo da curva. Nesse caso, aparece uma aceleração transversal não compensada (α_{nc}), dirigida ao exterior da curva, cujo valor se obtém a partir do equilíbrio das forças na direção transversal à via, de acordo com a equação (6) a seguir (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

$$\sum F_h = 0 \rightarrow F_c - P \times tg\alpha + m \times \alpha_{nc} = 0$$

$$\alpha_{nc} = \frac{V^2}{R} - g \times \frac{z}{a} \quad (6)$$

onde “ α_{nc} ” é a aceleração não compensada (m/s^2); “ g ” é a aceleração da gravidade (m/s^2); “ V ” é a velocidade (m/s); “ R ” é o raio da curva circular (m); “ z ” é a superelevação (mm), “ a ” é a distância entre os eixos dos trilhos (mm).

Define-se insuficiência de superelevação como a diferença entre a superelevação teórica que deveria haver para que a aceleração não compensada fosse nula e a superelevação prática, conforme mostra a equação (7) e a figura 3.2 a seguir (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

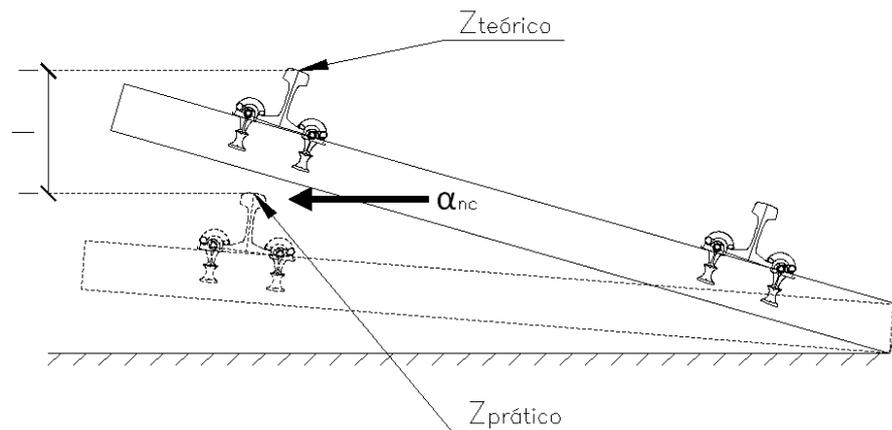


Figura 3.2 – Determinação da insuficiência de superelevação (I)

$$I = z_{teórico} - z_{prático}$$

$$I = \frac{a}{g} \times \left(\frac{V^2}{R} \right) - z_{prático} = \frac{a}{g} \times \left(\frac{V^2}{R} - g \times \frac{z_{prático}}{a} \right)$$

$$I = \frac{a}{g} \times \alpha_{nc} \quad (7)$$

onde “ α_{nc} ” é a aceleração não compensada (m/s^2); “ g ” é a aceleração da gravidade (m/s^2); “ V ” é a velocidade (m/s); “ R ” é o raio da curva circular (m); “ z ” é a superelevação (mm), “ a ” é a distância entre os eixos dos trilhos (mm); “ I ” é a insuficiência de superelevação (mm).

A aceleração não compensada em curvas é limitada com o objetivo de garantir a segurança das circulações, o conforto dos passageiros e custos razoáveis de manutenção para a via férrea, sendo este último fator consequência da limitação da solicitação do trilho mais externo à curva (PITA, 2006).

3.1.5 Excesso de Superelevação

O excesso de superelevação corresponde à situação de um trem circulando em uma curva com velocidade menor que a de equilíbrio para uma superelevação “z”, sendo equilibrada a partir do contato entre os fros laterais das rodas e o trilho interno da curva. Nesse caso, aparece uma aceleração transversal não compensada (α_{nc}), dirigida ao interior da curva, cujo valor se obtém a partir do equilíbrio das forças na direção transversal à via, de acordo com a equação (8) a seguir (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

$$\sum F_h = 0 \rightarrow F_c - P \times tg\alpha - m \times \alpha_{nc} = 0$$

$$\alpha_{nc} = g \times \frac{z}{a} - \frac{V^2}{R} \quad (8)$$

onde “ α_{nc} ” é a aceleração não compensada (m/s^2); “g” é a aceleração da gravidade (m/s^2); “V” é a velocidade (m/s); “R” é o raio da curva circular (m); “z” é a superelevação (mm), “a” é a distância entre os eixos dos trilhos (mm).

Define-se excesso de superelevação como a diferença entre a superelevação real e a superelevação teórica que deveria haver para que a aceleração não compensada fosse nula. Assim, conforme mostra a figura 3.3 e a equação (9), tem-se que (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

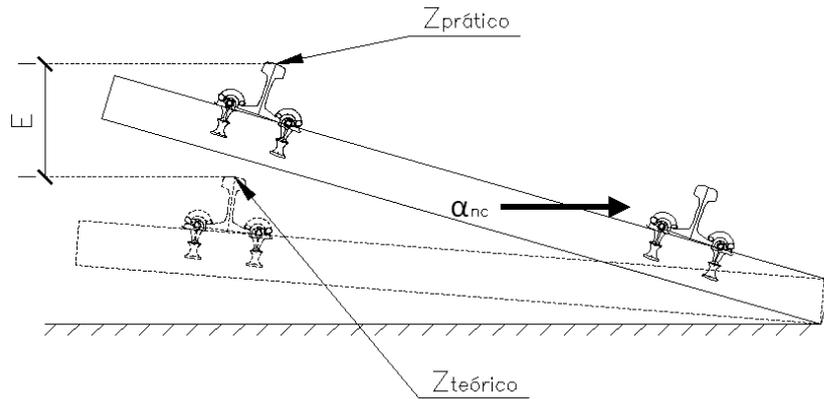


Figura 3.3 – Determinação do excesso de superelevação (E)

$$E = z_{prático} - z_{teórico}$$

$$E = z_{prático} - \frac{a}{g} \times \left(\frac{V^2}{R} \right) = \frac{a}{g} \times \left(g \times \frac{z_{prático}}{a} - \frac{V^2}{R} \right)$$

$$E = \frac{a}{g} \times \alpha_{nc} \quad (9)$$

onde “ α_{nc} ” é a aceleração não compensada (m/s^2); “ g ” é a aceleração da gravidade (m/s^2); “ V ” é a velocidade (m/s); “ R ” é o raio da curva circular (m); “ z ” é a superelevação (mm), “ a ” é a distância entre os eixos dos trilhos (mm); “ E ” = excesso de superelevação (mm).

O valor máximo que se pode adotar para o excesso de superelevação “ E ” ocorre no caso em que o trem se encontra parado, fazendo com que $E = z$. Como conseqüência, esse excesso de superelevação produz um maior desgaste do trilho interno da curva, aumentando os custos de manutenção da via (PITA, 2006).

3.2 CURVAS DE TRANSIÇÃO

Dada a necessidade de implantação da superelevação entre uma reta e uma curva circular, conseguiria se pensar, a princípio, em uma das situações citadas a seguir:

- Superelevação iniciando na tangente e terminando no começo da curva circular;
- Superelevação iniciando no começo da curva circular;
- Superelevação iniciando na tangente e terminando dentro da curva circular.

Entretanto, todas as alternativas citadas são indesejáveis tanto do ponto de vista teórico quanto do prático por razões específicas associadas a cada situação. No primeiro caso, o peso do trem se transfere gradualmente, em maior proporção, para o trilho interior durante todo o trecho em reta com superelevação e, de forma repentina, desaparece esse efeito ao entrar na curva circular, causando um efeito irregular na suspensão do veículo, o que pode acarretar em deformação da via. No segundo caso, a força centrífuga permanece sem compensar ao entrar na curva, fazendo com que a roda exterior sofra este efeito, o que causa um desgaste excessivo e uma trajetória incômoda para os passageiros, até que se alcance o valor necessário da superelevação. Já no terceiro caso, se produz uma combinação dos inconvenientes citados nos casos anteriores, com o mesmo impacto no ponto de tangência e dos problemas de desgaste e falta de conforto (RIVES; PITA; PUENTE, 1977).

Portanto, a maneira mais adequada de solucionar essas dificuldades é introduzir, entre a reta e a curva circular, uma curva de transição, em que o raio diminua gradualmente desde o infinito, no ponto de encontro com a tangente, até o valor correspondente do raio da curva circular, no ponto de encontro com essa, e a

superelevação aumente de forma gradual, atingindo seu valor máximo no início da curva circular. De forma análoga, a partir da tangente de saída da curva circular, é preciso aumentar o raio até o infinito, diminuir a superelevação, de forma gradual, até que essa fique nula no encontro com a tangente.

A vantagem da utilização da curva de transição está em variar o efeito da força centrífuga desde zero, na reta anterior e posterior à curva circular, até seu valor máximo na curva circular, ao invés de produzir um efeito brusco e repentino como ligação direta entre a tangente e a curva circular, assim como citado nos três casos anteriores (PITA, 2006).

As curvas de transição mais conhecidas são a clotóide, a parábola cúbica, a Lemniscata de Bernouille e a curva elástica, sendo essa última de pouquíssima utilização por ser de difícil locação em campo, assim como a Lemniscata de Bernouille, a qual é empregada somente em alguns casos na Inglaterra e Itália (ESVELD, 1989).

Com relação à parábola cúbica, utilizou-se esse tipo de curva de transição durante muitos anos, já que permitia uma facilidade matemática para o cálculo de suas coordenadas, o que contribuía para sua locação em campo em épocas nas quais a utilização de máquinas e computadores era mais restrita. Porém, por ser locada por coordenadas e gerar uma pequena imprecisão por não ter um exato desenvolvimento suficiente para a distribuição de toda a superelevação, não tem sido empregada em larga escala atualmente (ESVELD, 1989).

Sendo assim, a curva de transição mais comumente utilizada em traçados ferroviários em planta são as clotóides, em que a variação da curvatura ocorre de forma linear. Como critério geral de traçado, costuma-se adotar que as clotóides de entrada e saída da curva circular sejam simétricas (ESVELD, 1989).

A equação (10), a seguir, representa a equação intrínseca da clotóide (STOPATTO, 1987):

$$R \times L = A^2 \quad (10)$$

onde, “R” é o raio de curvatura em um ponto qualquer; “L” é o comprimento da curva entre seu ponto de inflexão, onde o raio é infinito, e o ponto de raio “R”; “A” é o parâmetro da clotóide, característico da mesma.

3.3 RECOMENDAÇÕES E LIMITAÇÕES DO TRAÇADO EM PLANTA

Depois de apresentado os conceitos dos principais parâmetros geométricos do traçado ferroviário em planta, é importante que se conheça quais são as recomendações e limitações empregadas em normas internacionais que condicionam os parâmetros do traçado.

Como será visto na seqüência da dissertação, as principais limitações do traçado em planta são dadas pela superelevação, raios mínimos das curvas circulares, o comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares e comprimento mínimo das curvas de transição.

É importante citar que os valores recomendados pelas diferentes normas e que serão apresentados na seqüência da dissertação referem-se a situações de bitola normal, ou seja, de 1435 mm entre as faces internas dos boletos, exceto quando indicado na própria norma.

3.3.1 Limitações nos valores da superelevação

As limitações mais restritas que se impõem sobre a superelevação são aquelas que se referem ao conforto do passageiro e, ao se atingir valores que atendam essa restrição, consegüentemente, consegue-se atender os parâmetros de segurança com relação a outros problemas que podem ocorrer no veículo ou na via.

O conforto do passageiro ao trem trafegar por uma curva é condicionado pela aceleração não compensada sentida pelo mesmo. Porém, para medir a aceleração não compensada suportada pelo passageiro é necessário que se conheça a

suspensão do veículo, já que essa influi diretamente nos efeitos das vibrações e acelerações aleatórias (PITA, 2006).

Durante a trajetória em curva, a suspensão do trem pode agregar um aumento da aceleração não compensada aplicada ao passageiro, visto que, pelo efeito da aceleração transversal, o sistema amortecedor exterior é comprimido e o inferior é alargado, dando lugar a uma aceleração não compensada maior do que a, teoricamente, deveria haver, conforme pode ser visto na figura 3.4. Com isso, chega-se na expressão representada na equação (11) (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

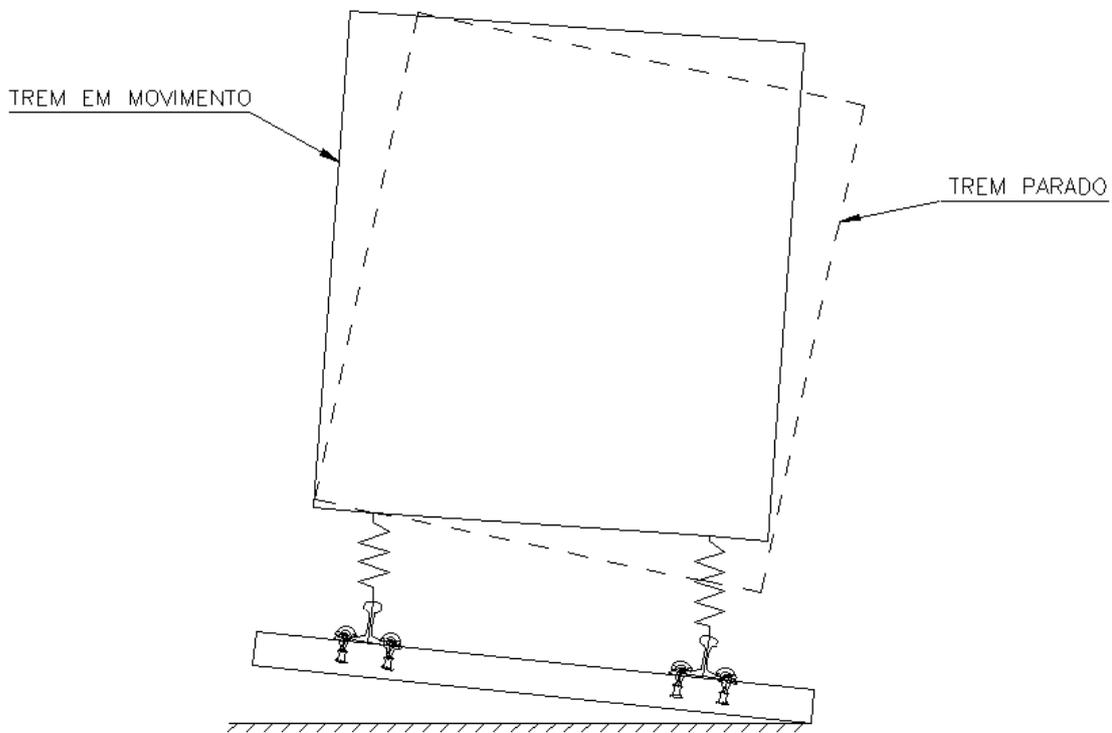


Figura 3.4 – Sistema amortecedor do veículo ferroviário parado e em movimento

$$\alpha_{nc} \times (1 + s) < \alpha_{nc,passageiro}$$

$$\left(\frac{V^2}{R} - \frac{g \times z}{a} \right) \times (1 + s) < \alpha_{nc,passageiro} \quad (11)$$

onde " α_{nc} " é a aceleração não compensada (m/s^2); "g" é a aceleração da gravidade (m/s^2); "V" é a velocidade (m/s); "R" é o raio da curva circular (m); "z" é a superelevação (mm), "a" é a distância entre os eixos dos trilhos (mm); "s" é o coeficiente de flexibilidade (adimensional).

O efeito da suspensão na aceleração não compensada suportada pelo passageiro é quantificado pelo coeficiente de flexibilidade "s", mostrado na equação (11). A maioria dos veículos modernos possui um coeficiente de flexibilidade da ordem de 0,4, porém, nem todos os órgãos ferroviários consideram esse efeito. No passado, a UIC considerava $s = 0,6$ para os veículos que circulavam nas redes ferroviárias europeias, entretanto esse valor é limitado em 0,4 na atualidade (MANTARAS; RODRIGUES, 2003).

3.3.1.1 Trens de alta velocidade

Para os trens rápidos, os fatores de limitação da superelevação mais importantes a serem verificados são a máxima aceleração não compensada admissível e a máxima insuficiência de superelevação.

Recomendações para a máxima aceleração não compensada admissível:

O valor máximo de aceleração não compensada admitido tanto pela AREMA, quanto pela N.R.V. 0-2-0.0, da RENFE, é $\alpha_{nc} = 0,65 m/s^2$.

Com relação à norma UIC-703R, os valores recomendados para a aceleração não compensada são mais específicos, conforme podem ser vistos na Tabela 3.1, apresentada na seqüência:

Tabela 3.1 – Valores da aceleração não compensada – UIC-703R

Categoria	I			II			III				IV	
	80 - 120			120 - 200			≤ 250				250 - 300	
Velocidade Máxima (km/h)							(FS)	(DB)	(SNCF)			
Valores	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Normal	Máx.	Normal	Máx.
Aceleração não compensada (m/s ²) *	0,53	0,67	0,86	0,67	0,80	1,00	0,81	-	0,27	0,40	0,33	0,67
Aceleração não compensada (m/s ²) **	0,40	0,53	0,80	0,40	0,53	0,67	-	-	-	-	0,33	0,67

FS = Ferrovie Dello Stato Italiane; DB = Deutsch Bahn; SNCF = Société Nationale des Chemins de fer Français;

* Via sem características especiais;

** Via na região de aparelhos de mudança de via (AMV's);

Fonte: UIC-703R (1989)

Recomendações para a máxima insuficiência de superelevação admissível:

O valor máximo de insuficiência de superelevação admitido pela N.R.V. 0-2-0.0 é $l = 115$ mm, enquanto que para trens do tipo TALGO pendular, $l = 210$ mm.

De acordo com a especificação técnica de interoperabilidade do sistema ferroviário trans-europeu de alta velocidade, revisado em dezembro de 2007, são estabelecidas 3 categorias de linhas para classificar a insuficiência de superelevação:

- **Categoria I:** linhas construídas especialmente para alta velocidade, preparadas para velocidades iguais ou superiores a 250 km/h;
- **Categoria II:** linhas convencionais melhoradas especialmente para alta velocidade, preparadas para velocidades da ordem de 200 km/h;
- **Categoria III:** linhas construídas ou melhoradas especialmente para alta velocidade, porém que possuem características especiais devido à condicionamentos topográficos, urbanísticos ou de relevo, nos quais a velocidade tem que ser adaptada para cada caso.

