

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Samuel Menezes Albuquerque

Ferrovias: Aspectos Técnicos de Projeto

Trabalho de Graduação

2011

Civil

Samuel Menezes Albuquerque

Ferrovias: Aspectos Técnicos de Projeto

Orientador

Prof. Ronaldo Gonçalves de Carvalho – Cap Eng (ITA)

Engenharia Civil-Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

DEPARTAMENTO GERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AEROESPACIAL

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Albuquerque, Samuel Menezes
Ferrovias: Aspectos Técnicos de Projeto
São José dos Campos, 2011.
48f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Ciência da Computação – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2011.

Orientador: Prof. Ronaldo Gonçalves de Carvalho

1. Transporte ferroviário. 2. Via permanente ferroviária. 3. Projeto geométrico.
I. Departamento Geral de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. II. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Civil. III. Título

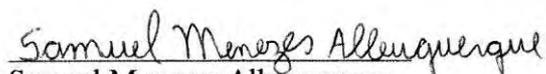
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALBUQUERQUE, Samuel Menezes. **Ferrovias: Aspectos Técnicos de Projeto**. 2011. 48f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

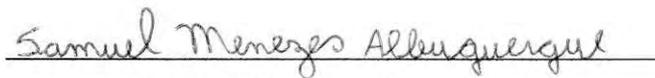
NOME DO AUTOR: Samuel Menezes Albuquerque
TÍTULO DO TRABALHO: Ferrovias: Aspectos Técnicos de Projeto
TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2011

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.


Samuel Menezes Albuquerque
Rua Antônio Augusto, 950
Fortaleza/CE

FERROVIAS: ASPECTOS TÉCNICOS DE PROJETO

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



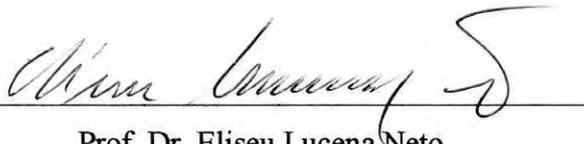
Samuel Menezes Albuquerque

Autor



Prof. Ronaldo Gonçalves de Carvalho (ITA)

Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 18 de novembro de 2011

Dedico este trabalho a meus pais,
a meus irmãos, a minha amada e
a todos que sempre me apoiaram
e incentivaram nessa longa jornada.

Agradecimentos

Agradeço a meu orientador, Ronaldo, pela ajuda na realização deste trabalho e aos demais professores do ITA por todo o aprendizado.

Aos meus pais, Tereza e Montany, por todo o sacrifício feito para que eu conseguisse chegar até aqui.

Aos meus irmãos, Felipe, Rafael, Gabriel e Davi, pelos exemplos e confiança que sempre me deram.

Aos amigos de Fortaleza, pelo apoio e incentivo para que eu não desistisse de vir para o ITA.

Aos amigos do H8, por tudo aquilo que passamos juntos nos últimos cinco anos.

À minha namorada, Ximênia, por estar sempre ao meu lado nesses quase oito anos.

À Construtora Norberto Odebrecht, por ter me possibilitado estagiar na obra de implantação da Ferrovia Transnordestina.

E a Deus, por permitir tudo isso.

“Não me envergonho de mudar de ideia, porque não me envergonho de pensar.”

Blaise Pascal

Resumo

O Brasil vive um momento de perspectivas de grande crescimento em diversos setores da economia. Dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI) apontam um aumento médio do Produto Interno Bruto (PIB) de 5,5% para os próximos 15 anos. Isso se dará, em parte, devido ao aumento das fronteiras agrícolas e minerais, e também pela exploração de petróleo nas recém-descobertas camadas do pré-sal. É nesse aspecto que as ferrovias têm importante papel a desempenhar no transporte de carga nacional. Com uma malha de apenas 29.817 km, mesma extensão verificada em 1923, o Brasil necessita de vultosos investimentos no setor ferroviário para conseguir atender de maneira adequada o crescimento da demanda.

Este Trabalho de Graduação tem como objetivo apresentar alguns aspectos técnicos relacionados a projetos de ferrovias, descrevendo elementos da superestrutura ferroviária, tais como os diferentes tipos de trilhos e dormentes e como a adoção da bitola da via permanente implica em sua construção e operação. Também são apresentadas algumas características dos metrô, do Trem de Alta Velocidade (TAV) e dos Veículos Leve sobre Trilhos (VLT). Por fim, é realizada uma comparação entre alguns aspectos de projetos de ferrovias e rodovias no que diz respeito principalmente à geometria das vias.

Abstract

Brazil is experiencing a time of great growth prospects in diverse sectors of the economy. Data from the National Industry Confederation (CNI) reported an average growth of Gross Domestic Product (GDP) of 5.5% for the next 15 years. This is, in part, due to the increase of the agricultural boundaries and minerals, but also due to oil in the newly discovered pre-salt layers. In this context, the railways have an important role to play in the national freight transportation. With a mesh of only 29,817 km, the same extension regarded in 1923, Brazil needs massive investments in the railway sector to be able to meet adequately the growing demand.

This graduate work aims to present some technical aspects related to projects of railways, featuring elements of the railway superstructure, such as different types of rails and sleepers and how the adoption of the gauge of the permanent way implies its construction and operation. It is also presented some characteristics of the subways, the High Speed Train (HST) and Light Rail Vehicle (LRV). Finally, it is performed a comparison between some aspects of highway and railroad projects with regard mainly to the geometry of the roads.

Lista de Figuras

Figura 1 - Comparação da capacidade de transporte	15
Figura 2 - Eficiência energética	16
Figura 3 - Distância de transporte ideal para cada modal.....	16
Figura 4 - Matriz de transportes no Brasil	17
Figura 5 - Matriz de transportes no mundo	18
Figura 6 - Malha multimodal.....	18
Figura 7 - Malha ferroviária	19
Figura 8 - Movimentação de carga transportada pelas ferrovias.....	20
Figura 9 - Via permanente ferroviária	22
Figura 10 - Perfil do trilho	23
Figura 11 - Fornecimento de energia elétrica para os metrôs.....	33
Figura 12 - Variação da seção da pista na implantação da superelevação	40
Figura 13 - Superelevação prática máxima	41
Figura 14 - Critério do conforto	42
Figura 15 - Critério da segurança	43

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais características dos modais	15
Tabela 2 - Alocação dos recursos nos principais planos de infraestrutura no Brasil	17
Tabela 3 - Características dos dormentes	25
Tabela 4 - Distribuição das ferrovias por bitola	27
Tabela 5 - Extensão da malha de trens de alta velocidade no mundo	28
Tabela 6 - Quantitativo resumido das obras de arte	29
Tabela 7 - Principais parâmetros de projeto do TAV	29
Tabela 8 - Demanda Estimada do TAV Brasil por tipo de serviço (em milhares de passageiros por ano).....	30
Tabela 9 - Matriz de transporte de passageiros simulada para 2008, com TAV (em milhares de passageiros/ ano).....	30
Tabela 10 - Custo total de investimento	31
Tabela 11 - Comparação entre investimentos em infraestrutura	32
Tabela 12 - Rampas máximas admissíveis	37
Tabela 13 - Raios mínimos em função da superelevação para rodovias	39
Tabela 14 - Superelevações máximas para rodovias	39

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

CNI: Confederação Nacional da Indústria

CNT: Confederação Nacional do Transporte

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

IAE: Instituto de Aeronáutica e Espaço

ITA: Instituto Tecnológico de Aeronáutica

PAC: Programa de Aceleração do Crescimento

PIB: Produto Interno Bruto

PNLT: Plano Nacional de Logística e Transporte

RFFSA: Rede Ferroviária Federal S.A.

TAV: Trem de Alta Velocidade

VLT: Veículo Leve sobre Trilhos

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivo	21
1.2	Estrutura do Trabalho	21
2	Ferrovias	22
2.1	Via Permanente Ferroviária	22
2.1.1	Trilhos e Acessórios	23
2.1.2	Dormentes	24
2.1.3	Lastro	26
2.2	Bitolas	26
2.3	Trem de Alta Velocidade	27
2.3.1	Críticas ao Projeto	31
2.4	Metrôs	33
2.5	Veículo Leve sobre Trilhos	34
3	Comparativo entre rodovias e ferrovias	35
3.1	Traçado	35
3.2	Rampas	36
3.3	Curvas	38
3.3.1	Superelevação	39
3.3.2	Superlargura	44
4	Considerações finais	46
5	Referências	47

1 Introdução

A infraestrutura de transporte no Brasil necessita de melhorias para conseguir atender de maneira adequada à crescente demanda gerada pelo aumento da produção nacional e também pelas perspectivas de crescimento da participação no mercado internacional. A melhoria da qualidade do sistema logístico do país exige que os diversos modais cresçam de forma simultânea e integrada, sendo essenciais vultosos investimentos públicos e privados. A implantação dos projetos propostos no Plano CNT de Transporte e Logística demanda, hoje, investimentos mínimos da ordem de R\$ 405 bilhões [1].

O Brasil vive um momento de perspectivas de grande crescimento nos diversos setores da economia. Dados da CNI apontam um aumento médio do PIB de 5,5% para os próximos 15 anos [2]. Isso se dará, em parte, devido ao aumento das fronteiras agrícolas e minerais, e também pela exploração de petróleo nas recém-descobertas camadas do pré-sal.

Apesar disso, observa-se um grande descompasso entre o desenvolvimento econômico e os investimentos em infraestrutura. Em 1975, esses investimentos representavam 1,8% do PIB, mas em 2007 corresponderam apenas a 0,6% do PIB [3]. Verifica-se, portanto, a necessidade de maiores gastos na infraestrutura de transporte para que os produtos nacionais possam ser competitivos no mercado externo.

Devido a suas características, o modal ferroviário possui um importante papel a cumprir na estrutura de transporte de cargas. A Tabela 1 apresenta as principais características de ferrovias, rodovias e hidrovias e a Figura 1 mostra uma equivalência da carga transportada por vagões e caminhões.

