

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS – IFG-GO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA ÁREA III
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**ANÁLISE TÉCNICO - OPERACIONAL ENTRE AS
BITOLAS ESTREITA E LARGA NAS FERROVIAS DE
CARGA NO BRASIL**

**Hugo Fernandes Pontes
Rômulo Gonçalves Vieira**

GOIÂNIA

2023



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Hugo Fernandes Pontes

Matrícula: 20161011180398

Título do Trabalho: ANÁLISE TÉCNICO - OPERACIONAL ENTRE AS BITOLAS ESTREITA E LARGA NAS FERROVIAS DE CARGA NO BRASIL

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

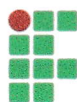
O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia,
Local

15 / 12 / 2023.
Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Rômulo Gonçalves Vieira

Matrícula: 20171011180417

Título do Trabalho: ANÁLISE TÉCNICO - OPERACIONAL ENTRE AS BITOLAS ESTREITA E LARGA NAS FERROVIAS DE CARGA NO BRASIL

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

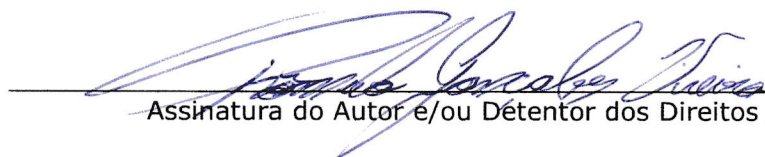
DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia,
Local

15 / 12 / 2023.
Data


Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Hugo Fernandes Pontes
Rômulo Gonçalves Vieira

**ANÁLISE TÉCNICO - OPERACIONAL ENTRE AS
BITOLAS ESTREITA E LARGA NAS FERROVIAS DE
CARGA NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão do Curso Superior de Engenharia de Transportes, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Transportes.

Orientador (a):

Profa. Dra. Maria de Lourdes Magalhães

GOIÂNIA

2023

P777a Pontes, Hugo Fernandes.

Análise técnico – operacional entre as bitolas estreita e larga nas ferrovias de carga no Brasil / Hugo Fernandes Pontes, Rômulo Gonçalves Vieira. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2023.
99 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Maria de Lourdes Magalhães.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia de Transportes, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Ferrovias. 2. Bitolas ferroviárias. 3. Transporte de cargas. I. Vieira, Rômulo Gonçalves. II. Magalhães, Maria de Lourdes (orientadora). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. IV. Título.

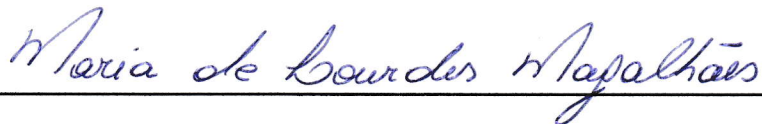
CDD 625.1

HUGO FERNANDES PONTES
RÔMULO GONÇALVES VIEIRA

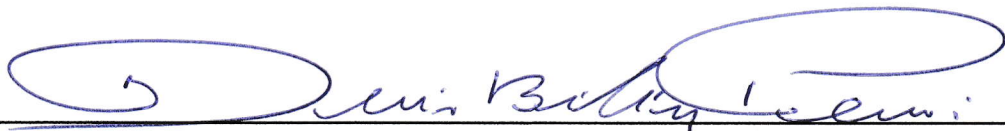
**ANÁLISE TÉCNICO - OPERACIONAL ENTRE AS BITOLAS ESTREITA E LARGA NAS
FERROVIAS DE CARGA NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Goiás como requisito básico para a concessão do Curso de Bacharelado em Engenharia de Transportes.

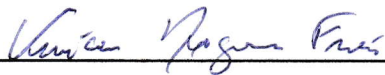
TCC defendido e aprovado pela banca examinadora constituída pelos senhores:



Profa. Dra. Maria de Lourdes Magalhães (Orientadora – IFG/GO)
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Goiás



Prof. Dr. Denis Biolkino de Sousa Pereira (Examinador – IFG/GO)
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Goiás



Prof. Me. Vinicius Nogueira Fróes
(Examinador – Externo/GO)

Aprovado em 04 de dezembro de 2023.

Local: Goiânia/GO

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por nos dar força, e sabedoria, aos nossos familiares e amigos pelo apoio incondicional e ao corpo docente do curso de engenharia de transportes durante a nossa jornada acadêmica.

À nossa orientadora Dra. Maria de Lourdes Magalhães, por aceitar esse desafio. Sua dedicação, conhecimento e iniciativa foram fundamentais para o nosso desenvolvimento acadêmico. Suas orientações claras e precisas, sua disponibilidade para esclarecer as dúvidas e seu constante encorajamento e engajamento foram inestimáveis.

À professora Dra. Luciana Araújo Azevedo, que foi nosso guia nessa jornada do TCC, auxiliando com total disposição, passando orientações do trabalho até mesmo em seu horário livre, sempre disponível para ajudar.

À banca examinadora desse TCC, Me. Vinícius Nogueira Fróes, que aceitou nosso convite para formação da banca como avaliador externo, que se reorganizou em sua agenda de trabalho para avaliar nosso trabalho, além de trazer valiosas contribuições para esse tcc.

Ao Dr. Denis Biolkino de Sousa Pereira, por aceitar o convite, compartilhando seu conhecimento, se dispondo em ajudar, se esforçou e empenhou mesmos em momento que passou por problema de saúde, e mesmo assim analisou, se propôs a participar da banca de qualificação de forma remota, e com toda dedicação forneceu valiosa contribuição para esse trabalho.

A professora Dra. Mariana de Paiva, que prontamente aceitou um convite de última hora para ser membro da banca de qualificação desse TCC, e mesmo o tema desse não sendo da sua área de especialização, aceitou o desafio e trouxe contribuições importantes para esse trabalho.

RESUMO

Desde as primeiras ferrovias construídas no Brasil, a ausência de critérios para a padronização da bitola ferroviária tem prejudicado o desenvolvimento do transporte ferroviário de carga no país. A falta de uniformidade nas bitolas resulta na incompatibilidade dos ativos operacionais e de manutenção, o que reduz a flexibilidade e complica a utilização racional e otimizada das vias. Este estudo realizou uma análise técnica e operacional, considerando os elementos de maior influência no transporte ferroviário e relacionou esses fatores a situações adversas que podem impactar as operações, a manutenção e a capacidade de carregamento das ferrovias brasileiras. Os cálculos de lotação de trens, aplicados às vias de bitola estreita (1,00 m) e larga (1,60 m), consideraram os elementos técnicos e operacionais que podem influenciar no dimensionamento dos trens e, por consequência, na eficiência do transporte ferroviário de cargas. As linhas existentes foram avaliadas sob uma perspectiva de integração, preservando a estabilidade econômica e operacional das ferrovias na escolha da bitola para ser empregada, tornando relativa a análise em função das características geométricas impostas. Para trechos futuros, foi sugerido a ampliação em bitola larga, com a preparação de um terceiro trilho em bitola métrica para integrar os trechos já existentes conforme a demanda emergente. Esse planejamento visa uma maior integração nas operações logísticas, promovendo uma abordagem mais eficiente e sustentável para o transporte ferroviário de cargas.

Palavras chaves: Ferrovias, Bitola, Técnico-Operacional, Cargas e Integração.

ABSTRACT

Since the early railways constructed in Brazil, the absence of criteria for standardizing railway gauge has hindered the development of freight rail transport in the country. The lack of uniformity in gauges results in the incompatibility of operational and maintenance assets, reducing flexibility and complicating the rational and optimized use of tracks. This study conducted a technical and operational analysis, considering the elements with the greatest influence on rail transport and linking these factors to adverse situations that can impact operations, maintenance, and the loading capacity of Brazilian railways. Train loading calculations, applied to narrow gauge (1.00 m) and broad gauge (1.60 m) tracks, took into account the technical and operational elements that can influence train sizing and, consequently, the efficiency of freight rail transport. Existing lines were evaluated from an integration perspective, preserving the economic and operational stability of railways in the choice of gauge to be used, making the analysis relative to the imposed geometric characteristics. For future sections, the expansion in broad gauge was suggested, with the preparation of a third rail in metric gauge to integrate existing sections as per emerging demand. This planning aims at greater integration in logistical operations, promoting a more efficient and sustainable approach to freight rail transport.

Keywords: Railways, Gauge, Technical-Operational, Freight, and Integration

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Medidas de Bitolas Ferroviárias no Mundo	25
Figura 2.2 - Participação das Bitolas na Malha Ferroviária de Cargas Brasileiras 2021.....	26
Figura 2.3 - Sistema Ferroviário Brasileiro	27
Figura 2.4 - Evolução da Malha Ferroviária por Décadas - km (1850 – 2021).....	35
Figura 3.1 - Bitola da Via	37
Figura 3.2 - Seção transversal e seus elementos típicos	39
Figura 3.3 - Trilho Ferroviário.....	40
Figura 3.4 - Principais tipos dormentes em uso	40
Figura 3.5 - Componentes da Via Permanente	41
Figura 4.1 - Sensibilidade às Rampas	45
Figura 4.2 - Perfis de Trilhos Brasileiros	46
Figura 4.3 - Dimensões Dormentes de Madeira.....	49
Figura 4.4 - Dimensões do Lastro	50
Figura 4.5 - Dimensões do Sublastro.....	51
Figura 4.6 - Superelevação Teórica.....	53
Figura 4.7 - Superelevação Prática Máxima	54
Figura 4.8 - Gabarito de Nível em Via Singela de Bitola Estreita e Larga ou Mista em Pontes é Tangentes.....	61
Figura 4.9 - Gabarito de Túnel em Via Singela de Bitola Estreita, Larga ou Mista	62
Figura 4.10 - Representação em Perspectiva da Área de Aterro	63
Figura 4.11 - Representação em Perspectiva da Área de Corte	64
Figura 4.12 - Gabarito Entrevias	65

Figura 4.13 - Designação da Nomenclatura dos Vagões	66
Figura 4.14 - Vagão Gondola - GDT e GDE.....	67
Figura 4.15 - Resistência de Rampa.....	71
Figura 4.16 - Base Rígida da Locomotiva	73
Figura 4.17 - Resistências ao Movimento	74
Figura 4.18 - Resistências ao Movimento - Trecho Plano e em Tangente	75
Figura 4.19 - Resistências ao Movimento - Trecho Plano e em Curva.....	75
Figura 4.20 - Resistências ao Movimento - Trecho em Rampa e em Curva.....	76
Figura 4.21 - Resistências ao Movimento - Trecho em Tangente e Rampa Ascendente	76
Figura 4.22 - Resistências ao Movimento - Trecho em Tangente e Rampa Descendente ...	77
Figura 4.23 - Principais Forças Envolvidas nos Cálculos do Esforço Trator	78
Figura 4.24 - Relação Esforço Trator e Velocidade.....	79
Figura 4.25 - Classificação das Locomotivas Conforme Configuração de Eixo	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Extensão da Malha Ferroviária de Cargas Brasileira (KM)	28
Tabela 3.1 - Limites Geométricos de Bitolas, Distância Máxima e Distância Mínima	37
Tabela 4.1 - Rampas Máximas em Bitolas Larga e Métrica	44
Tabela 4.2 - Sensibilidade às Rampas.....	44
Tabela 4.3 - Comparativo do Consumo dos Principais Elemento de Superestrutura	51
Tabela 4.4 - Coeficiente de Segurança e Conforto	56
Tabela 4.5 - Cálculo de Velocidade em Ferrovias (Km/h)	57
Tabela 4.6 - Relação da Velocidade entre as Bitolas Métricas e Largas	58
Tabela 4.7 - Velocidade média comercial das Empresas Ferroviárias de Cargas 2018	60
Tabela 4.8 - Gabarito de Aterro e Corte conforme a Bitola	63
Tabela 4.9 - Comparativo das Áreas de Aterro e Corte para a Bitola Larga e Métrica	64
Tabela 4.10 - Classe de Capacidade do Eixo e Peso Bruto Total	67
Tabela 4.11 - Relação Lotação / Peso Total - Bitola de 1,60m.....	68
Tabela 4.12 - Relação Lotação / Peso Total - Bitola de 1,00m.....	68
Tabela 4.13 - Coeficientes Típicos de Aderência f	80
Tabela 4.14 - Dados Técnicos da Locomotiva e do Vagão Considerado	83
Tabela 4.15 - Resultado da Lotação 1º Simulação.....	84
Tabela 4.16 - Resultado da Lotação 2º Simulação.....	85
Tabela 4.17 - Resultado da Lotação 3º Simulação.....	86
Tabela 4.18 - Resultado da Lotação 4º Simulação.....	87
Tabela 4.19 - Resultado da Lotação 5º Simulação.....	88

Tabela 4.20 - Lotação Total do Trem Aproveitamento Útil 89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALL	América Latina Logística S.A.
AMV	Aparelho de Mudança de Via
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CADE	Conselho Administrativo de Defesa Econômica
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
DNEF	Departamento Nacional de Estradas de Ferro
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
FCA	Ferrovias Centro-Atlântica
FEPASA	Ferrovias Paulista S.A.
FERROBAN	Ferrovias Bandeirantes S.A.
FERROESTE	Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A.
FERRONORTE	Ferrovias Norte Brasil S.A.
FICO	Ferrovias de Integração Centro-Oeste
FIOL	Ferrovias de Integração Oeste-Leste
FNS	Ferrovias Norte-Sul
FTC	Ferrovias Tereza Cristina

FTL	Ferrovia Transnordestina Logística S.A.
GDE	Vagão Gôndola Dump Manga "E"
GDT	Vagão Gôndola Dump Manga "T"
GO	Goiás
IFE	Inspetoria Federal de Estradas
MA	Maranhão
MMX	MMX Mineração e Metálicos S.A.
MRS	Mineradora Rio Sul Logística S.A.
NBR	Norma Técnica Brasileira
OAE	Obras de Arte Especiais
PN	Passagem em Nível
PNT	Programa Nacional de Desestatização
RFFSA	Rede Ferroviária Federal S.A.
RJ	Rio de Janeiro
RS	Rio Grande do Sul
RUMO	Rumo Logística S.A.
S.I.	Sistema Internacional de Unidades
SC	Santa Catarina
SE	Sergipe
SP	São Paulo
TKU	Toneladas Quilômetro Útil
TU	Toneladas Úteis

VALEC	Valec Engenharia, Construções e Ferrovias S.A.
VLI	Valor da Logística Integrada
VMA	Velocidade Máxima Autorizada

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	18
1.1. OBJETIVOS	20
1.1.1. Objetivo Geral.....	20
1.1.2. Objetivos Específicos	20
1.2. JUSTIFICATIVA.....	21
1.3. METODOLOGIA.....	22
 CAPÍTULO 2 - AS BITOLAS FERROVIÁRIAS	23
2.1. A ORIGEM DA BITOLA E SUAS PRINCIPAIS MEDIDAS	23
2.2. CARACTERIZAÇÃO DA MALHA FERROVIÁRIA DE CARGAS BRASILEIRA	26
2.2.1. Rumo Logística S.A.	29
2.2.2. Estrada de Ferro Carajás – EFC.....	29
2.2.3. Estrada de Ferro Paraná Oeste – S.A. / FERROESTE	29
2.2.4. Estrada de Ferro Vitória a Minas – EFVM.....	30
2.2.5. Ferrovia Centro-Atlântica S.A / VLI Logística	30
2.2.6. Ferrovia Tereza Cristina S.A – FTC	31
2.2.7. MRS Logística S.A.....	31
2.2.8. Ferrovia Transnordestina Logística – FTL	32
2.2.9. Ferrovia Norte-Sul – FNS.....	32
2.2.10. Estrada de Ferro do Amapá	33
2.2.11. Infra S.A.	33
2.3. QUADRO GERAL DO SISTEMA FERROVIÁRIO BRASILEIRO.....	34
 CAPÍTULO 3 - DEFINIÇÃO DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE ANÁLISE TÉCNICA E OPERACIONAL DAS FERROVIAS	36
3.1. BITOLA.....	36
3.2. RAIOS MÍNIMOS DE CURVA	38
3.3. RAMPAS MÁXIMAS	38
3.4. SEÇÃO TRANSVERSAL DA VIA	38
3.5. CAPACIDADE DE CARGA.....	41
3.6. SUPERELEVÇÃO	41
3.7. VELOCIDADE	42
3.8. GABARITO DA VIA	42

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS ENTRE AS BITOLAS FERROVIÁRIAS	43
4.1. ELEMENTOS TÉCNICOS	43
4.1.1. Raios Mínimos de Curva.....	43
4.1.2. Rampas Máximas	44
4.1.3. Seção Transversal da Via	45
4.2. ELEMENTOS OPERACIONAIS	52
4.2.1. Superelevação e Velocidade	52
4.2.2. Gabarito da Via.....	60
4.2.3. Capacidade de Carga.....	65
4.3. APLICAÇÃO DOS ELEMENTOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS AO CÁLCULO DA LOTAÇÃO DOS TRENS.....	68
4.3.1. Resistências ao Movimento	70
4.3.2. Esforço Trator.....	77
4.3.3. Roteiro de Cálculo do Número de Vagões Tractionados por uma Locomotiva	81
 CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO	 91
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 94

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial marcou o surgimento do transporte ferroviário global, transformando essa modalidade em um importante sistema de movimentação de cargas e pessoas em diversos países, contribuindo como importante ferramenta de desenvolvimento econômico e de eficiência energética na área dos transportes ao longo da história dessas nações.

A referida modalidade de transportes surgiu no Brasil no ano de 1854, através da inauguração da primeira ferrovia brasileira por Dom Pedro II (Estrada de Ferro Mauá), com 14,5 quilômetros de extensão que utilizava bitola de 1,680 metros. Na época esta via foi beneficiada pela promulgação da Lei n.º 641 de 26 de julho de 1852, ato do Governo Imperial que concedia isenções aos investidores que possuíam interesse em construir e explorar as estradas de ferro em qualquer parte do país.

A expansão da malha ferroviária continuou impulsionada pelos incentivos do Império. Até meados de 1876, o país já possuía dez ferrovias em operação, nas quais operavam com bitolas que variavam de 1,400m até 1,680m, iniciando assim, as discussões acerca das diferenças de bitolas na malha ferroviária brasileira.

No final do século XIX, ainda no período Imperial, as concessões continuaram por todo o país, sendo todas elas outorgadas para serem operadas em bitola de 1,000m, onde se destacavam as ferrovias das regiões Sul e Sudeste, com exceção da Estrada de Ferro Oeste de Minas, trecho São João Del Rey até Antônio Carlos, construída em bitola de 0,760 metros.

O Estado de São Paulo foi o maior beneficiado por ferrovias implantadas no final do século XIX até a década de 30 no século XX, esse fato se deve à produção cafeeira da região naquele período que era escoada até o Porto de Santos, totalizando 18 ferrovias no ano de 1930. Deve-se considerar que a metade dessa malha tinha extensão menor do que 100 quilômetros, condição que atendia a demanda de transporte da localidade, porém operando com bitolas distintas e com poucas conexões.

No início da década de 30, o sistema ferroviário nacional passou pela primeira grande organização administrativa realizada pelo Governo de Getúlio Vargas, sendo a maioria da gestão da malha ferroviária transferida para a União, ficando o controle a cargo da Inspeção Federal de Estradas (IFE). Tal controle foi posteriormente repassado ao Departamento

Nacional de Estradas de Ferro (DNEF) instituído pelo Decreto-Lei n.º 3155 de 28 de março de 1941.

Somente na década de 1950 as políticas governamentais republicanas iniciaram um movimento no sentido de organizar as ferrovias em um sistema ferroviário integrado, criando a Rede Ferroviária Federal S.A (RFFSA), pela Lei n.º 3115 de 26 de março de 1957. Foram agrupadas 18 ferrovias, somando aproximadamente 37 mil quilômetros de malha ferroviária.

Consoante as medidas administrativas da União, o Governo do Estado de São Paulo unificou as cinco ferrovias paulistas sob seu controle, criando através da lei estadual 10.410/SP de novembro de 1971 a FEPASA (Ferrovias Paulista S.A.), que integrava as malhas ferroviárias da Companhia Paulista de Estradas de Ferro, da Estrada de Ferro Sorocabana, da Estrada de Ferro Araraquara, da Companhia Mogiana de Estrada de Ferro e da Estrada de Ferro São Paulo – Minas.

Nesse período, o modo rodoviário vinha se desenvolvendo desde o início do século XX, quando o governo de Washington Luís intensificou o transporte rodoviário diante do aquecimento econômico, sobretudo do mercado automobilístico, além da construção de diversas autoestradas pelo país, substituindo assim, em partes, as ferrovias e hidrovias. Essa estratégia teve como objetivos integrar o território brasileiro e também industrializar o país com base na formação de polos automobilísticos. A consolidação do transporte rodoviário ocorreu com a intensificação da indústria automobilística ocorrida nesse período.

Entre 1980 e 1992, o sistema ferroviário brasileiro permaneceu praticamente inalterado, sem expansão e investimentos, fato que causou desequilíbrios técnico-operacionais nas linhas existentes, devido à degradação da infraestrutura e superestrutura e ao adiamento de manutenções em materiais rodantes, causando uma expressiva perda de espaço para o setor rodoviário.

Para mudar a situação e gerar os recursos necessários, o Governo Federal colocou em prática ações voltadas às concessões pela qual foi editada a Lei n.º 8.031/90 e suas alterações posteriores, que instituiu o Programa Nacional de Desestatização – PND, sendo a RFFSA incluída por meio do Decreto n.º 473 de 10/03/92. Neste processo, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES, nos termos do Decreto n.º 1.024/94, elaborou a forma e as condições gerais para concessão das malhas da RFFSA, pela qual, baseado na Lei n.º 8987/95 (Lei das concessões), o Governo Federal iniciou a desestatização da malha ferroviária brasileira, modelo que permanece até os dias atuais.

Assim, mesmo com as oscilações do setor ferroviário, ele se mostrou importante no processo de formação da economia contemporânea do Brasil, recebendo papel relevante por representar um dos modos de transporte mais adequado para vencer grandes distâncias, transportando maiores volumes de cargas. Porém, à medida que as ferrovias foram surgindo, não houve a preocupação de padronizar as bitolas, o que resultou na formação de um sistema ferroviário fragmentado, desconectado e segmentado, onde o próprio modo de transporte não sustenta a sua vocação, devido à descontinuidade da malha ferroviária no território brasileiro.