Na Tabela 3.2 a seguir, estão apresentados os valores de insuficiência de superelevação recomendados pela especificação técnica de interoperabilidade do sistema ferroviário trans-europeu de alta velocidade:

Tabela 3.2 – Valores da Especificação Técnica de Interoperabilidade para insuficiência de superelevação (I)

Intervalo de Velocidade (km/h)	Categoria I		Categoria II	Categoria III
	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	-	-
$300 < V$	80	80	-	-

Fonte: Especificación técnica de interoperabilidad (2007)

Na Tabela 3.3 a seguir, é possível observar os valores máximos admissíveis de insuficiência de superelevação e de máxima aceleração não compensada, de acordo com os critérios da ADIF:

Tabela 3.3 – Valores da ADIF para insuficiência de superelevação e aceleração não compensada

Velocidade Máxima de Projeto (km/h)	Máxima Insuficiência de Superelevação (mm)		Máxima Aceleração Não Compensada (m/s^2)	
	Normal	Excepcional	Normal	Excepcional
$140 \leq V_{m\acute{a}x} < 200$	100	150	0,65	0,98
$200 \leq V_{m\acute{a}x} < 250$	80	100	0,52	0,65
$250 \leq V_{m\acute{a}x} < 300$	70	80	0,46	0,52
$300 \leq V_{m\acute{a}x} < 350$	60	65	0,39	0,42

Fonte: ADIF – Instrucciones y recomendaciones para la redacción de Proyectos de Plataforma (2006)

De acordo com a norma europeia ENV 13803-1, se estabelecem os seguintes valores máximos de insuficiência de superelevação, representados na Tabela 3.4:

Tabela 3.4 – Máxima insuficiência de superelevação (em mm) – ENV 13803-1

Categorias de Tráfego		Bitola 1,435 m				Bitola 1,668 m			
		Valores Máximos Recomendados		Valores Máximos Permitidos		Valores Máximos Recomendados		Valores Máximos Permitidos	
		Carga	Passag.	Carga	Passag.	Carga	Passag.	Carga	Passag.
I: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 80 e 120 km/h	R < 650 m	110	130	130	160	125	150	150	185
	R ≥ 650 m	110	150	130	165	125	170	150	190
IIa: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 120 e 160 km/h		110	150	160 ⁽³⁾	165	125	170	185	190
IIb: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 160 e 200 km/h		110	150	160 ⁽³⁾	165	125	170	185	190
III: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 200 e 300 km/h	200 < V ≤ 250	100	100	150 ⁽³⁾	150	115	115	170 ⁽³⁾	170
	250 < V ≤ 300	80	80	130 ⁽²⁾	130 ⁽²⁾	90	90	150 ⁽²⁾	150 ⁽²⁾
IV: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades até 230 km/h (ou 250 km/h nas menores linhas), com veículos de características técnicas especiais	250 < V ≤ 300	110	160 ⁽¹⁾	160 ⁽³⁾	180 ⁽¹⁾	125	185 ⁽¹⁾	185 ⁽³⁾	205 ⁽¹⁾
	250 < V ≤ 300	-	140	-	160	-	160	-	185
	250 < V ≤ 300	-	120	-	160	-	135	-	185
	250 < V ≤ 300	-	100	-	150	-	115	-	170
V: Linhas de tráfego de passageiros com velocidades máximas compreendidas entre 250 e 300 km/h	V = 250	-	100	-	150	-	115	-	170
	V > 250	-	80	-	130	-	90	-	150 ⁽²⁾

(1) - Esses valores se aplicam à veículos com características mecânicas especiais

(2) - Pode-se utilizar uma insuficiência de superelevação de 150 mm (170 mm para bitola 1,668 m) em via sem lastro para V > 250 km/h

(3) - Esses valores somente se aplicam a vagões de carga com características especiais, similares a dos veículos de passageiros

Fonte: ENV 13803-1 (2010)

Enquanto isso, a norma UIC-703R recomenda os seguintes valores, expressos na Tabela 3.5, para a insuficiência de superelevação:

Tabela 3.5 – Insuficiência de superelevação (I) – UIC-703R

Categoria	I			II			III			IV		
Velocidade Máxima (km/h)	80 - 120			120 - 200			≤ 250			250 - 300		
Valores	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Normal	Máx.	Normal	Máx.
							(FS)	(DB)		(SNCF)		
Insuficiência de superelevação (mm) *	80	100	130	100	120	150	121	-	40	60	50	100
Insuficiência de superelevação (mm) **	60	80	120	60	80	100	-	-	-	-	50	100

FS = Ferrovie Dello Stato Italiane; DB = Deutsch Bahn; SNCF = Société Nationale des Chemins de fer Français;

* Via sem características especiais;

** Via na região de aparelhos de mudança de via (AMV's);

Fonte: UIC-703R (1989)

Já a AREMA, geralmente adota o valor limite de insuficiência de superelevação como sendo 3" = 76,2 mm para trens convencionais e 4" = 101,6 mm para equipamentos especiais. No caso de trens de alta velocidade, admite-se o valor de 5" = 127 mm para a insuficiência de superelevação, porém, para trens de alta velocidade que possuem um sistema de inclinação ativa, permite-se uma insuficiência de superelevação da ordem de até 9" = 228,6 mm.

3.3.1.2 Trens em baixa velocidade

Para as composições ferroviárias que circulam com menor velocidade o fator de limitação da superelevação que condiciona o traçado é o excesso de superelevação. Isso porque, se um trem percorrer, a baixa velocidade, uma curva que tenha um valor elevado de superelevação, pode haver problema de

descarrilamento do trem, especialmente se essa superelevação estiver associada a um raio pequeno (PITA, 2006).

Recomendações para o máximo excesso de superelevação admissível:

De acordo com a norma Européia ENV 13803-1, para a bitola de 1,435 m, o valor máximo recomendado para o excesso de superelevação é de 110 mm e o valor máximo permitido, em situação excepcional é de 130 mm.

Com relação aos valores adotados pelas instruções de recomendações de projetos de plataforma da ADIF (edição de Junho de 2006), para as velocidades compreendidas entre 140 e 350 km/h, o excesso de superelevação não deve superar 80 mm para o valor normal e 100 mm em casos excepcionais.

Como regra geral, o raio mínimo a ser adotado para satisfazer tanto as condições de excesso de superelevação quanto às de insuficiência de superelevação, devem cumprir a relação expressada na equação (12) a seguir (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

$$\frac{a}{g} \times \frac{V_{\min}^2}{z_{\max} - E} \geq R \geq \frac{a}{g} \times \frac{V_{\max}^2}{z_{\max} + I} \quad (12)$$

onde “g” é a aceleração da gravidade (m/s²); “V_{máx}” é a velocidade máxima (m/s); “V_{mín}” é a velocidade mínima (m/s); “R” é o raio da curva circular (m); “z_{máx}” é a superelevação máxima (mm), “a” é a distância entre os eixos dos trilhos (mm); “I” é a insuficiência de superelevação (mm); “E” é o excesso de superelevação (mm).

Na Tabela 3.6 a seguir, estão relacionados os critérios para o máximo excesso de superelevação, de acordo com a N.R.V. 0-2-0.0.:

Tabela 3.6 – Máximo excesso de superelevação (E) – N.R.V. 0-2-0.0

		Máximo Excesso de Superelevação (mm)			
Velocidade de Proj. (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 200	200 < V ≤ 250
Novas linhas e adaptação de linhas existentes com mudança de traçado	T > 45	80	80	Passageiros ≤ 160 km/h: 60 Carga: 80	Passageiros ≤ 160 km/h: 60 Carga: 80
	25 < T ≤ 45	90	90	Passageiros ≤ 160 km/h: 70 Carga: 90	Passageiros ≤ 160 km/h: 70 Carga: 90
	10 < T ≤ 25	100	100	Passageiros ≤ 160 km/h: 90 Carga: 100	Passageiros ≤ 160 km/h: 90 Carga: 100
	T ≤ 10	110	110	Passageiros ≤ 160 km/h: 90 Carga: 110	Passageiros ≤ 160 km/h: 90 Carga: 110
Melhora de linhas existentes	T > 45	80	80	Passageiros: 60 Carga: 80	-
	25 < T ≤ 45	90	90	Passageiros: 70 Carga: 90	-
	10 < T ≤ 25	100	100	Passageiros: 90 Carga: 100	-
	T ≤ 10	110	110	Passageiros: 90 Carga: 110	-
Velocidade de Proj. (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 180	180 < V ≤ 200
Adaptação de linhas existentes para circulação de trens sem limitação da velocidade	T > 45	Máximo: 80 Excep.: 105	Máximo: 80 Excep.: 105	Máximo: 80 Excepcional: 105	Máximo: 80 Excepcional: 105
	25 < T ≤ 45	Máximo: 90 Excep.: 115	Máximo: 90 Excep.: 115	Passageiros ≤ 160 km/h: 60 Máximo: 90 Excepcional: 115	Passageiros ≤ 160 km/h: 60 Máximo: 90 Excepcional: 115
	10 < T ≤ 25	Máximo: 100 Excep.: 125	Máximo: 100 Excep.: 125	Passageiros ≤ 160 km/h: 70 Máximo: 100 Excepcional: 125	Passageiros ≤ 160 km/h: 70 Máximo: 100 Excepcional: 125
	T ≤ 10	Máximo: 110 Excep.: 135	Máximo: 110 Excep.: 135	Passageiros ≤ 160 km/h: 90 Máximo: 110 Excepcional: 135	Passageiros ≤ 160 km/h: 90 Máximo: 110 Excepcional: 135

(T = milhares de toneladas brutas percorridas por quilômetro por dia)

Fonte: N.R.V. 0-2-0.0. (1988)

Já com relação à norma UIC-703R, os valores recomendados para o excesso de superelevação para diferentes categorias de velocidades, podem ser vistos na Tabela 3.7, apresentada na seqüência:

Tabela 3.7 – Máximo excesso de superelevação (E) – UIC-703R

Categoria	I			II			III			IV		
Velocidade							≤ 250			250 - 300		
Máxima	80 - 120			120 - 200			(FS)			(DB)		
(km/h)							(SNCF)					
Valores	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Normal	Máx.	Normal	Máx.
Excesso de superelevação (mm)	50	70	90	70	90	110	100	-	50	70	-	110

FS = Ferrovie Dello Stato Italiane; DB = Deutsch Bahn; SNCF = Société Nationale des Chemins de fer Français;

Fonte: UIC-703R (1989)

3.3.1.3 Trens parados

Numa situação em que o trem se encontra parado o passageiro não sofre perturbações variáveis, o que, de maneira geral, resulta em valores admissíveis da aceleração não compensada da ordem de até $\alpha_{nc} = 1,5 \text{ m/s}^2$. Além disso, sabendo, experimentalmente, que as força de atrito conseguem impedir o arranque do trem, desde que a aceleração não compensada seja inferior à $1,0 \text{ m/s}^2$, é possível obter o valor da superelevação máxima a ser empregada, assim como indicado na equação (13) (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

$$\alpha_{nc} = \frac{g \times z_{máx}}{a} - \frac{V^2}{R} < 1,0 \text{ m/s}^2$$

$$V = 0 \rightarrow z_{máx} = \frac{a}{g} \quad (13)$$

onde “g” é a aceleração da gravidade (m/s^2); “V” é a velocidade (m/s); “R” é o raio da curva circular (m); “ $z_{máx}$ ” é a superelevação máxima (mm), “a” é a distância entre os eixos dos trilhos (mm);

É prática comum dos órgãos ferroviários utilizarem a regra de que a superelevação não supere a décima parte da medida da bitola da via.

Recomendações para a superelevação máxima admissível:

De acordo com a N.R.V. 0-2-0.0, a superelevação máxima admissível é de 160 mm, enquanto que na AREMA, para as linhas de alta velocidade, admite-se uma superelevação máxima de 6" = 152,4 mm, sendo que, para projetos de vias sem lastro, toleram-se valores um pouco maiores para a superelevação máxima.

Com relação aos valores adotados pela especificação técnica de interoperabilidade do sistema trans-europeu revisado em dezembro de 2007, a superelevação de projeto adotada é de 180 mm para novas linhas de alta velocidade, admitindo-se uma tolerância de ± 20 mm para as linhas existentes, não podendo ultrapassar uma superelevação máxima de 190 mm para essas vias já em operação. Admite-se ainda, nesse mesmo critério, que o valor máximo da superelevação pode chegar até 200 mm nas vias reservadas exclusivamente para o transporte de passageiros.

Quanto às instruções e recomendações para a elaboração de projetos da ADIF, edição 2006, para a faixa de velocidade compreendida entre 200 e 350 km/h, se aceita como o valor máximo normal para a superelevação 140 mm, e, para os casos excepcionais, tolera-se um valor máximo de superelevação de 160 mm.

Na Tabela 3.8 a seguir, estão relacionados os valores máximos estabelecidos para a superelevação, de acordo com a norma europeia ENV 13803-1:

Tabela 3.8 – Máxima superelevação admissível (em mm) – ENV 13803-1

Categorias do Tráfego	Bitola 1,435 m		Bitola 1,668 m	
	Valores Máx. Recomendados	Valores Máx. Permitidos	Valores Máx. Recomendados	Valores Máx. Permitidos
I: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 80 e 120 km/h	160	180	185	205
Ia: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 120 e 160 km/h	160	180	185	205
Ib: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 160 e 200 km/h	160	180	185	205
III: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 200 e 300 km/h	160	180	185	205
IV: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades até 230 km/h (ou 250 km/h nas menores linhas), com veículos de características técnicas especiais	160	180	185	205
V: Linhas de tráfego de passageiros com velocidades máximas compreendidas entre 250 e 300 km/h	160	200	185	230

Fonte: ENV 13803-1 (2010)

Já na Tabela 3.9, são apresentados os valores para a máxima superelevação admissível de acordo com a norma UIC-703R:

Tabela 3.9 – Máxima superelevação admissível –UIC-703R

Categoria	I			II			III			IV		
	80 - 120			120 - 200			≤ 250			250 - 300		
Velocidade Máxima (km/h)							(FS)	(DB)	(SNCF)			
Valores	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Normal	Máx.	Normal	Máx.
Superelevação (mm) *	150	160	-	120	150	160	125	-	65	85	180	-

FS = Ferrovie Dello Stato Italiane; DB = Deutsch Bahn; SNCF = Société Nationale des Chemins de fer Français;

* Via sem características especiais;

Fonte: UIC-703R (1989)

3.3.2 Raio mínimo das curvas circulares

A definição do raio mínimo das curvas circulares pode ser obtida a partir da insuficiência de superelevação para as velocidades máximas e a partir do excesso de superelevação para as velocidades mínimas, contanto que a superelevação máxima não seja superada. Com isso, o raio mínimo da curva circular, deve permitir que, para a velocidade de circulação máxima, caso dos trens de alta velocidade, a insuficiência de superelevação seja inferior à máxima admissível e, para a velocidade mínima de circulação, como é o caso de trens de menor velocidade, o excesso de superelevação seja menor que o máximo admitido. Sendo assim, tem-se que o raio mínimo deve cumprir a seguinte condição, expressa na equação (14) (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

$$\frac{a}{g} \times \frac{V_{min}^2}{z_{máx} - E} \geq R_{mín} \geq \frac{a}{g} \times \frac{V_{máx}^2}{z_{máx} + I} \quad (14)$$

onde “g” é a aceleração da gravidade (m/s²); “V_{máx}” é a velocidade máxima (m/s); “V_{mín}” é a velocidade mínima (m/s); “R_{mín}” é o raio mínimo para a curva circular (m); “z_{máx}” é a superelevação máxima (mm), “a” é a distância entre os eixos dos trilhos (mm); “I” é a insuficiência de superelevação (mm); “E” é o excesso de superelevação (mm).

Geralmente, costuma-se utilizar um valor intermediário para o raio mínimo, de acordo com as características de tráfego da linha. Nos casos em que o raio da curva for muito pequeno, pode ser necessário aumentar a bitola da via com o objetivo de melhorar a inscrição dos veículos na curva, ou, até mesmo, realizar a fixação de um contra-trilho para aumentar a rigidez da via e proporcionar um melhor traçado da face interior da roda ao absorver parte do esforço de inscrição (PITA, 2006).

Recomendações para o raio mínimo das curvas circulares:

Segundo a norma europeia ENV 13803-1, o raio mínimo das curvas circulares deve obedecer à condição expressa na equação (15):

$$\frac{11,8 \times V_{min}^2}{z - E} \geq R \geq \frac{11,8 \times V_{máx}^2}{z + I} \quad (15)$$

onde “V_{máx}” é a velocidade máxima (m/s); “V_{mín}” é a velocidade mínima (m/s); “R” é o raio da curva circular (m); “z” é a superelevação (mm); “I” é a insuficiência de superelevação (mm); “E” é o excesso de superelevação (mm).

Resolvendo a equação (15), mostrada anteriormente, chega-se, para a maioria das vias, em um raio mínimo na ordem de aproximadamente 200 m. No entanto, em alguns lugares esse raio é possível encontrar raios menores, próximo aos 150 m.

Já a especificação técnica de interoperabilidade do sistema ferroviário trans-europeu, revisada em dezembro de 2007, sugere que nas vias em que os trens devem circular a baixa velocidade, o raio mínimo não seja inferior a 150 m. Porém, nas vias em que existam curvas reversas sem tangente entre elas, o raio mínimo deve ser superior a 190 m. Caso haja uma tangente de, no mínimo, 7 m entre essas curvas, tolera-se um raio mínimo inferior a 190 m.

Na Tabela 3.10 a seguir, estão apresentados os valores para o raio mínimo de curvas circulares, de acordo com a N.R.V. 0-2-0.0:

Tabela 3.10 – Raio mínimo das curvas circulares (em m) – N.R.V. 0-2-0.0

Velocidade de Projeto (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 200	200 < V ≤ 250
Novas linhas e adaptação de linhas existentes com mudança de traçado	Normal	1.000	1.300	2.300	4.000
	Excepcional	-	-	2.000	3.120
Melhora de vias existentes	Normal	970	1.300	1.980	-
	Excepcional	-	-	-	-
Velocidade de Projeto (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 180	180 < V ≤ 200
Adaptação de linhas existentes para circulação de trens sem limitação da velocidade		800	1.050	1.330	1.640

Fonte: N.R.V. 0-2-0.0. (1988)

3.3.3 Comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares

De modo a permitir um amortecimento suficiente do balanço dos trens entre alinhamentos retos e circulares, são estabelecidos comprimentos mínimos em curvas circulares e em tangentes entre curvas de transição ou circulares (PITA, 2006).