Tabela 1 - Principais características dos modais

Modal	Características
Ferrovário	<ul style="list-style-type: none"> • Transportador de longo curso • Movimentador lento de matéria-prima e de baixo valor • Preferência para carregamentos completos • Maior parte do tempo é gasta em operações de carregamento e descarregamentos • Permite o uso de veículos com elevadas cargas por eixo • Pode atingir velocidades superiores a 300 km/h no transporte de passageiros • Eficiente aproveitamento energético • Menor flexibilidade no trajeto
Rodoviário	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte de produtos semiacabados e acabados • Tamanhos médios menores que o ferroviário • Vantagens: serviço porta a porta, frequência e disponibilidade do serviço. • Menor manuseio da carga e menor exigência de embalagem • Menor capacidade de carga entre todos os modais
Aquaviário	<ul style="list-style-type: none"> • Exigências de localizações próximas às vias. • Mais vagaroso que o ferroviário na média (8 a 14 km/h). • Disponibilidade e confiabilidade variam com o clima. • Maior capacidade de carga • Necessidade de transbordo nos portos • Maior exigência de embalagens



Figura 1 - Comparação da capacidade de transporte

No que se refere à eficiência energética, o modal ferroviário apresenta resultados superiores ao rodoviário, mas ainda bem abaixo dos resultados obtidos por meio do transporte aquaviário. A Figura 2 mostra a distância que uma tonelada pode ser transportada utilizando a energia de um galão de combustível.



Figura 2 - Eficiência energética [4]

A Figura 3 apresenta a distância ideal de transporte para rodovias, ferrovias e hidrovias. Verifica-se que o modal ferroviário apresenta vantagens em comparação com o transporte rodoviário no que concerne ao transporte de carga de grandes distâncias, como é comum no caso do Brasil. As rodovias apresentam custo-benefício mais competitivo em curtas distâncias, principalmente quando envolvem produtos de alto valor agregado. Já as hidrovias necessitam de sistemas de integração com os outros modais para ter maior alcance e eficiência, devido ao traçado natural dos rios.



Figura 3 - Distância de transporte ideal para cada modal

Observando as informações contidas na Figura 3 e a matriz de transportes do Brasil (Figura 4) verifica-se uma grave distorção no sistema logístico do país. Cerca de 58% da produção nacional é escoada por meio de rodovias, enquanto que as ferrovias transportam apenas 25% e as hidrovias, 13%. Essa distorção tende a diminuir segundo previsões do Ministério dos Transportes. Espera-se que em 2025 as ferrovias já transportem mais do que as rodovias no país [3].

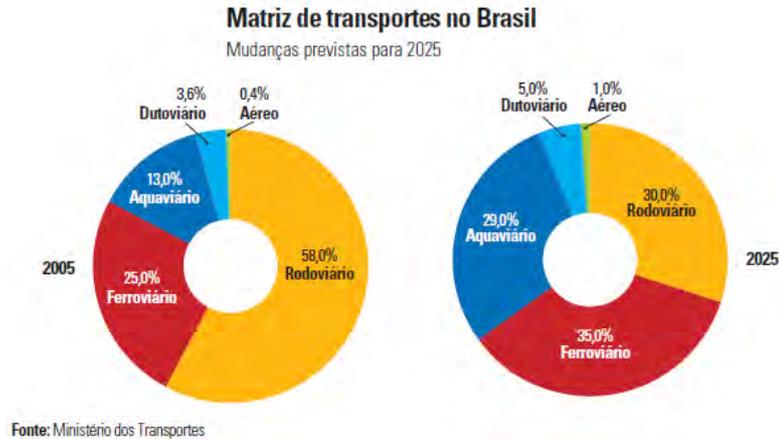


Figura 4 - Matriz de transportes no Brasil

Para que ocorra essa alteração na matriz de transportes do país é necessário que os investimentos sejam feitos de maneira a privilegiar os outros modais em comparação com o rodoviário. No entanto, não é isso que se observa no planejamento de investimentos mostrados na Tabela 2 [5].

Tabela 2 - Alocação dos recursos nos principais planos de infraestrutura no Brasil

Plano	Participação (%)		
	Rodovias	Ferrovias	Outros
PNLT	43%	29%	28%
CNT	54%	24%	22%
PAC 1 (2007-2010)	56%	14%	30%
PAC 2 (2011-2014)	46%	42%	12%

* No PAC 2, a previsão de recursos para ferrovias inclui a construção do TAV

Nos países desenvolvidos e com grande extensão territorial, as ferrovias possuem uma participação bem maior na matriz de transportes em comparação com o Brasil (Figura 5) [3].

Matriz de transportes no mundo

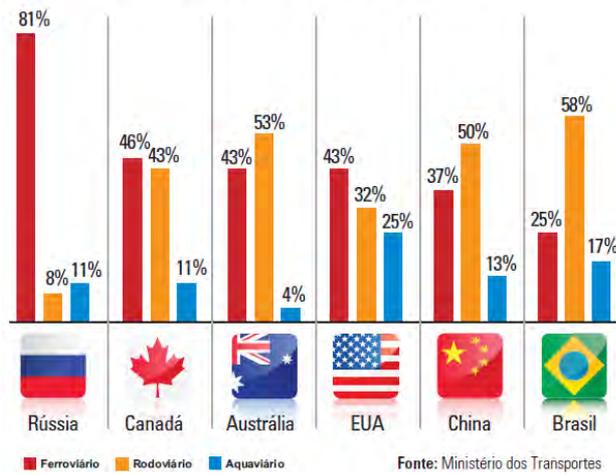


Figura 5 - Matriz de transportes no mundo

A malha rodoviária brasileira possui extensão de 1.580.809 km, sendo que apenas 13,4% das pistas são pavimentadas (Figura 6) [1]. Em comparação com os demais países da América Latina, o Brasil supera apenas o Uruguai, Nicarágua e Bolívia, economias muito mais pobres que a brasileira, em relação à porcentagem de rodovias pavimentadas. Na Argentina essa proporção chega a 30% e no Paraguai, 50,8% [6].



Figura 6 - Malha multimodal

Já a malha ferroviária possui extensão de apenas 29.817 km, sendo que 28.476 km são operados por empresas privadas, por meio de onze concessões (Figura 7) [1]. Apesar de ter uma extensão territorial cerca de três vezes menor, a Argentina possui uma extensão de ferrovias maior que a brasileira, 31.902 km [6].

O Brasil, que em 1960 chegou a possuir 40.801 km de ferrovias, viu sua malha diminuir consideravelmente devido à falta de investimentos no setor aliado ao crescimento do transporte rodoviário. A extensão das ferrovias no país hoje é a mesma de 1923 [7]!

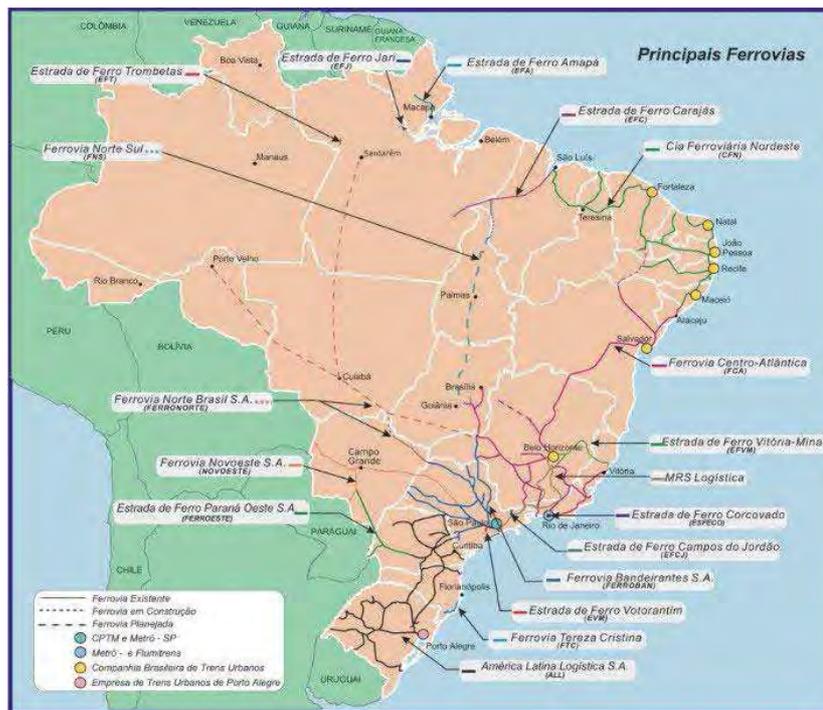


Figura 7 - Malha ferroviária

Observa-se da Figura 7 que a malha ferroviária brasileira está muito concentrada nas regiões sul e sudeste do país, sem ligação com as outras regiões. Outro problema que dificulta o sistema logístico nacional é a falta de terminais intermodais e a precária infraestrutura portuária, com mecanismos de embarque lentos e ineficientes, ausência de retroáreas nos portos e armazenagem precária e/ou insuficiente [5].

Quando da Proclamação da República, em 1889, já existiam no Brasil cerca de dez mil quilômetros de ferrovias, mas foi no início do século XX que houve um grande desenvolvimento desse setor. Entretanto, essa expansão descontrolada trouxe alguns problemas que persistem até hoje, tais como a utilização de diversos tipos de bitolas, traçados sinuosos e existência de diversas pequenas ferrovias dispersas pelo território nacional.

A existência de diferentes bitolas dificulta bastante a interligação das ferrovias. Dos 29.817 km existentes, cerca de 80% possui bitola estreita (1,00 m), mais barata de ser construída, e apenas 5.069 km têm bitola larga (1,60 m) que permite maior velocidade de operação [5].

As primeiras ferrovias construídas no país possuíam traçados bastante sinuosos visando diminuir os custos de implantação. Isso prejudicou bastante a eficiência do transporte ferroviário e fez com que o Estado e a iniciativa privada tivessem que investir na alteração de parte desses traçados, prejudicando o investimento na ampliação da rede ferroviária.

No início do século XX diversas pequenas empresas atuavam na construção e operação de linhas ferroviárias. Entretanto, muitas dessas companhias entraram em processo de falência em pouco tempo, obrigando o governo a socorrê-las financeiramente para impedir o colapso econômico de regiões dependentes desse meio de transporte.

Após estatizar diversas ferrovias, o governo brasileiro decidiu unificá-las administrativamente e, em 1957, criou a Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA). Entretanto, durante as crises do petróleo e econômicas da década de 1980, os investimentos estatais no setor diminuíram provocando o sucateamento parcial de algumas ferrovias. Por essa razão, o governo decidiu pela concessão do transporte ferroviário de cargas à iniciativa privada.