Partindo dessa contextualização, esse trabalho identifica como problemática a forma pela qual as ferrovias foram surgindo sem critérios que promovessem a integração ferroviária. Desta forma, levanta-se a questão de quais os parâmetros técnicos e operacionais, na área do transporte ferroviário, podem servir como alternativa para a conexão da malha existente no país, assim como os novos trechos a serem implantados.

Com base neste questionamento, esse estudo busca subsídios para contribuir com o planejamento do transporte, analisando as bitolas, métrica e larga, a fim de identificar aquela que acarretará maiores vantagens a partir da análise técnica-operacional.

Considerando que a bitola métrica é predominante e a bitola larga é que está sendo utilizada na expansão da malha ferroviária no território nacional, a análise, apontará as vantagens e desvantagens operacionais de cada bitola para viabilizar uma possível integração, seja através da bitola com maior representatividade no país ou o investimento em um afastamento maior entre trilhos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Realizar uma análise técnico - operacional entre as bitolas métrica e larga do sistema ferroviário de cargas do Brasil, a fim de analisar a viabilidade da integração da malha.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Abordar o histórico da formação da malha ferroviária brasileira e suas respectivas bitolas.

- Levantar os elementos determinantes na análise de desempenho técnico-operacional das ferrovias de cargas brasileiras.
- Estabelecer comparativos entre as bitolas ferroviárias em estudo, abordando as vantagens e desvantagens competitivas relacionadas a escolha do afastamento entre os trilhos.
- Apresentar os resultados obtidos na análise entre as duas principais bitolas da malha ferroviária existente no país, conforme critérios técnicos, operacionais e de planejamento do transporte ferroviário, para fins de integração das ferrovias de carga do sistema atual.

1.2. JUSTIFICATIVA

A diversidade de bitolas prejudicou o desenvolvimento do transporte ferroviário no Brasil desde a inauguração da primeira ferrovia. Foram poucos os casos em que ferrovias diferentes verdadeiramente promoveram uma integração com a mesma bitola, e nunca houve uma política governamental, do Império à República, que deu a atenção que esse assunto merecesse. (FILOMENO, 2008).

As variações de bitolas tendem a aumentar os custos do transporte ferroviário, pela necessidade de transbordo, aumentando o tempo de trânsito e comprometendo a eficiência energética dos comboios ferroviários.

Na prática das operações ferroviárias, os desempenhos operacionais no transporte de cargas em redes de bitola métrica ou larga não são significativamente diferentes, mas os custos gerados com as quebras de bitola são substancialmente elevados. Essas quebras de bitolas impedem a utilização do mesmo material rodante em operação e inviabilizam a padronização dos equipamentos de manutenção, favorecendo a perda de flexibilidade operacional por mudanças de bitola e dificultando a utilização da via de forma racional e otimizada.

A temática torna-se ainda mais relevante uma vez que o *direito de passagem* e o *tráfego mútuo* se caracterizam como obrigação dos concessionários de ferrovias, prevista nos respectivos contratos, de permitir o uso por outros concessionários dos recursos operacionais da ferrovia sob a responsabilidade do visitado, para que o visitante complete prestação de serviço iniciada na sua malha. No que se refere ao setor ferroviário, esta maximização da eficiência visa, ao mesmo tempo, permitir que o transporte se desenvolva por distâncias que

o tornem competitivo e viabilizar a chegada da carga passando por trecho de diferentes concessionários chegando ao seu destino.

Considerando o transporte ferroviário como modo economicamente mais favorável e seguro para o transporte de cargas em longas distâncias, um estudo de viabilidade de unificação das bitolas pode subsidiar ações do poder público que visem a promoção de ganhos operacionais e de competitividade que corrobore com o crescimento do setor ferroviário do país.

1.3. METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa proposta para a realização do trabalho é de natureza qualitativa e de caráter exploratório, baseada em técnicas de documentação direta e indireta como:

1. Coleta de Dados

- Pesquisa em anuários e periódicos das instituições ligadas ao setor ferroviário, das concessionárias e órgãos governamentais de planejamento, controle e fiscalização.
- Pesquisa bibliográfica e registros documentais para conteúdos textuais e informações sobre as ferrovias de cargas em operação.
- Levantamento dos dados sobre a infraestrutura ferroviária, de concessões, extensões, bitolas e velocidades comerciais.
- Informações sobre o tipo de vagão e locomotiva em uso nas duas bitolas, para fins de simulações e comparativos técnico - operacionais.

2. Análise Técnica e Operacional

- Análise das diferenças técnicas entre as bitolas métrica e larga, explorando elementos como a geometria da via e do material rodante.
- Abordagem dos fatores limitadores operacionais entre as bitolas métrica e larga.

Para a realização do trabalho serão consideradas escalas de análise espacial e temporal, uma vez que a pesquisa será limitada ao transporte ferroviário de cargas no espaço geográfico brasileiro, considerando a malha ferroviária em operação formada desde o período imperial até os dias atuais.

CAPÍTULO 2 - AS BITOLAS FERROVIÁRIAS

Nesse capítulo é abordado a origem das bitolas ferroviárias, trazendo as principais medidas utilizadas, e logo em seguida é apresentado as caracterizações do atual sistema ferroviário de cargas do país.

2.1. A ORIGEM DA BITOLA E SUAS PRINCIPAIS MEDIDAS

A primeira ferrovia do mundo foi projetada entre as cidades de Stockton e Darlington, na Inglaterra, e inaugurada em 1825. Foi usada para conectar minas de carvão e transportar passageiros, com bitola de 1.435 metros. Essa medida é conhecida atualmente como a bitola padrão internacional ou bitola standard.

George Stephenson, o inventor de locomotivas e construtor da primeira estrada de ferro, foi também o primeiro a identificar a necessidade de padronizar a bitola das ferrovias em um país. Assim, a bitola standard (1,435 m) foi adotada na maioria das ferrovias pioneiras por ele construídas. Desde o início, essa bitola foi amplamente contestada, uma vez que sua origem foi empírica, baseada na dimensão dos eixos das sindicâncias hipotracionadas existentes na época, ou seja, na largura das carroças puxadas por uma parelha de cavalos, o que leva a acreditar que não houve nenhum estudo de engenharia para justificar a determinação da bitola. (BRASIL FERROVIÁRIO, 2010).

Somente no ano de 1835, estudos previram que a variação das medidas de bitolas poderia permitir velocidades máximas diferentes em um mesmo traçado e assim, propuseram uma nova bitola com a medida de 2,134 metros, denominada *bitola extralarga*. (SANTOS, 2007).

Ainda segundo Santos (2007), essa nova bitola permitiria mais estabilidade para circulação das locomotivas e vagões, teria uma maior superfície, possibilitando mais potência e maiores velocidades. Entretanto, no ano de 1841, George Stephenson manteve a bitola de 1,435 metros e aumentou a potência das locomotivas com o alongamento das caldeiras, definindo assim a forma tradicional das locomotivas a vapor.

No século XIX, após as invasões francesas da Península Ibérica, foi decidido pela Espanha, em 1844, por razões defensivas, construir uma rede ferroviária com linhas de bitola diferente da bitola francesa, de forma que os comboios não

pudessem circular entre ambos os países. A distância entre carris na Espanha passou a ser de 1,668 m e do restante da Europa de 1,435m. Portugal, por arrasto, teve que adotar a *bitola espanhola*, hoje denominada *bitola ibérica*. (RODRIGUES, 2001).

Em 1845, na Inglaterra, uma comissão real foi encarregada de definir a largura das linhas ferroviárias e os ensaios realizados em diferentes bitolas estabeleceram a superioridade técnica das bitolas maiores. No entanto, a bitola de 1,435 já era a mais utilizada e, por isso, a comissão real proibiu a construção de ferrovias utilizando outro tipo de bitola, com exceção da Irlanda onde a norma era construir com a bitola larga de 1,600m, conhecida até os dias atuais como *bitola irlandesa*. Essa medida adotada pela comissão real teve o objetivo de evitar os transbordos desnecessários de passageiros e de cargas.

Em 1907, a Conferência Internacional de Berna (Suíça), consagrou a bitola de 1,435m, como “Bitola Internacional”, sendo essa a distância entre trilhos utilizada atualmente pela grande maioria dos países. (BRASIL FERROVIÁRIO, 2010).

Contrapondo os estudos do século XIX, por critérios econômicos surgem no século XX as vias estreitas, com bitola medindo 1,000m (bitola métrica). Essa economicidade era proporcionada pela plataforma com menor largura, o que permitia raios de curvas menores e, portanto, melhor adaptação à topografia do terreno. Essa característica contribuiu para a construção de diversas estradas com bitolas menores do que um metro, sendo principalmente utilizadas em regiões montanhosas.

A linha com bitola de 0,60m, idealizada pelo engenheiro francês Paul Decauville, que deu seu nome a esse tipo de via, foi utilizada no mundo inteiro na agricultura, na indústria e até mesmo para fins militares. No Brasil, a Decauville foi amplamente utilizada na plantação de bananas ao longo do litoral e ainda é empregada atualmente em rotas turísticas do transporte ferroviário, assim como a bitola de 0,76 m, denominada de bitola imperial. (SANTOS, 2007).

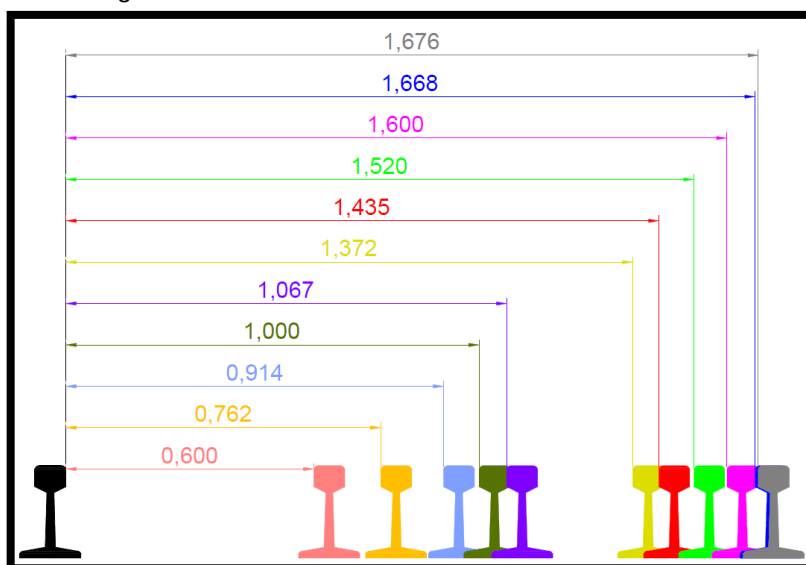
De acordo com Cury (2011), as bitolas com medidas acima da bitola padrão internacional de 1,435m podem ser consideradas bitolas largas (*broad gauge*), e as bitolas com medidas abaixo da bitola standard são chamadas de bitolas estreitas (*narrow gauge*).

No mundo, existem diversas medidas de bitolas em uso, fruto de opções tecnológicas de cada país. A construção de ferrovias com diferentes bitolas foi uma política muito comum em vários lugares, especialmente na Europa, por motivos estratégicos de segurança nacional. Devido à quebra de bitolas, países como a Argentina (bitolas métrica, standard e larga de

1,676m), Índia (bitolas métrica e larga de 1,676m), Espanha (métrica, standard e ibérica) e Suíça (bitola métrica e standard) apresentam sérias dificuldades de intercâmbio ferroviário. (CURY, 2011).

A Figura 2.1 apresenta as principais medidas de bitolas utilizadas nas ferrovias em todo o globo.

Figura 2.1 - Medidas de Bitolas Ferroviárias no Mundo

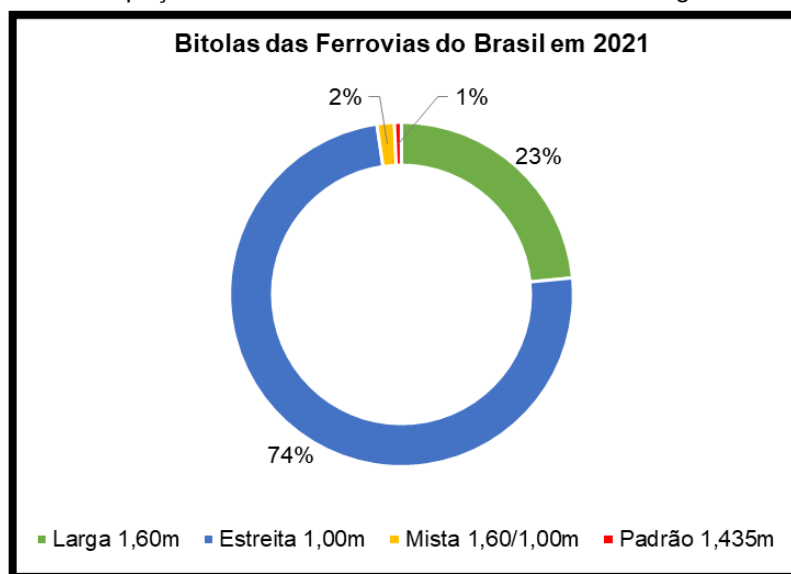


Fonte: (TAMAGUSKO, 2013)

A malha ferroviária brasileira possui quatro tipos diferentes de bitola em operação no transporte de carga: a bitola estreita métrica (1,00m); a bitola larga irlandesa (1,60m); a bitola padrão internacional ou standard (1,435m) e a bitola mista, que compartilha na mesma infraestrutura, as bitolas métrica e larga.

A figura 2.2 ilustra os percentuais de participação das bitolas na malha ferroviária do Brasil.

Figura 2.2 - Participação das Bitolas na Malha Ferroviária de Cargas Brasileiras 2021



Fonte: Adaptada de Santos (2021)¹

A figura 2.2 mostra que a bitola predominante da malha ferroviária brasileira é a bitola estreita (1,00m) que corresponde a 74% da extensão total do sistema ferroviário de cargas.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DA MALHA FERROVIÁRIA DE CARGAS BRASILEIRA

Segundo o levantamento da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT e de Santos (2021), o sistema ferroviário brasileiro possui aproximadamente 31 mil km de extensão, distribuídos entre 16 malhas ferroviárias, onde a Ferrovia Norte-Sul é analisada como duas malhas distintas: o tramo norte e o tramo central. Destas 16 malhas existentes, 12 estão sendo operados por concessões ou outorgas, as demais são administradas por empresas estatais. Entre as malhas existentes, dez compõem os principais trechos do sistema ferroviário nacional, uma vez que o tramo sul da Ferrovia Norte-Sul não está efetivamente em operação e as ferrovias Trombetas e Jari são linhas industriais isoladas. As 10 malhas ferroviárias de cargas juntas respondem por 31.108,3 km de linhas férreas e atendem às Regiões Sul, Sudeste, Nordeste e, em menor proporção, Centro-Oeste e Norte do País.

¹ A figura foi elaborada pelos autores através da tabulação de Santos (2021), que é baseada em pesquisas próprias e da ANTT. As Estradas de Ferro Trombetas, Jari e Campos do Jordão, foram excluídas, pois são estradas destinadas somente ao transporte industrial e de turismo.

Os dados do sistema ferroviário brasileiro, mostrado na Figura 2.3, permitem caracterizar as malhas do setor no período pós-concessão, marcado pelo incremento dos investimentos, pelo aumento da produção e pela redução dos índices de acidentes. (CNT, 2015). Esta figura apresenta a malha ferroviária brasileira indicando os trechos operados pelas correspondentes concessionárias.

Figura 2.3 - Sistema Ferroviário Brasileiro



Fonte: (CNT, 2015)²

² As ferrovias América Latina Logística (ALL) atualmente estão sendo operadas pela RUMO Logística.

Na tabela 2.1 a malha ferroviária é classificada relacionando as concessionárias e a bitola da linha férrea com suas respectivas extensões.

Tabela 2.1 - Extensão da Malha Ferroviária de Cargas Brasileira (KM)

EXTENSÃO DA MALHA FERROVIÁRIA DE CARGAS BRASILEIRA (KM)						
FERROVIAS ATUAIS	CONCESSÕES DE ORIGEM	BITOLAS				Total - Km
		Larga 1,60m	Estreita 1,00m	Mista 1,60/1,00 m	Padrão 1,435m	
RUMO	América Latina Logística Malha Norte S.A. – ALLMN	735,3				735,3
	América Latina Logística Malha Oeste S.A. – ALLMO		1973,1			1973,1
	América Latina Logística Malha Paulista S.A. – ALLMP	1463	373,2	283		2119,2
	América Latina Logística Malha Sul S.A. – ALLMS		7293	11		7304
	-	996,7				996,7
Estrada de Ferro Carajás - EFC	-		248,1			248,1
Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A. - FERROESTE	-		894,2			894,2
Estrada de Ferro Vitória a Minas – EFVM	-					
VLI	Ferrovias Centro-Atlântica S.A. – FCA		7856,8	156		8012,8
Ferrovias Tereza Cristina S.A. - FTC	-		164			164
MRS Logística S.A. - MRS	-	1821,3		42		1863,3
Ferrovias Transnordestina Logística - FTL)	-		4295,1	18		4313,1
(Atualmente operada pela RUMO)	Ferrovias Norte-Sul – Tramo Norte – FNS	2281,5				2281,5
Estrada de Ferro do Amapá	-				203	203
Total - Km		7297,8	23097,5	510	203	31108,3
Total - %		23,46%	74,25%	1,64%	0,65%	100,00%

Fonte: Adaptada de Santos (2021)³

Pode-se observar na tabela 1, que a bitola cuja extensão é a mais expressiva tem como distância entre eixos a bitola estreita (1,00m), seguida pela larga (1,60m) e mista. A bitola standard (1,435m) é a que possui menor representatividade perante a malha em operação.

³ A tabela foi elaborada pelos autores através da tabulação de Santos (2021), que é baseada em pesquisas próprias e da ANTT. As Estradas de Ferro Trombetas, Jari e Campos do Jordão, foram excluídas, pois são estradas destinadas somente ao transporte industrial e de turismo.

A seguir é apresentado um breve histórico das empresas que operam no sistema ferroviário de cargas brasileiro.

2.2.1. Rumo Logística S.A.

A Rumo Logística S.A. opera no país atendendo às regiões sul, sudeste e centro-oeste, permitindo o acesso ao Paraguai, à Argentina e à Bolívia. A primeira concessão era pertencente à Ferrovia Sul Atlântico (1996), com o leilão da Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA). As demais malhas incorporadas passaram a ser controladas pela América Latina Logística S.A. (ALL) a partir de 2006, quando, por meio da resolução nº 1.471, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) autorizou a aquisição do controle acionário indireto das concessionárias “Ferrovia Bandeirantes S.A. (Ferroban), Ferrovia Norte Brasil S.A. (Feronorte) e Ferrovia Novoeste S.A”, antes administradas pela Brasil Ferrovias S.A. Em 2015, por meio de processo autorizado pela ANTT e pelo Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE), a ALL foi incorporada à Rumo Logística Operadora Multimodal S.A. (CNT, 2015).

2.2.2. Estrada de Ferro Carajás – EFC

A EFC possui uma extensão de 996,7 km em bitola larga irlandesa e atende aos estados do Pará e Maranhão. Possui conexão com o Porto de Itaqui (MA), juntamente com o terminal marítimo de Ponta da Madeira (MA), anexo ao Porto de Itaqui, e com a malha ferroviária da FTL em São Luís, no Maranhão e da Ferrovia Norte-Sul (FNS) em Açailândia, também no Maranhão. Possui 254 locomotivas e 15.670 vagões em operação na EFC. (CNT, 2015) e (SANTOS, 2021).

Atualmente, estão sendo realizadas obras para duplicação de parte da malha ferroviária da EFC, visando atender à crescente demanda por transporte de minério de ferro.

2.2.3. Estrada de Ferro Paraná Oeste – S.A. / FERROESTE

A Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A., ou FERROESTE, é uma empresa ferroviária estatal brasileira, que tem como principal acionista o estado do Paraná. Sua linha férrea liga os municípios de Cascavel a Guarapuava, onde se une à malha ferroviária da ALL (atualmente RUMO), por meio da qual faz a conexão ao porto de Paranaguá no estado do Paraná.

Os atuais 248,1 km da FERROESTE são construídos em bitola métrica, com raio de curva mínimo de 312m, mantendo as rampas máximas compensadas de 1,5% sentida exportação e 1,8% sentida importação. A superestrutura da via é dotada de trilhos com perfil TR-45 soldados em barras de 270 a 324m, dormentes monoblocos de concreto e dormentes de madeira nos pátios, fixações elásticas e carga máxima de 20 toneladas por eixo. (BRASIL FERROVIÁRIO, 2020).

2.2.4. Estrada de Ferro Vitória a Minas – EFVM

A EFVM possui 894,2 km de extensão em bitola estreita de 1.000m. A maioria dessa extensão é em linha dupla. Atende aos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Possui integração com a malha da MRS, com a qual se conecta em Ouro Branco (MG) e com a FCA, com pontos de intercâmbio em Cariacica (ES), Ouro Preto (MG), Santa Luzia (MG) e Sabará (MG) e tem acesso, ainda, aos portos do estado do Espírito Santo: Tubarão, Barra do Riacho e Vitória, sendo o terminal portuário de Tubarão o principal destino das cargas transportadas pela ferrovia.

Em 2014, a EFVM possuía, em operação, uma frota composta de 315 locomotivas e 19.285 vagões, transportando 126,2 milhões de TU (toneladas úteis) e apresentando uma produção de 72,7 bilhões de TKU (toneladas por quilômetro útil). Os principais produtos transportados pela EFVM são minério de ferro, carvão mineral, produtos siderúrgicos (bobina) e coque. (CNT, 2015).

A EFVM também realiza transporte de passageiros, entre os municípios de Belo Horizonte (MG) e Cariacica (ES). Anualmente, são transportados cerca de 1 milhão de passageiros nesse trecho ferroviário.

2.2.5. Ferrovia Centro-Atlântica S.A / VLI Logística

A malha centro-leste da RFFSA foi concedida em junho de 1996 à Ferrovia Centro-Atlântica S.A (FCA), que iniciou as operações ferroviárias em setembro também de 1996. Em 2003, a Vale S.A assumiu a operação da FCA. Atualmente, a empresa é controlada pela Valor da Logística Integrada S.A (VLI). A malha da ferrovia possui 8.012,8 km de extensão, sendo 7.856,8 km de bitola métrica e o restante em bitola mista (métrica e irlandesa). Em 2014, a ferrovia possuía 637 locomotivas e 15.226 vagões em operação na malha. (CNT, 2015).