Recomendações para o comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares:

Os comprimentos mínimos de alinhamentos retos e circulares, segundo a SNCF, podem ser vistos na Tabela 3.11 a seguir:

Tabela 3.11 – Comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares (em m) – SNCF

Elementos do traçado (L em m)		V = 225 a 270 km/h	V = 300 km/h	V = 350 km/h
Valores Mínimos Normais	Curva Completa	$L = V/2$	L = 300 m	L = 300 m
	Reta entre duas curvas de sentido igual ou diferente	$L = V/2$	L = 300 m	L = 300 m
Valores Mínimos Excepcionais	Curva Completa	$L = V/2$	L = 175 m	L = 175 m
	Reta entre duas curvas de mesmo sentido	$L = V/2$	L = 175 m	L = 175 m
	Reta entre duas curvas de sentido oposto	L = 0	L = 0 ou L = 175 m	L = 0 ou L = 175 m

Fonte: ALIAS (1984)

De acordo com a norma europeia ENV 13803-1, em situações onde for necessário alocar duas curvas circulares seguidas de sentido contrário, recomenda-se utilizar

uma transição contínua com duas clotóides de mesmo valor e sentidos opostos ao invés de utilizar duas curvas de transição com uma tangente intermediária.

Os valores dos comprimentos mínimos para os comprimentos de alinhamentos retos e circulares dessa norma estão apresentados na Tabela 3.12 a seguir:

Tabela 3.12 – Comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares (em m) – ENV 13803-1

Categorias do Tráfego	Valores Mínimos Recomendados	Valores Mínimos Permitidos
I: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 80 e 120 km/h		
Ila: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 120 e 160 km/h	$V_{\text{máx}} / 3$ (> 30 m)	$V_{\text{máx}} / 5$ (> 30 m)
Ilb: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 160 e 200 km/h		
III: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 200 e 300 km/h		
IV: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades até 230 km/h (ou 250 km/h nas menores linhas), com veículos de características técnicas especiais	$V_{\text{máx}} / 1,5$	$V_{\text{máx}} / 2$
V: Linhas de tráfego de passageiros com velocidades máximas compreendidas entre 250 e 300 km/h		

Fonte: ENV 13803-1 (2010)

As limitações estabelecidas pela N.R.V. 0-2-0.0 para o comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares encontra-se na Tabela 3.13:

Tabela 3.13 – Comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares (em m) – N.R.V. 0-2-0.0

Velocidade de Projeto (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 200	200 < V ≤ 250
Novas linhas e adaptação de linhas existentes com mudança de traçado	Normal	80	90	110	140
	Excepcional	60	65	80	100
Melhora de vias existentes		70	80	100	-

Velocidade de Projeto (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 180	180 < V ≤ 200
Adaptação de linhas existentes para circulação de trens sem limitação da velocidade		56	64	72	80

Fonte: N.R.V. 0-2-0.0. (1988)

Quanto às recomendações e instruções de projetos da ADIF, edição de junho de 2006, são propostos os valores mínimos para alinhamentos retos e circulares expressos na Tabela 3.14:

Tabela 3.14 – Comprimento mínimo de alinhamentos retos e circulares (em m) – ADIF

Velocidade Máxima de Projeto	V _{máx} (km/h) < 140		140 ≤ V _{máx} (km/h) < 200		200 ≤ V _{máx} (km/h) < 350	
	Normal	Excepcional	Normal	Excepcional	Normal	Excepcional
Curva Circular						
Reta entre curvas de mesmo sentido	≥ V _{máx} / 3	≥ V _{máx} / 4	≥ V _{máx} / 2	≥ V _{máx} / 3	≥ V _{máx} / 1,5	≥ V _{máx} / 2
Reta entre curvas de sentidos opostos (pode ser zero)						

Fonte: ADIF – Instrucciones y recomendaciones para la redacción de Proyectos de Plataforma (2006)

3.3.4 Comprimento mínimo das transições

Na construção de uma via férrea procura-se sempre utilizar o menor comprimento possível para as curvas de transição, pois, dessa maneira, consegue-se minimizar os gastos de construção e de manutenção da via. No entanto, existem algumas limitações devido à rampa da superelevação e à necessidade de manter as variações de aceleração abaixo de limites determinados (PITA, 2006), como será visto na seqüência da dissertação.

3.3.4.1 Limitações Geométricas

Nas curvas de transição, devido à variação da superelevação, os dois trilhos sofrem uma torção, determinada por duas linhas não paralelas, ocasionando uma maior dificuldade para apoiar as rodas do veículo.

O veículo se adapta a esta situação mediante a suspensão, através da inclinação e torção dos eixos para assegurar o apoio das rodas. Porém, para evitar sobrecargas que afetem a estabilidade dos veículos e minimizar o risco de descarrilamentos, a superelevação é geralmente limitada em relação ao comprimento das curvas de transição, de maneira a se estabelecer a máxima rampa de superelevação admissível (STOPATTO, 1987).

Recomendações para a máxima rampa de superelevação admissível:

De acordo com a AREMA, a máxima rampa de superelevação é de 1,3 mm/m.

Já as limitações estabelecidas para a máxima rampa de superelevação, segundo a norma N.R.V. 0-2-0.0, podem ser vistas na Tabela 3.15 a seguir:

Tabela 3.15 – Máxima rampa de superelevação R_S (mm/m) – N.R.V. 0-2-0.0

Velocidade de Projeto (km/h)		$V \leq 140$	$140 < V \leq 160$	$160 < V \leq 200$	$200 < V \leq 250$
Novas linhas e adaptação de linhas existentes com mudança de traçado	Normal	0,90	0,80	0,80	0,65
	Excepcional	1,15	1,00		
Melhora de vias existentes		1,15	1,00	0,80	-

Velocidade de Projeto (km/h)		$V \leq 140$	$140 < V \leq 160$	$160 < V \leq 180$	$180 < V \leq 200$
Adaptação de linhas existentes para circulação de trens sem limitação da velocidade		1,285	1,125	1,000	0,900

Fonte: N.R.V. 0-2-0.0. (1988)

Na Tabela 3.16, estão apresentados os valores máximos para a rampa de superelevação, de acordo com a norma europeia ENV 13803-1:

Tabela 3.16 – Máxima rampa de superelevação R_S (mm/m) – ENV 13803-1

Bitola da Via	Valores Máximos Recomendados	Valores Máximos Permitidos
1,435 m	2,3	2,5
1,668 m	2,4	2,7

Fonte: ENV 13803-1 (2010)

Quanto às recomendações e instruções de projetos da ADIF, edição de junho de 2006, são propostos os seguintes valores, expressos na Tabela 3.17, para a máxima rampa de superelevação admissível em diferentes condições de velocidade:

Tabela 3.17 – Máxima rampa de superelevação R_S (mm/m) – ADIF

Velocidade de Projeto (km/h)	Máxima Rampa de Superelevação (mm/m)	
$V_{m\acute{a}x} < 140$	Normal	0,80
	Excepcional	2,00
$140 < V_{m\acute{a}x} < 200$	Normal	0,80
	Excepcional	1,00
$200 < V_{m\acute{a}x} < 250$	Normal	0,40
	Excepcional	0,68
$250 < V_{m\acute{a}x} < 300$	Normal	0,30
	Excepcional	0,56
$300 < V_{m\acute{a}x} < 350$	Normal	0,30
	Excepcional	0,50

Fonte: ADIF – Instrucciones y recomendaciones para la redacción de Proyectos de Plataforma (2006)

3.3.4.2 Limitação dinâmica ou da variação da superelevação com o tempo

Estabelece-se um limite para a variação do valor da superelevação devido ao tempo de resposta que é necessário para que se produza a adaptação da suspensão do veículo à nova superelevação. Além disso, uma variação da superelevação lenta permite uma melhor conservação do material (RIVES, PITA, PUENTES, 1977).

Recomendações para a máxima variação da superelevação com o tempo:

Com relação às recomendações e instruções de projeto da ADIF, edição de junho de 2006, tem-se, na Tabela 3.18, os valores para a máxima variação da superelevação:

Tabela 3.18 – Máxima variação da superelevação com o tempo d_z/d_t (mm/s) – ADIF

Velocidade Máxima de Projeto	$V_{\text{máx}} \text{ (km/h)} < 140$		$140 \leq V_{\text{máx}} \text{ (km/h)} < 350$	
	Normal	Excepcional	Normal	Excepcional
Máx. Variação da Superelevação com o tempo (mm/s)	30	50	30	50

Fonte: ADIF – Instrucciones y recomendaciones para la redacción de Proyectos de Plataforma (2006)

De acordo com a norma europeia ENV 13803-1, os valores recomendados para a máxima variação da superelevação com o tempo estão apresentados, na Tabela 3.19, para diferentes bitolas:

Tabela 3.19 – Máxima variação da superelevação com o tempo d_z/d_t (mm/s) – ENV 13803-1

Categorias do Tráfego	Bitola 1,435 m		Bitola 1,668 m	
	Valores Máx. Recomendados	Valores Máx. Permitidos	Valores Máx. Recomendados	Valores Máx. Permitidos
I: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 80 e 120 km/h	50	55	50	60
IIa: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 120 e 160 km/h	50	60	55	65
IIb: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 160 e 200 km/h	50	60	55	65
III: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 200 e 300 km/h	50	60	55	65
IV: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades até 230 km/h (ou 250 km/h nas menores linhas), com veículos de características técnicas especiais	50	60	55	65
V: Linhas de tráfego de passageiros com velocidades máximas compreendidas entre 250 e 300 km/h	50	60	55	65

Fonte: ENV 13803-1 (2010)

Segundo a norma americana da AREMA, o valor máximo para a superelevação admissível é de 50 mm/s.

Já para a N.R.V. 0-2-0.0, os máximos valores admissíveis para a variação da superelevação com o tempo estão expressos na Tabela 3.20, para diferentes faixas de velocidade:

Tabela 3.20 – Máxima variação da superelevação com o tempo d_z/d_t (mm/s) – N.R.V. 0-2-0.0

Velocidade de Projeto (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 200	200 < V ≤ 250
Novas linhas e adaptação de linhas existentes com mudança de traçado	Normal	35	35	45	45
	Excepcional	45	45		
Melhora de vias existentes		45	45	45	-

Velocidade de Projeto (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 180	180 < V ≤ 200
Adaptação de linhas existentes para circulação de trens sem limitação da velocidade		50	50	50	50

Fonte: N.R.V. 0-2-0.0. (1988)

Quanto às recomendações da norma UIC-703R para a máxima variação da superelevação com o tempo, estas podem ser verificadas na Tabela 3.21:

Tabela 3.21 – Máxima variação da superelevação com o tempo d_z/d_t (mm/s) – UIC-703R

Categoria	I			II			III		IV			
	80 - 120			120 - 200			≤ 250		250 - 300			
Velocidade Máx. (km/h)							(FS)	(DB)	(SNCF)			
Valores	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Normal	Máx.		
Variação da superelevação com o tempo (mm/s) *	28	46	55	28	35	50	38	-	20	-	50	60
Variação da superelevação com o tempo (mm/s) **	56	70	-	56	70	-	-	-	-	-	-	-

FS = Ferrovie Dello Stato Italiane; DB = Deutsch Bahn; SNCF = Société Nationale des Chemins de fer Français;

* Gradiente de superelevação com inclinação uniforme;

** Gradiente de superelevação com inclinação variável;

Fonte: UIC-703R (1989)

3.3.4.3 Limitações por razão de conforto

Por razões de conforto do passageiro, limita-se, nas curvas de transição, a variação da aceleração não compensada com o tempo (d_{anc}/d_t), conhecido também como taxa Jerk.

Recomendações para a máxima variação da aceleração não compensada:

De acordo com a AREMA, as práticas ferroviárias norte americanas recomendam que a máxima variação da aceleração não compensada seja limitada em $0,3 \text{ m/s}^3$. Porém, em locais específicos onde se justifique a necessidade de uma maior variação da aceleração não compensada, são permitidos valores de até $0,4 \text{ m/s}^3$.

Os valores máximos admissíveis para a variação da aceleração não compensada, segundo a N.R.V 0-2-0.0, estão expressos na Tabela 3.22 a seguir:

Tabela 3.22 – Máxima variação aceleração não compensada d_{anc}/d_t (m/s^3) – N.R.V. 0-2-0.0

Velocidade de Projeto (km/h)		$V \leq 140$	$140 < V \leq 160$	$160 < V \leq 200$	$200 < V \leq 250$
Novas linhas e adaptação de linhas existentes com mudança de traçado	Normal	0,17	0,17	0,20	0,20
	Excepcional	0,20	0,20		
Melhora de vias existentes		0,20	0,20	0,20	-

Velocidade de Projeto (km/h)		$V \leq 140$	$140 < V \leq 160$	$160 < V \leq 180$	$180 < V \leq 200$
Adaptação de linhas existentes para circulação de trens sem limitação da velocidade		0,20	0,20	0,20	0,20

Fonte: N.R.V. 0-2-0.0. (1988)

Quanto às recomendações e instruções de projetos da ADIF, edição de junho de 2006, sugere-se os seguintes valores expressos na Tabela 3.23, para a máxima variação da aceleração não compensada:

Tabela 3.23 – Máxima variação aceleração não compensada d_{anc}/d_t (m/s³) – ADIF

Velocidade Máxima de Projeto	$140 \leq V_{m\acute{a}x}$ (km/h) < 200		$200 \leq V_{m\acute{a}x}$ (km/h) < 350	
	Normal	Excepcional	Normal	Excepcional
Máx. Variação da Aceleração Não Compensada (mm/s)	0,20	0,36	0,20	0,33

Fonte: ADIF – Instrucciones y recomendaciones para la redacción de Proyectos de Plataforma (2006)

Já para a norma UIC-703R, os valores recomendados para a máxima variação da aceleração não compensada estão apresentados na Tabela 3.24:

Tabela 3.24 – Máxima variação aceleração não compensada d_{anc}/d_t (m/s³) – UIC-703R

Categoria	I			II			III		IV			
	80 - 120			120 - 200			≤ 250		250 - 300			
Velocidade Máxima (km/h)							(FS)	(DB)	(SNCF)			
Valores	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Normal	Máx.		
Variação da aceleração não compensada com o tempo (m/s ³) *	0,17	0,47	0,60	0,17	0,47	-	0,24	-	0,08	-	0,20	0,50
Variação da aceleração não compensada com o tempo (m/s ³) **	0,33	0,60	-	0,33	0,60	-	-	-	-	-	-	-

FS = Ferrovie Dello Stato Italiane; DB = Deutsch Bahn; SNCF = Société Nationale des Chemins de fer Franais;

* Curva de Transio com variao de curvatura constante;

** Curva de Transio com variao de curvatura não constante;

Fonte: UIC-703R (1989)

Recomendaes para a máxima variao da insuficiência de superelevao:

Os valores máximos admissíveis para a variao da insuficiência de superelevao, segundo a norma N.R.V 0-2-0.0, estão apresentados na Tabela 3.25 seguinte:

Tabela 3.25 – Máxima variação da insuficiência de superelevação d_l/d_t (mm/s) – N.R.V. 0-2-0.0

Velocidade de Projeto (km/h)		$V \leq 140$	$140 < V \leq 160$	$160 < V \leq 200$	$200 < V \leq 250$
Novas linhas e adaptação de linhas existentes com mudança de traçado	Normal	30	30	35	35
	Excepcional	35	35		
Melhora de vias existentes		35	35	35	-

Velocidade de Projeto (km/h)		$V \leq 140$	$140 < V \leq 160$	$160 < V \leq 180$	$180 < V \leq 200$
Adaptação de linhas existentes para circulação de trens sem limitação da velocidade		55	55	55	55

Fonte: N.R.V. 0-2-0.0. (1988)

Com relação à norma americana da AREMA, a máxima variação da insuficiência de superelevação com o tempo é de 50 mm/s.

De acordo com as recomendações e instruções de projetos da ADIF, edição de junho de 2006, admite-se os valores expressos na Tabela 3.26, para a máxima variação da insuficiência de superelevação com o tempo:

Tabela 3.26 – Máxima variação da insuficiência de superelevação d_l/d_t (mm/s) – ADIF

Velocidade Máxima de Projeto	$140 \leq V_{\text{máx}} \text{ (km/h)} < 200$		$200 \leq V_{\text{máx}} \text{ (km/h)} < 350$	
	Normal	Excepcional	Normal	Excepcional
Máx. Variação da Aceleração Não Compensada (mm/s)	30	55	30	50

Fonte: ADIF – Instrucciones y recomendaciones para la redacción de Proyectos de Plataforma (2006)

Já quanto para a norma europeia ENV 13803-1, os valores admissíveis para a máxima variação da insuficiência de superelevação com o tempo, encontram-se apresentados na Tabela 3.27 a seguir:

Tabela 3.27 – Máxima variação da insuficiência de superelevação d/d_t (mm/s) – ENV 13803-1

Categorias do Tráfego	Bitola 1,435 m		Bitola 1,668 m	
	Valores Máx. Recomendados	Valores Máx. Permitidos	Valores Máx. Recomendados	Valores Máx. Permitidos
I: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 80 e 120 km/h	55	90	60	100
Ia: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 120 e 160 km/h	55	90	60	100
Ib: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 160 e 200 km/h	55	90	60	100
III: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 200 e 300 km/h	50	75	55	85
IV: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades até 230 km/h (ou 250 km/h nas menores linhas), com veículos de características técnicas especiais	50	90	55	100
V: Linhas de tráfego de passageiros com velocidades máximas compreendidas entre 250 e 300 km/h	50	75	55	85

Fonte: ENV 13803-1 (2010)

Quanto aos valores recomendados pela norma UIC-703R para a máxima variação da insuficiência da superelevação com o tempo, os mesmos estão apresentados na Tabela 3.28:

Tabela 3.28 – Máxima variação da insuficiência de superelevação d_i/d_t (mm/s) – UIC-703R

Categoria	I			II			III			IV		
	80 - 120			120 - 200			≤ 250			250 - 300		
Velocidade Máxima (km/h)							(FS)	(DB)	(SNCF)			
Valores	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Normal	Máx.	Normal	Máx.
Variação da Insuficiência de superelevação (mm/s) *	25	70	90	25	70	-	36	-	13	-	30	75
Variação da Insuficiência de superelevação (mm/s) **	50	90	-	50	90	-	-	-	-	-	-	-

FS = Ferrovie Dello Stato Italiane; DB = Deutsch Bahn; SNCF = Société Nationale des Chemins de fer Français;

* Curva de Transição com variação de curvatura constante;

** Curva de Transição com variação de curvatura não constante;

Fonte: UIC-703R (1989)

3.3.4.4 Comprimento mínimo da curva de transição

Para satisfazer as condições de segurança e conforto do passageiro, é necessário que se cumpram as limitações geométricas, dinâmicas e de conforto, anteriormente citadas, para a definição do comprimento mínimo da curva de transição (MANTARAS, RODRIGUES, 2003):

1- Limitação Geométrica

$$L \geq \frac{z_{máx}}{R_s} \quad (16)$$

onde, “L” é o comprimento mínimo da curva de transição (m); “ $z_{máx}$ ” é a superelevação máxima (mm); “ R_s ” é rampa máxima de superelevação (mm).