O programa de privatização das ferrovias brasileiras teve início em 1996, durante o governo do presidente Fernando Henrique Cardoso. As linhas da RFFSA, que foi extinta oficialmente em 2007, foram leiloadas e divididas entre várias empresas. Hoje 11 companhias operam as ferrovias no país.

Desde o início da desestatização já foram investidos, pela iniciativa privada, cerca de R\$ 22,5 bilhões no setor. Nesse período houve um aumento de 56,1% da carga transportada pelas ferrovias (Figura 8) [5].



Figura 8 - Movimentação de carga transportada pelas ferrovias

1.1 Objetivo

Este Trabalho de Graduação (TG) pretende abordar alguns aspectos técnicos relacionados a projetos de ferrovias, apresentando elementos da superestrutura ferroviária, tais como os diferentes tipos de trilhos e dormentes e como a adoção da bitola da via permanente implica em sua construção e operação. Também será realizada uma comparação entre alguns aspectos de projetos de ferrovias e rodovias no que diz respeito principalmente à geometria das vias.

1.2 Estrutura do Trabalho

A estrutura organizacional adotada neste Trabalho de Graduação é a divisão de assuntos em capítulos.

No Capítulo 1 é mostrada a motivação para a realização deste TG, além de serem apresentadas a malha rodoviária e ferroviária brasileira e algumas vantagens e desvantagens no uso de cada um desses modais.

No Capítulo 2 são abordados tópicos relacionados a ferrovias, tais como uma descrição dos elementos da via permanente ferroviária, os tipos de trilhos, bitolas e dormentes utilizados e alguns aspectos relacionados com metrô, o TAV e os VLTs.

No Capítulo 3 é realizada uma comparação entre projetos rodoviários e ferroviários abordando alguns aspectos relacionados com a geometria das vias.

Por fim, no Capítulo 4 são apresentadas considerações sobre a importância da realização desse trabalho e uma síntese dos resultados obtidos.

2 Ferrovias

2.1 Via Permanente Ferroviária

A via permanente ferroviária constitui a pista de rolamento para os trens e é responsável por dar suporte e transmitir os esforços das composições ao subleito (Figura 9). Ela pode ser dividida em componentes de infraestrutura e superestrutura. A infraestrutura é composta pelo conjunto das obras de arte e de terraplenagem, seja com cortes ou aterros, desde o subleito, passando pela base até a camada de sublastro. Já a superestrutura ferroviária é composta pelos dormentes, trilhos, conjuntos de fixações dos trilhos aos dormentes e pela camada de lastro. Ao conjunto dormente + trilhos dá-se o nome de grade.

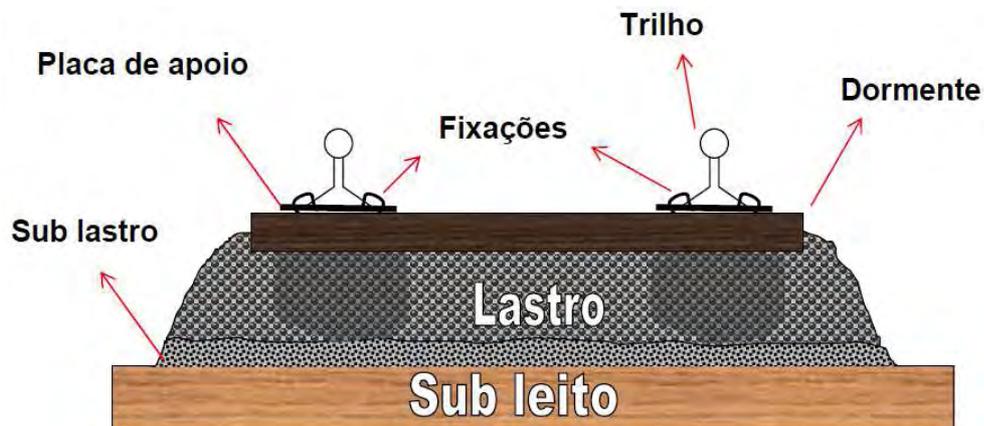


Figura 9 - Via permanente ferroviária [8]

A superestrutura ferroviária deve atender, entre outras, as seguintes finalidades básicas [9]:

- Manter permanente o exato afastamento dos trilhos, ou seja, a bitola, e da inclinação dos trilhos sobre a vertical;
- Garantir a exata geometria do traçado originalmente previsto, ou seja, garantir o alinhamento longitudinal e o nivelamento transversal e longitudinal;
- Transmitir as cargas atuantes, provenientes dos veículos, até a camada de subleito sem apresentar deformações permanentes;
- Permitir a circulação dos veículos ferroviários com segurança e suavidade mesmo em condições climáticas adversas;
- Garantir um rápido escoamento das águas pluviais para fora da plataforma;
- Amortecer, ao máximo, as vibrações provenientes dos trens.

2.1.1 Trilhos e Acessórios

Os trilhos devem proporcionar às rodas do material rodante uma superfície de rolamento plana, contínua e também funcionar como guia. Eles devem possuir uma capacidade de suporte suficiente para distribuir as cargas recebidas das rodas aos dormentes sem sofrer deformações permanentes. Além disso, os trilhos devem ser dotados de suficiente resistência à flexão, pois cabe a eles funcionarem como vigas contínuas devido aos apoios nos dormentes.

Para exercer a sua função de superfície de rolamento e suporte das cargas transportadas pelos veículos é necessário que o trilho possua dureza, tenacidade, elasticidade e resistência à flexão. O melhor material que atende a esses requisitos e que é, portanto, utilizado na fabricação dos trilhos é o aço [10].

De maneira geral, os trilhos são especificados de acordo com sua seção transversal, sendo designados pelas letras TR seguidos por um número correspondente à sua massa por metro linear. Ou seja, o perfil “TR-60” significa um trilho com 60 kg/m.

O trilho ferroviário possui um perfil caracteristicamente composto por três partes fundamentais: boleto, alma e patim (Figura 10) [9].

- Boleto: é a pista de rolamento da ferrovia. Deve ser massuda para poder ser desgastada dentro de certos limites sem afetar a inércia do trilho. Possui raios arredondados a fim de propiciar a máxima superfície de contato junto à roda, para minimizar a distribuição de pressão e conseqüentemente reduzir o seu desgaste;

- Alma: é o elo entre o boleto e o patim. Deve possuir espessura suficiente para garantir adequada resistência e rigidez transversal;

- Patim: é a base de apoio do trilho. Deve possuir espessura suficiente para garantir que a alma continue perpendicular ao dormente durante as solicitações transversais e que garanta a estabilidade do trilho.

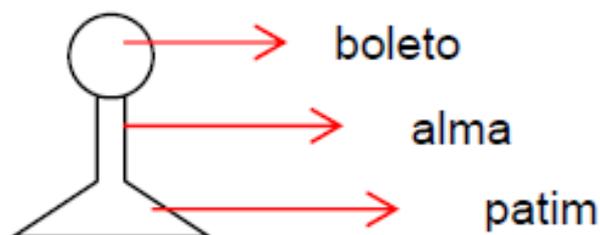


Figura 10 - Perfil do trilho [8]

Acessórios:

Alguns acessórios costumam ser utilizados na superestrutura para fazer a ligação entre trilhos ou entre o trilho e o dormente, como por exemplo, talas de junção, parafusos, arruelas, placas de apoio e acessórios de fixação.

As talas de junção são elementos que atuam na emenda mecânica dos trilhos e são apertadas por meio de parafusos de alta resistência com um torque pré-estabelecido. Para impedir que o parafuso se afrouxe com a trepidação na passagem dos trens são utilizadas arruelas. Essas arruelas atuam na absorção das vibrações e mantêm a ligação entre a tala e o parafuso com o aperto desejado.

As placas de apoio aumentam a área de apoio do trilho no dormente, ajudando a distribuir melhor as tensões. Além de aumentar a vida do dormente, essas placas ajudam na absorção das vibrações.

Alguns acessórios são utilizados para garantir a fixação do trilho ao dormente ou à placa de apoio do trilho. Esses elementos têm como função garantir a bitola da via, oferecendo resistência ao deslocamento longitudinal e transversal do trilho. As fixações podem ser flexíveis ou rígidas. Como exemplo de fixações rígidas há os pregos de linha e o tirefond. Esses acessórios costumam perder capacidade de resistência aos esforços longitudinais com o tempo devido às vibrações da linha.

Já as fixações elásticas não afrouxam com o tráfego e ajudam a absorver as vibrações causadas pelos trens. Os modelos mais utilizados nos dias de hoje são do tipo Pandrol e Denik.

2.1.2 Dormentes

O dormente é o elemento da superestrutura ferroviária que tem por objetivo receber e transmitir ao lastro os esforços produzidos pelas cargas dos veículos, servindo de suporte dos trilhos, permitindo a sua fixação e mantendo constante a bitola durante toda a sua vida útil [10]. Além disso, os dormentes devem ter durabilidade, suficiente resistência aos esforços, espessura que lhe dê rigidez necessária, mas ainda com alguma elasticidade, permitir uma boa fixação do trilho e amortecer parcialmente as vibrações.

Os dormentes utilizados usualmente podem ser três tipos: madeira, aço ou concreto.

A madeira foi até pouco tempo atrás o material mais utilizado na fabricação de dormentes por reunir características que garantem uma excelente performance, como

amortecimento das vibrações e facilidade de manuseio. Entretanto, devido à dificuldade na obtenção de madeira de boa qualidade e o endurecimento das leis, esse material tem sido preterido na utilização como dormente.

O dormente metálico possui a vantagem de ser relativamente leve e fácil de ser assentado. Entretanto, eles costumam ser barulhentos e apresentam o inconveniente de serem bons condutores de eletricidade, o que dificulta o isolamento entre os trilhos quando da utilização de circuitos de sinalização. Além disso, eles apresentam maior rigidez e a fixação do trilho é mais difícil de ser realizada.

Os dormentes de concreto começaram a ser utilizados no período pós-guerra na década de 1940 em virtude da escassez de madeiras de boa qualidade, para evitar o desflorestamento e devido aos inconvenientes apresentados pelos dormentes de aço. Os primeiros testes resultaram em blocos simplesmente armados, imitando a forma dos dormentes de madeira. Os resultados não foram satisfatórios, pois os choques e vibrações causavam trincas ou fissuras.