Juntamente com a Ferrovia Transnordestina Logística S.A (FTL), a FCA possui uma das maiores abrangências, em termos de estados diretamente atendidos pela ferrovia. A malha corta os estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Goiás, Bahia, Sergipe e o Distrito Federal, isto é, interliga três regiões do país: a sudeste, a centro-oeste e a nordeste. Tem pontos de conexão com a EFVM, MRS, RUMO e FTL.

A ferrovia possui ligação direta com os portos de Angra dos Reis (RJ), Rio de Janeiro (RJ), Vitória (ES), Aratu (BA) e Aracaju (SE), bem como indiretamente com o Porto de Santos, por meio do intercâmbio com a malha da Rumo.

2.2.6. Ferrovia Tereza Cristina S.A – FTC

Parte da malha ferroviária da extinta RFFSA, foi outorgada à Ferrovia Teresa Cristina S.A (FTC) em novembro de 1996 e a operação ferroviária foi iniciada em fevereiro do ano seguinte. A FTC está totalmente inserida no estado de Santa Catarina com 164 km de extensão em bitola métrica, 13 locomotivas e 400 vagões, interliga a região carbonífera do estado, a usina termelétrica Jorge Lacerda e o Porto de Imbituba. (CNT, 2015) e (SANTOS, 2021).

A FTC transporta acima de 3 milhões de toneladas úteis (TU) e apresenta uma produção ferroviária próxima de 0,3 bilhão de toneladas quilômetro útil (TKU) anualmente. Na FTC é transportado, majoritariamente, carvão mineral e em menor medida, industrializados em contêineres.

2.2.7. MRS Logística S.A

A malha sudeste da RFFSA foi concedida à MRS em setembro de 1996 e a operação foi iniciada em dezembro daquele ano. A ferrovia possui 1863,3 km de extensão, sendo 1.821,3 km em bitola larga irlandesa e o restante em bitola mista (métrica e irlandesa). Em 2014, operavam, na malha da MRS, 782 locomotivas e 19.482 vagões. (CNT, 2015) e (SANTOS, 2021).

A ferrovia está localizada na região sudeste do país e interliga São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Possui conexão com os portos de Santos (SP), Itaguaí (RJ) e Rio de Janeiro (RJ), possibilitando o escoamento da produção proveniente das principais siderúrgicas do país e do minério de ferro da região mineira do quadrilátero ferrífero, na porção centro-sul do estado. Está interligada, também, com a FCA, a EFVM e a RUMO. A MRS foi,

entre as ferrovias concedidas, a que apresentou maior volume transportado em 2014: 138,8 milhões de TU. Em termos de produção ferroviária, foram produzidos 64,4 bilhões de TKU no ano. Minério de ferro, açúcar, cimento a granel e produtos siderúrgicos são as principais mercadorias transportadas na ferrovia.

2.2.8. Ferrovia Transnordestina Logística – FTL

A malha nordeste da RFFSA foi concedida à antiga Companhia Ferroviária do Nordeste S.A (CFN) em julho de 1997, iniciando as operações de transporte ferroviário em janeiro de 1998. Em 2008, o nome social da companhia passou a ser Transnordestina Logística S.A (TLSA) e em 2013, com a cisão de seus ativos, teve origem a Ferrovia Transnordestina Logística (FTL), responsável pela operação da malha proveniente da RFFSA.

Tendo como foco o agronegócio e a indústria mineral, notadamente soja, farelo, milho e algodão, minério de ferro e gipsita.

A malha da FTL conta com 4.313,1 km de extensão, sendo 4.295,1 km em bitola métrica e o restante em bitola mista (métrica e irlandesa). Possui 91 locomotivas e 1.815 vagões em operação e interliga o Porto de Itaqui, no Maranhão, onde possui conexão com a EFC, aos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas. Conecta-se à FCA, no município de Propriá (SE), permitindo o acesso à Bahia e à região sudeste do país. A FTL interliga os principais portos da região nordeste do país. (CNT, 2015) e (SANTOS, 2021).

Em 2014, a FTL movimentou 1,2 milhão de TU e 0,6 bilhão de TKU, sendo que as principais mercadorias transportadas pela ferrovia foram óleos diesel, cimento, gasolina, produtos siderúrgicos (bobina) e minério de ferro. Ressalta-se que grande parte desses produtos é destinada ao abastecimento interno da região nordeste do país.

2.2.9. Ferrovia Norte-Sul – FNS

A construção e a operação da FNS foram concedidas à Valec em janeiro de 1987, que, em 2007, conforme já ressaltado anteriormente, subconcedeu a operação do trecho norte à Vale (como Ferrovia Norte-Sul S.A.). Atualmente, o trecho é operado pela Rumo Logística S.A.

A FNS foi projetada em bitola larga para promover a integração nacional e conectar as importantes malhas ferroviárias ainda em execução, como a Ferrovia de Integração Oeste-

Leste (FIOL) e a Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO), visando um eixo estruturante do transporte ferroviário do país.

Sua construção foi iniciada em 1980, com o objetivo inicial de interligar Açailândia (MA) e Anápolis (GO). Posteriormente, foram incorporados a esse traçado os trechos de Barcarena (PA) a Açailândia, de Ouro Verde de Goiás (GO) a Panorama (SP), de Panorama a Chapecó (SC) e de Chapecó a Rio Grande (RS).

Atualmente, apenas os tramos norte e central estão concluídos. Atendem os estados do Maranhão, Tocantins e Goiás, interligando Açailândia a Anápolis. A ferrovia possui conexão com a EFC em Açailândia e uma possível conexão com a FCA em Anápolis, pois a malha nesse trecho possui preparação para o terceiro trilho para interligar as duas concessionárias.

A FNS (tramo norte) movimentou 4,4 milhões de TU e respondeu por uma produção de 3,5 bilhões de TKU em 2014, quando estava concedida à Vale. Ainda nesse ano, a FNS possuía 36 locomotivas e 936 vagões operacionais e as principais mercadorias transportadas na ferrovia foram: soja, milho, celulose, óleo diesel e minério de ferro. (CNT, 2015).

2.2.10. Estrada de Ferro do Amapá

A estrada possui extensão de 203 km em bitola standard (padrão) e corta os municípios de Santana, Macapá, Porto Grande, Pedra Branca e Serra do Navio. Atualmente, os trens desta ferrovia estão sob a responsabilidade do Governo do Amapá, que está em busca de interessados em arrendar a ferrovia. Depois da MMX, já passaram pelo controle da EFA a inglesa Anglo American e a indiana Zamin Ferrous. (DIÁRIO DO AMAPÁ, 2017) e (SANTOS, 2021).

2.2.11. Infra S.A.

No ano de 2022, foi criado a Infra S.A., uma empresa pública que nasceu da junção da Valec Engenharia, Construções e Ferrovias S.A. com a Empresa de Planejamento e Logística (EPL) sendo responsável pelas obras ferroviárias, planejamento e estruturação de projetos para o setor de infraestrutura de transporte.

2.3. QUADRO GERAL DO SISTEMA FERROVIÁRIO BRASILEIRO

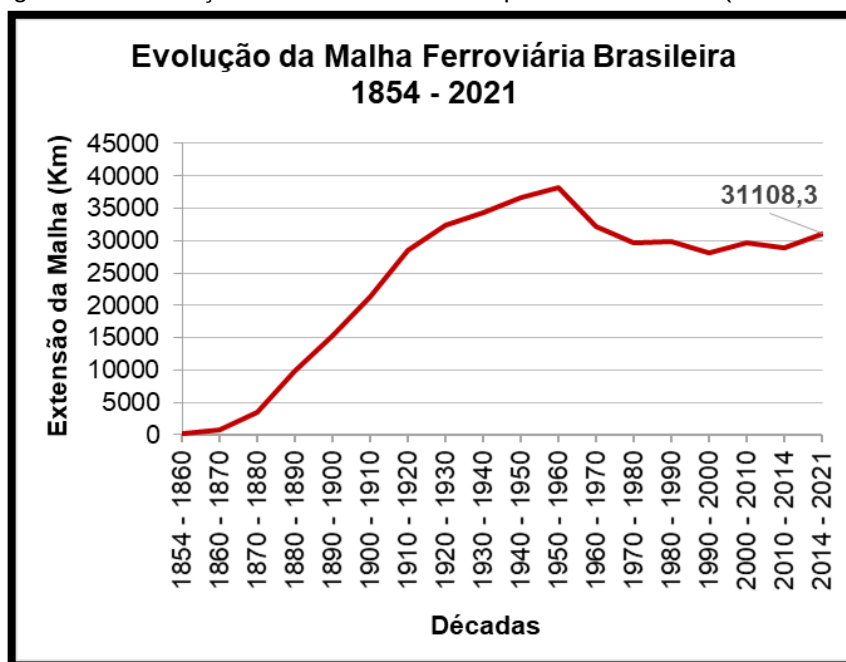
A priorização do modo rodoviário em detrimento do ferroviário, a partir da década de 50, provocou o declínio do transporte ferroviário de cargas no território brasileiro, marcado por baixos investimentos no setor, sucateamento da infraestrutura ferroviária e obsolescência dos ativos operacionais (oficinas, estações, pátios, locomotivas e vagões), resultando em perda de malha e, conseqüentemente, redução da participação da modalidade na matriz de transportes de cargas brasileiras.

Na década de 1960, a malha ferroviária chegou a possuir uma quilometragem total de 38.287 quilômetros, e diminuindo para 28.942 quilômetros em 1980. Em 2012 a malha ferroviária alcançou a quilometragem de 30.129 quilômetros, sendo uma densidade de 3,3 quilômetros de linhas férreo por mil km² de território, sendo menor que em 1960, porém maior que em 1980. Essa redução da malha se deu ao fato de tentar eliminar vias deficitárias e ramais ferroviários que eram antieconômicos, tentando assim reduzir o déficit do setor no orçamento da União. De 1960 até 2012, foram desativados aproximadamente 8.000 quilômetros de linhas férreas.

O sistema ferroviário de carga brasileiro conta com a nona rede mais extensa do mundo, com 31.108,3 km e a sexta maior em produção, com 307 bilhões de TKU (BNDES, 2017) e (SANTOS, 2021).

Há diversas dificuldades para o seu desenvolvimento, já que envolve o equacionamento de um grande volume de recursos por longo período, além de um planejamento e acompanhamento consistente e sistemático, o que ao longo da história centenária de formação da malha ferroviária brasileira não ocorreu. A figura 2.4 a seguir ilustra essa condição.

Figura 2.4 - Evolução da Malha Ferroviária por Décadas - km (1850 – 2021)



Fonte: Adaptado de Boiteux, (2014) e Santos, (2021)⁴

O sistema ferroviário brasileiro apresenta pontos positivos devido aos resultados dos investimentos que a iniciativa privada trouxe para o setor. Através das concessionárias, aumentaram-se os investimentos na manutenção das linhas concedidas, a tonelagem transportada e o nível de segurança, esse comprovado pela diminuição no índice de acidentes.

⁴ Foi adaptada de Boiteux, (2014) sendo atualizada através da tabulação de Santos, (2021). A Ferrovia Norte-Sul e seus ramais estão incluídos no levantamento até a data da apuração.

CAPÍTULO 3 - DEFINIÇÃO DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE ANÁLISE TÉCNICA E OPERACIONAL DAS FERROVIAS

Nesse capítulo será abordado os conceitos e definições dos principais elementos necessários para realizar uma análise técnica e operacional das ferrovias de cargas brasileiras.

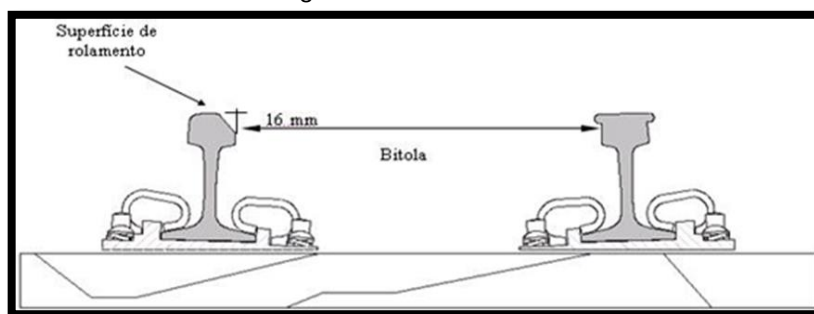
3.1. BITOLA

A bitola é uma característica fundamental para a estrada de ferro, tanto para o ponto de vista do traçado, quanto para a exploração e custos do modo ferroviário. Somente um estudo técnico e operacional permitirá, em cada caso, chegar-se à solução mais conveniente (BRINA, 1983).

A decisão da escolha do tipo de bitola que melhor possa atender a um sistema ferroviário depende de diversas variáveis, necessitando de uma análise da malha existente e uma perspectiva de expansão da mesma, pois não há estudo consensual que afirme absolutamente qual bitola se consolida como a mais indicada. No caso do Brasil, a questão torna esse fato mais preocupante, haja vista que as suas dimensões continentais somadas às diferenças de bitolas prejudicam as operações ferroviárias e o avanço do sistema sobre o espaço geográfico brasileiro.

Para melhor compreensão das abordagens do estudo é importante ser conceituado o que é bitola. Assim, denomina-se Bitola, a distância entre as faces internas das duas filas de trilhos, medida a 16 mm, abaixo do plano de rodagem (BRINA, 1983).

Figura 3.1 - Bitola da Via



Fonte: (BRINA, 1983)

Em relação às dimensões das bitolas e suas variações dimensionais, apresenta-se pela tabela 3.1, da literatura de Brina (1983), as tolerâncias máximas e mínimas permitidas para às duas principais bitolas brasileiras:

Tabela 3.1 - Limites Geométricos de Bitolas, Distância Máxima e Distância Mínima

LIMITES DE BITOLAS		
BITOLA	MÁXIMA	MÍNIMA
Bitola Métrica (1,0 m)	1.020 mm	995 mm
Bitola Larga (1,6 m)	1,620 mm	1.595 mm

Fonte: (BRINA, 1983)

Os limites de tolerância máxima e mínima apresentados na tabela acima, representam parâmetros de conservação da bitola da via, sendo monitorados para que esses valores não ultrapassem esse intervalo, pois a bitola fora desses limites, associados a outros fatores, como, por exemplo, defeitos em material rodante ou falha humana na condução dos trens, possa elevar os esforços verticais e transversais da via, causando acidentes.

De acordo com Brina (1983), Araújo (1986), Nabais (2014) e Paiva (2016) as vantagens e desvantagens entre as bitolas ferroviárias se divergem em torno dos seguintes parâmetros técnicos e operacionais:

- Raios mínimos de curva;
- Rampas máximas admitidas;
- Seções transversais;
- Capacidade de carga;
- Superelevação;
- Velocidade;
- Gabaritos da via permanente;

3.2. RAIOS MÍNIMOS DE CURVA

O raio mínimo por definição em engenharia ferroviária é o menor raio da curva de concordância horizontal, no qual poderá ser usado no projeto de traçado ferroviário. Esse raio mínimo de curva, de acordo com Brina (1988), permite a inscrição livre do veículo na curva horizontal pela qual o eixo segue a direção do raio da curva e também evita o escorregamento da roda externa do veículo.

3.3. RAMPAS MÁXIMAS

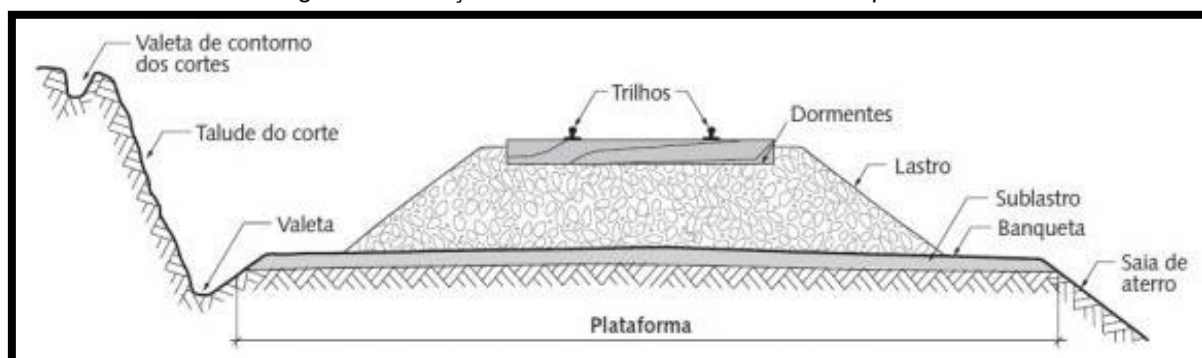
A rampa máxima trata-se do desnível máximo aceitável de um trecho de via em função do tipo do comboio, obedecendo às características do traçado da via e das operações ferroviárias para o qual foi projetado.

Atualmente, as ferrovias de cargas trabalham com o conceito de rampas máximas compensadas, que são rampas implantadas levando em consideração o equilíbrio entre as curvas verticais e horizontais em um determinado trecho. (RIBEIRO, 2018). Esse conceito busca minimizar os esforços horizontais, transversais e longitudinais nas vias causados pelos trens em circulação. (BRINA, 1988).

3.4. SEÇÃO TRANSVERSAL DA VIA

Os componentes desenvolvidos na seção transversal, caracterizam a plataforma de terraplenagem através dos principais elementos de superestrutura e infraestrutura, tais como; trilhos, dormentes, lastro, sublastro e terraplenos. As suas dimensões e definições dependem de parâmetros resistivos dos seus próprios materiais em relação às solicitações dos trens e suas cargas em operação, assim, como outros componentes que dependem de diversas variáveis, como pontes, viadutos, túneis e os dispositivos de drenagem (RITA, 2015). A figura 3.2 ilustra os principais elementos de uma seção transversal de uma ferrovia de linha simples.

Figura 3.2 - Seção transversal e seus elementos típicos

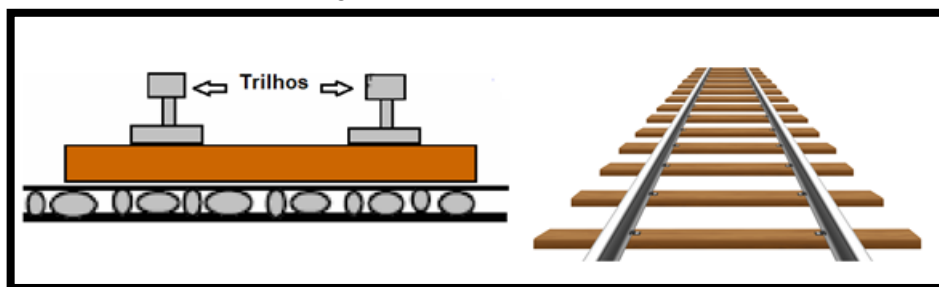


Fonte: (NABAIS, 2014)

Os elementos descritos a seguir compõe a seção da via e estão relacionados a plataforma ferroviária, uma vez que as dimensões inadequadas desses elementos podem prejudicar o deslocamento da composição ferroviária.

- a) Corte e Aterro: À medida que as obras de estradas avançam em seus perfis longitudinais (greide), suas seções transversais sofrem variações nas características de terraplenagem, resultando basicamente em operações de corte e aterro. Define-se corte como sendo a retirada de terra de um determinado local e aterro a colocação de terra até atingir o nível determinado em projeto. Assim essas seções sofrerão alterações no projeto geométrico em função da bitola empregada, que por sua vez determinará os *offsets* de corte e aterro de forma que nos trechos em curva, por exemplo, a composição trafegue sem “abalroar” nos taludes de corte e garantindo faixas laterais em aterros para circulação de mantenedores da via e dos trens.
- b) Trilho: Os trilhos são duplas paralelas de perfis de aço alinhados e nivelados de forma estratégica a suportar o primeiro contato do material rodante sobre si. Estes são fixados ao dormente com objetivo de manter sua firmeza, conferindo estabilidade aos veículos, bem como também manter sua bitola. (BRASIL FERROVIÁRIO, 2018). Existem trilhos de diferentes modelos e perfis para atender demandas específicas de operação e de produção, tendo influência não só técnica, mas também operacional nas ferrovias. A Figura 3.3 representa a configuração dos trilhos ferroviários.

Figura 3.3 - Trilho Ferroviário



Fonte: Autores

- c) **Dormente:** Dormentes são as peças retangulares colocadas transversalmente a via-férrea e sobre as quais os trilhos assentam e são fixados. Este item pretende não permitir que a bitola se alargue, ou seja, manter a bitola em seu tamanho padrão, e também procura suportar os esforços aplicados pelo trilho e dissipá-los sobre o lastro. Os dormentes podem ser produzidos de vários materiais, sendo os mais comuns o dormente de madeira, dormente de aço, dormente de concreto e dormente de polímeros. A figura 3.4 mostra os principais tipos dormentes em uso, sendo de madeira (1), concreto (2), aço (3) e plástico ou polímero (4).

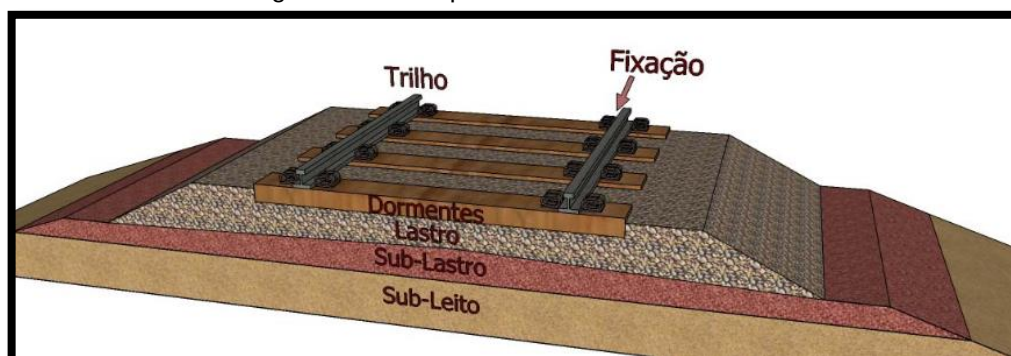
Figura 3.4 - Principais tipos dormentes em uso



Fonte: (VALE, 2009)

- d) **Lastro e sublastro:** O lastro e sublastro são elementos granulares aplicados entre o dormente e a plataforma ferroviária, com função principal de absorver os impactos aplicados pelo dormente e repassá-los de forma distribuída ao subleito. O lastro em específico é aplicado também nas laterais dos trilhos, contando o espaço de 30 centímetros para cada lado, sendo esse espaçamento denominado ombreira de lastro ou ombro de lastro. A “brita” é o material mais utilizado como lastro e sublastro. A figura 3.5 mostra o lastro, o sublastro e também os outros componentes da via permanente.