2- Limitação Dinâmica

$$L \geq \frac{z_{m\acute{a}x} \times V}{d_z/d_t} \quad (17)$$

onde, “L” é o comprimento mínimo da curva de transição (m); “z_{máx}” é a superelevação máxima (mm); V é a velocidade (m/s); “d_z/d_t” = é a variação da superelevação com o tempo (mm/s).

3- Limitação de conforto

$$L \geq \left(\frac{V}{(d_i/d_t \times 0,001)} \right) \times \left(\frac{a \times V^2}{g \times R} - (z_{m\acute{a}x} \times 0,001) \right) \quad (18)$$

onde, “L” é o comprimento mínimo da curva de transição (m); “z_{máx}” é a superelevação máxima (mm); “V” é a velocidade (m/s); “d_i/d_t” é a variação da insuficiência de superelevação com o tempo (mm/s); “R” é o raio da curva circular (m); “a” = distância entre os eixos dos trilhos (m); “g” é a aceleração da gravidade (m/s²).

4. TRAÇADO EM PERFIL

As condições prioritárias para a definição do alinhamento vertical são garantir a segurança e o conforto dos passageiros durante a circulação dos trens. Entretanto, a definição do traçado em perfil, ou alinhamento vertical, é mais sensível às limitações do terreno natural existente do que no traçado em planta, já que os parâmetros escolhidos podem condicionar a viabilidade da construção da ferrovia tanto do ponto de vista técnico quanto do econômico (PITA, 2006).

As condições topográficas requerem, geralmente, mudanças nos gradientes verticais longitudinais. Por isso, na definição de um alinhamento vertical, busca-se, preferencialmente, um traçado que seja o mais nivelado possível, com mudanças mínimas nos gradientes verticais. Nesse contexto, para proporcionar uma transição mais suavizada, as mudanças nos gradientes devem ser realizadas a partir da utilização de curvas verticais que, se adequadamente projetadas, ajudam a minimizar os efeitos da aceleração vertical e garantem melhor qualidade à circulação e à dinâmica dos trens. Porém, se mal projetadas, podem contribuir para que a aceleração vertical seja maior que o desejável, podendo ocasionar até o descarrilamento dos trens (SAÑA, 2007).

As curvas verticais são caracterizadas por uma mudança progressiva da inclinação, diferentemente das rampas em tangentes verticais, em que a inclinação é constante ao longo do perfil longitudinal. O tipo de curva vertical geralmente utilizada em traçados ferroviários é a parábola de segundo grau de eixo vertical, conforme pode ser visto na equação (19) a seguir (STOPATTO, 1987):

$$y = A + B \cdot x + C \cdot x^2 \quad (19)$$

em que, x = posição do traçado na horizontal; y = posição do traçado na vertical; A , B e C = constantes da parábola de segundo grau.

Impondo as condições de rampa constante nas tangentes de entrada e saída da curva, consegue-se obter as seguintes relações a partir do desenvolvimento da equação (20):

$$i = \frac{d_y}{d_x} = B + 2 \cdot C \cdot x \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{d_y}{d_x} \right)_{\text{entrada}} = B + 2 \cdot C \cdot x_{\text{tangente entrada}} = i_{\text{entrada}} \\ \left(\frac{d_y}{d_x} \right)_{\text{saída}} = B + 2 \cdot C \cdot x_{\text{tangente saída}} = i_{\text{saída}} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \frac{i_{\text{entrada}} - i_{\text{saída}}}{2 \cdot (x_{\text{tangente entrada}} - x_{\text{tangente saída}})} \\ B = i_{\text{entrada}} - \left(\frac{i_{\text{entrada}} - i_{\text{saída}}}{x_{\text{tangente entrada}} - x_{\text{tangente saída}}} \right) \cdot x_{\text{tangente entrada}} \leftrightarrow \\ \leftrightarrow B = i_{\text{saída}} - \left(\frac{i_{\text{entrada}} - i_{\text{saída}}}{x_{\text{tangente entrada}} - x_{\text{tangente saída}}} \right) \cdot x_{\text{tangente saída}} \end{array} \right.$$

Com isso, conseguem-se os seguintes valores característicos da curva vertical (SAÑA, 2007):

- Comprimento da curva vertical: $L = X_{\text{tangente saída}} - X_{\text{tangente entrada}}$;
- Variação de inclinação na curva vertical: $\Delta i = i_{\text{saída}} - i_{\text{entrada}}$; sendo que $i =$ rampa em ‰;
- Parâmetro da curva vertical: $k_v = 1000 \cdot L / \Delta i$; sendo que K_v é positivo se a curva é côncava e negativo se a curva é convexo.

4.1 RECOMENDAÇÕES E LIMITAÇÕES DO TRAÇADO EM PERFIL

Depois de apresentado os principais conceitos em torno ao alinhamento vertical, é importante que se conheça quais são as recomendações e limitações empregadas em normas internacionais que condicionam os parâmetros do traçado em perfil.

Como será visto na seqüência da dissertação, as principais limitações do traçado em perfil são dadas pela rampa máxima, raio mínimo vertical e máxima aceleração vertical.

4.1.1 Limitações da rampa máxima

A definição da rampa máxima tem conseqüências diretas sobre as características necessárias do material rodante. Por isso, na escolha da rampa, são considerados alguns fatores, como (SAÑA, 2007):

- **Contato roda-trilho:** em rampas ferroviárias, devido a problemas de falta de aderência, costuma-se não exceder valores da ordem de 70‰;
- **Potência dos veículos ferroviários:** trens de passageiros, em circunstâncias excepcionais, costumam utilizar rampas máximas na ordem de até 50‰, enquanto que os trens de carga geralmente não devem superar 20‰;
- **Capacidade de arranque na rampa:** que está relacionada a distâncias muito curtas, como o comprimento do trem;
- **Capacidade de frenagem de emergência:** que está relacionada a distâncias maiores, podendo chegar à ordem de 4 a 6 km para trens de alta velocidade.

Em estações ferroviárias e em vias de estacionamento é desejável que o perfil longitudinal seja horizontal, assim, os trens que estão parados não necessitam impor uma maior pressão na frenagem dos veículos para mantê-los sem movimentação. Porém, em situações nas quais isso não é possível, costuma-se utilizar uma rampa uniforme de até 3‰, sendo que, se necessário também a utilização de uma curva vertical, o raio vertical deverá ser superior à 5.000 m. Para

estes casos, a especificação técnica de interoperabilidade do sistema ferroviário trans-europeu de alta velocidade, de dezembro de 2007, a rampa máxima não deve exceder 2‰.

Nos casos em que uma rampa coincide com uma curva em planta, como acontece com frequência em regiões montanhosas, faz-se necessário uma maior utilização de potência para a circulação dos trens. Nessas situações, costuma-se adotar uma rampa fictícia para levar em conta o aumento de resistência da subida do trem ao circular em uma rampa com curvas. Portanto, ao se estabelecer os parâmetros de traçado ferroviário para a construção de uma linha ferroviária não se costuma limitar a rampa máxima geométrica, mas sim uma rampa compensada, dada pela somatória da rampa fictícia com a rampa geométrica. Com isso, consegue-se levar em consideração a resistência gerada pela rampa associada à resistência gerada pelo efeito desfavorável das curvas horizontais (SAÑA, 2007).

A rampa geométrica pode ser definida no perfil longitudinal em função do terreno natural existente, enquanto que a rampa fictícia pode ser encontrada a partir da equação (21) a seguir (MANTARAS; RODRIGUES, 2003):

$$i_e = \frac{50 \times a}{R_H} \quad (21)$$

onde, “ i_e ” é a rampa fictícia (%); “ a ” é a distância entre os eixos dos trilhos (m); “ R_H ” é o raio da curva horizontal (m).

Ainda nesse âmbito, existem alguns motivos para se evitar rampas íngremes com grande extensão, conforme explicado pelos seguintes fatores (SAÑA, 2007):

- Redução da velocidade dos trens ao subir a rampa;
- Maiores distâncias de frenagem durante a descida, o que afeta desfavoravelmente a segurança;
- Maiores custos operacionais, devido ao maior consumo energético e à maiores tempos de viagem;
- Maiores custos de conservação da via e do material rodante.

Recomendações para a rampa máxima:

Os valores para a rampa máxima estabelecidos pela norma N.R.V. 0-2-0.0 estão apresentados na Tabela 4.1 a seguir:

Tabela 4.1 – Rampa máxima (‰) – N.R.V. 0-2-0.0

Velocidade de Projeto (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 200	200 < V ≤ 250
Novas linhas e adaptação de linhas existentes com mudança de traçado	Normal	20	15	12,5	12,5
	Excepcional	-	20	15	-

Para tráfego puramente de passageiros para V > 250 km/h a rampa máxima é de 3,5‰

Nas estações a rampa máxima é de 2,5‰

Fonte: N.R.V. 0-2-0.0. (1988)

Com relação aos valores limites recomendados pela norma americana da AREMA, estes estão apresentados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Rampa máxima (‰) – AREMA

Rampa Máxima Longitudinal (‰)	Considerações
0 a 10	Aceitável para tráfego de passageiro e carga
11 a 20	Aceitável para tráfego mixto, caso estejam em conformidade com a rampa máxima ao longo da linha
21 a 30	Pode ser aceitável para tráfego de passageiros e para traçado de curtas distâncias para transporte de carga
31 a 40	Pode ser aceitável para tráfegos de passageiros, preferencialmente para traçados de curta distância
Acima de 40	Não é recomendado para nenhuma situação
0 a 2	Adequado para manutenção e pontos de parada / estacionamento

Fonte: AREMA (2009)

De acordo com as recomendações e instruções de projetos da ADIF, edição de junho de 2006, admite-se os valores expressos na Tabela 4.3, para a rampa máxima longitudinal:

Tabela 4.3 – Rampa máxima (‰) – ADIF

Rampa Máxima Longitudinal (‰)	Normal	Excepcional
Vias com tráfego somente de passageiros	25	30
Vias com tráfego misto	15	28
Pontos de parada / estacionamento do trem	2	2

Fonte: ADIF – Instrucciones y recomendaciones para la redacción de Proyectos de Plataforma (2006)

4.1.2 Limitações da máxima aceleração vertical

A fim de se respeitar a sensação de conforto dos passageiros, limita-se a máxima aceleração vertical, conforme visto nas recomendações a seguir.

Recomendações para a máxima aceleração vertical:

Na Tabela 4.4 a seguir, estão apresentados os limites sugeridos pela SNCF a respeito da máxima aceleração vertical para a alta velocidade ferroviária:

Tabela 4.4 – Máxima aceleração vertical (m/s²) – SNCF

Máxima Aceleração Vertical (m/s²)	Normal	Excepcional
Curva côncava	$a_v = 0,045.g$	$a_v = 0,06.g$
Curva Convexa	$a_v = 0,045.g$	$a_v = 0,05.g$

Fonte: ALIAS (1984)

Os critérios recomendados pela norma N.R.V 0-2-0.0 para a máxima aceleração vertical estão apresentados na Tabela 4.5 a seguir:

Tabela 4.5 – Máxima Aceleração Vertical (m/s²) – N.R.V. 0-2-0.0

Velocidade de Projeto (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 200	200 < V ≤ 250
Novas linhas e adaptação de linhas existentes com mudança de traçado	Normal	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,20
	Excepcional	0,40	0,40	0,30	0,30
Comentários: se a curva vertical coincidir com uma curva em planta, então: a _v ≤ 0,20					
Melhoras de vias existentes	Normal	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	-
	Excepcional	0,45	0,40	0,40	-
Comentários: sem curvas convexas: a _{v máx} = 0,40; se a curva vertical coincidir com uma curva em planta, então: a _v ≤ 0,20					
Velocidade de Projeto (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 180	180 < V ≤ 200
Adaptação de linhas existentes para circulação de trens sem limitação da velocidade	Curvas Côncavas	0,50	0,50	0,45	0,45
	Curvas Convexas	0,40	0,40	0,40	0,40

Fonte: N.R.V. 0-2-0.0. (1988)

Já para a AREMA, os limites recomendados para a máxima aceleração vertical, estão apresentados na Tabela 4.6:

Tabela 4.6 – Máxima aceleração vertical (m/s²) – AREMA

Máxima Aceleração Vertical (m/s ²)	Linhas de Tráfego misto projetadas para trens de passageiros 200 < V ≤ 300 km/h	Linhas de Tráfego misto com trens de passageiros V ≤ 250 km/h	Linhas de alta velocidade dedicadas para tráfego de passageiros 200 < V ≤ 300 km/h
Valores limites Recomendados	0,22	0,22	0,22
Limites Máximos Recomendados	0,44	0,31	0,44

Fonte: AREMA (2009)

De acordo com a norma européia ENV 13803-1, os valores admissíveis para a máxima aceleração vertical, encontram-se apresentados na Tabela 4.7:

Tabela 4.7 – Máxima aceleração vertical (m/s²) – ENV 13803-1

Categorias do Tráfego	Valores Máx. Recomendados	Valores Máx. Permitidos
I: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 80 e 120 km/h	0,22 ⁽²⁾	0,31
Ila: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 120 e 160 km/h	0,22	0,31
Ilb: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 160 e 200 km/h	0,22	0,31
III: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 200 e 300 km/h	0,22	0,44 ⁽¹⁾
IV: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades até 230 km/h (ou 250 km/h nas menores linhas), com veículos de características técnicas especiais	0,22	0,31
V: Linhas de tráfego de passageiros com velocidades máximas compreendidas entre 250 e 300 km/h	0,22	0,44 ⁽¹⁾

(1) Tem-se uma tolerância de + 10% em curvas convexas e de + 30% em curvas côncavas

(2) Nas linhas em que os passageiros podem circular de pé, recomenda-se $a_v \leq 0,10$

Fonte: ENV 13803-1 (2010)

Segundo as recomendações e instruções de projetos da ADIF, edição de junho de 2006, são admitidos os seguintes valores expressos na Tabela 4.8, para a máxima aceleração vertical:

Tabela 4.8 – Máxima Aceleração Vertical (m/s²) – ADIF

Velocidade Máxima de Projeto	Máxima Aceleração Vertical (m/s ²)	
	Normal	Excepcional
$V_{m\acute{a}x} \text{ (km/h)} < 140$	0,22	0,31
$140 \leq V_{m\acute{a}x} \text{ (km/h)} < 200$	0,22	0,31
$200 \leq V_{m\acute{a}x} \text{ (km/h)} < 250$	0,22	0,35
$250 \leq V_{m\acute{a}x} \text{ (km/h)} < 300$	0,22	0,39
$300 \leq V_{m\acute{a}x} \text{ (km/h)} < 350$	0,22	0,44

Fonte: ADIF – Instrucciones y recomendaciones para la redacción de Proyectos de Plataforma (2006)

Quanto aos valores recomendados pela norma UIC-703R para a máxima aceleração vertical, estes se encontram apresentados na Tabela 4.9:

Tabela 4.9 – Máxima Aceleração Vertical (m/s²) – UIC-703R

Categoria	I			II			III			IV		
	80 - 120			120 - 200			≤ 250			250 - 300		
Velocidade Máxima (km/h)							(FS)			(DB)		
Valores	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Excep.	Normal	Máx.	Normal	Máx.	Normal	Máx.
Aceleração Vertical (m/s ²)	0,20	0,30	0,40	0,20	0,30	-	0,16	0,24	0,20	-	0,45	0,60

FS = Ferrovie Dello Stato Italiane; DB = Deutsch Bahn; SNCF = Société Nationale des Chemins de fer Français;

Fonte: UIC-703R (1989)

4.1.3 Limitações para o raio vertical mínimo

A expressão mais comumente utilizada para o cálculo do raio vertical mínimo é dada pela equação (22), a qual vale tanto para curvas côncavas quanto convexas (PITA, 2006):

$$R_V = \frac{V_{m\acute{a}x}^2}{12,96 \times a_V} \quad (22)$$

onde, “R_v” é o raio vertical (m); “V_{máx}” é a velocidade máxima (km/h); “a_v” é a aceleração vertical (m/s²).