De um modo geral, os dormentes de concreto utilizados nos dias de hoje são monoblocos protendidos ou são compostos por dois blocos interligados por meio de uma haste metálica. Estes possuem algumas vantagens em relação ao primeiro, como maior área de apoio sobre o lastro, maior massa garantindo maior estabilidade, resistente à flexão no centro e absorvem e transmitem bem os esforços horizontais e verticais, mesmo em caso de desnivelamento transversal.

A Tabela 3 apresenta algumas vantagens e desvantagens para cada tipo de dormente.

Tabela 3 - Características dos dormentes [8]

	Vantagens	Desvantagens
Madeira	<ul style="list-style-type: none"> - Menor massa (manuseio); - Bons isolantes; - Suportam bem supersolicitações; - Diminuição dos ruídos; - Fixação simples. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vida útil; - Ataque de fungos e insetos; - Redução da oferta; - Necessidade de tratamento químico.
Concreto	<ul style="list-style-type: none"> - Maior massa (esforços laterais); - Manutenção da bitola; - Vida útil longa; - Isolante; - Invulnerável a fungos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Manuseio e substituição onerosos; - Destruído em descarrilamentos; - Vulnerável a solicitações excepcionais.
Aço	<ul style="list-style-type: none"> - Manutenção da bitola; - Recondicionável; - Insensível ao ataque de fungos; - Relativamente resistente a supersolicitações. 	<ul style="list-style-type: none"> - Massa reduzida (falta de inércia); - Elevado nível de ruído; - Gasto adicional com isolamento elétrico; - Dificuldade na socaria do lastro.

2.1.3 Lastro

O lastro ferroviário deve receber as cargas transmitidas na base dos dormentes, ainda bastante dispersa pela ação dinâmica quando da passagem dos trens, e redistribuí-las tão uniformemente quanto possível ao sublastro [9]. Suas principais funções são:

- Distribuir os esforços resultantes das cargas dos veículos;
- Atenuar as trepidações resultantes da passagem dos veículos;
- Corrigir as irregularidades existentes da terraplenagem, permitindo um exato assentamento da via e formando uma superfície contínua e uniforme para os dormentes e trilhos;
- Impedir os deslocamentos dos dormentes e da via, impedindo a flambagem no plano horizontal;
- Facilitar a drenagem da superestrutura.

Para desempenhar de maneira adequada essas funções o lastro deve possuir resistência suficiente para transmitir os esforços e possuir certo limite de elasticidade para absorver as vibrações. Em geral, os lastros são constituídos de pedra britada de granulometria uniforme com formato cúbico. A forma cúbica das partículas evita os recalques que ocorreriam com a passagem do tráfego caso fossem lamelares [8]. Com o passar do tempo, as dimensões das pedras do lastro sofrem uma fragmentação relativamente intensa, sendo necessária sua substituição.

O sublastro é a camada situada entre o lastro e o subleito e tem como função impedir o bombeamento de finos e diminuir a espessura do lastro, uma vez que seu custo é menor.

2.2 Bitolas

Bitola é a distância compreendida entre as faces interna dos boletos dos trilhos, medido perpendicularmente ao eixo longitudinal da via. Em 1907, na Conferência Internacional de Berma, ficou oficialmente adotada como “bitola internacional” a bitola de 1,435 m, valor correspondente à distância entre rodas das “diligências” da época [10]. As ferrovias brasileiras adotam três valores de bitola:

- Métrica: 1.000 mm;
- Padrão: 1.435 mm;
- Larga: 1.600 mm.

A escolha da bitola a ser adotada é de fundamental importância para definir alguns aspectos de construção e operação da via. A bitola métrica apresenta a vantagem de tornar a construção da ferrovia mais barata devido à existência de curvas de menor raio e menor largura da plataforma. Além disso, há economia também no lastro, dormentes, material rodante e obras de arte. Entretanto, as vias com bitola larga possuem maior capacidade de carga e permitem a operação com maiores velocidades.

A existência de diferentes bitolas dificulta bastante a interligação entre as ferrovias. No Brasil não há uma padronização das bitolas, o que acaba por prejudicar bastante o transporte de cargas e passageiros pelo modal ferroviário. Cerca de 80% das vias possui espaçamento métrico, enquanto que o padrão internacional praticamente não é utilizado (Tabela 4).

As ferrovias brasileiras sempre tiveram um grande foco no transporte de carga e não de passageiros. Isso explica o porquê da malha ferroviária nacional ser constituída basicamente de bitola estreita, pois se privilegiou a construção de vias mais baratas em detrimento de vias que permitem maior velocidade de operação e conforto.

Tabela 4 - Distribuição das ferrovias por bitola

Bitolas	Métrica (1,000 m)	Padrão (1,435 m)	Larga (1,600 m)
Brasil	79,7%	0,7%	19,6%
Mundo	17,0%	60,0%	23,0%

2.3 Trem de Alta Velocidade

Em 2008, foram contratados serviços de consultoria pelo Governo Federal para estudar a viabilidade técnica, econômica e financeira de um trem de alta velocidade ligando as duas maiores metrópoles do país, São Paulo e Rio de Janeiro. O estudo de viabilidade desse projeto incluiu também a ligação entre Campinas e a capital do estado, uma vez que o governo paulista já previa a instalação de uma linha rápida de trem entre essas cidades, denominada Expresso Bandeirantes.

Os trens a velocidades superiores a 250 km/h são considerados de alta velocidade. Esse tipo de meio de transporte costuma ser mais adequado quando opera entre regiões com grandes concentrações populacionais e distantes entre si de 500 a 600 km. Acima dessa distância, o avião torna-se mais competitivo, apesar do tempo maior para embarque e desembarque dos passageiros [11].

Devido às suas características, tanto para implantação e operação, os trens de alta velocidade apresentam algumas vantagens em relação a outros meios de transporte para o caso brasileiro, segundo a consultoria contratada pelo governo para realizar o estudo de viabilidade do projeto [11]:

- Menor uso do solo comparado à construção ou ampliação de rodovias;
- Redução dos tempos de viagem associados à baixa probabilidade de atrasos;
- Redução de impactos ambientais e emissão de gases poluentes em decorrência do desvio da demanda do transporte aéreo e rodoviário para o TAV;
- Redução dos níveis de congestionamento e do número de acidentes em rodovias;
- Redução de gargalos dos subsistemas de transporte aeroportuário, rodoviário e urbano.

O primeiro trem de alta velocidade do mundo começou a operar em 1964, no Japão. Hoje em dia, esse modal é utilizado em 12 países e, além do Brasil, mais cinco países planejam a sua construção. A Tabela 5 apresenta a extensão da malha de TAVs no mundo em operação, construção e planejamento.

Tabela 5 - Extensão da malha de trens de alta velocidade no mundo [11]

PAÍS	SISTEMAS DE TREM DE ALTA VELOCIDADE				
	Em operação			Em construção (km)	Planejada (km)
	Ano	Extensão (km)			
		Inicial	Atual		
Coréia	2004	300	300	82	-
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
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

O TAV brasileiro fará a interligação das cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Campinas, com conexão nos aeroportos do Galeão, Guarulhos e Viracopos. O Plano Nacional de Viação prevê também a construção de uma linha de alta velocidade entre Belo Horizonte e Curitiba, passando por São Paulo.

A extensão total da ferrovia será de 510,8 km e devido às restrições geométricas impostas pela velocidade operacional do trem, tais como a inclinação máxima e raio de curvatura, será necessária a construção de diversos túneis e pontes (Tabela 6), o que irá implicar em elevados custos para a obra. O tempo mínimo de viagem entre Rio e São Paulo seria de 1 hora e 33 minutos. A Tabela 7 apresenta os principais parâmetros utilizados no projeto do TAV.

Tabela 6 - Quantitativo resumido das obras de arte [11]

Obras de engenharia civil	Extensão (km)	% em relação à extensão total
Túnel	90,9	18%
Ponte	107,8	21%
Superfície	312,1	61%

Tabela 7 - Principais parâmetros de projeto do TAV

Bitola	1.435 mm
Velocidade máxima de projeto	350 km/h
Inclinação máxima de projeto	3,5 %
Raio horizontal mínimo	7.228 m
Raio vertical mínimo	42.875 m
Carga por eixo do trem	17 t
Plataforma mínima de estação	500 m

No estudo de demanda de usuários do TAV foram levados em consideração os seguintes aspectos: rede de transportes, frequência de viagem, tempo de viagem, tarifa ou custo de viagem e a acessibilidade medida pelos tempos de acesso entre o terminal e o local de origem/destino da viagem [11]. A Tabela 8 apresenta a demanda estimada do TAV Brasil para dois tipos de serviço, expresso e regional (em milhares de passageiros por ano) [11].

Tabela 8 - Demanda Estimada do TAV Brasil por tipo de serviço (em milhares de passageiros por ano)

Origem	2014	2024	2034	2044
Serviço Expresso	7.070	11.282	19.323	27.788
Rio de Janeiro – São Paulo	6.435	10.201	17.328	24.948
Rio de Janeiro – Campinas	635	1.081	1.975	2.840
Serviço Regional	25.538	34.777	49.774	51.577
Rio de Janeiro – Volta Redonda/Barra Mansa	2.619	3.217	4.211	6.055
Rio de Janeiro – São José dos Campos	211	294	422	606
Volta Redonda/Barra Mansa – São José dos Campos	254	337	457	657
Volta Redonda/ Barra Mansa – São Paulo	184	233	308	443
Volta Redonda/ Barra Mansa – Campinas	40	55	79	113
São José dos Campos – São Paulo	8.553	11.490	16.282	23.415
São José dos Campos – Campinas	1.305	2.003	3.110	4.473
São Paulo – Campinas	12.372	17.094	24.905	35.815
Total	32.608	46.059	69.097	99.365

Ainda sobre estudo de demanda realizado pelo consórcio Halcrow/ Sinergia, o TAV Brasil absorveria cerca de 50% do volume de passageiros em relação aos outros meios de transporte [11]. A Tabela 9 apresenta os resultados da simulação realizada para o ano de 2008.

Tabela 9 - Matriz de transporte de passageiros simulada para 2008, com TAV (em milhares de passageiros/ ano)

Modalidade de Transporte	Rio – São Paulo	Rio – Campinas	Regional	Total
TAV	3.519	302	14.170	17.991
Aéreo	2.368	101	-	2.469
Automóvel	751	31	8.108	8.890
Ônibus	670	49	3.531	4.250
Total	7.308	483	25.809	33.600

Os custos estimados pelo governo para construção, aquisição do material rodante e implantação de todos os sistemas necessários ao empreendimento ultrapassam os R\$ 34 bilhões, tendo como data-base setembro de 2008 [11]. Entretanto, segundo relatório produzido pelas quatro maiores construtoras do Brasil o custo total da obra seria cerca de 30%

maior, R\$ 55 bilhões [12]. A Tabela 10 apresenta o investimento necessário para a construção do TAV.