Figura 3.5 - Componentes da Via Permanente



Fonte: (KLINCEVICIUS, 2011)

3.5. CAPACIDADE DE CARGA

A capacidade de carga do vagão ferroviário depende da resistência de cada eixo que compõe o truque e também da resistência da linha (trilho) por onde ele transita. Se um vagão, por exemplo, permite 25 toneladas por eixo, o peso total poderá atingir até 100 toneladas, incluindo a tara do vagão e a mercadoria. (SANTOS, 2020).

A utilização da capacidade total de um vagão, porém, dependerá sempre do tipo de mercadoria transportada e do volume em m³, ou seja, para uma mercadoria leve, por exemplo, madeira, atingirá o volume disponível sem atingir o total de toneladas permitidas. Por outro lado, para uma mercadoria densa e pesada, por exemplo, minério de ferro, a tonelage máxima será atingida sem, no entanto, o volume do vagão estar completo. Assim, a análise de capacidade de carga entre as bitolas, terá como referência os limites impostos pela superestrutura ferroviária (trilhos, dormentes e lastro), além da relação lotação/peso total do produto de maior densidade transportado no país, no caso, o minério de ferro.

3.6. SUPERELEVAÇÃO

Superelevação refere-se ao desnível entre os trilhos da via no trecho em curva onde o trilho externo é elevado. Essa técnica reduz o desconforto causado pela mudança de direção, o desgaste do contato metal com metal e o risco de tombamento devido às forças centrífugas que ocorrem nas curvas. A velocidade máxima projetada para um determinado trecho de estrada, geralmente com múltiplas curvas, será definida em termos do raio da curva “mais fechada”. (PORTO, 2004).

3.7. VELOCIDADE

Utilizando o conceito da Física, a velocidade é definida como a relação entre uma determinada distância percorrida e o tempo gasto no percurso. Por sua vez, a velocidade trata-se de uma grandeza vetorial representada por um módulo, direção e sentido, sendo a distância medida geralmente em metros ou quilômetros e o tempo em segundo ou hora no Sistema Internacional de Unidades (S.I).

De uma forma geral, a variação do espaço em relação ao tempo determina o que é velocidade, ou seja, caracteriza a grandeza do quão rápido é o deslocamento de um corpo. Entretanto, no que se refere a prática do transporte ferroviário, a velocidade assume diferentes conceitos, uma vez que ocorrem variações em seu módulo entre a expectativa definida pelo projeto da via e a operação dos trens de carga.

3.8. GABARITO DA VIA

O gabarito da via-férrea é um modelo geométrico que fixa as dimensões máximas com que o veículo ferroviário pode ser construído e as dimensões máximas da carga fornecem em função das bitolas adotadas a área da seção transversal mínima necessária para a livre circulação na via. (BRASIL FERROVIÁRIO, 2021).

O gabarito dinâmico avalia os limites máximos, em medidas, das condições mais adversas para o material rodante em trânsito pela via permanente e o gabarito estático avalia os limites máximos, em medidas, das condições mais adversas para o material rodante parado na via permanente, porém na literatura é comum denominarmos apenas de gabarito ferroviário o estudo destes elementos.

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS ENTRE AS BITOLAS FERROVIÁRIAS

Nesse capítulo é apresentado uma análise técnica e operacional que considera os elementos de maior influência apuradas nas revisões literárias, as quais são relacionados aos principais parâmetros aplicados para a bitola métrica e larga, relacionando com situações adversas que possam gerar impactos nas operações, na manutenção e na capacidade de carga das ferrovias brasileiras.

4.1. ELEMENTOS TÉCNICOS

Baseado na literatura específica e mediante conhecimentos adquiridos foi levantado como principais elementos a serem analisados:

- Raio mínimo de curvas;
- Rampas máximas;
- Seções transversais.

4.1.1. Raios Mínimos de Curva

O raio mínimo de curva é um dos elementos fundamentais tanto no projeto quanto na operação ferroviária, de tal maneira que para Santos (2021), as curvas acentuadas abaixo de 300m, limitam o número de vagões que a locomotiva poderá tracionar.

No caso do raio mínimo horizontal para o traçado ferroviário é estabelecido levando-se em conta as características do material rodante, tais como: rodas, eixos, truques e engates, assim como dimensões de locomotivas e vagões previstos para transitar no trecho. Portanto, o limite do raio mínimo de curva é determinado conforme a inscrição dos veículos ferroviários projetados.

Segundo Brina (1988), a aplicação deste critério conduz a raios muito reduzidos e mesmo inaceitáveis dentro da moderna tecnologia ferroviária. Portanto, este raio mínimo significa, na maioria dos casos, apenas um limite que não pode ser ultrapassado, porém, pode encontrar aplicações em desvios e ramais secundários. Estes valores são limitados em 100 vezes o valor da bitola:

- R = 100m para bitola métrica
- R = 160m para bitola larga

4.1.2. Rampas Máximas

As rampas máximas são determinantes para as operações ferroviárias, tanto que para Santos (2021), as rampas consideradas fortes, acima de 1,5% de inclinação, resultam em composições com menor quantidade de vagões que a locomotiva poderá tracionar.

Segundo Pereira (1958), as rampas máximas admissíveis nas estradas de ferro, para trens de cargas, devem atender as prescrições estabelecidas pelo antigo Departamento Nacional de Estradas de Ferro – DNEF conforme tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Rampas Máximas em Bitolas Larga e Métrica			
Bitola e Linha	Terrenos		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
Bitola Larga (1,6 m)			
Troncos Principais	0,60%	0,90%	1,30%
Troncos Secundários	0,70%	1,00%	1,40%
Bitola Métrica (1,0 m)			
Troncos Principais	0,70%	1,00%	1,50%
Troncos Secundários	0,80%	1,20%	1,50%

Fonte: (PEREIRA, 1958)

A tabela 4.2 apresenta a sensibilidade às rampas, as quais a força de tração da locomotiva precisa vencer a rampa e tracionar a locomotiva, considerando seu peso bruto total (P), ou seja, considera o peso do vagão vazio (tara) mais o peso da carga transportada (lotação).

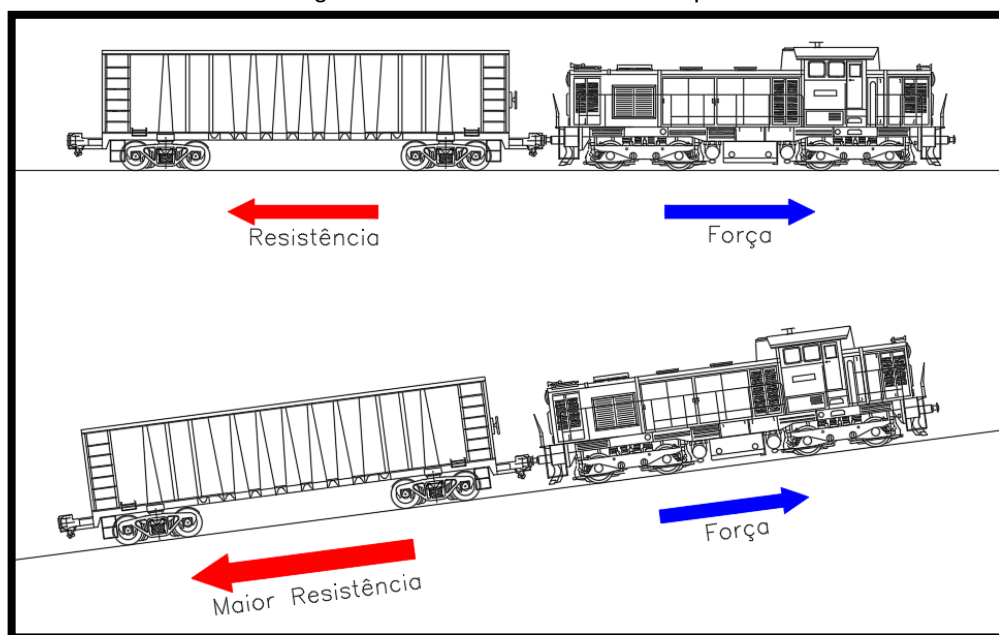
Tabela 4.2 - Sensibilidade às Rampas

Rampa (%)	Ferrovia
0,00	$0,0025 \times P$
0,25	$0,0050 \times P$
0,50	$0,0075 \times P$
1,00	$0,0125 \times P$
2,00	$0,0225 \times P$
3,00	$0,0325 \times P$
4,00	$0,0425 \times P$

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Brina, 1988.

A figura 4.1 demonstra a sensibilidade às rampas, ou seja, quanto mais forte a rampa, maior será a resistência contrária à força de tração.

Figura 4.1 - Sensibilidade às Rampas



Fonte: Desenvolvido pelos Autores

Considerando que a maioria da nossa rede ferroviária foi estabelecida antes de 1950, é frequente observar que as linhas ferroviárias possuem curvas com raios próximos de 100 metros e inclinações superiores a 2,0% de rampa. Isso resulta em um transporte ferroviário de eficiência operacional reduzida, uma vez que uma única locomotiva teria a capacidade de tracionar poucos vagões nessas condições e como resultado, a tração múltipla, que envolve o uso de 2 ou mais locomotivas, se tornaria uma necessidade. Por outro lado, as ferrovias modernas possuem rampas mais suaves, com inclinações inferiores a 1,0% e raios de curva superiores a 500 metros, o que permite que as locomotivas modernas movam até centenas de vagões com facilidade. (SANTOS, 2021).

4.1.3. Seção Transversal da Via

Para efeito das análises comparativas das seções transversais típicas entre as bitolas ferroviárias de 1,00m e 1,60m, foi utilizado os dados dos elementos de superestrutura do sistema ferroviário brasileiro, uma vez que a infraestrutura, devido suas particularidades, dificultam a sua mensuração, sendo assim tratado no tópico que aborda o gabarito de via permanente em seção de corte e aterro.

A superestrutura é a parcela estrutural da via apoiada sobre a infraestrutura e recebe diretamente os carregamentos dinâmicos dos trens e os distribuem à infraestrutura. (DNIT, 2016a).

Basicamente, a superestrutura é composta pelos trilhos, dormentes e lastro, os quais atuam como apoio e superfície de rolamento para as locomotivas e vagões. Apesar de estar em zona de transição com a infraestrutura, o sublastro é um considerável componente da superestrutura devido às propriedades proveitosas. (BRINA, 1983).

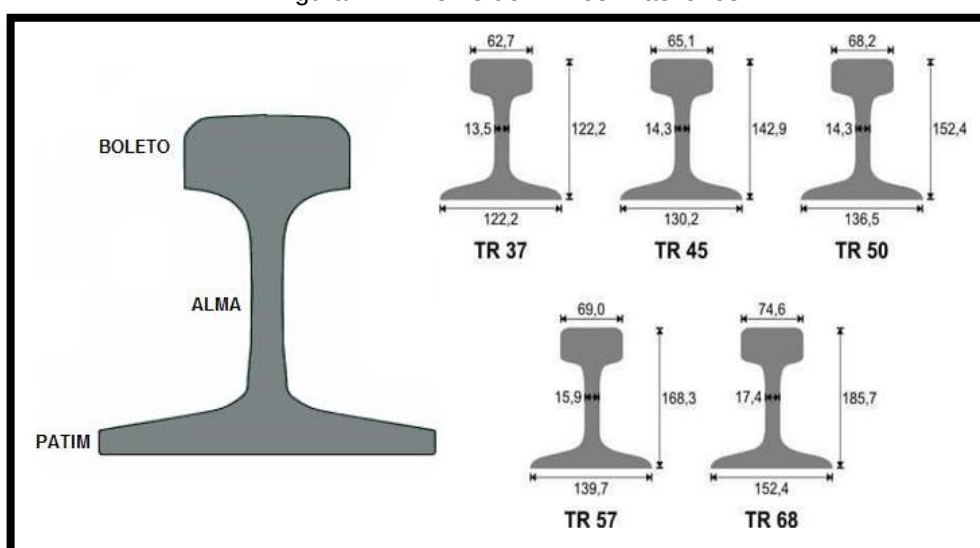
4.1.2.1. Trilhos Ferroviários

O perfil dos trilhos tem sido objeto de contínuo aperfeiçoamento desde o aparecimento das ferrovias. Existem diversos modelos de trilho ferroviário, porém o modelo de perfil consolidado e amplamente utilizado em ferrovias de cargas é o do tipo Vignole, nome atribuído ao engenheiro que o projetou. (PROFILLIDIS, 2014).

A escolha do perfil em um determinado projeto é feita, principalmente, em função da carga, do tráfego e do período de vida útil do trilho. Contudo, a definição do perfil do trilho também deve levar em consideração parâmetros como velocidade, carga por eixo, espaçamento entre os dormentes e reuso. Outro fator indispensável para a escolha do perfil do trilho é a bitola adotada como critério de projeto. (SANTOS, 2020).

No Brasil, é de costume utilizar a nomenclatura de perfis de trilhos especificados pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), quando ainda fabricavam trilhos ferroviários para abastecimento das ferrovias estatais. As especificações técnicas de trilhos ferroviários utilizados no país definem os perfis principalmente conforme suas dimensões de boleto, alma e patim, assim como seus respectivos pesos por metro linear. A figura 4.2 mostra os diferentes perfis utilizados nas ferrovias de carga do Brasil.

Figura 4.2 - Perfis de Trilhos Brasileiros



Fonte: Adaptado da Ferrovias e Trens, (2018)

O emprego de cada tipo de trilho depende do tipo de tráfego que utiliza cada linha. Para trens pesados de minério, com tráfego intenso, são utilizados os trilhos TR-57 e TR-68. Para uma linha de trens de carga geral, transportados em contêineres e vagões especializados, é normal a utilização de trilhos TR-45. (SANTOS, 2020).

Os trilhos mais leves, a exemplo do TR-37, permitem a circulação de locomotivas e vagões com a carga máxima de 18 t/eixo. O TR-45 e o TR-57 admitem 20 t/eixo e 25 t/eixo respectivamente. As ferrovias modernas, para trens longos e pesados para o transporte de minério e grãos, utilizam os trilhos TR-68 que permitem a circulação de material rodante com até 30 toneladas por eixo. (SANTOS, 2020).

Nas mesmas condições geométricas, os trilhos sofrerão variação de consumo apenas se a capacidade de carga e do tráfego forem diferentes, pois pode ser utilizado perfis diferentes para atenderem os critérios estabelecidos em projeto.

4.1.2.2. Dormentes

Os dormentes são componentes da superestrutura ferroviária que recebem dos trilhos e transmite ao lastro os carregamentos dos veículos. Ademais, possibilita a fixação dos trilhos e mantém constante a distância entre eles, isto é, a bitola. (BRINA, 1983).

O primeiro material utilizado para os dormentes em uma ferrovia foi a madeira, sendo até hoje o tipo de dormente mais comum utilizado. Além da madeira, tem-se utilizado em escala crescente no país os dormentes de concreto, seguido dos dormentes de aço e de polímeros em caráter experimental. A escolha do tipo de dormente para cada via-férrea depende de sua viabilidade técnica e econômica. (PROFILLIDIS, 2014).

Para Profillidis (2014), os principais fatores econômicos são:

- Custo de fabricação ou de aquisição dos dormentes;
- Custo de compra dos grampos fixadores;
- Tempo de vida útil dos dormentes;
- Custo de manutenção;
- Provável valor a se recuperar no final da vida útil dos dormentes.

Em relação aos aspectos técnicos:

- O peso dos dormentes tem por efeito alta ou baixa resistência transversal da via-férrea, dessa maneira interfere na velocidade e nas cargas por eixos que podem ser suportadas com segurança na via;
- Distribuição dos carregamentos dos trens;

Os dormentes de madeira e de concreto monobloco, predominantes na malha ferroviária brasileira, possuem aproximadamente as mesmas dimensões, tendo formatos geométricos aproximadamente iguais e aplicados em mesma quantidade por quilômetro de via em ambas bitolas analisadas.

4.1.2.3. Lastro Ferroviário

O lastro é um componente da superestrutura que sustenta os dormentes e trilhos. Transmite uniformemente para a plataforma os carregamentos advindos da superfície de rolamento que se distribuem por meio dos dormentes. (DNIT, 2016a).

Diversos tipos de materiais podem ser utilizados na aplicação do lastro, como cascalho natural, agregados de rocha, pedregulhos, brita e areia, sendo os materiais empregados consoantes os critérios de projeto, disponibilidade e custo. (MUNDREY, 2010). Entretanto, o material mais adequado, e que cumpre todas as finalidades do lastro, é a pedra britada, onde pode haver um controle mais rigoroso das propriedades do lastro em função da rocha escolhida como matéria-prima.

Um problema comum em relação ao lastro é a lenta e contínua deterioração do material devido ao carregamento do tráfego e, em alguns casos, à alta velocidade. Como o lastro consiste em material granular solto, no qual os grãos podem se espalhar e quebrar, isto pode causar uma crescente assimetria geométrica ou mesmo entupimento da base do lastro, do qual pode resultar em problemas de drenagem. Desta maneira, é necessário considerar o tempo de manutenção para restaurar o alinhamento regular da geometria da superestrutura. (ESVELD, 2001).

4.1.2.4. Sublastro Ferroviário

Segundo Brina (1988), o sublastro é o elemento da superestrutura ferroviária ligado a infraestrutura com as seguintes finalidades:

- Aumentar a capacidade de suporte da plataforma, permitindo elevar a taxa de trabalho no terreno ao serem transmitidas as cargas através do lastro e, por conseguinte, permitir menor altura do lastro;
- Evitar a penetração do lastro na plataforma;
- Aumentar a resistência do leito a erosão e a penetração da água, concorrendo, pois, para uma boa drenagem da via;
- Permitir relativa elasticidade ao apoio do lastro, para que a via permanente não seja rígida.

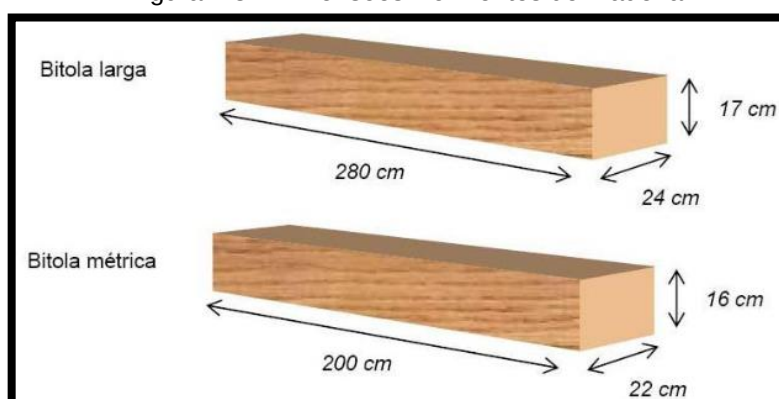
Sendo o lastro um material até certo ponto caro e de grande consumo (cerca de até 1,5 m³ por metro corrente) e às vezes de difícil obtenção, a disponibilidade de material do sublastro nas proximidades do local de construção é uma oportunidade para tornar o custo e a manutenção da superestrutura mais econômicos e de melhor condição técnica. (BRINA, 1983).

4.1.2.5. Parâmetros de Análise dos Elementos de Superestrutura

Ao realizar os comparativos dos elementos da superestrutura nas vias de bitola métrica e de bitola larga para determinar o consumo de materiais, foi necessário estabelecer padrões técnicos da via.

Foi considerado para análise um trecho em tangente com trilhos TR-68 (68kg/m), sendo este perfil de trilho o de maior carregamento possível, dormentes de madeira, devido sua ampla utilização nas ferrovias brasileiras, com taxa de dormentação de 1.750 dormentes/km tanto para vias de bitola métrica quanto larga. (BRINA, 1983). A figura 4.3 ilustra as dimensões dos dormentes de madeira conforme estabelecido no procedimento de inspeção de material do DNIT.

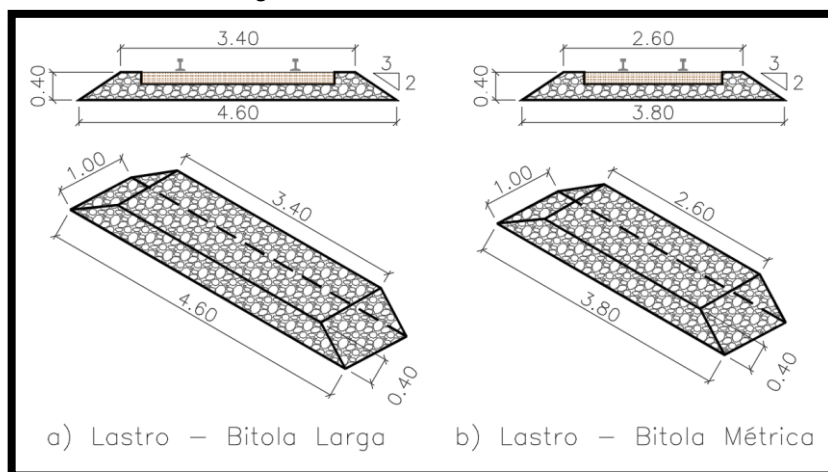
Figura 4.3 - Dimensões Dormentes de Madeira



Fonte: (DNIT, 2016b)

Já o material de lastro foi considerado de pedra britada, de maneira a simplificar a estimativa de seu volume na via com bitola larga ou métrica em um trecho de 1,00m, modelado em um tronco de pirâmide com base nas dimensões apresentadas, projetando o resultado para 1,00 km de via. A figura 4.4 mostra as dimensões do lastro consideradas para os cálculos de consumo.

Figura 4.4 - Dimensões do Lastro

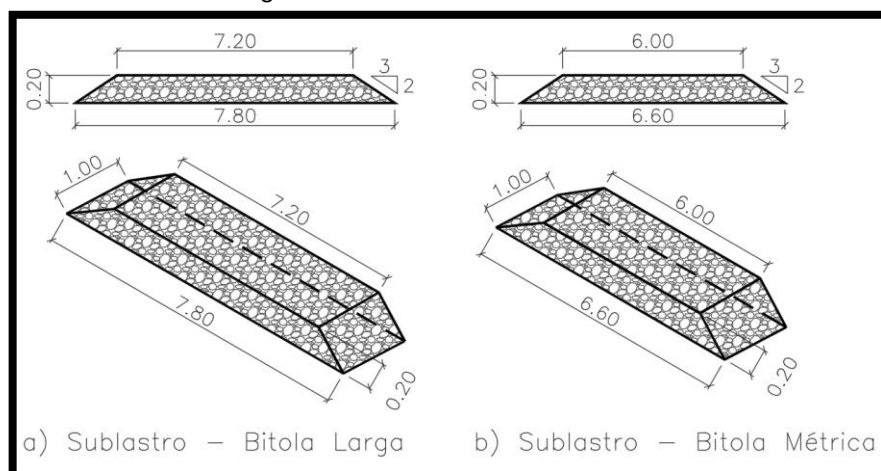


Fonte: Desenvolvido pelos autores

Para a subtração do volume dos dormentes inseridos no lastro em relação ao volume do tronco de pirâmide, o espaçamento entre dormentes definidos foi de 0,57m, ou seja, haverá 2 dormentes por metro de via-férrea em ambas bitolas.