Recomendações para o raio mínimo vertical:

Os critérios recomendados pela norma N.R.V 0-2-0.0 para a máxima aceleração vertical estão apresentados na Tabela 4.10 a seguir:

Tabela 4.10 – Raio mínimo vertical (m) – N.R.V. 0-2-0.0

Velocidade de Projeto (km/h)		V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 200	200 < V ≤ 250
Novas linhas e adaptação de linhas existentes com mudança de traçado	Normal	5.100	6.600	16.000	24.000
	Excepcional	3.800	4.900	10.000	16.000
Melhoras de vias existentes	Normal	5.100	6.600	10.000	-
	Excepcional	3.800	4.400	7.700	-

Raio mínimo em curvas convexas: 3.000 m

Raio mínimo em curvas côncavas: 2.000 m

Caso a curva vertical coincida com uma curva horizontal, o raio mínimo da curva vertical será de 5.000 m

Velocidade de Projeto (km/h)	V ≤ 140	140 < V ≤ 160	160 < V ≤ 180	180 < V ≤ 200
Adaptação de linhas existentes para circulação de trens sem limitação da velocidade	3.100	4.000	5.000	6.900

Fonte: N.R.V. 0-2-0.0. (1988)

De acordo com a norma europeia ENV 13803-1, os valores admissíveis para a máxima aceleração vertical, encontram-se apresentados na Tabela 4.11 a seguir:

Tabela 4.11 – Raio mínimo vertical (m) – ENV 13803-1

Categorias do Tráfego	Valores Máx. Recomendados ($V_{máx}$ em km/h)	Valores Máx. Permitidos ($V_{máx}$ em km/h)
I: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 80 e 120 km/h	$0,35.V_{máx}^2$ ⁽²⁾	$0,25.V_{máx}^2$ ⁽³⁾
Ila: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 120 e 160 km/h	$0,35.V_{máx}^2$	$0,25.V_{máx}^2$ ⁽³⁾
Ilb: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 160 e 200 km/h	$0,35.V_{máx}^2$	$0,25.V_{máx}^2$ ⁽³⁾
III: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades máximas compreendidas entre 200 e 300 km/h	$0,35.V_{máx}^2$	$0,175.V_{máx}^2$ ⁽¹⁾
IV: Linhas de tráfego misto, com trens de passageiros e velocidades até 230 km/h (ou 250 km/h nas menores linhas), com veículos de características técnicas especiais	$0,35.V_{máx}^2$	$0,25.V_{máx}^2$ ⁽³⁾
V: Linhas de tráfego de passageiros com velocidades máximas compreendidas entre 250 e 300 km/h	$0,35.V_{máx}^2$	$0,175.V_{máx}^2$ ⁽¹⁾

(1) Tem-se uma tolerância de + 10% em curvas convexas e de + 30% em curvas côncavas

(2) Nas linhas em que os passageiros podem circular de pé, recomenda-se $R_v \leq 0,77.V_{máx}^2$

(3) Os raios verticais mínimos não devem ser inferiores à 2.000 m

Fonte: ENV 13803-1 (2010)

Segundo os critérios da SNCF, os limites sugeridos para a escolha do raio mínimo vertical para linhas ferroviárias de alta velocidade, estão de acordo com os apresentados na Tabela 4.12 a seguir:

Tabela 4.12 – Raio mínimo vertical (m) – SNCF

Raio Mínimo Vertical (m)		Normal	Excepcional
V = 300 km/h	Curva côncava	$R_v = 16.000$	$R_v = 12.000$
	Curva Convexa	$R_v = 16.000$	$R_v = 14.000$
V = 350 km/h	Curva côncava	$R_v = 19.000$	$R_v = 18.500$
	Curva Convexa	$R_v = 19.000$	$R_v = 21.000$

Fonte: ALIAS (1984)

Quanto aos critérios da AREMA para a escolha do raio mínimo vertical, estes podem ser vistos na Tabela 4.13:

Tabela 4.13 – Raio mínimo vertical (m) – AREMA

Máxima Aceleração Vertical (m/s²)	Linhas de Tráfego misto projetadas para trens de passageiros 200 < V ≤ 300 km/h	Linhas de Tráfego misto com trens de passageiros V ≤ 250 km/h	Linhas de alta velocidade dedicadas para tráfego de passageiros 200 < V ≤ 300 km/h
Valores limites Recomendados	$0,35.V_{máx}^2$	$0,35.V_{máx}^2$	$0,35.V_{máx}^2$
Limites Máximos Recomendados	$0,175.V_{máx}^2$	$0,25.V_{máx}^2$	$0,175.V_{máx}^2$

Fonte: AREMA (2009)

4.1.4 Limitações das variações bruscas de aceleração

Como as curvas verticais se definem, geralmente, mediante parábolas de eixo vertical, sem a inserção de uma curva de transição entre a tangente e a curva vertical, isso pode acarretar em um salto da aceleração vertical nos extremos da curva, produzindo uma oscilação na suspensão do trem e uma sensação de desconforto para os passageiros (PITA, 2006).

Nesse contexto, caso duas curvas verticais de sinais opostos sejam colocadas consecutivamente, sem intercalar uma tangente vertical de comprimento adequado entre elas, o salto da aceleração vertical de cada uma dessas curvas verticais devem ser somados, alcançando um valor considerável e podendo produzir os seguintes efeitos (SAÑA, 2007):

- Rápida descarga da suspensão ao passar de uma curva côncava para uma convexa;
- Maior carga da suspensão ao passar de uma curva convexa para uma côncava;
- Maior sensação de incômodo aos passageiros pelo salto da aceleração vertical, o qual é produzido gradualmente devido à suspensão.

Entretanto, do ponto de vista de conforto do passageiro, é mais desfavorável um salto brusco na aceleração vertical do que circular pela via submetido a uma aceleração vertical constante de mesmo valor. Como consequência disso, o salto da aceleração vertical que se produz no encontro das tangentes verticais com as curvas verticais parabólicas, é um fator mais limitador do que a máxima aceleração vertical permitida na curva vertical (SAÑA, 2007).

Sendo assim, para reduzir o salto produzido pela aceleração vertical, cabem duas possibilidades, que são aumentar o parâmetro de curvatura K_v ou inserir curvas de transição entre as tangentes e as curvas verticais. Apesar de que ambos impliquem num aumento considerável do comprimento da curva vertical, a solução amplamente utilizada na atualidade é aumentar o parâmetro de curvatura, levando em conta as seguintes considerações (SAÑA, 2007):

- **Comprimento mínimo da curva vertical:** é necessário que transcorra um tempo entre um salto da aceleração vertical e o seguinte, para permitir a amortização da suspensão e evitar uma superposição de efeitos, que podem levar o veículo a ter grandes oscilações. Por isso, procura-se limitar o comprimento mínimo das curvas verticais.

- **Comprimento mínimo da tangente vertical:** se estabelece um comprimento mínimo de tangente vertical entre duas curvas verticais consecutivas, de forma que os saltos da aceleração vertical produzidos não se superponham. Assim, evitam-se efeitos negativos na suspensão dos veículos e no conforto dos passageiros.

Recomendações para o comprimento mínimo de curvas e tangentes verticais:

Segundo a norma N.R.V. 0-2-0.0 o comprimento mínimo de uma tangente vertical está compreendido entre 40% e 50% do valor da velocidade de projeto do trem, em km/h, assim como mostra a Tabela 4.14:

Tabela 4.14 – Comprimento mínimo da tangente vertical (m) – N.R.V. 0-2-0.0

Velocidade de Projeto (km/h)	$V \leq 140$	$140 < V \leq 160$	$160 < V \leq 200$	$200 < V \leq 250$
Novas linhas e adaptação de linhas existentes com mudança de traçado	70	80	100	100
Melhoras de vias existentes	70	80	100	-

Fonte: N.R.V. 0-2-0.0. (1988)

Quanto às recomendações e instruções de projetos da ADIF, edição de junho de 2006, admite-se os seguintes comprimentos mínimos tanto para as curvas verticais quanto para as tangentes posicionadas entre as curvas verticais, conforme expressos na Tabela 4.15 a seguir:

Tabela 4.15 – Comprimento mínimo de curvas e tangentes verticais (m) – ADIF

Velocidade Máxima de Projeto (km/h)	Comprimento mínimo de curvas verticais e de tangentes entre curvas verticais (m)	
	Normal	Excepcional
$V_{\text{máx}} < 140$	$\geq V_{\text{máx}}/3$	$\geq V_{\text{máx}}/4$
$140 \leq V_{\text{máx}} < 200$	$\geq V_{\text{máx}}/2$	$\geq V_{\text{máx}}/3$
$200 \leq V_{\text{máx}} < 350$	$\geq V_{\text{máx}}/1,5$	$\geq V_{\text{máx}}/2$

Fonte: ADIF – Instrucciones y recomendaciones para la redacción de Proyectos de Plataforma (2006)

Já com relação à norma da AREMA, o comprimento da curva vertical pode ser calculado pela equação (23):

$$L = \frac{\Delta_i \times V^2}{12,96 \times a_v} \quad (23)$$

onde, “L” é o comprimento da curva vertical (m); “ a_v ” é a aceleração vertical (m/s^2); “ Δ_i ” é o valor absoluto da diferença de rampas expresso em decimal; “V” é a velocidade de projeto (m/s).

O comprimento mínimo de curva vertical recomendado pela norma americana da AREMA é de 30 m, o qual é o mesmo valor recomendado para a tangente vertical.

5. SEÇÃO TRANSVERSAL

Para a determinação da diretriz de traçado em planta e perfil, é preciso se levar em consideração as premissas adotadas para os elementos que constituem a seção transversal, pois, somente a partir daí, é que se consegue definir os dispositivos que ocuparão a faixa ferroviária, como os componentes da superestrutura ferroviária, a envoltória do trem, limites de fechamento da faixa, cabos de sinalização, postes de rede aérea, dispositivos de drenagem e demais interferências.

Como existem infinitos cenários para a seção transversal, cada projeto assume premissas específicas distintas, não sendo possível representá-los todos nessa dissertação. Sendo assim, com relação à seção transversal, serão abordados somente os principais parâmetros de projeto geométricos que são comuns à maioria dos projetos ferroviários, como o estudo acerca da bitola, da entrevia, do posicionamento do eixo de referência do traçado e da definição do ponto de referência do greide em relação à seção.

5.1 BITOLA DA VIA

A bitola ferroviária é considerada a distância entre as faces internas dos boletos (CRUZ, 1981), conforme pode ser observado na Figura 5.1 a seguir:



Figura 5.1 – Bitola Ferroviária

As bitolas mais utilizadas em ferrovias de todo o mundo são:

- Bitola métrica: 1,000 m;
- Bitola normal: 1,435m;
- Bitola ibérica: 1,668m.

Normalmente, a bitola normal é a que se utiliza para novas linhas de alta velocidade, sendo também amplamente utilizada pelas linhas européias existentes. Já as linhas espanholas adotam geralmente a bitola ibérica para seus traçados ferroviários, porém é a menos utilizada por agregar um maior custo de construção da linha, apesar de garantir maior estabilidade. Analogamente, a bitola métrica, por apresentar um menor arrasto aerodinâmico bem como um deslocamento relativo menor entre as rodas do mesmo eixo ao circular por uma curva, possibilita a utilização de raios menores e rampas maiores, resultando em um traçado que se ajusta mais ao terreno natural, permitindo uma maior economia na construção da linha. Em contrapartida, para a alta velocidade a bitola métrica é menos utilizada, já que proporciona uma menor estabilidade do trem, o que se traduz numa diminuição da velocidade de circulação, especialmente em regiões que requerem curvas de raios menores (RIVES, PITA, PUENTE, 1977).

5.2 ENTREVIA

No caso de linhas ferroviárias com vias múltiplas, faz-se necessário prever a coincidência de dois trens cruzando simultaneamente uma mesma seção transversal da linha em duas vias adjacentes. Esta situação leva à consideração de uma distância mínima que se deve estabelecer entre os eixos de duas vias adjacentes, de tal forma que se garanta a segurança necessária para evitar o choque dos trens. A Figura 5.2 mostrada na sequência ilustra a entrevista de uma faixa ferroviária com via dupla:

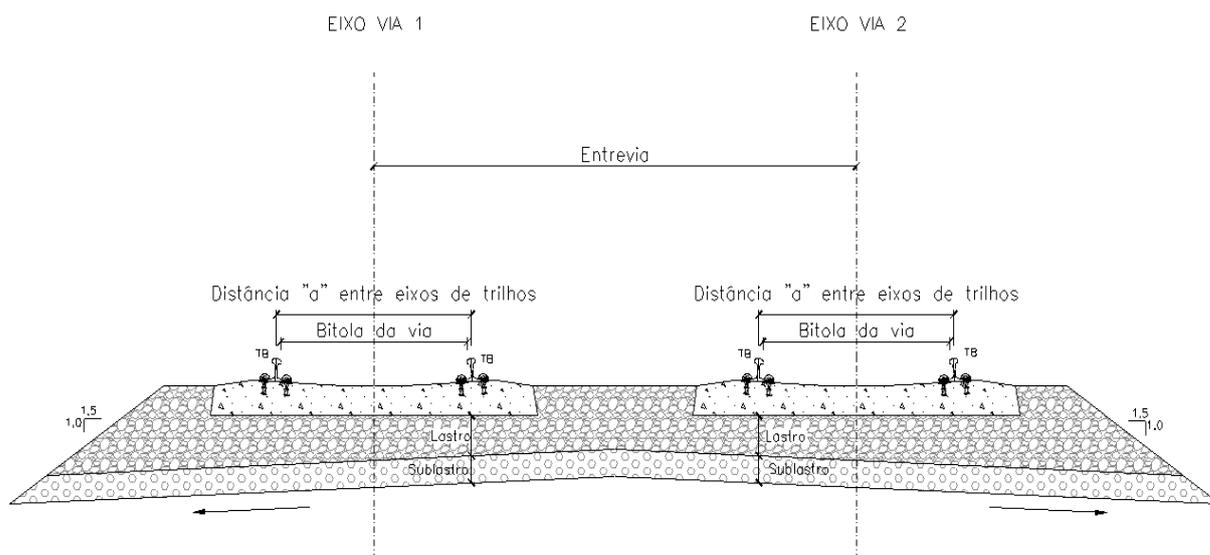


Figura 5.2 – Entrevia ferroviária para via dupla

5.2.1 Via em tangente

No caso do traçado em planta ser retilíneo, pode-se manter a entrevia constante ao longo de toda a extensão da reta, sem a necessidade de ter que aumentar seu valor em algum ponto.

A entrevia mínima adotada pela RENFE para o caso de um alinhamento retilíneo é de 3,800 m para trilhos de 45 kg/m e de 3,808 m para trilhos de 54 kg/m, enquanto que para a SNCF é de 3,700 m. Para as ferrovias britânicas, alemãs e soviéticas, são adotadas, respectivamente, uma entrevia de 3,404 m, 3,600 m e 4,700 m, sendo que a bitola utilizada nessa última é de 1,524 m. Porém, para a alta velocidade ferroviária, os valores da entrevia em condições de via reta geralmente são sempre superiores a 4,000 m (RIVES; PITA; PUENTE, 1977).

5.2.2 Via em curva

Quando um veículo ferroviário trafega por uma curva, a caixa não segue o caminho curvo, já que não consegue se adaptar por ser uma estrutura rígida.

Dessa forma, o veículo ocupa uma posição tal que sua parte central invade o interior da curva, e suas laterais saem ao exterior da mesma, conforme pode ser observado na Figura 5.3 (RIVES, PITA, PUENTE, 1977):

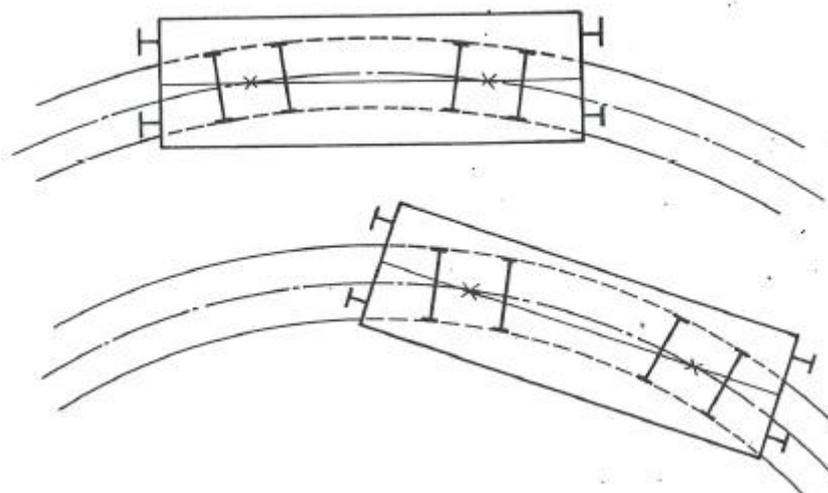


Figura 5.3 – Diminuição da entrevia efetiva nas curvas

Tendo isso em vista, nas linhas com vias duplas ou múltiplas, ocorre uma diminuição entre os pontos mais salientes dos veículos ao cruzarem simultaneamente uma seção transversal em curva, comparado ao cruzamento em uma reta, o que é indesejável, pois aumenta o risco de contato entre os mesmos.

Além desse efeito, ainda existe uma aproximação dos trens produzida pelo plano vertical, causada pela diferença de superelevação entre as duas vias, e também devido à flexibilidade transversal das suspensões dos veículos e às folgas transversais tanto da via quanto do material rodante, como será visto mais detalhadamente na seqüência (RIVES; PITA; PUENTE, 1977).

5.2.2.1 Efeito do comprimento do veículo na entrevia para vias em curva

A distância entre o eixo longitudinal da caixa do veículo e o eixo da via, obriga a considerar um incremento no valor da entrevia, denominado sobrelargura, a qual

pode ser calculada por meio de simples relações geométricas, através do esquema mostrado na Figura 5.4:

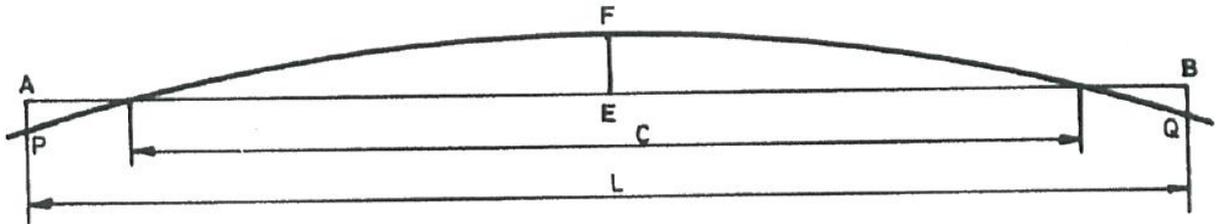


Figura 5.4 – Esquema do princípio de cálculo da sobrelargura devido ao efeito da curva

Segundo Rives, Pita e Puente (1977), a sobrelargura necessária do centro do veículo para o interior da curva pode ser calculado pela equação 24, enquanto que a sobrelargura necessária dos extremos do veículo para o exterior da curva pode ser calculado pela equação 25:

$$EF = \frac{C^2}{8 \times R} \quad (24)$$

$$AP = BQ = \frac{L^2 - C^2}{8 \times R} \quad (25)$$

onde, "L" é o comprimento total do veículo (mm); "C" é a distância entre os eixos dos truques dos veículos (mm); "R" é o raio da curva horizontal (mm). Se denominam compensados os veículos em que $EF = AP = BQ$.