Tabela 10 - Custo total de investimento

ITEM	Em milhões de R\$	(%)
Obras civis	24.583,0	71,0
Desapropriação e medidas socioambientais	3.894,1	11,3
Sistemas e equipamentos	3.409,9	9,8
Material rodante	2.739,8	7,9
Total	34.626,8	100,0

O edital de concessão prevê que empresas nacionais absorvam tecnologia associadas ao TAV e alguns institutos de pesquisa e desenvolvimento do país atuariam nesse processo de transferência tecnológica. Nesse aspecto o Instituto Tecnológico de Aeronáutica terá papel relevante. Segundo informações do Ministério dos Transportes, o ITA será responsável pelo suporte dos seguintes processos: sistemas de telecomunicação, sistema de sinalização, janelas e portas, acoplamentos, truque, motor de tração/ redutor, inversores e conversores, freio. O IAE atuaria no suporte aos serviços de manutenção [11].

2.3.1 Críticas ao Projeto

Diversos setores da sociedade têm feito críticas ao projeto do trem de alta velocidade brasileiro. Questiona-se a priorização da construção do TAV em detrimento de investimentos em outras áreas, como saneamento, transporte de carga, saúde etc.

Os principais pontos de discussão são o alto valor para a execução da obra e também a viabilidade financeira do projeto. O custo estimado pelo governo para a construção do TAV (R\$ 34,6 bilhões) é mais de seis vezes superior ao da Ferrovia Nova Transnordestina (R\$ 5,4 bilhões) e quase duas vezes maior que o da hidrelétrica de Belo Monte (R\$ 19 bilhões). O orçamento total da obra representa mais que o dobro do valor total investido em ferrovias no Brasil, pelo setor público e privado, entre 1999 e 2008 (Tabela 11) [13].

Tabela 11 - Comparação entre investimentos em infraestrutura

Projetos	R\$ bilhões
TAV	34,6
Usina Hidrelétrica de Belo Monte	19,0
Usina Hidrelétrica de Santo Antônio	8,7
Usina Hidrelétrica de Jirau	8,7
Ferrovias Norte-Sul	6,5
Ferrovias Transnordestina	5,4
Transposição do Rio São Francisco	4,5
Investimento público e privado em ferrovias de 1999 a 2008	16,6
Investimento público em aeroportos de 1999 a 2008	3,1

Segundo Mendes, os estudos técnicos que embasam o projeto apresentam indícios de subestimação dos custos e superestimação das receitas. O custo por quilômetro do projeto brasileiro é de R\$ 33 milhões, abaixo dos valores observados nos demais países que variam de R\$ 35 milhões e R\$ 70 milhões [14]. Esses indícios tornam-se ainda mais fortes quando levados em consideração algumas características do projeto brasileiro, como traçado inclinado, grande quantidade de túneis e pontes, construção de linha exclusiva sem aproveitamento da malha férrea já existente e também os custos de desapropriação em áreas de alta densidade populacional [13].

Experiências em outros países mostram que as linhas de alta velocidade não conseguem se sustentar apenas com recursos privados. No caso da Itália, o projeto começou privado, mas teve que ser estatizado e a dívida foi assumida pelo Estado. No Japão, as ferrovias sempre foram lucrativas, mas começaram a operar no vermelho após a utilização dos trens velozes. Na França, seguindo o padrão de toda a Europa, o valor das passagens é fortemente subsidiado pelo governo [13].

Críticas também são feitas às vantagens da implantação do TAV apresentadas no estudo de viabilidade encomendado pelo Governo Federal. Alega-se que o investimento no trem de alta velocidade reduziria os investimentos necessários para reforma e ampliação dos aeroportos. Entretanto, o aeroporto de Viracopos, em Campinas, teria seu tráfego ampliado em consequência das melhorias no acesso.

A redução no tempo de viagem entre o Rio de Janeiro e São Paulo também é questionada, uma vez que os aeroportos Santos Dumont e Congonhas possuem localização mais privilegiada que aquelas planejadas pelo TAV.

2.4 Metrô

A definição de metrô diverge um pouco entre os especialistas, mas, em geral, ele pode ser definido como um sistema de transporte urbano elétrico, com circulação em sítio próprio, independente do restante do tráfego e com operação frequente, ou seja, com tempo de espera reduzido entre as composições.

O fornecimento de energia elétrica para os trens do metrô é realizado, na maioria das vezes, por meio de um terceiro trilho eletrificado. A energia é transportada para o motor da composição por meio de uma roda, escova ou sapata deslizante que entra em contato com o trilho eletrificado. Esse pode ser posicionado fora ou entre os trilhos do metrô. A Figura 11 apresenta um esquema do abastecimento elétrico dos metrôs [15].

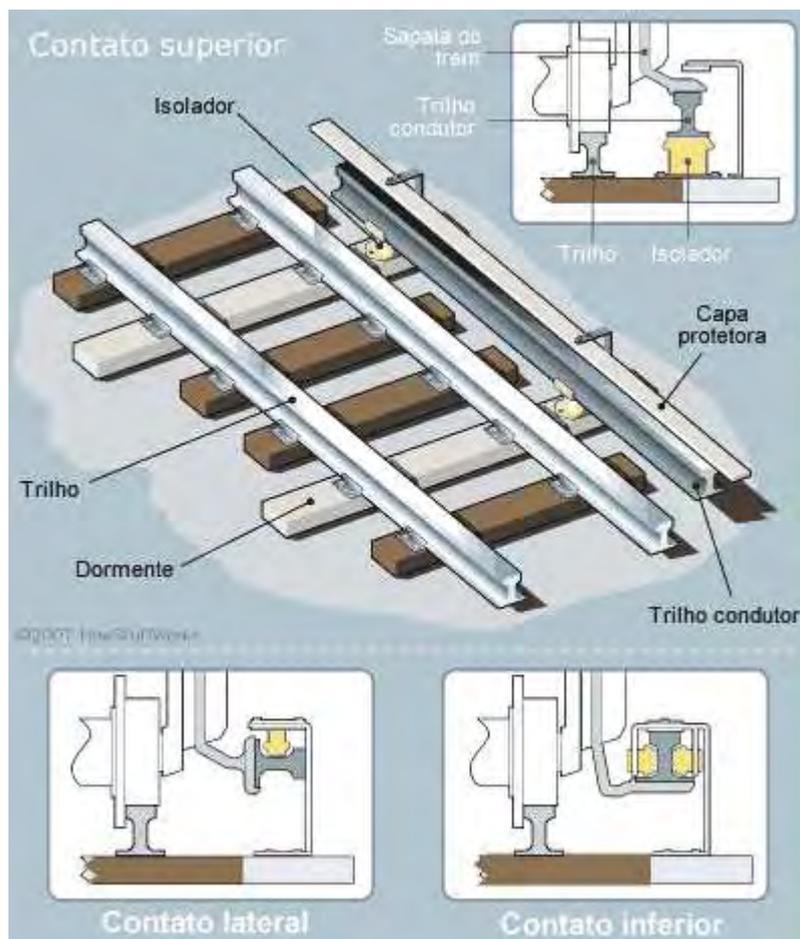


Figura 11 - Fornecimento de energia elétrica para os metrôs

A primeira linha de metrô foi inaugurada em 1863, em Londres, e, hoje, existem mais de 140 redes em todo o mundo. A maior malha metroviária existente está localizada na cidade de Xangai com cerca de 420 km de extensão, seguida pelas redes de Nova Iorque (418 km) e Londres (408 km).

No Brasil, a maior rede de metrô está localizada na cidade de São Paulo com 74,3 km, seguida pelo Rio de Janeiro (48,1 km), Brasília (46,5 km), Recife (39,5 km), Porto Alegre (33,8 km), Belo Horizonte (28,2 km) e Teresina (12,5 km). Atualmente, encontram-se em fase de execução as obras do metrô em Fortaleza e Salvador.

Em 2010 foram transportados, em média, 3,8 milhões de passageiros por dia na cidade de São Paulo [16]. No Rio de Janeiro esse número foi de 588 mil passageiros por dia [17].

2.5 Veículo Leve sobre Trilhos

Os veículos leves sobre trilhos são pequenos trens urbanos, normalmente movidos a eletricidade. Os VLTs são equivalentes a bondes modernos e devido às suas características eles têm se tornado cada vez mais alternativa de transporte nas grandes cidades.

O veículo leve é bem mais barato para ser construído do que o metrô, produz menos barulho e possui maior flexibilidade em curvas apertadas. Além disso, seu tamanho permite que a estrutura de trilhos se encaixe no meio urbano, permitindo grande flexibilidade para os usuários. Eles podem circular em vias próprias isoladas ou dividindo o tráfego nas ruas com os ônibus e automóveis.

O primeiro veículo leve sobre trilhos entrou em operação no Brasil em 1995, em Campinas. Entretanto, os serviços foram encerrados após cinco anos devido à má localização das linhas existentes. Atualmente, o VLT do Cariri é o único em operação no Brasil. Com extensão de 13,9 km, ele interliga as cidades do Crato e Juazeiro do Norte, no Ceará.

Algumas cidades, tais como Natal, Fortaleza, Recife, Salvador e Cuiabá, estudam a implantação de VLTs para melhorar a mobilidade urbana. Entretanto, as únicas cidades que já estão com projetos em fase de execução são Brasília e João Pessoa.

3 Comparativo entre rodovias e ferrovias

Neste capítulo será realizada uma análise comparativa entre alguns aspectos de projeto relacionados a rodovias e ferrovias, principalmente no que se refere à geometria (traçado, rampas, curvas, superelevação e superlargura).

3.1 Traçado

A definição do traçado de uma via, seja rodoviária ou ferroviária, irá impactar fortemente nos custos da obra, devido à quantidade de cortes, aterros e obras de arte a serem executadas. Eles devem ser projetados de modo que haja, da melhor maneira possível, uma inserção da estrada na topografia do terreno, garantindo uma fluência das vias e que as mudanças de direção ocorram gradativamente.