Adotou-se para o sublastro a mesma largura da plataforma do subleito, sendo a mesma largura da plataforma de terraplenagem acabada, ou seja, para a bitola larga foi considerado 7,20 m e para a bitola métrica 6,00 m. Com base nesta largura e na altura do sublastro de 0,20 m, assim como o lastro, foi estendido a um trecho de 1,00 km. A figura 4.5 mostra as dimensões do sublastro adotados para os cálculos de consumo.

Figura 4.5 - Dimensões do Sublastro



Fonte: Desenvolvido pelos Autores

Conforme os critérios estabelecidos, a tabela 4.3 relaciona o consumo de dormentes de madeira, lastro e sublastro por quilômetro de via para as duas principais bitolas brasileiras: a métrica e larga.

Tabela 4.3 - Comparativo do Consumo dos Principais Elemento de Superestrutura

DORMENTE DE MADEIRA					
Bitola	Dimensões (m)	Volume unitário (m3)	Quantidade de dormentes por km	Volume de madeira (m3 / km)	Diferença (%)
Métrica	2,00x0,22x0,16	0,07	1750	123,2	38,38%
Larga	2,80x0,24x0,17	0,11	1750	199,92	
LASTRO					
Bitola	Dimensões (m)	Volume por metro (m3)	Comprimento do trecho (km)	Volume de lastro (m3 / km)	Diferença (%)
Métrica	3,80x2,60x0,40	1,14	1	1.139,20	16,94%
Larga	4,60x3,40x0,40	1,37	1	1.371,52	
SUBLASTRO					
Bitola	Dimensões (m)	Volume por metro (m3)	Comprimento do trecho (km)	Volume de sub-lastro (m3 / km)	Diferença (%)
Métrica	6,60x6,00x0,20	1,26	1	1.260,00	16,00%
Larga	7,80x7,20x0,20	1,50	1	1.500,00	

Fonte: Elaborada pelos Autores⁵

Através dos resultados apresentados na tabela 4.3 é possível concluir que, a bitola larga por ser mais robusta apresenta um maior consumo de dormentes, de lastro e sublastro, sendo respectivamente de 38,38%, 16,94% e 16,00% a mais de material comparada à bitola

⁵ Os dormentes de concreto, aço e polímeros não foram considerados para os cálculos apresentados na tabela.

métrica. Essas diferenças percentuais de consumo são refletidas não somente nos custos de construção da via, mas também na manutenção, uma vez que esses componentes possuem um ciclo de vida útil e que pode em função do tráfego operacional acelerar a substituição desses elementos.

4.2. ELEMENTOS OPERACIONAIS

Referenciados na literatura específica e mediante conhecimentos adquiridos foi levantado como principais elementos a serem analisados:

- Superelevação e Velocidade;
- Gabarito de Via;
- Capacidade de Carga.

4.2.1. Superelevação e Velocidade

Neste tópico a superelevação e velocidade são analisados em conjunto, pois a dinâmica dos trens na via em trechos de curva sugere equações que envolvem as duas grandezas.

4.2.2.1. Superelevação

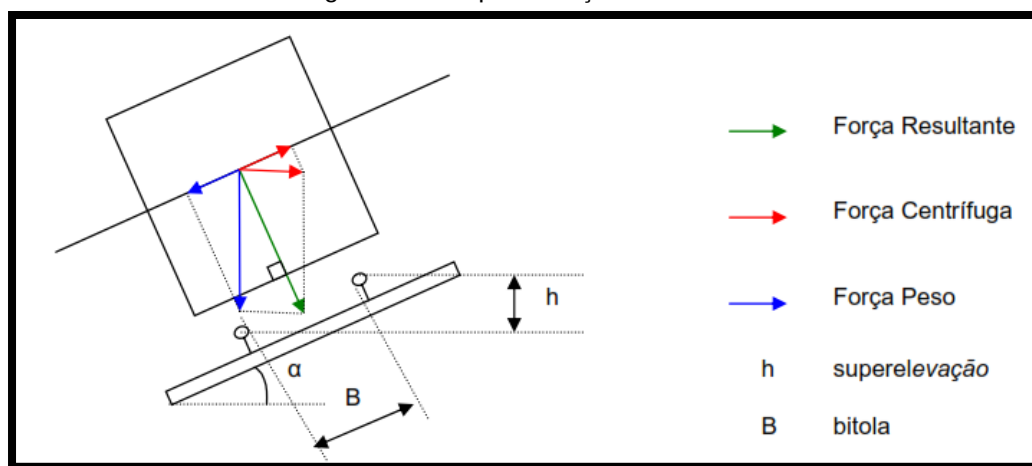
A superelevação é importante para garantir melhor desempenho e reduzir desgastes além de melhorar a estabilidade da composição nos trechos em curva. No entanto, podemos tratar a superelevação considerando dois aspectos; a superelevação teórica relacionada às formulações dinâmicas dos movimentos, e superelevação prática relacionada às operações ferroviárias.

a) Superelevação Teórica

Segundo Brina (1983), a superelevação teórica é um desnível transversal ao eixo da via, verificado pelo desnível entre o trilho externo e interno da curva, que permite utilizar a força peso para contrabalancear os efeitos da aceleração centrífuga decorrente do movimento do veículo ao inscrever-se em um trecho em curva. No estabelecimento da superelevação ferroviária, primeiro calcula-se o valor máximo, chamado superelevação teórica, por meio de fórmulas que contrabalanceiam a força peso, força centrífuga e que seja capaz de manter a

velocidade de projeto da composição ferroviária. A figura 4.6 mostra as forças atuantes que determinam a superelevação teórica.

Figura 4.6 - Superelevação Teórica



Fonte: (PORTO, 2004)

Através da equação 4.1 é possível estabelecer a condição de equilíbrio que resulte na superelevação teórica.

$$h = \frac{B}{127} \cdot \frac{V^2}{R} \quad (4.1)$$

Onde:

- h = Superelevação Teórica (m)
- B = Bitola da via (m)
- V = Velocidade da via (km/h)
- R = Raio da Curva (m)

b) Superelevação Prática

Como a superelevação teórica é calculada para a velocidade diretriz do projeto em km/h e as vias podem ser percorridas por trens com diferentes velocidades, faz-se necessário estabelecer um valor de superelevação máximo que atenda a essas variações de velocidades. Portanto, a superelevação prática aparece para equilibrar um valor de superelevação que reduza o risco de tombamentos de composições mais lentas para dentro da curva, além de minimizar o excesso de desgastes do trilho interno, caso a superelevação tenha sido dimensionada pelo critério teórico. (ROSA e RIBEIRO, 2016) e (PORTO, 2004).

Havendo a possibilidade de por um motivo qualquer o trem precisar parar em uma curva, é preciso estabelecer a superelevação máxima admissível que não ocasione o tombamento da composição. (PORTO, 2004).

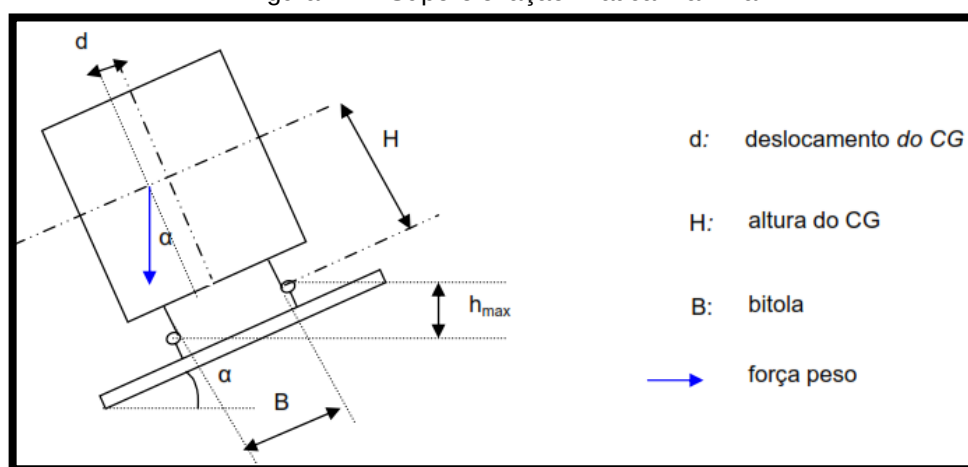
Os critérios de definição da superelevação prática subdividem-se em dois tipos: empíricos, baseados em aplicação prática que tiveram resultados positivos na manutenção da circulação da via e racionais, que se fundamenta em raciocínios matemáticos com objetivo de evitar que ocorra o tombamento de veículos na curva. (PAZ e OLIVEIRA, 2015).

Quanto aos métodos empíricos, existem diversos, aos quais se destaca o adotado nas ferrovias europeias, onde o valor máximo de superelevação prática ($h_{\text{máx}}$), varia de 15 a 18 cm na bitola de 1,435m. No entanto, alguns autores indicam que $h_{\text{máx}}$ seja 10% da bitola. A norma brasileira diz que “a superelevação em milímetros poderá abranger excepcionalmente a 125 vezes a bitola da via expressa em metros”, ou seja, 12,5cm para a bitola métrica e 20,0cm para a bitola larga de 1,60m. (BRINA, 1983). Normalmente as estradas de ferro brasileiras adotam;

- $h_{\text{máx}} = 18\text{cm}$ para a bitola de 1,60m e
- $h_{\text{máx}} = 10\text{cm}$ para a bitola de 1,00m.

No **método racional**, a determinação de $h_{\text{máx}}$ representa a estabilidade do veículo mesmo que ele esteja parado sobre a curva. A figura 4.7 representa as variáveis envolvidas que resultam na equação do método racional.

Figura 4.7 - Superelevação Prática Máxima



Fonte: (PORTO, 2004)

A equação 4.2 (método racional), estabelece a superelevação prática máxima admitida para manter a estabilidade do veículo mesmo parado sobre uma curva.

$$h_{m\acute{a}x} = \frac{B}{H \cdot n} \cdot \left(\frac{B}{2} - d \right) \quad (4.2)$$

Onde:

- $h_{m\acute{a}x}$ = Superelevação Prática Máxima (m),
- B = Bitola da via (m),
- H = Altura do centro de gravidade em relação aos trilhos. É função da geometria dos diversos tipos de veículos, da ordem de 1,5 m para locomotivas diesel-elétrica e 1,8 m para vagões fechado, carregados até o teto,
- n = coeficiente de segurança
- d = deslocamento do centro de gravidade (~0,10m).

Uma vez estabelecido o valor de $h_{m\acute{a}x}$, e através de formulações e operações matemáticas segundo Brina (1983), estabeleceu as equações 4.3 a 4.6, apresentadas no item a seguir, que possibilita determinar a velocidade limite pelos critérios de segurança e de conforto.

4.2.2.2. Velocidade de Projeto e Velocidade Comercial

Uma das mais sérias restrições à definição das dimensões e ao uso das bitolas ferroviárias, refere-se à velocidade máxima de projeto permitida em função do afastamento entre os trilhos e da sua velocidade comercial por consequência.

A *velocidade diretriz* ou *velocidade de projeto* é a velocidade selecionada para fins de projeto, da qual se derivam dos valores mínimos de determinadas características físicas da via, diretamente vinculadas à operação e ao movimento dos veículos. Essa velocidade representa à máxima velocidade que um veículo pode manter, em determinado trecho, em condições normais, com conforto e segurança.

Segundo Paiva (2016), a velocidade de projeto deve ser um dos principais parâmetros a ser estabelecido nas considerações iniciais do projeto geométrico de uma linha férrea.

Já a *velocidade comercial* refere-se à velocidade média, cujo cálculo inclui os tempos de parada em terminais, pátios para a tomada e largada de vagões, bem como a arranque e desaceleração próxima das paradas. Além disso, abrange situações em que o bloqueio impõe restrições de velocidade, o que acaba impactando nos indicadores de eficiência operacional.

As linhas de bitola métrica no Brasil, sempre foram adotadas tendo em vista a predominância de velocidades mais baixas, reduzido custo de implantação, emprego de trilhos mais leves e outros fatores técnicos e econômicos restritivos (ARAÚJO, 1986). Já a proposta da bitola larga é de permitir velocidades mais altas em trechos mais planos, escoando maiores volumes de carga.

Segundo Brina (1983), a bitola e a velocidade estão relacionadas com a segurança desta modalidade de transporte. Segundo este autor, a velocidade de segurança e conforto podem ser calculadas pelas equações a seguir:

a) Para a bitola Métrica (1,00m):

- Segundo critérios de segurança:

$$V = 4,3 \times \sqrt{R} \quad (4.3)$$

- Segundo critérios de Conforto:

$$V = 4,1 \times \sqrt{R} \quad (4.4)$$

b) Para a bitola Larga (1,60m):

- Segundo critérios de segurança:

$$V = 4,8 \times \sqrt{R} \quad (4.5)$$

- Segundo critérios de Conforto:

$$V = 4,5 \times \sqrt{R} \quad (4.6)$$

Onde para ambas as equações:

- V = Velocidade máxima da via (km/h)
- R = Raio da Curva (m)

A tabela 4.4 relaciona os coeficientes de segurança e conforto estabelecidos para a bitola métrica e larga e que são utilizados nas equações 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

Tabela 4.4 - Coeficiente de Segurança e Conforto		
Coeficientes	Bitola Métrica	Bitola Larga
Coeficiente de Segurança	4,3	4,8
Coeficiente de Conforto	4,1	4,5

Fonte: Desenvolvida pelos autores

Ao atribuir valores de raios nas equações, uma simples regra de três bastará para indicar que a bitola métrica admite praticamente 90% da velocidade da bitola larga, nas mesmas condições de curvas, conforme apresentado na tabela 4.5.

Essa diferença, em economia de transportes, pode-se provar que é marginal, não podendo, portanto, ser tomada como único fator para se determinar a economicidade de implantação e operação de um trecho ferroviário. (ARAÚJO, 1986).

A tabela 4.5 foi desenvolvida através das equações apresentadas anteriormente, atribuído os mesmos valores de raio tanto para a bitola métrica quanto para larga, calculando a velocidade máxima da via para cada critério considerado (conforto e segurança).

Tabela 4.5 - Cálculo de Velocidade em Ferrovias (Km/h)

Raio (m)	Cálculo de Velocidade em Ferrovias (Km/h)							
	Coeficientes				Velocidades (Km/h)			
	Segurança		Conforto		Segurança		Conforto	
	Métrica	Larga	Métrica	Larga	Métrica	Larga	Métrica	Larga
100					43,0	-	41,0	-
160					54,4	60,7	51,9	56,9
300					74,5	83,1	71,0	77,9
500					96,2	107,3	91,7	106,6
600	4,3	4,8	4,1	4,5	105,3	117,6	100,4	110,2
900					129,0	144,0	123,0	135,0
1000					136,0	151,8	129,9	142,3
2000					192,3	214,7	183,4	201,2

Fonte: Desenvolvida pelos autores

Observa-se que à medida que os raios de curvas aumentam, as velocidades permitidas conforme critérios de segurança e conforto também se elevam, mantendo uma diferença proporcional entre as bitolas analisadas. Veja, por exemplo, que com um raio de 2000m considerando os coeficientes tabelados, as velocidades permitidas chegaram a 192,3 km/h, na bitola métrica e 214,7 km/h para a bitola larga no critério de segurança, já para o critério de conforto as velocidades permitidas chegaram a 183,4 km/h na bitola métrica e 201,2 km/h para a bitola larga.

A tabela 4.6 apresenta o comparativo, evidenciando em números relativos à proporção das velocidades permitidas entre as bitolas nos critérios de segurança e conforto.

Tabela 4.6 - Relação da Velocidade entre as Bitolas Métricas e Largas

Relação da Velocidade entre as Bitolas Métricas e Largas						
Raio (m)	Segurança			Conforto		
	Velocidade (Km/h)					
	Métrica	Larga	Relação Métrica / Larga (%)	Métrica	Larga	Relação Métrica / Larga (%)
100	43,0	-	-	41,0	-	-
160	54,4	60,7	90%	51,9	56,9	91%
300	74,5	83,1	90%	71,0	77,9	91%
500	96,2	107,3	90%	91,7	100,6	91%
600	105,3	117,6	90%	100,4	110,2	91%
900	129,0	144,0	90%	123,0	135,0	91%
1000	136,0	151,8	90%	129,7	142,3	91%
2000	192,3	214,7	90%	183,4	201,2	91%

Fonte: Desenvolvida pelos autores

Utilizando o mesmo exemplo da tabela 4.5 (raio 2000m) observa-se que as velocidades permitidas calculadas para os critérios de segurança e conforto para a bitola métrica corresponde a 90% e 91% da bitola larga respectivamente.

Em complemento à análise das tabelas 4.5 e 4.6 as simulações de melhoria de traçado geométrico (raios de curva) e de velocidades de acordo com critérios de segurança e conforto com coeficientes definidos por Brina (1983), percebe-se que, sob a ótica das bitolas, a métrica não só garante a circulação de veículos ferroviários em situações extremas, mas também se aproxima de um desempenho muito próximo ao da bitola larga à medida que os raios de curva mínimos vão sendo melhorados em um determinado trecho analisado.

Essa análise leva a compreender que nas mesmas condições de traçado a diferença de velocidade é relativamente pequena entre as bitolas analisadas e os custos de implantação e operação tendem a ser menores na bitola métrica, principalmente em função dos materiais aplicados na construção e reaplicados na manutenção da superestrutura ferroviária.

Isso faz a diferença nas operações ferroviária uma vez que tem influência na degradação horizontal ou vertical da ferrovia, sendo a velocidade o primeiro componente que se busca reduzir para evitar maiores danos, sinistros e descarrilamentos, portanto a velocidade é associada a critérios de segurança para as operações dos trens de carga.

4.2.2.3. Fatores Operacionais Limitadores da Velocidade dos Trens de Carga

É importante observar que no Brasil, os trens de cargas não costumam ultrapassar velocidades superior a 80km/h, logo para cada trecho pode-se determinar uma *Velocidade Máxima Autorizada (VMA)*, que poderá variar de acordo com:

- Estado de conservação da via permanente;
- Passagens ao nível (PN's);
- Aparelhos de mudança de via (AMV's);
- Travessia de áreas urbanas;
- Restrições em áreas de preservação ambiental,
- Invasões ou avanços sobre faixa de domínio.

Em outros casos específicos, um determinado trecho ferroviário poderá receber pontualmente restrições de velocidade, que são reduções de velocidades justificadas por um determinado tempo, causada por uma inconformidade operacional, como defeitos na via, ocorrências provocadas por fenômenos naturais, invasões de faixa de domínio e transporte de produtos perigosos.

Quando ocorre uma restrição de velocidade, o comboio ferroviário tem a sua velocidade comprometida em uma extensão de trecho considerável, uma vez que a composição é longa e precisa entrar e sair do ponto da restrição com a velocidade imposta à operação. Isso traz efeitos indesejáveis ao desempenho ferroviário como baixa eficiência energética, aumento do tempo em trânsito e desgaste precoce de materiais da via e do material rodante.

O relatório anual da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) de 2018 apontou que as velocidades médias comerciais das ferrovias de cargas do país têm caído nos últimos anos, fato este que está diretamente relacionada aos fatores já mencionados e que corroboram com a tese de que as velocidades projetadas em função dos aspectos técnicos quase sempre não se efetivam na prática, dada às condicionantes físicas e operacionais impostas.

A tabela 4.7 apresenta as velocidades médias comerciais das empresas concessionárias do transporte ferroviário de cargas do Brasil conforme o relatório da ANTT.

Tabela 4.7 - Velocidade média comercial das Empresas Ferroviárias de Cargas 2018

Velocidade média comercial das empresas ferroviárias de cargas 2018	
Empresa	Velocidade (km/h)
MRS - Mineradora Rio-Sul Logística	36,22
EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas	31,6
EFC - Estrada de Ferro Carajás	28,63
FNSTN - Ferrovia Norte Sul Tramo Norte	28,44
FTC - Ferrovia Tereza Cristina	26,56
EFPO - Estrada de Ferro Paraná Oeste	25,88
FCA/VLI - Ferrovia Centro-Atlântica	21,57
RUMO - Malha Sul	14,66
RUMO - Malha Paulista	13,79
RUMO - Malha Norte	13,58
RUMO - Malha Oeste	12,66
FTL - Ferrovia Transnordestina Logística	12,55

Fonte: Relatório Anual ANTT, 2018 - Elaborada pelos Autores

A tabela 4.7 apresenta um cenário em que as ferrovias desenvolvem velocidades comerciais inferiores às velocidades para qual foram concebidas, colocando em dúvida se a bitola larga, que vem sendo ampliada, teria seu aproveitamento máximo da velocidade em função de suas características.

4.2.2. Gabarito da Via

O gabarito da via é padronizado pelos órgãos reguladores de cada país, sendo adotado no Brasil como referência a norma da ABNT NBR 12915, que trata da “Via-férrea – Gabarito ferroviário e entrevia – Especificações.

Naturalmente, no gabarito devem ser consideradas as principais peculiaridades do projeto, como o veículo, tipo de projeto, quanto às suas dimensões transversais e altura da plataforma do veículo, assim como sua trajetória descrita nas curvas implantadas da via-férrea. (PAIVA, 2016).