5.2.2.2 Efeito da superelevação na entrevista

Como conseqüência da superelevação, o veículo se inclina para o interior da curva, necessitando, portanto, acrescentar à entrevista uma sobrelargura, cujo valor pode ser calculado, aproximadamente, pela equação 26 (RIVES; PITA; PUENTE, 1977):

$$d = \frac{H \times z}{a} \quad (26)$$

onde, “H” é a altura do veículo (mm); “z” é a superelevação (mm); “a” é a distância entre os eixos dos trilhos (mm); “d” é a sobrelargura devido à superelevação (mm).

O efeito da superelevação descrito anteriormente pode ser verificado na Figura 5.5 a seguir:

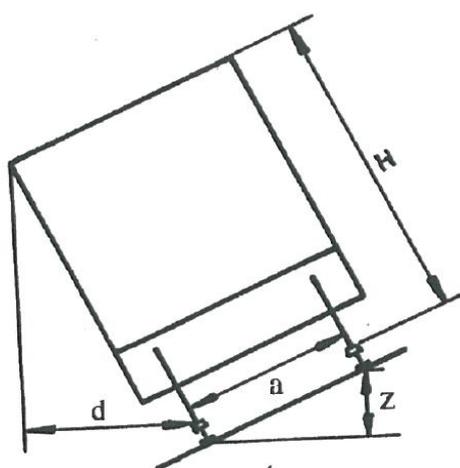


Figura 5.5 – Diminuição da entrevia efetiva devido à superelevação

5.2.2.3 Efeito da elasticidade transversal das suspensões na entrevia

Como já citado anteriormente, devido á força centrífuga não compensada, as caixas dos veículos apresentam uma tendência de deslocar-se para o exterior da curva se a velocidade de circulação é maior que a de equilíbrio, e uma tendência de deslocar-se para o interior da curva se a velocidade é menor que a de equilíbrio. Nesse âmbito, segundo Rives, Pita e Puente (1977), o valor do aumento de entrevia necessário devido a essas razões são fixados em 25% do valor obtido na sobrelargura devido à superelevação (d).

5.2.2.4 Efeito das folgas transversais da via e do veículo na entrela

Deve-se considerar esse efeito durante o estabelecimento da entrela na curva, sendo que a quantificação deste efeito depende, principalmente, das características da via e dos veículos. Segundo Rives, Pita e Puente (1977), este efeito pode ser considerado como 2,5% do valor da entrela total obtida, já considerando os três efeitos anteriores.

5.2.3 Sobrelargura da via em curva

Para uma melhor circulação do material rodante em curvas com raio reduzido, como em pátios ferroviários e regiões de estações, a sobrelargura é aplicada gradualmente durante uma curva de transição para garantir o gabarito de circulação das composições ferroviárias. Com isso, o valor da sobrelargura é repartido ao meio entre os dois trilhos (RIVES, PITA, PUENTE, 1977).

Segundo a norma N.R.V. 7-3-2-0, da RENFE, os valores de sobrelargura são estabelecidos em função do raio horizontal, conforme mostra a tabela 5.1 a seguir:

Tabela 5.1 – Sobrelargura (m) – N.R.V. 7-3-2-0

Raio Horizontal (m)	Sobrelargura (mm)
R > 300	0
$300 \leq R < 250$	5
$250 \leq R < 200$	10
$200 \leq R < 150$	15
$150 \leq R < 100$	20

Fonte: N.R.V. 7-3-2-0 (1983)

5.3 DEFINIÇÃO DO PONTO DE REFERÊNCIA DO GREIDE EM RELAÇÃO À SEÇÃO

Para se definir o ponto de referência do greide em relação à seção transversal, costuma-se estabelecer os seguintes critérios (PITA, 2006):

- **Critério 1 – linha do greide definida pela cota do trilho mais baixo:**

Utilizando esse critério, define-se o traçado em perfil associando cada ponto do eixo à cota do trilho mais baixo. Entretanto, nos casos de traçado com via singela, o eixo do traçado em planta deve coincidir com o eixo da via, enquanto que o perfil longitudinal se define mediante a projeção sobre a cota do trilho mais baixo. Já nos casos de traçado com via dupla, o eixo do traçado em planta será comum para as duas vias, coincidindo com o eixo intermediário das duas vias, sendo que o perfil longitudinal se define mediante a projeção da cota do trilho mais baixo de cada uma das vias sobre o eixo do traçado.

- **Critério 2 – linha do greide definida pelo valor médio entre as cotas do trilho mais alto e do trilho mais baixo:**

Utilizando esse critério para traçados com via dupla, o eixo do traçado horizontal será comum para as duas vias, coincidindo com o eixo intermediário das duas vias, sendo que no perfil longitudinal, a cota de cada ponto do eixo do traçado em perfil é igual à projeção da cota correspondente ao eixo de cada uma das vias, sabendo que o valor dessas cotas é o valor médio das cotas do trilho mais alto e mais baixo.

Já se esse critério for utilizado para via singela, o eixo do traçado em planta deverá coincidir com o eixo da via, enquanto que o perfil longitudinal será definido pela cota do eixo vertical, cujo valor é a média entre a cota do trilho mais alto e do trilho mais baixo.

5.3.1 Análise dos critérios de definição do ponto de referência do greide

Para decidir qual critério é o mais adequado a ser utilizado, é preciso que se faça uma análise das vantagens e desvantagens de cada um deles, com relação à implantação e funcionalidade da via, bem como às características do tráfego ferroviário.

5.3.1.1 Implantação da via

Com relação ao Critério 1, pelo fato do eixo do greide coincidir com uma referência física, que é a cota do trilho mais baixo, isso simplifica a operação matemática do cálculo para implantação da obra, uma vez que a implantação do trilho mais baixo se baseia numa referência constante em relação a cota da plataforma da ferroviária. Já a implantação do trilho mais alto é feita a partir da elevação deste em relação ao trilho mais baixo, caso haja superelevação.

Quanto ao Critério 2, este exige um maior esforço matemático para o cálculo da implantação da obra, pois é preciso considerar que a cota do eixo do greide é a cota média entre o trilho mais alto e o mais baixo. Sendo assim, deve-se descontar a diferença de valor da cota média com a cota dos trilhos mais altos e mais baixos, para definir a cota real dos trilhos a serem implantados.

5.3.1.2 Funcionalidade da via

Na circulação ferroviária, em situações de tangente, o centro de gravidade do material rodante situa-se sobre o eixo da via, enquanto que nas curvas, o eixo de gravidade do material rodante fica ligeiramente deslocado em relação ao eixo da via. Tendo isso em vista, no Critério 1, o greide definido não coincide com o eixo que descreve o centro de gravidade do veículo, visto que, num traçado plano com situação de curva horizontal, por exemplo, o material rodante terá um acréscimo

de cerca da metade do valor da superelevação, fazendo com que o eixo de gravidade do trem suba devido à como consequência dessa superelevação.

Já no Critério 2, a cota do greide definida é muito próxima à cota que descreve o centro de gravidade do veículo, visto que nas curvas a diferença dessas cotas diminui, como consequência da inclinação gerada pela superelevação.

5.3.1.3 Variação das características do tráfego ferroviário

Em linhas ferroviárias de tráfego misto é freqüente que, em casos de diminuição da proporção do tráfego de trens de carga em relação a trens de passageiros, ocorra um aumento da velocidade dos trens que circulam na linha, o que implica na necessidade de se aumentar o valor da superelevação. Visto isso, de acordo com o Critério 1, o aumento da superelevação não implica em uma modificação do greide, já que basta subir o trilho alto em relação ao trilho baixo, para se manter a mesma posição.

Já no Critério 2, o aumento da superelevação ocorreria a partir de uma torção da superestrutura ferroviária a partir do eixo do traçado em planta para elevar um trilho em relação ao outro, o que implicaria na necessidade de rebaixar a plataforma ferroviária sob o trilho mais baixo e, conseqüentemente, resultaria em modificações no greide.

5.3.1.4 Utilização habitual

Conforme apresentado anteriormente, devido a menor complexidade dos cálculos matemáticos de projeto e para a implantação da via, o Critério 1 é o habitualmente mais utilizado no âmbito internacional. Além disso, esse critério é favorável para que se garanta uma altura de lastro mínima, fazendo com que o projeto do greide possa se desvincular da altura do lastro mínimo, a qual, normalmente, gira em torno de 30 cm.

6. EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL – TRENS DE ALTA VELOCIDADE

A implantação dos trens de alta velocidade envolve aspectos econômicos, demográficos e geográficos que condicionam fortemente a factibilidade da alta velocidade ferroviária e seu entendimento é uma primeira aproximação aos limites e possibilidades desse tipo de transporte. Nesse âmbito, é interessante que se apresente as principais experiências adquiridas internacionalmente, para que sirvam de referência para novos projetos.

Em outros países, a construção de linhas aptas à implementação de serviços de alta velocidade ocorre, de forma geral, devido à necessidade de superar os problemas de falta de capacidade de linhas ferroviárias convencionais, ou também para melhorar substancialmente a oferta de transporte de passageiros a médias e longas distâncias.

Com relação à geometria da via, a experiência internacional mostra que certos critérios de projeto geométrico para novos traçados do TAV, podem incidir de forma significativa na redução dos custos de implantação. Porém, sabe-se também que, se não empregados corretamente, esses critérios podem limitar o sistema de exploração da linha, como, por exemplo, excedendo os valores máximos de rampa.

Contanto, uma possível redução dos custos de implantação, mediante a adoção de certos critérios de projeto geométrico, nem sempre é uma regra geral que ocorra para níveis econômicos significativos, devendo-se levar em conta o seu possível impacto prático, considerando fatores como a topografia da região atravessada pela linha, ou valores relativos adotados para o raio das curvas ou rampas do traçado.

Neste mérito, é interessante conhecer o esforço adotado em ferrovias francesas e alemãs, para tentar otimizar a rampa máxima de algumas linhas de alta velocidade, conforme se pode verificar na Tabela 6.1:

Tabela 6.1 – Impacto da adoção da rampa máxima nos custos de implantação

Localidade	Redução de Custos ao passar de 1.25% de rampa para 3.5% *
Paris-Lyon (França)	30%
Linha de Rhur (Alemanha)	
- Traçado de Westenwald	13%
- Traçado Hagen-Friedberg	9%
- Traçado via Koblenz	3%
Hannover - Wurzburg (Rethen - Kassel)	11%
Mannheim-Stuttgart	10%

* 1,5% com relação a Paris-Lyon

Fonte: PITA (1991)

Na perspectiva de se definir o traçado de uma linha ferroviária de alta velocidade, os parâmetros de maior importância e repercussão prática a serem levados em conta para a viabilidade do sistema, de acordo com a experiência internacional, estão listados a seguir (PITA, 2008):

- Raio mínimo horizontal das curvas em planta associados à superelevação;
- Entrelaço;
- Seção dos túneis;
- Rampa máxima;
- Raio mínimo das curvas verticais.

As primeiras linhas de alta velocidade do mundo foram projetadas em meados da década de 50 do século XX no Japão, num momento em que a máxima velocidade de circulação comercial da Europa se situava em torno de 140 a 150 km/h. É racional, portanto, pensar que os parâmetros geométricos adotados para essa linha, a qual ligava Tokyo–Osaka, tenham sido sensivelmente diferentes dos empregados para o projeto, por exemplo, da linha TGV-Este, aberta para exploração comercial no ano de 2007 (Revista do BNDES – Jun 2008).

Para um melhor entendimento da evolução dos critérios de projeto geométrico ao longo do tempo, na seqüência da dissertação serão abordados os principais critérios empregados em linhas de alta velocidade de diversos países do mundo, e em diferentes períodos, possibilitando, dessa forma, que se tenha também uma noção da ordem de grandeza de parâmetros já utilizados em ferrovias consolidadas ao redor do mundo.

6.1 PANORAMA INTERNACIONAL

A maior parte dos serviços ferroviários de alta velocidade atende rotas domésticas. Ao redor do mundo, os TAV's atualmente em operação estão concentrados em países de maior renda per capita, pois essa modalidade de transporte tem altos custos de implantação e suas tarifas são caras. O público-alvo principal são usuários com níveis de renda média ou alta e pessoas que viajam por motivo de negócios ou trabalho. Mesmo cobrando passagens caras e atendendo um grande número de passageiros, as ferrovias de alta velocidade não são capazes de recuperar, através da venda de passagens, a totalidade de seus custos de construção, por isso, recursos públicos sempre foram utilizados, em maior ou menor escala, para viabilizar a implantação dos trens de alta velocidade (Revista do BNDES – Jun 2008).

Vários países estão em processo de estudo e planejamento de TAV. Na Argentina, o governo federal pretende a implantação de uma linha de alta velocidade entre Buenos Aires, Rosário e Córdoba. Nos Estados Unidos, existem planos de construir uma linha entre São Francisco e Los Angeles. Já em Portugal, estão em planejamento linhas entre Porto e Lisboa e entre Lisboa e Madri.

Os TAV's construídos na Coreia do Sul e em Taiwan são de particular interesse, pois foram construídos recentemente, em regiões com topografia desfavorável e que até então não dispunham desse tipo de transporte. As dificuldades encontradas nesses projetos indicam alguns desafios que a alta velocidade teria a enfrentar no Brasil.

A Tabela 6.2 apresentada a seguir indica as principais extensões de vias de alta velocidade em operação, construção e planejamento em diversos países do mundo no ano de 2009:

Tabela 6.2 – Sistemas de alta velocidade em operação, construção e planejamento em 2009

PAÍS	SISTEMAS DE TREM DE ALTA VELOCIDADE				
	Em Operação			Em construção (km)	Em planejamento (km)
	Ano	Extensão (km)			
	Inicial	Atual			
Japão	1964	515	2.387	590	583
França	1981	471	1.872	299	2.616
Itália	1981	224	744	132	395
Alemanha	1988	327	1.285	378	670
Espanha	1992	471	1.599	2.219	1.702
Bélgica	1997	72	137	72	-
Reino Unido	2003	74	113	-	-
China	2003	442	832	3.404	4.075
Coréia	2004	300	300	82	-
Taiwan	2007	345	345	-	-
Holanda	2008	120	120	-	-
Turquia	2009	235	235	510	1.679
Índia	-	-	-	-	495
Irã	-	-	-	-	475
Marrocos	-	-	-	-	680
Portugal	-	-	-	1.006	-
Arábia Saudita	-	-	-	-	550
TOTAL			9.969	8.692	13.920

Fonte: Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2 (2009)

6.2 JAPÃO

O Japão foi a primeira nação a construir uma rede ferroviária de alta velocidade, o Tokaido Shinkansen, que abriu em 1964 para os Jogos Olímpicos de Tóquio. Foi um sucesso imediato, transportando 10 milhões de passageiros dentro de três anos, e, desde então, a rede tem sido progressivamente estendida por todo o

arquipélago japonês com mais de 2.300km de vias, servindo, principalmente, as áreas de grande população que estão concentradas nas regiões costeiras (Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2).

É o país com mais alta participação da ferrovia no transporte de passageiros, com 27% do transporte sendo realizado pelo meio ferroviário. A grande população, com 128 milhões de habitantes, em uma área pequena e montanhosa resultou em enormes regiões urbanas nos vales próximos à costa. Tendo isso em vista, o transporte ferroviário foi adotado como solução para a mobilidade da população, tanto nas áreas urbanas quanto entre elas. Dessa forma, os trilhos no Japão são usados principalmente para o transporte de passageiros, sendo que a participação das ferrovias no transporte de cargas é de apenas 4% da tonelagem-quilômetro total (Revista do BNDES – Jun 2008).

O planejamento da linha de alta velocidade entre Tóquio e Osaka se iniciou em 1955, através do estabelecimento de critérios de projeto geométrico que permitissem que esta fosse a primeira infraestrutura ferroviária apta a circular acima dos 200 km/h. Apesar de nesse mesmo ano a França ter alcançado 331 km/h em um ensaio, a velocidade máxima autorizada para a circulação de trens nas ferrovias francesas era de apenas 150 km/h (PITA, 2010).

A primeira linha de alta velocidade foi projetada com os seguintes parâmetros geométricos expressos na Tabela 6.3:

Tabela 6.3 – Parâmetros geométricos da linha Tóquio - Osaka

Parâmetro	Valor	Observação
Entrevia	4,20 m	Nas linhas europeias convencionais eram da ordem de 3,80 m
Raio mínimo horizontal ($R_{\min. H}$)	2.500 m	-
Velocidade máxima (V_{\max})	250 km/h	Inicialmente era de 210 km/h e, posteriormente 250 km/h
Rampa máxima (I_{\max})	2%	-
Seção dos Túneis	62 m ²	Nas linhas convencionais as seções variavam entre 40 e 50 m ²

Fonte: PITA (2008)

A segunda linha de alta velocidade do Japão, cuja construção se iniciou em 1969 e ligava Osaka e Okayama, adotou critérios de projeto geométrico mais conservadores que a primeira linha. Tanto os valores do raio horizontal mínimo quanto o valor da entrevia foram aumentados para permitir uma velocidade máxima de 250 km/h na maior parte do traçado, com a mesma coisa acontecendo para o valor da seção dos túneis. Já com relação à rampa, houve uma diminuição do valor da rampa máxima, permitindo também um aproveitamento melhor da velocidade máxima ao longo do percurso (PITA, 2010).

Os critérios geométricos adotados para a linha Osaka - Okayama podem ser vistos na Tabela 6.4 a seguir:

Tabela 6.4 – Parâmetros geométricos da linha Osaka - Okayama

Parâmetro	Valor	Observação
Entrevia	4,30 m	Maior entrevia comparada a linha Tokyo - Osaka
Raio mínimo horizontal ($R_{\min. H}$)	4.000 m	Maior $R_{\min. H}$ comparado a linha Tokyo - Osaka
Velocidade máxima (V_{\max})	250 km/h	-
Rampa máxima (I_{\max})	1,5%	Diminuição da rampa máxima
Seção dos Túneis	64 m ²	Aumento da seção dos túneis comparada a linha Tokyo - Osaka

Fonte: PITA (2008)

É interessante ressaltar que as seguintes linhas de alta velocidade projetadas no Japão, antes da chegada do TGV na Europa, foram construídas com os mesmos critérios da linha Osaka – Okayama. São as linhas Omiya – Niigata, de 270 km de extensão, e que foi inaugurada em novembro de 1982, e a linha Omiya – Morioka, com 465 km de extensão, e que está em exploração comercial desde junho de 1982 (PITA, 2010).