Diferentemente das rodovias, trechos excessivamente longos em tangentes são convenientes para ferrovias. Devido às características de operação de composições ferroviárias é preferível que tangentes longas sejam adotadas como unidades básicas de projeto no traçado das vias permanentes.

Por outro lado, para rodovias de elevado padrão, o traçado deverá ser uma sequência de poucas curvas de raios amplos do que de longas “tangentes” quebradas por curvas de pequeno desenvolvimento circular. Tal fato tem por objetivo reduzir a sensação de monotonia para o motorista e também ajustar de maneira mais adequada o traçado à conformação topográfica, reduzindo os custos de terraplenagem [18].

Segundo o manual de projetos para rodovias do DNER, as curvas são opções mais interessantes por oferecerem aos motoristas uma visão mais variada e dinâmica, estimulando o senso de previsão e, principalmente, por propiciarem uma melhor condução ótica, permitindo ver de frente o que na tangente seria visto periféricamente. Entretanto, isso não significa que se deve arbitrariamente forçar a construção de curvas desnecessárias, pois poucos são os terrenos tão planos que o traçado não possa apresentar uma curvatura esteticamente justificada [18].

Vale ressaltar que tais recomendações muitas vezes não podem ser contempladas, pois muitas vezes há necessidade de ajustar o traçado aos elementos da paisagem, como maciços rochosos, vales estreitos e malhas viárias urbanas ou até mesmo aproveitar os traçados já existentes.

3.2 Rampas

As rampas são utilizadas para vencer os obstáculos geográficos que possuem alturas diferenciais ao longo do desenvolvimento do traçado de qualquer estrada. Também conhecidas por greides ou gradientes, elas são geralmente definidas pela tangente do ângulo formado com a horizontal e expressas em porcentagem.

A principal limitação ao emprego de rampas suaves é constituída pelo fator econômico, traduzido pelo aumento do custo de construção em regiões topograficamente desfavoráveis. O estabelecimento de rapas máximas objetiva estabelecer um equilíbrio entre esse fator e os desempenhos operacionais dos veículos e composições ferroviárias, principalmente no que tange ao consumo e desgaste [18].

Costuma-se manter os aclives e declives nas ferrovias sempre pequenos para possibilitar rebocar grandes volumes de carga. À medida que os greides crescem, decresce a capacidade de reboque de uma mesma locomotiva. Ou seja, a intensidade do greide positivo, ou aclive, é inversamente proporcional à capacidade de reboco de uma locomotiva [9].

De modo geral, os aclives e declives numa ferrovia costumam ser da mesma ordem em ambos os sentidos de tráfego, permitindo, dessa maneira, o transporte do mesmo volume de carga nos dois sentidos. Entretanto, nem sempre isso é verdade. Nas vias onde o transporte é predominantemente unidirecional pode haver diferenças nos valores máximos de greide adotados.

Existem algumas vias ferroviárias em que o volume de carga no sentido importação, do litoral para o interior, é menor que no sentido de exportação, do interior para o litoral. Nesses casos os trens circulam com carga total no sentido dos portos e retornam com carga parcial no sentido contrário. Tal fato permite a adoção de diferentes valores máximos de greide em cada sentido, o que acaba por reduzir os custos de implantação da ferrovia e também o consumo de combustível pelas locomotivas.

Tal fato pode ser constatado, por exemplo, na Estrada de Ferro Vitória a Minas, que liga a região das minas de minério de ferro, em Minas Gerais, ao Porto de Tubarão, no Espírito Santo. No sentido importação a rampa máxima é de 1,0%, enquanto que no sentido exportação é de 0,3 %.

Na Ferrovia Nova Transnordestina, que se encontra em fase de construção atualmente, também estão sendo adotadas rampas diferentes em cada sentido. Essa ferrovia será utilizada

principalmente para o transporte de gesso e minério de ferro do interior dos Estados de Pernambuco e Piauí para os portos do Pecém/CE e Suape/PE. No sentido dos portos está sendo adotada a rampa máxima de 1,0%, enquanto que no sentido do litoral para o interior esse valor é de 1,5%.

Com o objetivo de manter constante a capacidade de reboque da locomotiva ao longo de todo o aclive costuma-se realizar uma diminuição equivalente na rampa geométrica. Tal fato procura compensar a resistência ao deslocamento do trem nas curvas.

Os metrôes, de modo geral, adotam a rampa máxima de 4% em ambos os sentidos do tráfego sem a compensação da resistência de curva, pois todos os eixos dos carros metroviários possuem tração própria e, portanto, não rebocam carga, possuindo capacidade suficiente para a sua necessária aceleração [9].

As composições ferroviárias não conseguem superar rampas muito íngremes. Para rampas de 1,5% o esforço trator de uma locomotiva é seis vezes maior que em um terreno plano. A Tabela 12 apresenta os valores máximos admissíveis de rampas para rodovias e ferrovias.

Os valores das rampas adotadas nas rodovias variam de acordo com sua classe, ou seja, são função das características técnicas e operacionais da via. Quanto mais alta a classe de projeto de uma rodovia maior a restrição quanto à rampa a ser adotada.

Tabela 12 - Rampas máximas admissíveis

	Classe de projeto	Relevo		
		Plano	Ondulado	Montanhoso
Rodovia	Classe 0	3%	4%	5%
	Classe I	3%	4,5%	6%
	Classe II	3%	5%	7%
	Classe III	4%	6%	8%
	Classe IV-A	4%	6%	8%
	Classe IV-B	6%	8%	10%
Ferrovia	-	0,6%	0,9%	1,3%

Em trechos longos em rampa nas rodovias é conveniente dispor a parte mais íngreme na parte inferior e as rampas mais suaves no topo para tirar proveito do impulso acumulado no segmento plano ou descendente anterior à subida. Além disso, poderá também ser considerada

a conveniência de intercalar, no caso de rampas íngremes, trechos com aclives mais suaves, em vez de dispor de uma punica rampa contínua [18].

3.3 Curvas

As ferrovias têm exigências mais severas quanto às características das curvas que as rodovias. A questão da aderência nas rampas, a solidariedade rodas-eixo e o paralelismo dos eixos de mesmo truque impõem a necessidade de raios mínimos maiores que os das rodovias [8].

O raio mínimo para uma via férrea é estabelecido por norma ($R \geq 180$ m) e deve permitir a inscrição da base rígida dos truques dos carros locomotivas, além de limitar o escorregamento entre roda e trilho [8]. Já nas rodovias, o raio mínimo a ser adotado é função da velocidade diretriz da via, da máxima taxa de superelevação adotada e do máximo coeficiente de atrito transversal admissível entre o pneu e o pavimento (Equação 1).

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127(e_{\max} + f_{\max})} \quad (1)$$

Onde:

R = raio da curva (m)

V = velocidade diretriz (km/h)

e_{\max} = máxima taxa de superelevação adotada (m/m)

f_{\max} = máximo coeficiente de atrito transversal admissível entre o pneu e pavimento (adimensional)

A Tabela 13 apresenta os valores dos raios mínimos calculados para velocidades de 30 a 120 km/h [18].

Tabela 13 - Raios mínimos em função da superelevação para rodovias

Velocidade diretriz (km/h) \ $e_{max}(\%)$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
4	30	60	100	150	205	280	355	465	595	755
6	25	55	90	135	185	250	320	415	530	665
8	25	50	80	125	170	230	290	375	475	595
10	25	45	75	115	155	210	265	345	435	540
12	20	45	70	105	145	195	245	315	400	490

3.3.1 Superelevação

Dá-se o nome de superelevação em um ponto da curva ao valor da tangente do ângulo formado pela reta de maior declive da seção com o plano horizontal [18]. Elas são utilizadas nas rodovias com o objetivo de contrabalancear o efeito da aceleração centrífuga.

Os valores máximos admissíveis para a superelevação levam em consideração a grande possibilidade do fluxo de tráfego operar a velocidades bem abaixo da velocidade diretriz, a velocidade diretriz e a classe de projeto da rodovia, o comprimento de transição da superelevação nas curvas e também razões econômicas, visando, por exemplo, reduzir os custos de construção e manutenção da via (Tabela 14) [18]. A Figura 12 apresenta a variação da seção da pista da implantação da superelevação [18].

Tabela 14 - Superelevações máximas para rodovias

$e_{m\acute{a}x}$	Casos de emprego
12%	Máximo absoluto em circunstâncias específicas
10%	Máximo normal. Próprio para rodovias de padrão elevado
8%	Rodovias de padrão intermediário
6%	Rodovias em áreas urbanizadas ou com frequente interseções
4%	Situações extremas, com intensa ocupação do solo adjacente

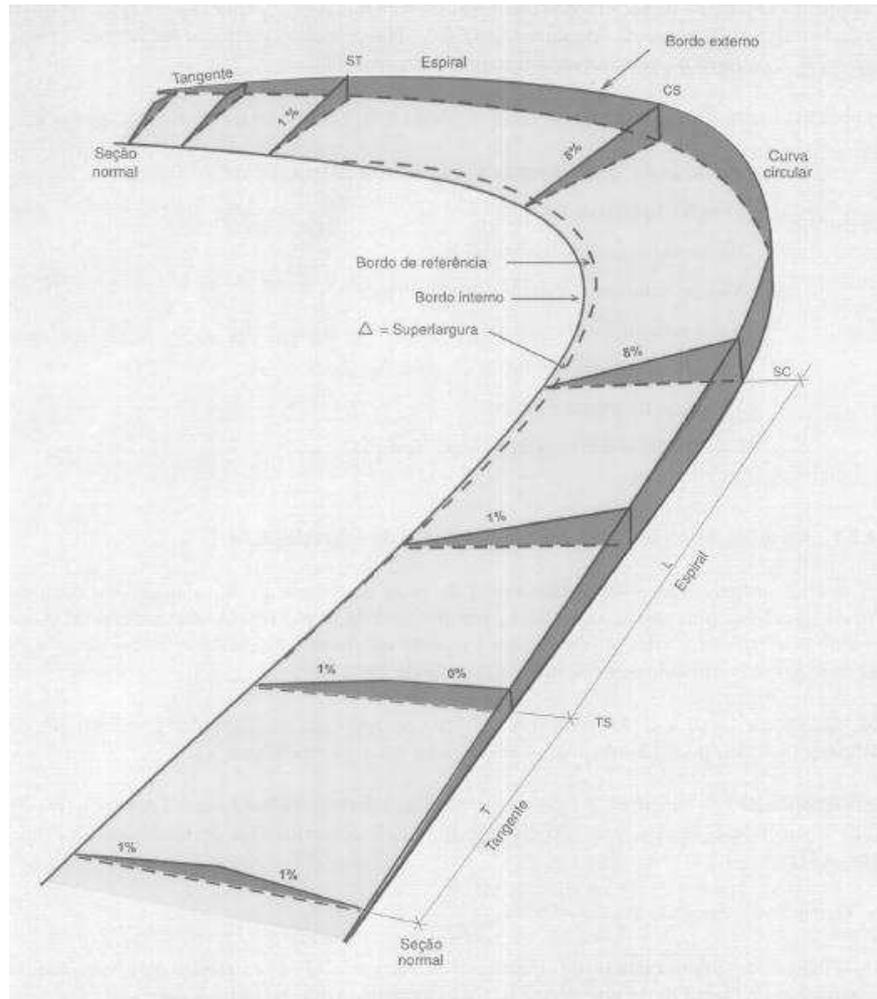


Figura 12 - Variação da seção da pista na implantação da superelevação

Em uma via ferroviária percorrendo uma trajetória circular num plano horizontal, a força centrífuga deslocará o veículo no sentido do trilho externo, provocando um forte atrito através dos frisos das rodas. Dependendo da intensidade dessa força centrífuga poderá ocorrer o tombamento do veículo [9].