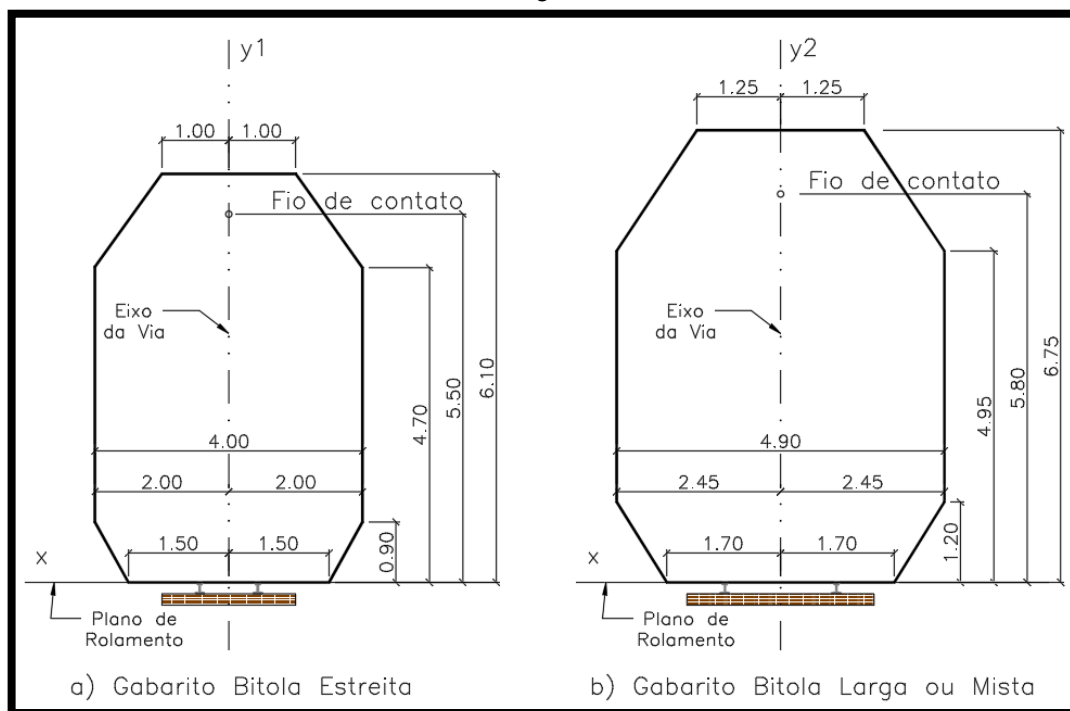
4.2.2.1. Gabarito de Obras de Arte Especiais - OAEs

Obras de Arte Especiais (OAEs) são estruturas em concreto armado, protendido, metálicas ou combinações entre estes sistemas construtivos estruturais, para proporcionar alternativas para a via ferroviária vencer obstáculos naturais ou mesmo impedir a interferência das vias de outros modais. Dentre as OAEs utilizadas para as ferrovias, pode se citar túneis, pontes, viadutos, passagens superiores, inferiores e muros de arrimo. (DNIT, 2015).

Os gabaritos para as diversas classificações de linha singela e dupla, bitolas de 1,60 m e 1,0 m, entre outras, constam nos desenhos anexo à Norma NBR 12915.

A Figura 4.8 ilustra o gabarito padrão em trechos construídos sobre Pontes, Tangentes, Linhas simples, com utilização de bitola estreita e larga ou mista.

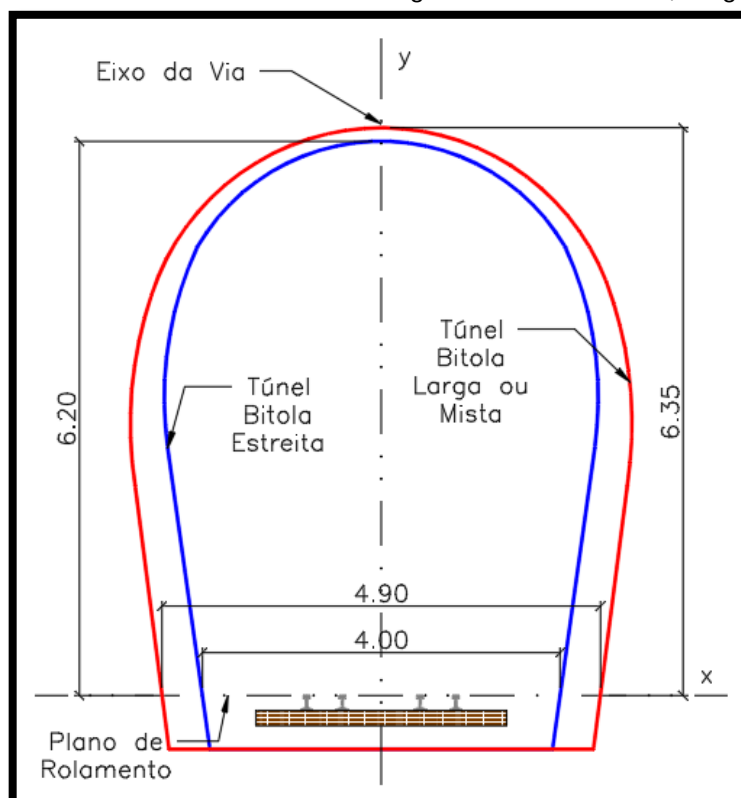
Figura 4.8 - Gabarito de Nível em Via Singela de Bitola Estreita e Larga ou Mista em Pontes e Tangentes



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 12915, 2020

Os gabaritos serão acrescidos em altura e largura, em função das respectivas características de curvas, para a livre circulação de composições ferroviárias, nas respectivas bitolas de 1,60 m e 1,00 m, nas dimensões indicadas nos desenhos da referida norma, ou nos casos mais desfavoráveis. São previstos, também, gabaritos para túneis e de obstáculos adjacentes como coberturas e plataformas de embarque. A figura 4.9 apresenta o gabarito de túneis para a bitola larga e estreita.

Figura 4.9 - Gabarito de Túnel em Via Singela de Bitola Estreita, Larga ou Mista



Fonte: Elaborado pelos autores conforme NBR 12915.

A figura 4.9 mostra a dimensão mínima que os túneis devem ter para que as composições da bitola estreita e larga ou mista consigam transpor essa OAE sem que ocorra o abalroamento nas paredes ou teto do túnel. Note que as diferenças de dimensões entre o gabarito da bitola estreita e larga são pequenas, na ordem de 15 cm na altura e 45 cm para cada lado. Assim, garante apenas a passagem dos veículos que atendem ao gabarito estático normatizado pela NBR 12915, portanto, para operações que necessitem de composições que extrapolem tais dimensões devem ser feitos um gabarito de túneis compatível com esse veículo. Assim sendo, operações *double stack*, aquelas que transportam dois contêineres empilhados, não passam por esses gabaritos, pelo fato de que a carga supera a altura do túnel.

4.2.2.2. Gabarito de Terraplenagem

Os gabaritos de terraplenagem devem prever seções típicas de corte e aterro com extensões superiores a 200 m, largura do passeio lateral que permita a circulação de veículos de manutenção da via e de outros sistemas existentes ao longo dela. A rotina de trabalhos de manutenção da via precisa ser considerada no projeto da via. (PAIVA, 2016).

Assim, as dimensões dos gabaritos mínimos de terraplenos para passagem de composições ferroviárias devem atender as medidas especificadas conforme tabela 4.8, onde é apresentada as dimensões, ou seja, largura das seções de corte e aterro relacionadas com as bitolas da via.

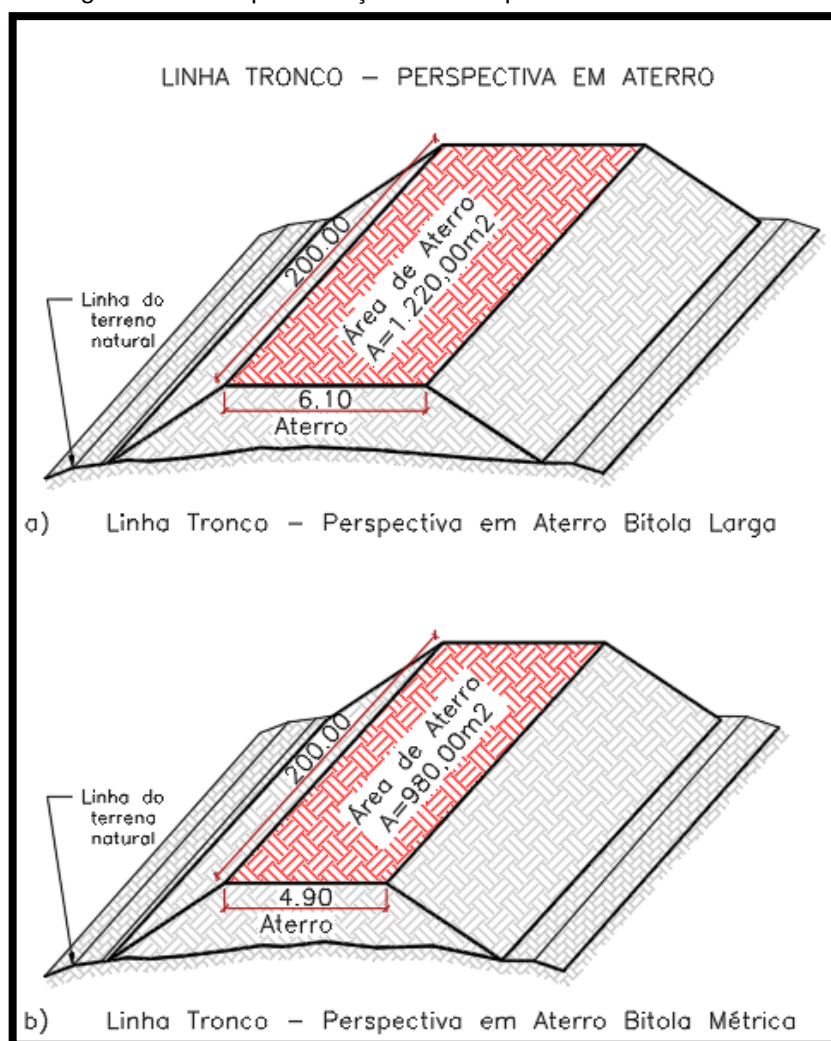
Tabela 4.8 - Gabarito de Aterro e Corte conforme a Bitola

Linhas Simples	Bitola 1,60 m e 1,435 m		Bitola de 1,0 m	
	Aterro	Corte	Aterro	Corte
Tronco	6,1m – 5,8m	7,2m – 6,9m	4,9m – 4,6m	6,0m – 5,7m
Subsidiária	5,6m – 5,4m	6,7m – 6,5m	4,6m – 4,4m	5,7m – 5,4m

Fonte: VALEC, 2014

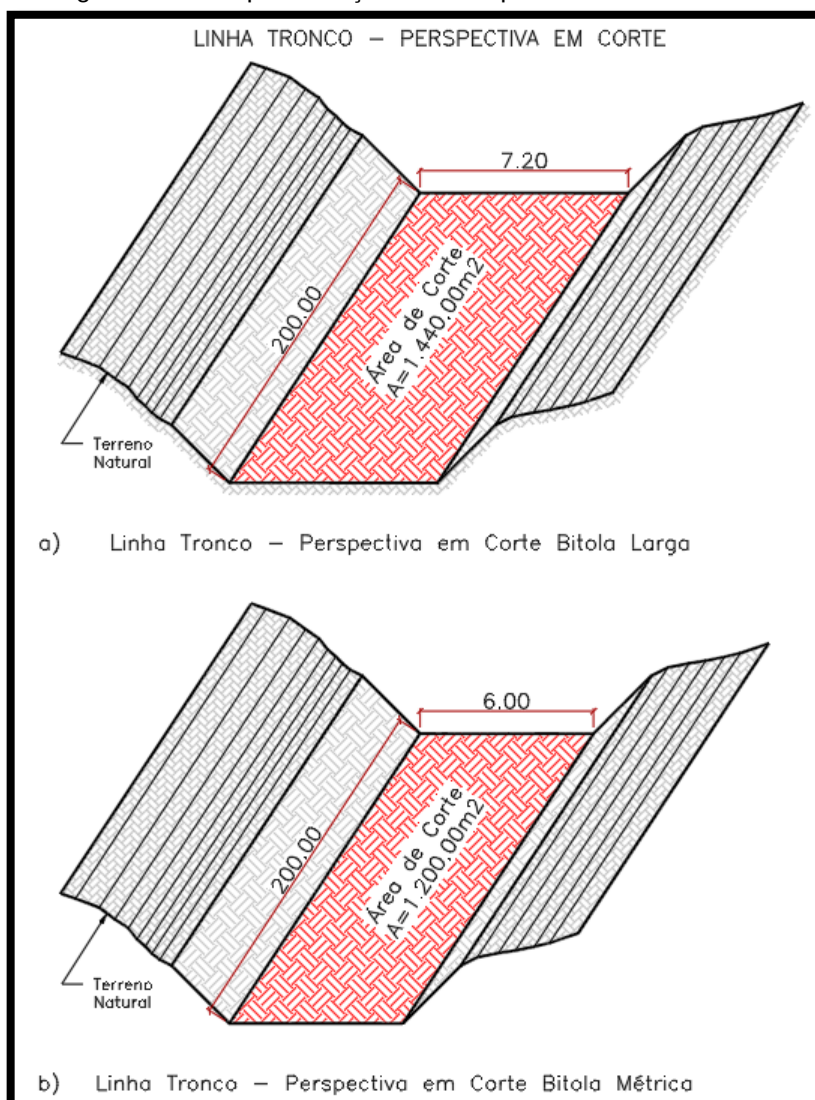
A figura 4.10 e 4.11 trazem uma representação em perspectiva da área de aterro e corte para a bitola larga e métrica, considerando a largura estabelecida na tabela 4.8 e comprimento de 200 m conforme recomendado por Paiva (2016).

Figura 4.10 - Representação em Perspectiva da Área de Aterro



Fonte: Elaborada pelos Autores

Figura 4.11 - Representação em Perspectiva da Área de Corte



Fonte: Elaborada pelos Autores

A tabela 4.9 compara as dimensões de aterro e corte objetivando analisar as diferenças em porcentagem com relação às dimensões estabelecidas representadas nas figuras 4.10 e 4.11.

Tabela 4.9 - Comparativo das Áreas de Aterro e Corte para a Bitola Larga e Métrica

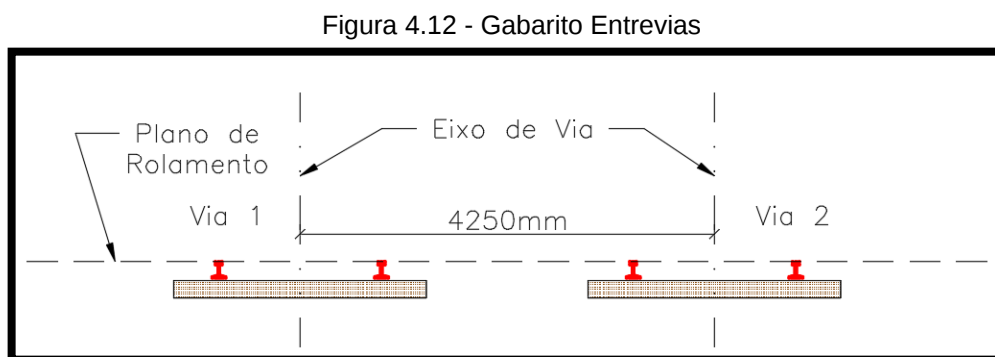
LINHA TRONCO EM ATERRO				
Linhas Tronco	Trecho (m)	Aterro (m)	Área de Aterro (m²)	Diferença (%)
Bitola 1,60	200,00	6,10	1.220,00	19,67%
Bitola 1,00	200,00	4,90	980,00	
LINHA TRONCO EM CORTE				
Linhas Tronco	Trecho (m)	Corte (m)	Área de Corte (m²)	Diferença (%)
Bitola 1,60	200,00	7,20	1.440,00	16,67%
Bitola 1,00	200,00	6,00	1.200,00	

Fonte: Elaborada pelos Autores

Uma análise de terraplenos factível quanto a dimensão em área exigida para cortes e aterros, pode-se concluir que a bitola métrica (1,00m) necessita de uma área de aterro de 19,67% menor quando comparada com a bitola larga (1,60 m) para o mesmo comprimento de trecho (200 m). Ao comparar as áreas de corte, a bitola métrica necessita de uma área de 16,67% menor que a bitola larga. Essa análise é pertinente, uma vez que as movimentações de terra em obras ferroviárias representam altos custos relativos ao valor global da obra.

4.2.2.3. Gabarito Entrevias

A entrevia que corresponde à distância entre os eixos de vias adjacentes deve apresentar a dimensão mínima de 4250 mm para qualquer bitola, conforme a norma NBR 12915 da ABNT. Essa distância mínima entre duas vias férreas adjacentes e paralelas visa permitir o cruzamento, a ultrapassagem ou ainda o estacionamento de uma composição numa dessas vias, assim como permitir o tráfego seguro na outra via. Portanto, essa dimensão é o afastamento mínimo em vias duplas e múltiplas de pátios, estações e terminais de carga e descarga de mercadorias. (PAIVA, 2016). A figura 4.12 apresenta a dimensão mínima entrevias estabelecida pela NBR 12915.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 12915, (2020)

Conforme a norma NBR 12915, o gabarito entrevias é de no mínimo 4250mm para qualquer bitola a ser empregada. Portanto, é possível concluir que independentemente de qualquer bitola, a distância entre os eixos das vias atenderá de forma suficiente e garantirá a circulação simultânea de trens em linhas paralelas, seja em tangente ou em curva.

4.2.3. Capacidade de Carga

A capacidade de carga de uma ferrovia envolve questões complexas que leva em consideração vários fatores relacionados ao tráfego, expressando o número de operações que é possível ser realizada em uma linha férrea durante um período. Essa expressão

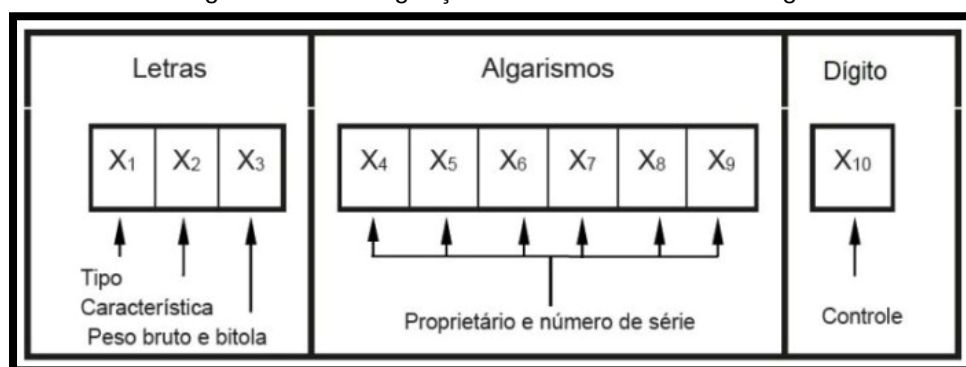
depende de fatores como; a infra e superestrutura, padrão construtivo e de manutenção da linha, além das características do material rodante (locomotiva e vagões), do nível de regularidade de fluxo e heterogeneidade dos trens. (RIVES et al., 1977 e BRINA, 1988 apud BARROS, 2021).

Diante da complexidade que envolve conhecimentos específicos intrínsecos para cada trecho, esse tópico tem como enfoque a análise do ponto de vista da capacidade de carga do vagão e da via. Assim, a capacidade dos vagões depende da resistência de cada eixo que compõe o truque e também da resistência da linha por onde ele transita. Como consequência, passa a existir uma carga máxima por eixo, além da capacidade que a via possa suportar. (BRINA, 1983).

Os vagões de carga são geralmente dotados de dois truques com dois eixos cada, caixa com estrutura central que recebe a carga, aparelhos de choque e engates com acoplamento automático.

A nomenclatura dos vagões é composta de três letras para caracterizar o vagão, seguido de seis algarismos e um dígito verificador de controle para caracterizar a sua propriedade. (SANTOS, 2021). A figura 4.13 detalha a sequência de letras e algarismos para nomenclatura dos vagões.

Figura 4.13 - Designação da Nomenclatura dos Vagões



Fonte: (MAURICIO, 2023).

O grupo de letras X1 e X2 nos mostra o tipo básico de vagão e suas características funcionais mais marcantes. Já o grupo X3 apresenta uma forma de aliar a bitola do vagão com seu Peso Bruto Máximo sobre os trilhos, o qual será mostrado na Tabela 4.9.

Na tabela abaixo é indicado apenas os números do grupo X3, por representar a classe de capacidade máxima por eixo. A tabela 4.10 apresenta a classe de capacidade por eixo.

Tabela 4.10 - Classe de Capacidade do Eixo e Peso Bruto Total

Peso Bruto Máximo Kg	Letra de Designação (X ₃)	
	Bitola 1,00m	Bitola 1,60m
Até 30.000	A	O
Acima de 30.000 até 47.000	B	P
Acima de 47.000 até 64.000	C	Q
Acima de 64.000 até 80.000	D	R
Acima de 80.000 até 100.000	E	S
Acima de 100.000 até 110.000	F	-
Acima de 110.000 até 130.000	G	T
Acima de 130.000 até 150.000	H	U
Acima de 150.000	I	V

Fonte: (MAURICIO, 2023)

Levando em consideração a descrição do parágrafo anterior e visando obter maior rendimento de uma bitola, seria necessário otimizar as dimensões dos vagões, procurando uma melhor relação lotação/peso total.

Para análise da relação lotação/peso total dos vagões, que caracteriza o maior aproveitamento da carga por unidade rebocada, foi escolhido para o comparativo entre as bitolas de 1,60m e 1,00m o vagão ferroviário destinado a transportar o produto de maior densidade de carregamento, o minério de ferro.

Como forma ilustrativa é apresentado os vagões do tipo gôndola para carregamento de minério de ferro utilizados na análise, sendo o vagão GDT (gôndola dumper manga "T" - 32,5 ton/eixo) para bitola de 1,60m e o vagão GDE (gôndola dumper manga "E" – 25 ton/eixo) para bitola de 1,0m. A figura 4.14 ilustra os dois vagões especificados.

Figura 4.14 - Vagão Gondola - GDT e GDE



Fonte: Greenbrier Maxion

Como forma demonstrativa de análise é feita uma comparação entre os vagões utilizados para o transporte de minério de ferro para bitolas de 1,60m e 1,0m. (BRINA, 1983). Assim, as tabelas 4.10 e 4.11 relacionam a lotação com o peso total desses vagões, medindo o aproveitamento útil de cada vagão nas suas respectivas bitolas.

- Bitola de 1,6 m:

Tabela 4.11 - Relação Lotação / Peso Total - Bitola de 1,60m

Bitola de 1,60m	
Lotação	97,5 ton
Tara	32,5 ton
TOTAL	130 ton

Fonte: Adaptado de Brina (1983)

Lotação / Peso Total = 97,5t / 130t = 0,75.

- Bitola de 1,0 m:

Tabela 4.12 - Relação Lotação / Peso Total - Bitola de 1,00m

Bitola de 1,00m	
Lotação	80 ton
Tara	20 ton
TOTAL	100 ton

Fonte: Adaptado de Brina (1983)

Lotação / Peso Total = 80t / 100t = 0,80.