As linhas Shinkansen são todas construídas com bitola padrão (1,435m), sendo a maior parte construída sobre estruturas de concreto e muito pouco sobre aterros. Já quanto aos indicadores de segurança e de pontualidade da malha ferroviária de alta velocidade japonesa, estes podem ser considerados excepcionais. Desde o início de seu funcionamento, há mais de 45 anos, nenhum acidente com vítimas

fatais foi registrado no Shinkansen, e o atraso médio na linha entre Tóquio e Osaka foi de apenas 36 segundos, em 2005. Mesmo sob nevascas fortes as linhas não sofrem interrupções ou atrasos significativos, enquanto os aeroportos e rodovias adjacentes são fechados ou operam com restrições (Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2).

6.3 FRANÇA

A França foi o segundo país a introduzir ferrovias de alta velocidade. A linha pioneira do Train à Grande Vitesse (TGV), entre Paris e Lyon, numa distância de 425 km, teve o seu planejamento iniciado em 1966 e a construção em 1978, porém sua primeira fase só foi inaugurada em 1981. Como a topografia francesa é relativamente plana e as vias do TGV são em nível, esse fator, associado à utilização das vias convencionais dos trens urbanos na aproximação a Paris, facilitou e barateou a implantação do TGV (Revista do BNDES – Jun 2008).

De forma geral, quanto à geometria, o projeto LGV é similar ao de linhas ferroviárias normais, mas com algumas diferenças cruciais. Os raios das curvas são maiores de forma que os trens possam fazê-las em velocidades mais altas sem aumentar a força centrípeta sentida pelos passageiros, sendo historicamente maiores que 4.000 m. Porém, as novas linhas têm raios mínimos de 7.000 m para permitir futuros aumentos de velocidade. As LGVs são totalmente cercadas para evitar invasores, não são permitidas passagens de nível, e as pontes sobre a linha têm sensores para detectar objetos que caem sobre a via. O diâmetro dos túneis é maior do que normalmente requerido pelo tamanho dos trens, especialmente nas entradas. Isso limita os efeitos de alterações na pressão do ar, o que poderia ser problemático a velocidades de TGV (PITA, 2010).

As linhas usadas apenas para tráfego de alta velocidade podem incorporar rampas mais íngremes que o normal de até 3,5%, o que facilita o planejamento de LGVs e reduz o custo de construção da linha. A grande inércia de TGVs em alta velocidade permite-lhes subir rampas íngremes sem aumentar em muito seu consumo de energia, e também podem deslizar em rampas de descida (PITA, 2010).

O alinhamento das vias também é mais preciso que em linhas ferroviárias convencionais, e o lastro está num perfil mais profundo que o normal, resultando em maior capacidade de carga e estabilidade de via. A via LGV utiliza um trilho mais pesado, o UIC60, e é ancorada por mais dormentes de concreto por quilômetro que o usual, blocos mono ou duplos. A manutenção nas LGVs é realizada durante o período noturno, quando os TGVs não estão em operação (PITA, 2010).

Quanto à configuração e articulação dos trens, os TGVs possuem unidades múltiplas articuladas, semi-permanentemente acopladas, com truques entre os vagões, suportando ambos, e os vagões de tração em cada uma das pontas têm seus próprios truques. Além disso, os trens podem ser encompridados acoplando dois TGVs, usando acopladores escondidos nos bicos dos vagões de tração. Algumas vantagens da articulação estão no melhor conforto, já que os truques não estão debaixo de nenhuma acomodação de passageiros, na melhor estabilidade ao operar em alta velocidade em razão do efeito de direção da articulação sobre os truques, e na diminuição do custo devido à menor utilização de truques por eixo. Por outro lado, uma desvantagem da articulação está na dificuldade de dividir conjuntos de vagões, necessitando de equipamentos especializados de oficina que levem o trem inteiro de uma vez para dividir os vagões, ou seja, diferentemente dos procedimentos padrões de desacoplamento (Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2).

Em relação aos critérios de projeto geométrico, os parâmetros empregados na Linha Paris-Lyon foram similares aos utilizados nas linhas Japonesas que ligavam Osaka-Okayama, Omiya-Niigata e Omiya-Morioka. A única diferença realmente notória nos âmbitos de critérios de projeto entre a primeira linha francesa e as linhas japonesas citadas estão na magnitude das rampas adotadas, sendo que na linha Paris-Lyon alcançou-se uma rampa de 3,5%, o que permitiu, devido à topografia atravessada, que não fosse necessária a construção de nenhum túnel, reduzindo, assim, consideravelmente os custos de implantação. Os parâmetros geométricos empregados nessa linha encontram-se na Tabela 6.5:

Tabela 6.5 – Parâmetros geométricos da linha Paris - Lyon

Parâmetro	Valor	Observação
Entrevia	4,20 m	Maior entrevista comparada a linha Tokyo - Osaka
Raio mínimo horizontal ($R_{\min. H}$)	4.000 m	$R_{\min. H}$ excepcional de 3.250 m
Velocidade máxima (V_{\max})	250 km/h	-
Rampa máxima (I_{\max})	3,5%	Aumento da rampa máxima para evitar construção de túneis
Seção dos Túneis	-	Não existem túneis nessa linha

Fonte: PITA (2008)

Apesar da participação da ferrovia no transporte de passageiros na França ser bem menor do que no Japão, sendo de 9,6%, o sucesso da primeira linha de alta velocidade levou a uma expansão da rede, com novas LGVs (ligne à grande vitesse) construídas ao norte, sul, leste e oeste de todo o país (Revista do BNDES – Jun 2008). No período entre 1990 e 1996 entraram em serviço comercial 865 km de novas linhas de alta velocidade: TGV-Atlântico (294 km); TGV-Rhone-Alpes (121 km); TGV-Norte (346 km) e TGV-Interconexión (104 km). Os principais parâmetros geométricos de cada uma das linhas mencionadas se encontram na Tabela 6.6 a seguir:

Tabela 6.6 – Parâmetros geométricos das linhas de alta velocidade da França

Linha	Início do Serviço Comercial	Raio das Curvas Horizontais	Rampa Máxima	Entrevia
TGV-Atlântico	1989-1990	6.000 m	2,5%	4,5 m
TGV-Rhone-Alpes	1992-1994	Zona Norte - 4.000 m Zona Sul - 6.000 m	3,5%	4,5 m
TGV-Norte	1994-1996	6.000 m	2,5%	4,5 m
TGV-Interconexión	1994-1996	4.000 m (3.250 m)	2,5%	4,2 m

Fonte: PITA (2008)

Analisando a Tabela 6.6, apresentada anteriormente, verifica-se uma tendência de adotar como 6.000 m o raio mínimo das curvas em planta, 4,5 m o valor da

entrevia e de 2,5 a 3,5% a rampa máxima. Nota-se, no entanto, que em algumas linhas o raio mínimo foi reduzido para 4.000 m e, excepcionalmente, para 3.250 m, o que se explica devido ao fato de estarem em regiões densamente povoadas. Por esta razão, adotaram-se, nessas regiões, magnitudes semelhantes as que foram referência na primeira linha de alta velocidade da França, no trecho Paris-Lyon, porém, nesta última, os trens operam com uma velocidade de operação em torno de 260 km/h, enquanto que, nas demais linhas essa velocidade chega até 300 km/h.

As mais novas linhas francesas a serem exploradas comercialmente foram a TGV-Mediterrâneo (259 km), que liga Valência-Marselha e foi aberta em 2001, e a TGV-Este, inaugurada, com um trecho inicial, no ano de 2007 e que liga Paris-Brecourt. Os parâmetros geométricos empregados nessas linhas encontram-se na Tabela 6.7 a seguir:

Tabela 6.7 – Parâmetros geométricos das linhas TGV-Este e TGV-Mediterrâneo

Parâmetro	Valor	Observação
Entrevia	4,50 m	-
Raio mínimo horizontal ($R_{\min. H}$)	7.143 m	$R_{\min. H}$ excepcional de 5.556 m
Velocidade máxima (V_{\max})	300 km/h	Tramo autorizado a operar a 320 km/h
Rampa máxima (I_{\max})	3,5%	-
Seção dos Túneis	63 m ²	V_{\max} no túnel de Marselha é de 230 km/h

Fonte: PITA (2010)

6.4 ALEMANHA

Na Alemanha, o serviço InterCity Express (ICE) iniciou suas operações em 1991, nas rotas entre Hamburgo e Wurzburg, com 327 km, e entre Mannheim e Stuttgart, com 100 km, a uma velocidade máxima de 250 km/h trens de passageiro. A estratégia adotada foi o compartilhamento das vias entre serviços de passageiros e de cargas, ao contrário de França e Japão, onde as linhas de alta velocidade são

exclusivas. Entre Hamburgo e Wurzburg, os trens de carga percorrem a linha de alta velocidade durante a noite, a 120 km/h, em intervalos de seis minutos, com os trens de carga mais leves circulando a velocidade máxima de 160 km/h (Revista do BNDES – Jun 2008). Os parâmetros geométricos dessas linhas estão apresentados na Tabela 6.8 a seguir:

Tabela 6.8 – Parâmetros geométricos das primeiras linhas de alta velocidade da Alemanha

Parâmetro	Valor	Observação
Raio mínimo horizontal ($R_{\min. H}$)	5.100 m	Raio de 7.000 m para situações "normais"
Velocidade máxima (V_{\max})	250 km/h	Para trens de carga a V_{\max} está entre 80 a 120 km/h
Rampa máxima (I_{\max})	1,25%	-
In + E (Insuficiência + Excesso) de superelevação	130 mm	130 mm para situações onde emprega-se o raio mínimo e 80 mm para situações de raio normal

Fonte: PITA (2008)

A justificativa para se adotar um raio normal e um raio mínimo em planta, ocorre devido à velocidade dos trens de carga se situar entre 80 e 120 km/h. Quanto à rampa máxima do traçado, fixou-se o valor de 1,25% com o objetivo de possibilitar a circulação de trens de carga mais pesados (PITA, 2010).

No período entre 2000 e 2008, foram abertas à exploração comercial diversas linhas de alta velocidade na Alemanha, tal como pode ser visto na Tabela 6.9:

Tabela 6.9 – Linhas de alta velocidade alemãs abertas ao serviço comercial no período de 2000 - 2008

Linha	Velocidade (km/h)	Abertura Comercial	Extensão (km)
Colônia - Frankfurt	300	2002/2004	197
Colônia - Düren	250	2003	42
(Karlsruhe) Rastatt - Offenburg	250	2004	44
Leipzig - Gröbers (Erfurt)	250	2004	24
Hamburgo - Berlim	230	2004	253
Nuremberg - Ingolstadt	300	2006	89

Fonte: PITA (2010)

Conforme podemos verificar na Tabela 6.9, apenas duas linhas alemãs estão capacitadas para velocidades máximas de 300 km/h. Uma é a linha entre Colônia e Frankfurt, construída entre 1995 e 2002, a qual permite vencer um trajeto de 197 km em uma hora e dez minutos. Por ser este um trajeto que percorre um terreno muito acidentado, isso exigiu a construção de um grande número de pontes e túneis, sendo que, nessa linha, são oferecidos apenas serviços de passageiros. Já a outra linha, que está entre Nuremberg e Ingolstadt, possui 89 km de extensão e foi inaugurada para exploração comercial em 2006. Em ambas as linhas, a fim de minimizar os impactos ambientais, elas foram construídas, em grande parte, paralelamente a rodovias já existentes para aproveitar a exploração da faixa rodoviária. Esta decisão obrigou, em planta, a adotar critérios mais restritivos do que os habitualmente utilizados para os raios mínimos de curvas, de até 3.250 m. Quanto à elevação, levando-se em conta que a rampa máxima utilizada nas rodovias alemãs é da ordem de 5%, adotou-se como limite superior uma rampa máxima ferroviária de 4%, valor este, até o momento, não utilizado em nenhuma outra ferrovia de alta velocidade da Alemanha. Cabe ressaltar que, para que essa medida fosse possível, foi necessária a construção de túneis ao longo de 21% da linha. Os critérios de projeto geométrico utilizados na linha Colônia - Frankfurt estão apresentados na Tabela 6.10 a seguir:

Tabela 6.10 – Parâmetros geométricos da linha Colônia - Frankfurt

Parâmetro	Valor	Observação
Entrevia	4,70 m	-
Raio mínimo horizontal ($R_{\min. H}$)	3.250 m	Para acompanhar os raios da rodovia existente
Velocidade máxima (V_{\max})	300 km/h	-
Rampa máxima (I_{\max})	4%	Para acompanhar a rampa de 5% da rodovia existente
Seção dos Túneis	92 m ²	Os túneis representam 21% da extensão total da linha

Fonte: PITA (2008)

Os serviços do trem de alta velocidade na Alemanha, Intercity Express (ICE), são operados pela empresa estatal Deutsch Bahn (DB), a qual controla o transporte de passageiros e de carga em mais de 90% da malha do país. A DB oferece serviços de passageiros e cargas, manutenção e infra-estrutura, sendo que a sua subsidiária DB Netz é responsável pela infra-estrutura e a DB Reise & Touristik opera todos os serviços de passageiros de longa distância, incluindo os serviços de alta velocidade. Entretanto, alguns serviços regionais e locais são concedidos a operadores privados que usam a rede da DB (Revista do BNDES – Jun 2008).

A participação da ferrovia no transporte de passageiros na Alemanha é de 8,4%. A menor utilização dos trens de alta velocidade na Alemanha, em comparação com a França, é atribuída, em parte, à dispersão da população e ao relevo mais montanhoso. Os serviços alemães têm, em geral, paradas freqüentes e menores velocidades médias de percurso. No trecho entre Munique e Hamburgo, por exemplo, o trem de alta velocidade faz um mínimo de sete paradas intermediárias. A DB opera todos os serviços de ônibus de longa distância, de forma que não existe competição entre ônibus e trens (Revista do BNDES – Jun 2008).

Nos aspectos relacionados à via, para linhas convencionais, com velocidades abaixo de 250 km/h, a DB define a utilização de seções de trilho UIC 60 sobre dormentes pesados de monobloco (Tipo B60). Já para novas linhas de alta velocidade com velocidades superiores a 250 km/h, após uma extensa pesquisa e otimização de custos da vida total, a DB adotou a via em laje como obrigatória. Espera-se que o maior custo capital seja recuperado com economia de manutenção durante a vida de 60 anos da via (Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2).

Na Alemanha foram construídos cerca de 800 km de via em laje para a rede de alta velocidade, dos quais a linha inteira de Frankfurt – Colônia foi construída como via em laje, considerando que isso seria uma decisão economicamente vantajosa para o projeto global (Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2).

6.5 ITÁLIA

A Itália foi pioneira na Europa em ferrovias de alta velocidade com a implantação do serviço “Direttissima” e com o desenvolvimento do trem “Pendolino”. O serviço “Direttissima” deu início à era italiana de alta velocidade, em 1978, ligando Roma – Florença numa extensão de 252 km de linhas de alta velocidade em uma hora e meia, e operando a uma velocidade máxima de 250 km/h. Já o trem “Pendolino”, desenvolvido para enfrentar a grande quantidade de curvas nos traçados, é caracterizado por inclinar-se nas curvas para compensar a força centrífuga e oferecer maior conforto aos passageiros. Esses tipos de trens pendulares têm sido largamente adotados em vários países para fazer melhor uso das vias convencionais e nas linhas em que o traçado é composto por curvas freqüentes de raio mais acentuado (Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2).

Na Itália também são fabricados os trens não pendulares, os quais foram projetados para operar nas novas linhas de alta velocidade, com traçados menos sinuosos. Esse trem não pendular apresenta um conceito muito semelhante a outros trens europeus como o ICE (Alemanha) e o TGV (França). (Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2).

A participação de mercado do transporte ferroviário na Itália é de 5%, sendo menor que a participação do Japão, França e Alemanha. A Trenitalia é a responsável por operar todos os serviços de cargas e passageiros, incluindo os serviços de alta velocidade. Enquanto isso, a Rete Ferroviaria Italiana administra a infra-estrutura e a Treno Alta Velocità SPA é a responsável pelo planejamento e a construção de novas linhas de alta velocidade. Somente alguns dos serviços locais é que são providos por governos regionais italianos (Revista do BNDES – Jun 2008).

Os critérios geométricos de projeto empregados na primeira linha de alta velocidade da Itália, no trecho Roma-Florença, estão apresentados na Tabela 6.11 na seqüência:

Tabela 6.11 – Parâmetros geométricos da linha Roma - Florença

Parâmetro	Valor	Observação
Entrevia	4,0 m	-
Raio mínimo horizontal ($R_{\min. H}$)	3.000 m	-
Velocidade máxima (V_{\max})	250 km/h	-
Rampa máxima (I_{\max})	0,8%	Prevendo uma futura exploração de tráfego misto
Seção dos Túneis	54 m ²	-

Fonte: PITA (1991)

De acordo com a Tabela 6.11 apresentada anteriormente, cabe assinalar que a magnitude de rampa máxima adotada, de somente 0,8%, traduz a vontade de se explorar, naquele tempo, uma nova linha ferroviária com tráfego misto de passageiros e cargas.