Nas ferrovias a superelevação consiste em elevar o nível do trilho externo em uma curva com o objetivo de reduzir o desconforto gerado pela mudança de direção e diminuir o desgaste no contato metal-metal e o risco de tombamento devido à força centrífuga que aparece nas rodas [8].

Existem dois métodos para determinação da superelevação (h) da via a ser utilizada, um empírico e outro racional. No método empírico o valor da superelevação é função da bitola da via [8]:

$$B = 1,60 \text{ m} \rightarrow h_{\max} = 18 \text{ cm} \rightarrow e_{\max} = 11,25\%$$

$$B = 1,00 \text{ m} \rightarrow h_{\max} = 10 \text{ cm} \rightarrow e_{\max} = 10,00\%$$

Já o método racional utiliza dois critérios para o cálculo da superelevação: critério da segurança ou estabilidade do veículo na curva e o critério do conforto.

A superelevação prática máxima é determinada de modo a garantir que um veículo crítico parado sobre a via não venha a tombar (Figura 13) [8]. De posse do valor máximo admissível da superelevação para uma curva (Equação 2), determinam-se as velocidades máximas que podem ser atingidas pelos veículos segundo os critérios da segurança e do conforto.

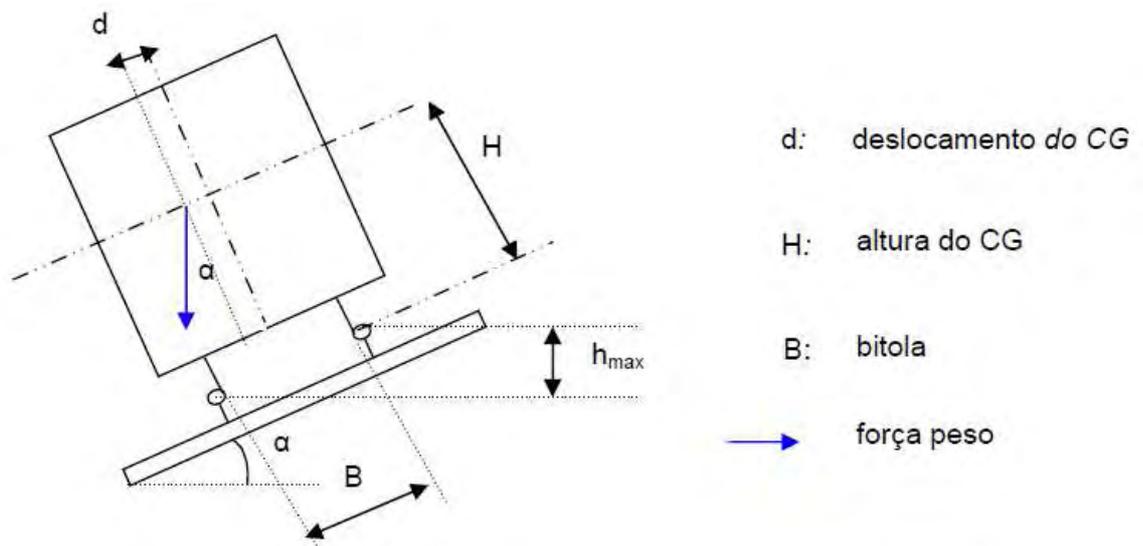


Figura 13 - Superelevação prática máxima

$$\text{Momento estabilizador: } M_e = P \cos \alpha \left(\frac{B}{2} - d \right) \approx P \left(\frac{B}{2} - d \right)$$

$$\text{Momento instabilizador: } M_i = P \sin \alpha \cdot H = P \frac{h}{B} H$$

Equilíbrio: $M_e = n \cdot M_i$, onde n é o coeficiente de segurança.

$$h_{\max} = \frac{B}{H \cdot n} \left(\frac{B}{2} - d \right) \quad (3)$$

Quando da adoção de uma superelevação menor que seu valor máximo teórico surge no trem de passageiros uma componente da aceleração não compensada (η). Tal componente pode causar desconforto nos passageiros, o que aumenta com o distanciamento da superelevação prática em relação à teórica. Deve-se, portanto, determinar qual a máxima velocidade que pode ser percorrida em uma curva de raio R de modo que não haja desconforto.

Critério do conforto:

A Figura 14 apresenta um esquema com a distribuição de forças em um vagão para a determinação da velocidade máxima a ser percorrida em uma curva com conforto [8].

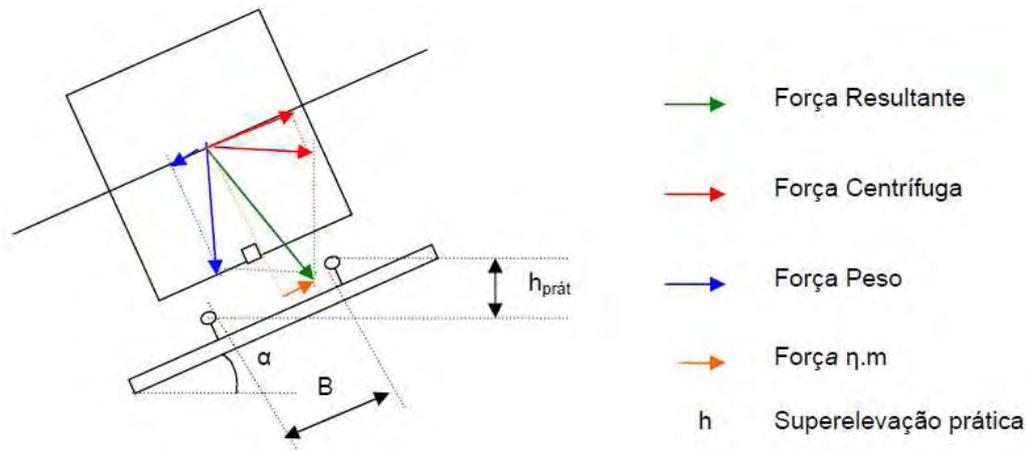


Figura 14 - Critério do conforto

$$F_c \cdot \cos \alpha - P \cdot \sin \alpha = m \cdot \eta$$

$$\frac{m \cdot V^2}{R} - m \cdot g \cdot \frac{h_{\max}}{B} = m \cdot \eta$$

$$\eta = \frac{V^2}{R} - g \cdot \frac{h_{\max}}{B}$$

$$V_{\max} = \sqrt{127 \cdot R \left(\frac{h_{\max} + \frac{\eta \cdot B}{g}}{B} \right)} \quad (4)$$

Onde:

V_{\max} = velocidade máxima com conforto (km/h)

R = raio da curva

B = bitola (m)

h_{\max} = superelevação prática máxima

O valor do componente da aceleração centrífuga não compensada (η) que não causa desconforto aos passageiros varia de acordo com a companhia. Entretanto, os valores comumente adotados são:

- Bitola métrica: $\eta = 0,45 \text{ m/s}^2$

- Bitola padrão: $\eta = 0,60 \text{ m/s}^2$

- Bitola larga: $\eta = 0,65 \text{ m/s}^2$

Simplificando a expressão da velocidade máxima pelo critério do conforto, temos:

$$- B = 1,00 \text{ m} \rightarrow h_{\max} = 0,115 \text{ m} \rightarrow V_{\max} \approx 4,2\sqrt{R} \quad (5)$$

$$- B = 1,60 \text{ m} \rightarrow h_{\max} = 0,204 \text{ m} \rightarrow V_{\max} \approx 4,7\sqrt{R} \quad (6)$$

Critério da segurança:

O critério da segurança é utilizado para verificar a velocidade máxima que um trem pode percorrer uma curva com a superelevação máxima de modo que não haja risco de tombamento para o lado externo. A Figura 15 apresenta um esquema com a distribuição de forças em um vagão para a determinação da velocidade máxima a ser percorrida em uma curva com segurança [8].