Analisando as tabelas 4.11 e 4.12, verifica-se que a relação lotação/peso total do vagão de minério de ferro da bitola métrica possui um aproveitamento útil maior comparado ao vagão de bitola larga, assim, a bitola métrica torna-se mais vantajosa nos transportes de cargas de maior densidade. Por outro lado, a bitola larga será mais vantajosa quando o transporte demandar maior volume, ou seja, cargas com menor densidade.

A capacidade de carga pode ser melhorada quando uma ferrovia consegue aumentar a sua capacidade de tráfego, ou seja, possibilita a passagem de mais composições em um dado período. Aliado a isso, teoricamente, quanto mais ampla a bitola for, maior o volume de carga. (CHANDRA e AGARWAL, 2007). Entretanto, esta vantagem é relativa, pois se limita à capacidade dos vagões e, principalmente, à resistência dos trilhos, mesmo em bitolas mais largas. (BRINA, 1983).

4.3. APLICAÇÃO DOS ELEMENTOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS AO CÁLCULO DA LOTAÇÃO DOS TRENS

Diante do que foi exposto, a movimentação dos trens ao longo de uma via sofre restrições devido à existência de curvas horizontais e rampas ascendentes. Essas resistências têm como origem o projeto geométrico e influenciam nas operações. (PAIVA, 2016).

Assim, segundo os autores Porto (2004), e Brina (1988), a determinação da quantidade de vagões e locomotivas que formam uma composição, deve ser considerada nos cálculos de lotação tanto a capacidade de tração das locomotivas quanto à resistência ao movimento oferecida por todos os veículos da composição. Então as resistências podem ser divididas da seguinte forma:

- Resistência Normal: atua permanente em qualquer circunstância, sendo composta por atrito do ar e das peças móveis, como, por exemplo, nas mangas dos eixos, no cubo das rodas e nos frisos das rodas.
- Resistência acidental:
 - Rampa – componente do peso atua no sentido oposto ao movimento;
 - Curva – dificuldade de inscrição dos truques;
 - Inércia – reserva de potência ligada à necessidade de aceleração;

A força de tração de cada locomotiva é influenciada pelo seu peso e potência. O peso desempenha um papel fundamental para garantir a aderência entre a roda e o trilho, evitando que a locomotiva “patine”.

O cálculo da capacidade de carga é realizado com base no trecho mais desafiador da rota, ou seja, aquele que apresenta a maior soma de resistências e onde o trem atinge sua velocidade crítica, caracterizada por uma baixa velocidade com um torque elevado nos eixos.

O equilíbrio é alcançado quando a força de tração é igualada à resistência total da composição, e essa resistência pode incluir uma parte de potência reservada para uma eventual aceleração, conhecida como resistência de inércia. Assim o princípio dos cálculos se resume na equação 4.7 apresentada.

$$\sum \text{Esforço trator da}(s) \text{ locomotiva}(s) = \sum \text{Resistencias ao Movimento} \quad (4.7)$$

As resistências ao movimento são influenciadas por características específicas de cada tipo de veículo, o que inclui o seu peso. Como o peso pode variar para um veículo do mesmo tipo devido à carga que transporta, as resistências acidentais e normais são calculadas de maneira específica para cada categoria de veículo.

Assim, esse trabalho vai apresentar as equações para o cálculo das resistências e esforço trator, e em seguida, um “roteiro” de cálculos conforme estabelecido por Brina (1988), para aplicação das equações, resultando na determinação da lotação para uma composição, ou seja, o número de vagões de mesma característica que uma locomotiva pode tracionar

considerando o trecho crítico, aquele que as exigências são máximas a qual a locomotiva tem que superar para transpor esse trecho da rota.

4.3.1. Resistências ao Movimento

As resistências aqui apresentadas são aplicadas tanto para a locomotiva quanto para os vagões, onde as equações são resultadas de abordagens analíticas das diversas parcelas que compõem as resistências, obtendo-se fórmulas práticas válidas para as condições obtidas, uma vez que são originadas de determinações experimentais. (BRINA, 1988).

4.3.1.1. Resistência Normal

Exerce influência sobre o veículo durante todo o trajeto e é composta pela resistência do ar e pelo atrito das partes móveis, apresentando uma complexidade considerável, sendo difícil uma abordagem racional direta. (PORTO, 2004).

Assim, Brina (1988), apresenta fórmulas experimentais de Davis que tem sido utilizadas com êxito nas estradas de ferro para calcular essa resistência que se aplica às locomotivas elétricas, diesel-elétricas e vagões.

a) Locomotiva com peso por eixo superior a 5 toneladas (shrt-ton):

$$R'_{nl} = 1,3 + \frac{29}{w} + 0,03 V + \frac{0,0024 AV^2}{w \times n} \quad (4.8)$$

b) Vagões com peso por eixo superior a 5 toneladas:

$$R'_{nv} = 1,3 + \frac{29}{w} + 0,045 V + \frac{0,0005 AV^2}{w \times n} \quad (4.9)$$

Onde:

- R'_{nl} : taxa de resistência normal da locomotiva em lb/short-ton (libra/tonelada inglesa – libra/short-ton);
- R'_{nv} : taxa de resistência normal do vagão em lb/short-ton (libra/tonelada inglesa – libra/short-ton);
- w : peso médio por eixo em ton (short-ton), resultado da divisão do peso bruto total da locomotiva ou peso total do vagão carregado pela quantidade de eixo.
- n : número de eixos por veículo;

- V: velocidade em mi/h (milhas por hora);
- A: Área frontal do veículo em sq.ft (square-feet).

Para a aplicação das fórmulas de Davis é necessário utilizar de fatores de conversão de unidades de medidas bem como valores de equivalência.

Valores de A:

- Locomotiva entre 50 e 70 ton = 105 sq-ft;
- Locomotiva 70 e 100 ton = 110 sq-ft;
- Locomotiva acima de 100 ton = 120 sq-ft;
- Vagões utilizar 80 a 90 sq-ft.

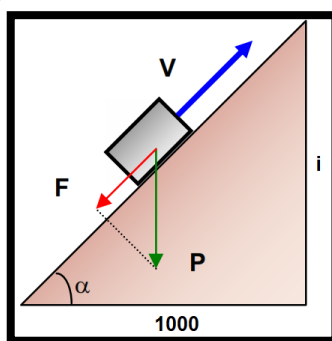
Fatores de conversão:

- 1 t (tonelada métrica) = 1,1 ton (adotaremos t para tonelada métrica e ton para a short-ton);
- 1km = 0,622 mi (milhas);
- 1 lb/ton = 0,5 Kg/t.
- 1 m² = 10,764 sq-ft

4.3.1.2. Resistência de Rampa

O cálculo da resistência de rampa permite uma avaliação analítica praticamente exata e corresponde à parcela da potência das locomotivas que é destinada a contrabalançar a componente peso que atua no sentido oposto ao do movimento. (BRINA, 1988). A figura 4.15 representa as componentes de forças que atuam nas rampas que auxilia na dedução da equação.

Figura 4.15 - Resistência de Rampa



Fonte: Adaptado de Porto, (2004)

Através da figura 4.15 é possível estabelecer as forças atuantes para a dedução das fórmulas reduzidas, onde se utiliza i em m/m, que resulta em R_i na mesma unidade. Para se estabelecer R_i em Kg/tf, utiliza-se $F_{resistente}$ em kgf e P em tf. E ainda é necessário fazer um ajuste para que i seja dado em %. (PORTO, 2004). Logo temos;

$$R'_i = \frac{F_{resistente}}{P} = \frac{P \cdot \sin \theta}{P} = \sin \theta \cong \tan \alpha = i \leftrightarrow R'_i = \frac{i}{100} 1000$$

$$\therefore R'_i = 10 \cdot i \quad (4.10)$$

Onde:

- R'_i : Taxa de resistência de rampa, em Kg/tf;
- i : rampa em %

4.3.1.3. Resistência de Curva

Segundo Porto (2004), e Brina (1988), a resistência de curva indica a dificuldade de inscrever o veículo numa curva. Depende da configuração do truque (distância entre eixos), da bitola da via (distância entre trilhos) e do raio da curva. Porém, devido essa resistência possuir algumas incertezas bem como à complexidade do fenômeno, apresenta-se a fórmula obtida empiricamente por Stevenson, que vem apresentado bons resultados na prática.

a) Locomotivas (fórmula de Stevenson):

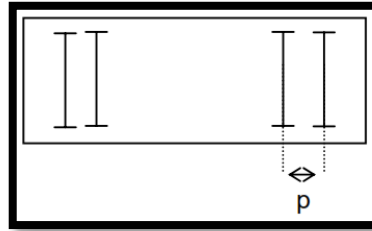
$$R'_{cl} = 0,2 + \frac{100}{R} (p + b + 3,8) \quad (4.11)$$

Onde:

- R'_{cl} : Taxa de resistência de curva da locomotiva, em Kg/t;
- R : Raio da curva, em metros;
- p : base rígida da locomotiva;
- b : bitola da linha, em metros

A figura 4.16 indica o local de obtenção da medida da base rígida da locomotiva.

Figura 4.16 - Base Rígida da Locomotiva



Fonte: (PORTO, 2004)

b) Vagão (fórmula de Stevenson):

$$R'_{cv} = \frac{500 b}{R} \quad (4.12)$$

Onde:

- R'_{cv} : Taxa de resistência de curva do vagão, em Kg/t;
- R : Raio da curva, em metros;
- b : Bitola da linha, em metros.

4.3.1.4. Resistência de Inércia

Segundo Porto (2004), e Brina (1988), a resistência de inércia não é propriamente dita uma “resistência”, mais sim uma reserva de potência da locomotiva aplicada ao veículo em repouso, para que o mesmo adquira uma velocidade, ou aumente a mesma, caso já esteja em movimento. Na sequência é apresentado a principal dedução que resulta na fórmula de resistência de inércia.

$$\tau = \Delta E_v$$

$$F \times l = \frac{1}{2} \times m \times (V_f^2 - V_i^2)$$

$$\frac{F}{P} \times l = \frac{1}{2} \times \frac{m}{P} \times (V_f^2 - V_i^2)$$

$$R'_v = \frac{1}{2 \times g \times l} \times (V_f^2 - V_i^2)$$

Para que V seja dado em Km/h e R'_v , seja obtido em Kgf/tf, ajusta-se a expressão conforme a equação 4.13.

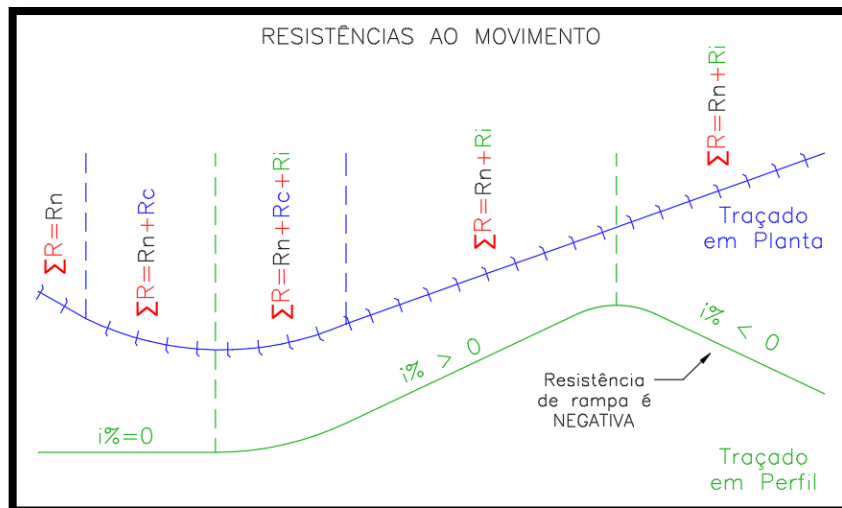
$$R'_y = \frac{4 \times (V_f^2 - V_i^2)}{l} \quad (4.13)$$

Onde:

- R'_y : Taxa de resistência de inércia, em Kgf/tf;
- V_i : Velocidade anterior, em Km/h;
- V_f : Velocidade após aceleração, em Km/h;
- l : Trecho percorrido em aceleração, em metros.

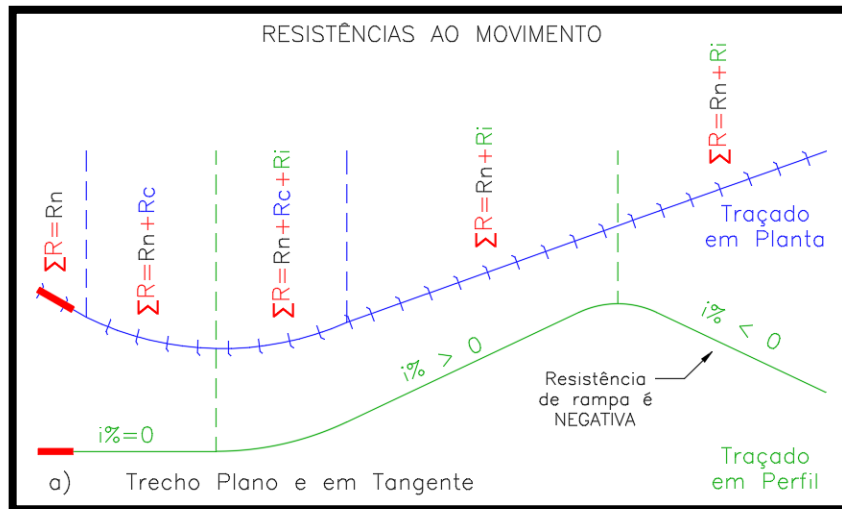
Para melhor compreensão da atuação das resistências ao movimento, as figuras 4.17 a 4.22 auxilia no entendimento da pior situação a qual os cálculos de lotação devem ser realizados para garantir que a locomotiva seja capaz de tracionar a composição ao longo do pior trecho.

Figura 4.17 - Resistências ao Movimento



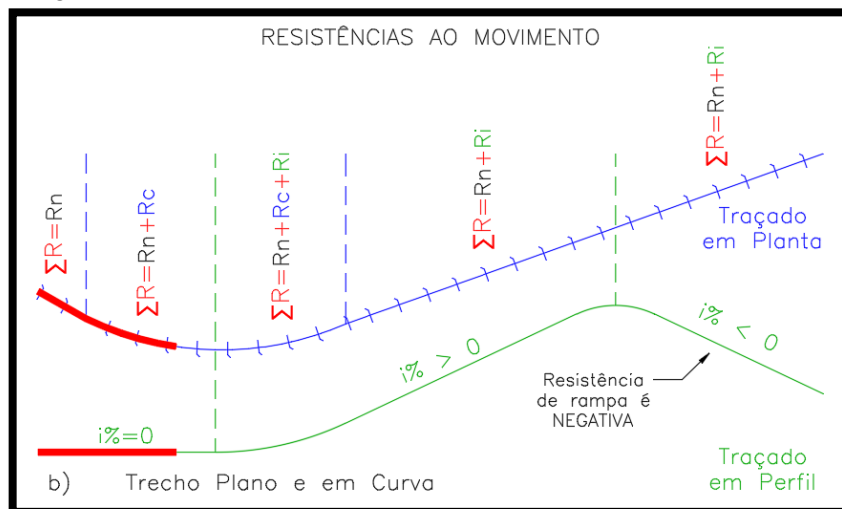
Fonte: Adaptado de Porto (2004)

Figura 4.18 - Resistências ao Movimento - Trecho Plano e em Tangente



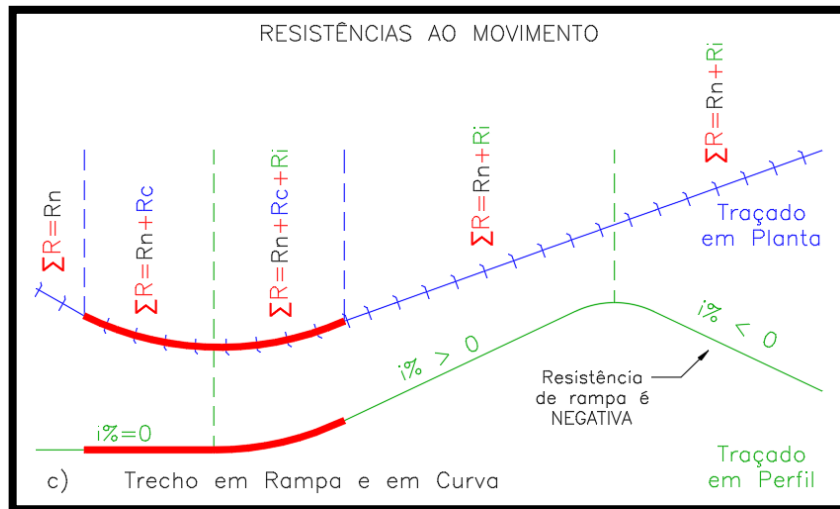
Fonte: Adaptado de Porto (2004)

Figura 4.19 - Resistências ao Movimento - Trecho Plano e em Curva



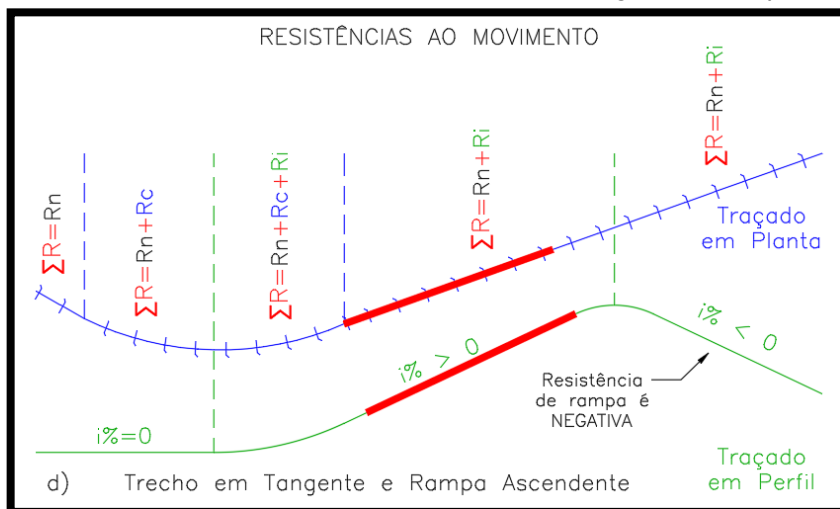
Fonte: Adaptado de Porto (2004)

Figura 4.20 - Resistências ao Movimento - Trecho em Rampa e em Curva



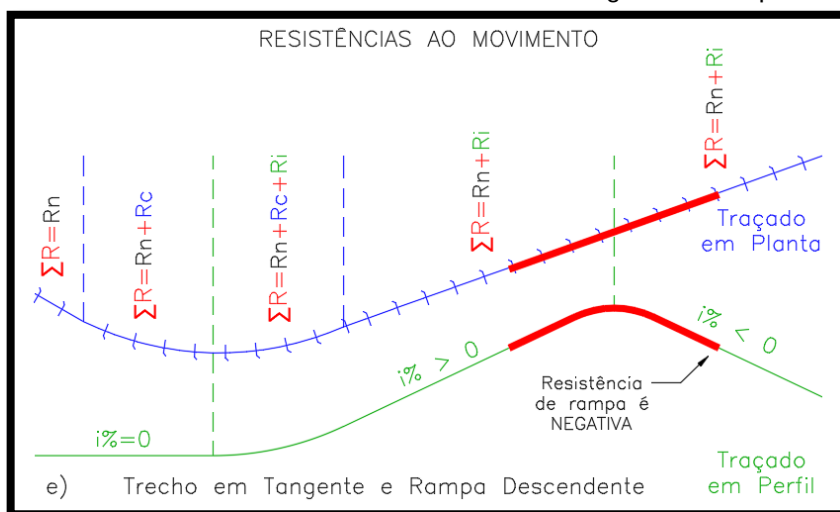
Fonte: Adaptado de Porto (2004)

Figura 4.21 - Resistências ao Movimento - Trecho em Tangente e Rampa Ascendente



Fonte: Adaptado de Porto (2004)

Figura 4.22 - Resistências ao Movimento - Trecho em Tangente e Rampa Descendente



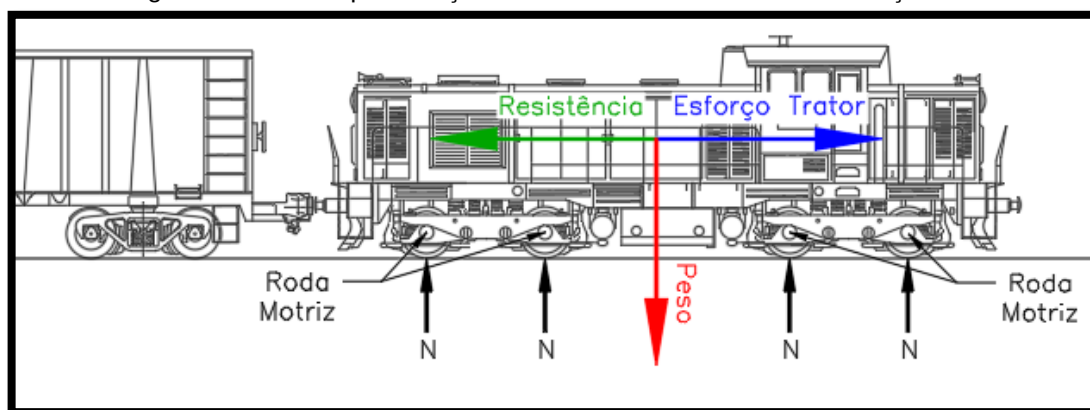
Fonte: Adaptado de Porto (2004)

Através da análise das figuras é possível visualizar que o trecho cuja demanda de maior esforço da locomotiva é o apresentado na figura 4.20, pois a composição está passando por um trecho de rampa e em curva, fazendo com que as três resistências normais, de curva e de rampa (R_n , R_c e R_i) atuem simultaneamente contra a força de tração da locomotiva. Essa é a condição crítica que deve ser utilizada para calcular o número de vagões que a locomotiva consegue tracionar sem que ocorra a patinação.

4.3.2. Esforço Trator

Segundo Brina (1988) e Porto (2004), o esforço trator define quantas toneladas uma locomotiva ou um conjunto de locomotivas podem tracionar em determinada região com velocidade constante e para isso acontecer, o esforço trator deve igualar à soma das resistências ao movimento. Esse esforço depende da potência do veículo trator e é limitada pela aderência no contato roda trilho. A figura 4.3 representa as principais forças envolvidas no esforço trator que locomotiva terá que vencer.