A partir de 1986 a rede de alta velocidade italiana começou a se difundir, e novos parâmetros geométricos foram estabelecidos para a concretização de novas linhas, como a que liga Milão a Nápoles, e outra que passa pelo eixo Turín-Milão-Veneza (PITA, 2010). Os critérios de projeto para as novas linhas de alta velocidade na Itália, definidos em 1986, pode ser vistos na Tabela 6.12:

Tabela 6.12 – Parâmetros geométricos para novas linhas de alta velocidade na Itália em 1986

Parâmetro	Valor	Observação
Entrevia	5,0 m	Utiliza-se 4,6 m para trechos com V_{\max} de 250 km/h
Raio mínimo horizontal ($R_{\min. H}$)	5.450 m	$R_{\min. H}$ para trechos com V_{\max} de 250 km/h
Velocidade máxima (V_{\max})	300 km/h	Trechos com V_{\max} de 250 km/h
Rampa máxima (I_{\max})	1,8%	Prevendo a exploração de tráfego misto
Seção dos Túneis	82 m ²	-

Fonte: PITA (2010)

A partir da Tabela 6.12 se salienta que a magnitude da rampa máxima, de 1,8%, tem o objetivo de tornar possível a utilização das linhas de alta velocidade para trens de carga, assim como na linha entre Roma e Florença. É interessante assinalar também que, para as seções projetadas para uma velocidade máxima de 250 km/h, os critérios de projeto foram um pouco diferentes do que os utilizados na linha Roma-Florença, que também operava a 250 km/h, porém a qual teve seus critérios de projeto geométrico definidos 20 anos antes, em 1966. Nas novas linhas, para essa velocidade de 250 km/h, passou-se a utilizar um raio mínimo em planta de 3.695 m e uma entrevia de 4,6m (PITA, 2008).

6.6 ESPANHA

A primeira linha de alta velocidade da Espanha só começou a ser construída em 1988 entre Madrid e Sevilha, e seus critérios de projeto estiveram baseados na experiência disponível até aquele momento na Europa, conforme podemos verificar na Tabela 6.13 a seguir:

Tabela 6.13 – Parâmetros geométricos para a linha Madrid - Sevilha

Parâmetro	Valor	Observação
Entrevia	4,3 m	-
Raio mínimo horizontal ($R_{\min. H}$)	4.000 m	$R_{\min. H}$ excepcional de 3.250 m
Velocidade máxima (V_{\max})	300 km/h	-
Rampa máxima (I_{\max})	1,25%	Prevendo a exploração de tráfego misto
Seção dos Túneis	75 m ²	Prevendo a exploração de tráfego misto

Fonte: PITA (2010)

A partir da Tabela 6.13 é possível constatar que, em planta, foi tomado como referência a mesma magnitude adotada para o raio mínimo das curvas na linha Paris-Lyon, e, no greide, um valor igual aos adotados pelas ferrovias alemãs para

as linhas de Hannover-Wurzburg e Mannheim-Stuttgart, devido a exploração com tráfego misto. Entretanto, a decisão posterior de implementar na via a bitola padrão, condicionou a exploração como sendo exclusiva apenas para o tráfego de passageiros (PITA, 2010).

Outras linhas de alta velocidade passaram a ser exploradas comercialmente no período entre 2003 e 2008, ou seja, depois de mais de uma década da exploração comercial da linha Madrid-Sevilha. Isso fez com que os parâmetros geométricos empregados nas novas linhas fossem diferentes em relação à primeira linha de alta velocidade, conforme pode ser verificado na Tabela 6.14:

Tabela 6.14 – Parâmetros geométricos para linhas de alta velocidade na Espanha no período 2003-2008

Linha	Velocidade Máxima	Entrevia	R_{min. H}	Rampa Máxima
Madrid - Valladolid	300 km/h	4,7 m	5.000 a 6.000 m	2,0%
Córdoba - Málaga	300 km/h	4,7 m	7.000 m	2,5%
Madrid - Barcelona	300 km/h	4,7 m	6.000 m	2,7%
Madrid - Toledo	270 km/h	-	4.000 m	-

Fonte: PITA (2010)

A partir dos parâmetros estabelecidos para as novas linhas espanholas, pode-se comprovar um notável aumento dos raios mínimos em planta, situados num intervalo de 5.000 a 7.000 m. Já a magnitude das rampas máximas, de 2,0 a 2,7%, se explicam pelo fato de serem construídas com bitola padrão e exclusivamente destinadas a circulação de trens de passageiros (PITA, 2010).

Apesar das primeiras linhas de alta velocidade terem sido construídas com bitola Ibérica de 1,688 m, e a Espanha decidiu que todas as novas linhas ferroviárias de alta velocidade seriam construídas na largura da bitola Européia de 1,435 m para facilitar a movimentação entre países. Além disso, com o intuito de permitir uma operação contínua para a rede existente de Bitola Ibérica, foi desenvolvido o

material rodante de bitola variável Talgo, que permite alterar a bitola até uma velocidade de 30 km/h (Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2).

O trem AVE Velaro Madrid-Barcelona de alta velocidade, o qual iniciou suas operações na Espanha em fevereiro de 2008, alcançando velocidades de 300 km/h durante os 630 km da rota e fazendo esse percurso em 2 horas e 38 minutos, é um dos serviços ferroviários de longa distância mais rápidos do mundo. O AVE foi projetado para substituir parte do tráfego aéreo na rota Barcelona a Madrid de forma semelhante ao ocorrido com os serviços TGV, Eurostar e Thalys. Atualmente mais de 80% dos viajantes usam o trem, com menos de 20% permanecendo com aéreo (Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2).

Atualmente, a Espanha trabalha para expandir sua rede ferroviária de alta velocidade, pretendendo-se tornar a maior da Europa nos próximos anos. A intenção estratégica é conectar todas as suas principais cidades e ter 90% da população a uma distância de até 50 km de uma estação de linhas de alta velocidade. Os recursos do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional têm sido um importante fator a viabilizar a construção das vias de alta velocidade na Espanha. A estatal Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles (RENFE) é o operador de serviços de passageiros e o Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) é responsável pela manutenção e pela operação das vias e estações. Além disso, outros três operadores oferecem serviços de passageiros. A participação de mercado do transporte ferroviário é relativamente baixa na Espanha, sendo de 4,8% (Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2).

6.7 CHINA

O desenvolvimento da primeira linha de alta velocidade da China, entre Pequim e Xangai, se iniciou aos meados da década de 1990, devendo-se destacar que, durante um período de cinco anos, se analisou a pertinência de utilizar a tecnologia de levitação magnética (Maglev) ou a ferrovia convencional de alta velocidade (Relatório Halcrow/Sinergia – Vol. 4 – Parte 2).

No ano de 1998 já se dispunha dos parâmetros geométricos mais relevantes, e, tendo-se em conta o desenvolvimento tecnológico experimentado pela alta velocidade nos últimos anos, conseguindo-se alcançar 515 km/h num ensaio experimental em 1990, e sabendo que a distância a ser percorrida era da ordem de 1.300 km, não é de se surpreender que as magnitudes adotadas para os parâmetros geométricos apresentem valores diferenciados em relação a outras ferrovias de alta velocidade, como se pode verificar na Tabela 6.15 a seguir:

Tabela 6.15 – Parâmetros geométricos para linhas de alta velocidade na China

Velocidade Máxima	Entrelavia	R_{min. H}	Rampa Máxima	Seção dos Túneis
350 km/h	5,0 m	7.000 m (5.500 m)	1,2%	100 m ²

Fonte: PITA (2008)

Observando a Tabela 6.15 acima, pode-se destacar a magnitude da rampa máxima como sendo de 1,2%, valor este próprio de uma linha de tráfego misto. Com respeito a isso se pode dizer que, num primeiro momento, se pensou na circulação de trens de carga e qualquer outra composição que circulasse a uma velocidade de operação inferior a 200 km/h. Já com relação à entrelavia, essa é uma das poucas linhas de alta velocidade onde se adotou um valor de 5 m (PITA, 2010).

6.8 CORÉIA

A primeira linha de alta velocidade da Coréia, entre Seul e Pusan, começou a ser estudada em 1973, porém somente na década seguinte é que foram realizados os estudos do projeto. Essa linha já foi projetada para circular a 350 km/h, apesar de que a velocidade máxima de operação seja de 300 km/h no país (PITA, 2010).

As principais características geométricas do traçado encontram-se na Tabela 6.16 a seguir:

Tabela 6.16 – Parâmetros geométricos na linha Seúl - Pusan

Velocidade Máxima	Entrevia	R_{min. H}	Rampa Máxima	Seção dos Túneis
350 km/h	5,0 m	7.000 m	1,5% a 2,5%	107 m ²

Fonte: PITA (2008)

Uma particularidade que pode ser atribuída à linha coreana está na elevada percentagem de túneis e pontes durante o traçado. Nos 412 km que possui o traçado existem 141 viadutos, ocupando 109 km, ou seja, 29% do traçado. Quanto aos túneis, existem 81 túneis os quais representam um comprimento total de 189 km, o que significa 46% do comprimento do traçado (PITA, 2010).

6.9 TAIWAN

Os estudos para de definir um traçado apto para a circulação ferroviária de alta velocidade, ao longo da costa leste de Taiwan, foram iniciados na segunda metade da década de 1980. Devido ao desejo de se circular, no futuro, a 350 km/h, foram definidos os seguintes critérios de projeto geométrico na linha Tapei - kaohsiung, demonstrados na Tabela 6.17 (PITA, 2010):

Tabela 6.17 – Parâmetros geométricos na linha Tapei - Kaohsiung

Velocidade Máxima	R_{min. H}	Rampa Máxima
350 km/h	6.250 m	2,5%

Fonte: PITA (2010)

6.10 TURQUIA

A linha de alta velocidade entre Ancara – Istambul foi projetada para velocidades máximas de 250 km/h, fazendo com que seus critérios de projeto geométrico obedeam aos valores demonstrados na Tabela 6.18 (PITA, 2010):

Tabela 6.18 – Parâmetros geométricos na linha de alta velocidade Ancara – Istambul

Segmento	Velocidade Máxima	R_{min. H}	Rampa Máxima
Ensenkent - Eskifiehir	250 km/h	3.500 m	1,6%
Ancara - Konya	250 km/h	6.500 m	1,6%

Fonte: PITA (2008)

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou contribuir com a apresentação de conceitos teóricos do projeto geométrico ferroviário e de normas internacionais de diferentes fontes de consulta, servindo como suporte de auxílio à tomada de decisões na escolha dos diferentes parâmetros geométricos que envolvem o alinhamento horizontal e vertical para trens de passageiros de alta velocidade e longo percurso para um projeto específico. Além disso, procurou apresentar valores característicos de parâmetros geométricos adotados em países com sólidas tradições ferroviárias, a fim de que sirvam como base de referência para outros projetos.

Nesse âmbito, vale esclarecer que a escolha dos parâmetros do projeto geométrico de uma determinada linha ferroviária, ocorre, de forma geral, a partir do estabelecimento de premissas de partida impostas pela diretriz de implantação da ferrovia, como é o caso da velocidade de projeto, dos elementos e dispositivos que constituirão a seção transversal e da definição dos pontos de interesse em que a ferrovia deve passar, o que é normalmente definido nos estudos de demanda.

Apesar deste estudo não envolver a viabilidade econômico-financeira para a implantação de uma linha ferroviária de alta velocidade e longo percurso, recomenda-se que a solução técnica para a definição do traçado ferroviário sempre prevaleça frente aos custos de implantação da obra, para que o projeto não fuja do escopo inicialmente proposto. A descaracterização da geometria da via, além de aumentar os custos operacionais, de manutenção e agregar um gasto energético maior para o funcionamento da linha, pode afetar a velocidade operacional para a qual a linha foi dimensionada, o que pode implicar numa diminuição de competitividade com outros modais de transporte.

A definição do traçado e suas características geométricas podem ser considerados também um dos vetores de maior importância no investimento, visto a alta parcela que a implantação da via consome. Ou seja, depois de consolidada a implantação da nova linha ferroviária, terá que se conviver com o novo cenário apresentado por um longo período até que se justifique realmente alguma necessidade para a

alteração do traçado, dada a baixa flexibilidade de modificação do mesmo devido aos altos custos.

Quanto à adaptação de um traçado existente para receber uma nova linha ferroviária de alta velocidade e longo percurso, muitas vezes é difícil de compatibilizar o novo traçado proposto, já que o existente pode ter sido concebido a partir de outras velocidades de projeto e diferentes parâmetros geométricos. Essa dificuldade se agrava principalmente quando o traçado existente atravessa uma área urbanizada. Entretanto, nas situações onde for possível a compatibilização do traçado, essa pode ser uma alternativa interessante para minimizar os custos de implantação da obra.

Com relação às diferentes normas apresentadas ao longo da dissertação, cada uma delas apresenta premissas e particularidades específicas para a definição dos parâmetros geométricos utilizados. Tal feito dificulta na realização de uma comparação conceitual entre as normas, o que acarreta na impossibilidade de se indicar qual norma é a mais adequada para cada situação.

Por fim, cabe ressaltar que, dada a escassez de materiais bibliográficos nacionais e de estudos relacionados ao projeto ferroviário, que são conseqüência da falta de investimentos no setor ferroviário durante as últimas décadas, é importante que se resgate novamente à nossa formação acadêmica, conceitos e estudos relacionados ao setor ferroviário, como é o caso desta dissertação de mestrado, visto sua necessidade no futuro do desenvolvimento do país.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) **Instrucciones Generales para los Proyectos de Plataforma**, 2006.

ALIAS, J. **La Voie Ferrée-Tome I: Techniques de Construction et d' Entretien**, Eyrolles, Paris, 1984.

ALIAS, J.; VALDÉS, A. **La Vía del Ferrocarril**. Ed. Bellisco, Madrid, 1990.

ÁLVAREZ, A. G. **Dinámica de los Trenes en Alta Velocidad. Fundación de los Ferrocarriles Españoles – Dirección de Estudios y Programas**, 2005.

ARDWIN, J. P.; NI, J. J. **Japan Railway and Transport Review – French TGV Network Development**, 2005.

AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association) **Corridor Design Issues for Florida High-speed Rail.**, USA, 2004.

AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association) **Manual for Railway Engineering. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association**, USA, 2009.

BIRMANN, F. **Geometria da Via, Construção da Superestrutura de linhas para alta velocidade**, 1968.

BRINA, H. L. **Estradas de Ferro**. Ed. Livros Técnicos e Científicos S.A, Rio de Janeiro, 1979.

CHAMBRON, E. **Les Ouvrages d'art de la Ligne Nouvelle. Revue Générale des Cheminsde**, 1976.

CLAVER, L. U., **Ferrocarriles de via métrica: posibilidades y limitaciones**, Ed. UPC, Barcelona, 2002.

CONSÓRCIO HALCROW GROUP / SINERGIA BRASIL **Relatório Final de Tecnologia Sinergia – Vol. 4 – Parte 2**, 2009

CRUZ, H. J. V. **O conceito de Via Permanente para trens de passageiro de alta velocidade**, 1981.

ENV 13803-1 **Railway applications Track alignment design parameters — Track gauges 1435 mm and wider Part 1: Plain line**, 2010

ESVELD, C., **Modern Track Railway** – Tradução de Julie Page, Ed.vGraphics Department of Thyssen Stahl AG, West Germany, 1989.

ETI (Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad) – **Material rodante convencional**, 2007.

FERROVIE DELLO STATO ITALIANE **Railway-Technology – High Speed Rail Operations**, 2008.

FRA (Federal Railroad Administration) – **Track Standards Compliance Manual – Chapter 5**, USA, 2007.

HENENBERGER, W. **Dinâmica do veículo e da estrada a altas velocidades, do ponto de vista da manutenção da via férrea**, 2008.

ITALFERR (Gruppo Ferrovie Dello Stato Italiane) **Specifiche Tecniche: Linee – Stazioni/Impianti – Viabilità – Norma Societaria Specifica Tecnica**, 2004.

LINDAHL, M. **Track Geometry for high-speed railways** - A literature survey and simulation of dynamic vehicle response. KTH, Estocolmo, 2001.

MANTARAS, D. A.; RODRIGUES, P. L. **Ingeniería e Infraestructura de los transportes – Ferrocarriles**, Ed. Universidad de Oviedo, 2003.

N.R.V. 0-2-0.0. (Normativa Renfe Vía) **Parámetros geométricos**, Mantenimiento de Infraestructura Renfe, Dirección Técnica/ Jefatura de vía, 1988.

N.R.V. 7-3-2.0. (Normativa Renfe Vía) **Calificación de la vía – Ancho de vía**, Mantenimiento de Infraestructura Renfe, Dirección Técnica/ Jefatura de vía, 1983.

NEFZGER, A. **Comportamento da roda e trilhos a altas velocidades**, 1979.
PARÁMETROS DE DISEÑO DEL TRAZADO DE LA VÍA. – Norma Europea (em redacción).

PITA, A. L. **Alta velocidad en el ferrocarril**, Ed. UPC, Barcelona, 2010.

PITA, A. L., **Explotación de líneas de Ferrocarril**, Ed. UPC, Barcelona, 2008.

PITA, A. L., **Infraestructuras Ferroviarias**, Ed. UPC, Barcelona, 2006.

PITA, A. L., **Las relaciones por ferrocarril en el Mediterráneo en el marco de la red europea de alta velocidad**. Obras Públicas nº 22, 36-45, 1991.

PITA, A. L., **Transporte Marítimo y Ferrocarril**, Ed. UPC, Barcelona, 2003.

REVISTA DO BNDES, Rio de Janeiro, V. 14, N. 29, P. 61-80, Junho 2008.

RFI (Rete Ferroviaria Italiana) **Norme Tecniche per la Progettazione del Tracciati Ferroviari – Istruzione Tecnica**, 2006.

RIVES, F. O.; PITA, A. L.; PUENTE, M. J. M. **Tratado de Ferrocarriles I Via**, Ed. Rueda, Madrid, 1977.

SAÑA, A. B., **Las rampas máximas em líneas de alta velocidad**, Ed. UPC, Barcelona, 2002.

STEVENS, F.S **Velocidade do trem em curvas e desvios**, 1969.

STOPATTO, S. **Via permanente ferroviária: conceitos e aplicações**, Ed. CBTU, São Paulo, 1987.

U.S. Department of Transportation, **Improved Spiral Geometry for High-Speed Rail, Federal Railroad Administration**, USA, 2008.

UIC (Union Internationale des Chemins de Fer) – **505 R** – Matériel de transport ferroviaire Gabarit de construction Du matériel roulant, 1993.

UIC (Union Internationale des Chemins de Fer) – **703 R** – Layout characteristics for lines used by fast trains, 1989.

UIC (Union Internationale des Chemins de Fer) – **741 OR** – Passenger stations – height of platforms – Regulations governing the positioning of platform edges in relation to the track, 1993.

VOLPE CENTER, **Evaluation of High-Speed Rail Options in the Macon**, Volpe National Transportation System Center, Atlanta, USA, 2008.