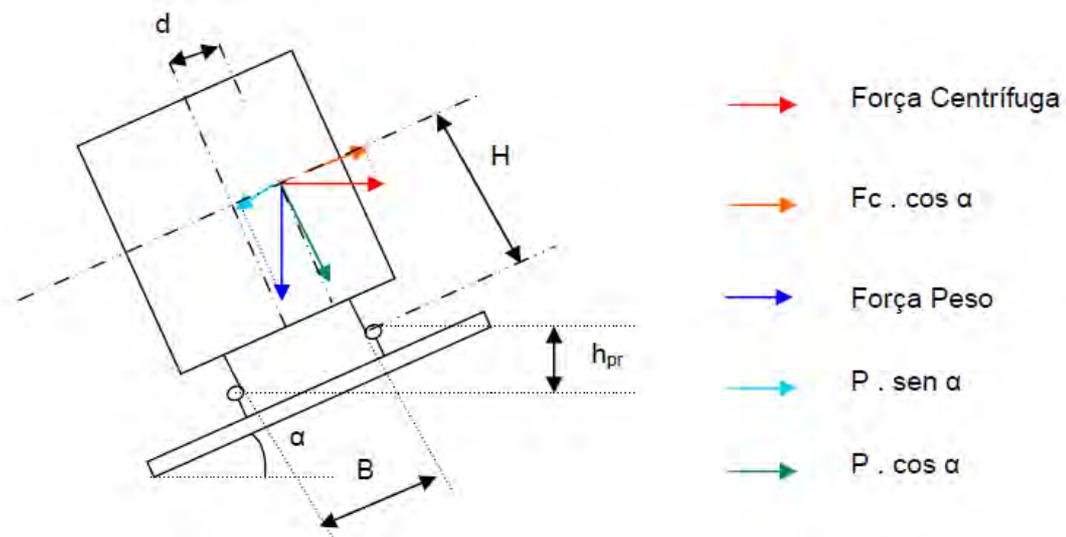


Figura 15 - Critério da segurança

Onde:

d: deslocamento do centro de gravidade

H: altura do centro de gravidade em relação aos trilhos

$$\text{Momento instabilizador: } M_i = (F_c - P \cdot \text{sen} \alpha) \cdot H = \left[\left(\frac{P \cdot V^2}{127 \cdot R} \right) - \left(\frac{P \cdot h_p}{B} \right) \right] \cdot H$$

$$\text{Momento estabilizador: } M_e = P \cdot \text{cos} \alpha \cdot \left(\frac{B}{2} - d \right) \approx P \cdot \left(\frac{B}{2} - d \right)$$

Equilíbrio: $M_e = n \cdot M_i$, onde n é um coeficiente de segurança, em geral igual a 5.

$$V_{\max} = \sqrt{127 \cdot R \left(\frac{h_{\max}}{B} + \frac{\frac{B}{2} - d}{H \cdot n} \right)} \quad (7)$$

Simplificando a equação 7 para as bitolas métrica e larga, temos:

$$- B = 1,00 \text{ m} \rightarrow V_{\max} \approx 4,2\sqrt{R} \quad (8)$$

$$- B = 1,60 \text{ m} \rightarrow V_{\max} \approx 4,8\sqrt{R} \quad (9)$$

A menor das duas velocidades, equações 4 e 7, será adotada como velocidade máxima permitida para o trecho. Como os cálculos foram realizados para a curva crítica garante-se que todo o trecho pode ser percorrido com a velocidade máxima e os critérios de conforto e segurança serão atendidos.

3.3.2 Superlargura

Nas rodovias, a superlargura corresponde ao acréscimo de largura necessário em uma curva para manter as condições de conforto e segurança dos trechos em tangente. Os veículos nas curvas, por serem rígidos, não conseguem acompanhar a curvatura da estrada, sendo, portanto, necessário aumentar a largura da pista para que permaneça a distância mínima entre os veículos que existia no trecho em tangente [18].

A determinação da superlargura nas rodovias é função dos parâmetros do veículo de projeto, tais como largura, distância entre eixos e balanço dianteiro. O valor mínimo adotado é de 0,40 m.

Já nas ferrovias a superlargura corresponde ao excesso de distância em relação à bitola usada. Ela tem por objetivo facilitar a inscrição do truque e impedir ou atenuar o arrastamento da roda externa sobre o trilho, diminuindo, assim, os desgastes e as resistências das curvas.

Os valores de superlargura variam geralmente de 1 a 2 cm, sendo a distribuição desse aumento na bitola realizada antes da curva circular ou durante a transição, numa taxa de 1 mm/m em vias convencionais e 0,5 mm/m em vias de alta velocidade [8]. A superlargura é colocada deslocando-se o trilho interno, pois o externo é responsável por guiar as rodas dianteiras.

A superlargura pode ser determinada por meio de uma fórmula prática em função do raio da curva (Equação 10). Os aumentos da bitola da via nas curvas só costumam ser utilizados para raios de até 500 m.

$$S = \frac{6}{R} - 0,012, S \leq 2 \text{ cm} \quad (10)$$

Onde:

S = superlargura (m)

R = raio da curva (m)

4 Considerações finais

Os investimentos do governo em obras de infraestrutura de transportes não estão acompanhando o crescimento da economia e, conseqüentemente, aumento da demanda. E isso tem causado dificuldades e encarecendo o escoamento da produção nacional nos últimos anos. Com uma pauta de exportação baseada fortemente em minérios e grãos, o Brasil reúne características que favorecem a utilização do modal ferroviário em diversas regiões.

Com uma malha ferroviária com a mesma extensão verificada em 1923, o governo brasileiro negligenciou a manutenção e expansão das ferrovias no país por vários anos. Entretanto, desde a privatização na década de 1990, os investimentos no setor vêm sendo retomados.

Atualmente, algumas grandes obras de implantação de ferrovias no país encontram-se em fase em execução, como a Ferrovia Norte-Sul e a Nova Transnordestina, e outras se encontram em fase de projeto, como a Ferrovia de Integração Oeste-Leste, na Bahia, e a Ferrovia de Integração do Centro-Oeste, no Mato Grosso.

A utilização de bitolas diferentes tem dificultado a interligação das ferrovias brasileiras que sempre tiveram um grande foco no transporte de carga e não de passageiros. Isso explica o porquê da malha ferroviária nacional ser constituída basicamente de bitola estreita, pois se privilegiou a construção de vias mais baratas em detrimento de vias que permitem maior velocidade de operação e conforto.

Este Trabalho de Graduação procurou abordar alguns aspectos técnicos relacionados a projetos de ferrovias, principalmente em relação à geometria das vias. Foram detalhados elementos da superestrutura ferroviária e apresentadas algumas informações acerca do modal ferroviário como um meio de transporte de passageiros (metrô, Trem de Alta Velocidade e Veículo Leve sobre Trilhos).

Este TG teve como objetivo trazer o tema das ferrovias para debate no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, apresentando informações gerais e relevantes sobre o assunto e esperando ser uma fonte de inspiração para a realização de trabalhos futuros.

5 Referências

- [1] BRASIL. Confederação Nacional do Transporte. CNT. Plano CNT de Transporte e Logística 2011
- [2] BRASIL. Confederação Nacional das Indústrias. CNI. Mapa Estratégico da Indústria 2007 – 2015. Brasília, 2010.
- [3] BRASIL. Ministério dos Transportes. Matriz de Transportes: presente e futuro. Trabalho apresentado no II Encontro de Ferrovias. Vitória, 2010.
- [4] PEREIRA, Olyntho Carmo. Soluções de Otimização da Eficiência Energética de uma Ferrovia de Carga: o Caso da Estrada de Ferro Carajás - EFC. Dissertação de mestrado, PUC. Rio de Janeiro, 2009.
- [5] BRASIL. Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários. ANTF. As Ferrovias e o Futuro do País. Brasília, 2010.
- [6] TEIXEIRA, Karênina Martins. Infra-estrutura Brasileira de Transportes: uma das Piores da América Latina. NTC&Logística, São Paulo, 2008.
- [7] BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE. Estatísticas históricas do Brasil: séries econômicas, demográficas e sociais de 1550 a 1988. 2. ed. rev. e atual. do v. 3 de Séries estatísticas retrospectivas. Rio de Janeiro, 1990.
- [8] PORTO, Telmo Giolito. Notas de aula da disciplina PTR 2501 – Ferrovias. USP, 2004
- [9] WANKE, Helmar. Curso sobre Ferrovias. Recife: Construtora Norberto Odebrecht, 1978
- [10] BRINA, Helvécio Lapertosa. Estradas de Ferro. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979

- [11] BRASIL. Ministério dos Transportes. TAV Brasil. Consulta a página institucional. Disponível em < <http://www.tavbrasil.gov.br>>. Acesso em 15 set. 2011
- [12] <<http://economia.uol.com.br/ultimas-noticias/efe/2011/04/21/construtoras-brasileiras-elevam-em-mais-de-30-custo-do-trem-bala.jhtm>>. Acesso em 23 ago. 2011
- [13] MENDES, Marcos. Trem de Alta Velocidade: Novas Informações para Debater o Projeto. Centro de Estudos da Consultoria do Senado. Brasília, 2011
- [14] AMOS, Paul et al. (2010) High-speed rail: the fast track to economic development? Banco Mundial. Disponível em www.worldbank.org .
- [15] <<http://viagem.hsw.uol.com.br/metro3.htm>> Acesso em 12 out. 2011
- [16] METRÔ. Acesso a página institucional. <<http://www.metro.sp.gov.br/empresa/numeros/indicadores/indicadores03.shtml>> Acesso em 14 out. 2011
- [17] Revista Transporte Moderno <http://www.revistatransportemoderno.com.br/destaque_princ/index.php?cod=131&edicao=2&revista=12> Acesso em 15 out. 2011
- [18] BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER. Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais. Rio de Janeiro, 1999

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	2. DATA 16 de novembro de 2011	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-073/2011	4. N° DE PÁGINAS 48
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Ferrovias: aspectos técnicos de projeto			
6. AUTOR(ES): Samuel Menezes Albuquerque			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Transporte ferroviário; Via permanente ferroviária; Projeto geométrico			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Transporte ferroviário; Projetos estruturais; Tecnologia ferroviária; Engenharia de transportes; Brasil.			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Ronaldo Gonçalves de Carvalho. Publicado em 2011.			
11. RESUMO: <p>O Brasil vive um momento de perspectivas de grande crescimento em diversos setores da economia. Dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI) apontam um aumento médio do Produto Interno Bruto (PIB) de 5,5% para os próximos 15 anos. Isso se dará, em parte, devido ao aumento das fronteiras agrícolas e minerais, e também pela exploração de petróleo nas recém-descobertas camadas do pré-sal. É nesse aspecto que as ferrovias têm importante papel a desempenhar no transporte de carga nacional. Com uma malha de apenas 29.817 km, mesma extensão verificada em 1923, o Brasil necessita de vultosos investimentos no setor ferroviário para conseguir atender de maneira adequada o crescimento da demanda.</p> <p>Este Trabalho de Graduação tem como objetivo apresentar alguns aspectos técnicos relacionados a projetos de ferrovias, descrevendo elementos da superestrutura ferroviária, tais como os diferentes tipos de trilhos e dormentes e como a adoção da bitola da via permanente implica em sua construção e operação. Também são apresentadas algumas características dos metrô, do Trem de Alta Velocidade (TAV) e dos Veículos Leve sobre Trilhos (VLT). Por fim, é realizada uma comparação entre alguns aspectos de projetos de ferrovias e rodovias no que diz respeito principalmente à geometria das vias.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			