Figura 4.23 - Principais Forças Envolvidas nos Cálculos do Esforço Trator



Fonte: Elaborado Pelos Autores

4.3.2.1. Potência da Máquina

Ao formar um trem, é preciso saber quantas toneladas podem ser tracionadas por uma locomotiva ou grupo trator, ou seja, é necessário conhecer a potência disponível. Entretanto, nem toda potência desenvolvida por uma locomotiva está disponível em seu engate para tracionar os vagões. Isso ocorre devido à perda de parte da energia ser gasta para superar as resistências internas, incluindo perdas no motor, perdas por calor nos geradores, motores e energia consumida nos circuitos auxiliares como compressor de ar, iluminação, ar condicionado, etc. Ainda, a locomotiva precisa superar sua resistência própria no mancal e do flange (eixo) tracionando a si mesma. (CASSEMIRO, 2017).

Ao tratar da transferência de torque dos motores para os eixos da locomotiva, esse diminui à medida que a velocidade aumenta. Assim, quanto menor a velocidade maior será o esforço trator (torque) das locomotivas, nessa condição a potência é inversamente proporcional à velocidade. (PORTO, 2004).

A equação 4.14 demonstra as afirmações descritas anteriormente.

$$P = F.V \quad (4.14)$$

Onde:

- P: Potencia;
- F: Força Tratora;
- V: Velocidade.

A equação 4.16 estabelece as variáveis envolvidas que resultam no esforço trator máximo sem que ocorra a perda de aderência.

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{P_a \times f_v}{1 + 0,01 \times V} \quad (4.16)$$

Onde:

- $F_{m\acute{a}x}$: Esforço trator máximo (limitado pela aderência) em Kgf;
- P_a : Peso total ou peso aderente da locomotiva em Kg;
- f_v : Coeficiente de aderência na velocidade crítica;
- V : Velocidade crítica em Km/h.

O coeficiente de aderência f_v varia conforme as condições da superfície do trilho. A tabela 4.13 relaciona esses coeficientes.

Tabela 4.13 - Coeficientes Típicos de Aderência f

Estado do Trilho	Aderência
Totalmente seco e limpo	0,33
Lavado pela chuva	0,33
Seco e limpo	0,22
Seco	0,20
Molhado pela chuva	0,14
Úmido de orvalho	0,125
Úmido e sujo	0,11
Sujo com óleo	0,10

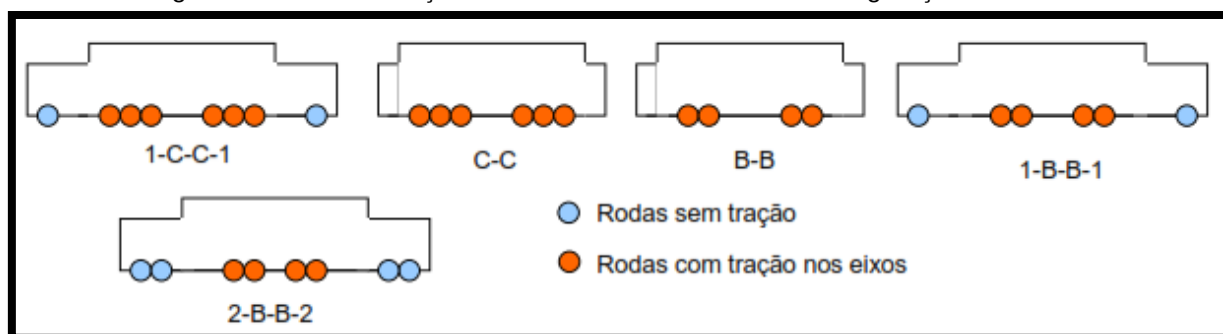
Fonte: (SETTI, 2002)

No Brasil, um valor médio comumente utilizado no cálculo da força de tração é de 0,22, aquele que considera os trilhos secos e limpos. (SETTI, 2002). Conforme apresentado na equação 4.15, o peso da locomotiva é determinante para promover o chamado “peso aderente”, ou seja, aquele que contribui efetivamente para a solicitação do atrito nas rodas. Isso é importante na hora de determinar o peso por eixo tanto para os vagões quanto para a locomotiva, sendo que nesse último caso, as locomotivas podem apresentar configurações de eixos onde se possui tração e outros eixos que não possuem tração. No caso, para se obter o peso aderente da locomotiva deve-se dividir o peso bruto total da locomotiva pela quantidade de eixos, mesmos aqueles que não possui tração. (PORTO, 2004).

As locomotivas são classificadas conforme sua configuração de eixos, assim código do tipo N-A-A-N, onde N indica o número de eixos que não possuem tração e A são letras (codificadas como C e B), que indicam a quantidade de eixos que possuem tração, logo uma locomotiva B tem 2 eixos com tração e locomotivas C tem 3 eixos de tração. (PORTO, 2004).

A figura 4.25 apresenta as configurações de eixo possíveis, bem como sua classificação.

Figura 4.25 - Classificação das Locomotivas Conforme Configuração de Eixo



Fonte: (PORTO, 2004).

A principal função do número de eixos de uma locomotiva é de distribuir o peso sobre o trilho sem sobrecarregar a via, pois alguns tipos de locomotivas possuem dificuldade em transferir o torque produzido pelo motor para os eixos situados em suas extremidades. Por este motivo, tais eixos não possuem tração. (PORTO, 2004).

4.3.3. Roteiro de Cálculo do Número de Vagões Tracionados por uma Locomotiva

Vimos que cada locomotiva possui uma curva característica de velocidade em função do esforço trator. Em conjunto, conhecendo-se as resistências do trem, é possível determinar a lotação que a locomotiva pode rebocar em cada velocidade e em determinado trecho da linha, na qual são identificados o menor raio e a rampa máxima. (BRINA, 1988).

A seguir é apresentado o roteiro de cálculos estabelecido por Brina (1988), que resultam na lotação da composição:

- Estabelecer a velocidade mínima (*velocidade crítica*) a qual o trem pode desenvolver no *trecho crítico*, isto é, o que possui a rampa máxima e menor raio. Para os trens de carga é indicada pelo fabricante e corresponde ao esforço trator contínuo que a locomotiva pode despenhar sem danos aos motores.
- Verificar na curva "*velocidade / esforço trator*" o esforço trator nas rodas da locomotiva, que corresponde à *velocidade crítica* ou calcular pela equação já conhecida;

$$F_R = \frac{273,24 \times \eta \times W_{HPG}}{V_c} \quad (4.15)$$

- c) Verificar se o esforço trator (F_r) resultante não ultrapassa a aderência, ou seja, $F_{m\acute{a}x}$, na velocidade crítica, conforme equação apresentada;

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{P_a \times f_v}{1 + 0,01 \times V} \quad (4.16)$$

- d) Calcular as resistências das locomotivas e dos vagões, conforme a equação conhecida;

- Resistência normal da locomotiva;

$$R'_{nl} = 1,3 + \frac{29}{w} + 0,03 V + \frac{0,0024 AV^2}{w \times n} \quad (4.8)$$

- Resistência normal do vagão;

$$R'_{nv} = 1,3 + \frac{29}{w} + 0,045 V + \frac{0,0005 AV^2}{w \times n} \quad (4.9)$$

- Resistência de curva da locomotiva;

$$R'_{cl} = 0,2 + \frac{100}{R} (p + b + 3,8) \quad (4.11)$$

- Resistência de curva do vagão;

$$R'_{cv} = \frac{500 b}{R} \quad (4.12)$$

- Resistência de rampa;

$$R'_i = 10.i \quad (4.10)$$

- e) Calcular a resistência total da locomotiva (R_l);

$$R_l = P_a (R'_{nl} + R'_{cl} + R'_i) \quad (4.17)$$

- f) Determinar o esforço trator útil (F_u) no engate da locomotiva, ou seja, a força disponível para tracionar os vagões;

$$F_u = F_R - R_l \quad (4.18)$$

g) Calcular a resistência total dos vagões (R_v);

$$R_v = R'_{nv} + R'_{cv} + R'_i \quad (4.19)$$

h) A lotação da locomotiva, em toneladas (P);

$$P = \frac{F_u (kg)}{R_v (kg/t)} \quad (4.20)$$

i) Número de vagões da composição (N);

$$N = \frac{P}{p_v} \quad (4.21)$$

Onde:

- p_v : Peso do vagão (lotação mais tara) em t;
- A lotação (carga útil), depende do peso específico da mercadoria.

Com base nesse roteiro é apresentado cinco (5) simulações, a fim de comparar a lotação de uma locomotiva da bitola métrica e outra locomotiva com as mesmas especificações para a bitola larga. A locomotiva escolhida é a U20C, da série 3800 (métrica) e 7800 (larga), pois se trata do modelo de locomotiva mais comum utilizada para o transporte ferroviário de cargas no Brasil, uma vez que, essa máquina opera no país predominantemente desde a década de 70, tendo sido herdadas das extintas RFFSA e FEPASA pelos concessionários para dar continuidade às operações ferroviárias do sistema atual.

A tabela 4.14 relaciona os dados técnicos referente a locomotiva e ao vagão considerado. Essas informações foram retiradas das fichas técnicas e do site da viação férrea do centro oeste (vfco). É importante ressaltar que a velocidade crítica aqui considerada, obedece à especificação da ficha técnica da locomotiva.

Tabela 4.14 - Dados Técnicos da Locomotiva e do Vagão Considerado

DESCRIÇÃO	BITOLA	
	MÉTRICA	LARGA
Bitola (m)	1,00	1,60
Potência da locomotiva (U20C) métrica/larga (hp)	2.000,00	2.000,00
Base rígida da locomotiva métrica/larga (m)	3,51	3,51
Peso da locomotiva - métrica/larga (kg)	108.000,00	109.980,00
Peso da locomotiva - métrica/larga (ton)	108,00	109,98
Área frontal da locomotiva - métrica/larga (sq-ft)	120,00	120,00
Peso por eixo da locomotiva - métrica/larga (ton)	18,00	18,33

Área frontal do vagão gde - métrica (sq-ft)	80,00	90,00
Peso do vagão GDE - métrica/GDT - larga (ton)	100,00	130,00
Peso por eixo do vagão GDE - métrica/GDT – larga (ton)	25,00	32,50
Velocidade crítica (km/h)	20,00	20,00
Velocidade crítica (mi/h)	12,44	12,44
Conversão de libras/ton para kg/ton	0,50	0,50

Fonte: Elaborado Pelos Autores

As informações apresentadas na tabela 4.14 são fundamentais para os cálculos que constam nas tabelas a seguir.

4.3.3.1. Primeira Simulação

Esse cenário calcula a lotação máxima da locomotiva levando em consideração além dos dados apresentados na tabela 4.14 os seguintes parâmetros de raio e rampa.

Considera-se como raio mínimo de curvas horizontais aquele que não pode ser inferior a 100 vezes o valor da bitola, ou seja, 100 m para a bitola métrica e 160 m para a bitola larga.

Com relação à condição de rampa, consideram-se os critérios estabelecidos por Pereira (1958), conforme tabela 4.1, no qual se admite nas estradas de ferro, para trens de carga na linha tronco principal, trechos planos com rampa máxima de 0,70% para bitola métrica e 0,60% para bitola larga.

Assim a tabela 4.15 apresenta os resultados para essa condição.

Tabela 4.15 - Resultado da Lotação 1º Simulação

RESULTADO PROCURADO	EQUAÇÃO UTILIZADA	BITOLA	
		MÉTRICA	LARGA
Raio mínimo de curva - métrica/larga (m)	-	100,00	160,00
Rampa máxima (%)	-	0,70	0,60
Esforço trator nas rodas (kgf)	4.15	22.405,68	22.405,68
Esforço trator máximo limitado (kgf)	4.16	19.800,00	20.163,00
Resistência normal da locomotiva (kg/ton)	4.8	1,85	1,83
Resistência normal do vagão tipo (kg/ton)	4.9	1,54	1,40
Resistência de curva locomotiva (kg/ton)	4.11	8,51	5,77
Resistência de curva vagão (kg/ton)	4.12	5,00	5,00
Resistência de rampa (kg/ton)	4.10	7,00	6,00
Resistência total da locomotiva (kg)	4.17	1.874,18	1.495,28
Esforço trator útil no engate da locomotiva (kgf)	4.18	17.925,82	18.667,72
Taxa de resistência total dos vagões (kg/ton)	4.19	13,85	12,83
Cálculo da lotação total do trem (ton)	4.20	1.294,42	1.454,97
Número de vagões (und)	4.21	12,94	11,19

Número de vagões considerados	-	13,00	12,00
--------------------------------------	----------	--------------	--------------

Fonte: Elaborado Pelos Autores

As rampas consideradas nessa simulação (trechos planos) em conjunto com raios mínimos de curva de cada bitola segundo os cálculos para que o trem em bitola larga possua capacidade de tracionar 160,55 toneladas a mais que a bitola métrica.

4.3.3.2. Segunda Simulação

Esse cenário calcula a lotação máxima da locomotiva levando em consideração além dos dados apresentados na tabela 4.14 os seguintes parâmetros de raio e rampa.

Considera-se como raio mínimo de curvas horizontais aquele que não pode ser inferior a 100 vezes o valor da bitola, ou seja, 100m para a bitola métrica e 160m para a bitola larga.

Com relação à condição de rampa, consideram-se os critérios estabelecidos por Pereira (1958), conforme tabela 4.1, no qual se admite nas estradas de ferro, para trens de carga na linha tronco principal, trecho montanhoso com rampa máxima de 1,50% para bitola métrica e 1,30% para bitola larga.

Assim a tabela 4.16 apresenta os resultados para essa condição.

Tabela 4.16 - Resultado da Lotação 2ª Simulação

RESULTADO PROCURADO	EQUAÇÃO UTILIZADA	BITOLA	
		MÉTRICA	LARGA
Raio mínimo de curva - métrica/larga (m)	-	100,00	160,00
Rampa máxima (%)	-	1,50	1,30
Esforço trator nas rodas (kgf)	4.15	22.405,68	22.405,68
Esforço trator máximo limitado (kgf)	4.16	19.800,00	20.163,00
Resistência normal da locomotiva (kg/ton)	4.8	1,85	1,83
Resistência normal do vagão tipo (kg/ton)	4.9	1,54	1,40
Resistência de curva locomotiva (kg/ton)	4.11	8,51	5,77
Resistência de curva vagão (kg/ton)	4.12	5,00	5,00
Resistência de rampa (kg/ton)	4.10	15,00	13,00
Resistência total da locomotiva (kg)	4.17	2.738,18	2.265,14
Esforço trator útil no engate da locomotiva (kgf)	4.18	17.061,82	17.897,86
Taxa de resistência total dos vagões (kg/ton)	4.19	21,85	19,83
Cálculo da lotação total do trem (ton)	4.20	780,92	902,55
Número de vagões (und)	4.21	7,81	6,94
Número de vagões considerados	-	8,00	7,00

Fonte: Elaborado Pelos Autores

Nessa simulação para trechos ondulados, as rampas máximas admitidas juntamente com os raios mínimos de curva de cada bitola contribuíram nos cálculos para que a lotação

do trem reduza significativamente, sendo 780,92 ton e 902,55 ton nas bitolas métrica e larga respectivamente. Apesar da queda significativa em ambas bitolas, percebe-se que houve menor perda de lotação total do trem na bitola larga, que por sua vez continuou tracionando mais carga com menos vagões em comparação com a bitola métrica.

4.3.3.3. Terceira Simulação

Esse cenário é o que mais retrata a realidade da malha ferroviária brasileira, uma vez que os parâmetros de raio e rampa utilizados no cálculo da lotação se aproxima das considerações de Santos (2021), onde a rampa característica é de 2,0%, com raio de 100m para bitola métrica e raio de 160m para bitola larga.

Assim a tabela 4.17 apresenta os resultados para essa condição.

Tabela 4.17 - Resultado da Lotação 3ª Simulação

RESULTADO PROCURADO	EQUAÇÃO UTILIZADA	BITOLA	
		MÉTRICA	LARGA
Raio mínimo de curva - métrica/larga (m)	-	100,00	160,00
Rampa máxima (%)	-	2,00	2,00
Esforço trator nas rodas (kgf)	4.15	22.405,68	22.405,68
Esforço trator máximo limitado (kgf)	4.16	19.800,00	20.163,00
Resistência normal da locomotiva (kg/ton)	4.8	1,85	1,83
Resistência normal do vagão tipo (kg/ton)	4.9	1,54	1,40
Resistência de curva locomotiva (kg/ton)	4.11	8,51	5,77
Resistência de curva vagão (kg/ton)	4.12	5,00	5,00
Resistência de rampa (kg/ton)	4.10	20,00	20,00
Resistência total da locomotiva (kg)	4.17	3.278,18	3.035,00
Esforço trator útil no engate da locomotiva (kgf)	4.18	16.521,82	17.128,00
Taxa de resistência total dos vagões (kg/ton)	4.19	26,85	26,83
Cálculo da lotação total do trem (ton)	4.20	615,37	638,38
Número de vagões (und)	4.21	6,15	4,91
Número de vagões considerados	-	7,00	5,00

Fonte: Elaborado Pelos Autores

Nessa simulação as rampas máximas foram extrapoladas para condicionar uma situação mais próxima da realidade das ferrovias de carga, assim a rampa máxima está em desacordo com as especificações técnicas atuais, o que resulta em uma lotação total de 615,37 e 638,38 toneladas brutas para a bitola métrica e larga respectivamente, sendo que mesmo com dois vagões a menos a bitola larga consegue puxar 23,01 toneladas a mais que a bitola métrica.

4.3.3.4. Quarta Simulação

Esse cenário é o mais equilibrado diante dos parâmetros técnicos de rampa e raio, pois mantém o raio mínimo de 100m para bitola métrica e o raio de 160m para a bitola larga e utiliza uma rampa de 1,0% para ambas as bitolas, sendo esta uma condição “intermediária” entre os parâmetros técnicos e, que atendem simultaneamente as bitolas analisadas.

Assim a tabela 4.18 apresenta os seguintes resultados.

Tabela 4.18 - Resultado da Lotação 4ª Simulação

RESULTADO PROCURADO	EQUAÇÃO UTILIZADA	BITOLA	
		MÉTRICA	LARGA
Raio mínimo de curva - métrica/larga (m)	-	100,00	160,00
Rampa máxima (%)	-	1,00	1,00
Esforço trator nas rodas (kgf)	4.15	22.405,68	22.405,68
Esforço trator máximo limitado (kgf)	4.16	19.800,00	20.163,00
Resistência normal da locomotiva (kg/ton)	4.8	1,85	1,83
Resistência normal do vagão tipo (kg/ton)	4.9	1,54	1,40
Resistência de curva locomotiva (kg/ton)	4.11	8,51	5,77
Resistência de curva vagão (kg/ton)	4.12	5,00	5,00
Resistência de rampa (kg/ton)	4.10	10,00	10,00
Resistência total da locomotiva (kg)	4.17	2.198,18	1.935,20
Esforço trator útil no engate da locomotiva (kgf)	4.18	17.601,82	18.227,80
Taxa de resistência total dos vagões (kg/ton)	4.19	16,85	16,83
Cálculo da lotação total do trem (ton)	4.20	1.044,71	1.083,04
Número de vagões (und)	4.21	10,45	8,33
Número de vagões considerados	-	11,00	9,00

Fonte: Elaborado Pelos Autores

Para essa simulação o valor de rampa máxima admitida nos cálculos para as duas bitolas foi de 1,0 % e raios mínimos de curva mantidos conforme especificações técnicas para cada bitola, resultando em diferença de peso total tracionado de 38,33 toneladas favoráveis a via de bitola larga. Isso realizando a tração do carregamento com dois vagões a menos que a simulação com a bitola de 1,00m.

4.3.3.5. Quinta Simulação

Esse cenário aproxima-se da situação “ótima”, ou seja, um melhor traçado quanto ao raio e rampa. Onde segundo Santos (2021), as ferrovias modernas devem possuir rampas máximas de 1,0% e raios superiores a 500 metros. Assim a tabela 4.19 apresenta os resultados considerando essa rampa e raio para ambas as bitolas.

Tabela 4.19 - Resultado da Lotação 5ª Simulação

RESULTADO PROCURADO	EQUAÇÃO UTILIZADA	BITOLA	
		MÉTRICA	LARGA
Raio mínimo de curva - métrica/larga (m)	-	500,00	500,00
Rampa máxima (%)	-	1,00	1,00
Esforço trator nas rodas (kgf)	4.15	22.405,68	22.405,68
Esforço trator máximo limitado (kgf)	4.16	19.800,00	20.163,00
Resistência normal da locomotiva (kg/ton)	4.8	1,85	1,83
Resistência normal do vagão tipo (kg/ton)	4.9	1,54	1,40
Resistência de curva locomotiva (kg/ton)	4.11	1,86	1,98
Resistência de curva vagão (kg/ton)	4.12	1,00	1,60
Resistência de rampa (kg/ton)	4.10	10,00	10,00
Resistência total da locomotiva (kg)	4.17	1.480,63	1.518,96
Esforço trator útil no engate da locomotiva (kgf)	4.18	18.319,37	18.644,04
Taxa de resistência total dos vagões (kg/ton)	4.19	12,85	13,43
Cálculo da lotação total do trem (ton)	4.20	1.425,80	1.388,21
Número de vagões (und)	4.21	14,26	10,68
Número de vagões considerados	-	15,00	11,00

Fonte: Elaborado Pelos Autores

Nessa última simulação as rampas máximas admitidas de ambas as bitolas foram mantidas conforme simulação 4 (1,0%) e os raios mínimos de curva majorados para 500m nas duas bitolas, o que trouxe como resultado a vantagem da bitola métrica sobre a larga, uma vez que a diferença de peso bruto total tracionado foi de 37,59 toneladas, porém foram necessários quatro vagões a mais para transportar toda a carga.

4.3.3.6. Análise geral das simulações

Nas simulações de cálculos do quadro de lotação de um trem, aplicadas as vias de bitolas de 1,0m e 1,60m, foram considerados todos os elementos técnicos e operacionais que podem influenciar direta ou indiretamente no dimensionamento dos trens e em consequência, na eficiência do transporte ferroviário de cargas.

Considerando que os gabaritos operacionais, os componentes de superestrutura e infraestrutura que compõem a seção transversal, satisfazem e viabilizam os cálculos da lotação total de um trem e a superelevação é compatível com a velocidade (crítica) introduzida nos cálculos, sendo iguais para todas as simulações apresentadas, o traçado geométrico foram os grandes diferenciais nos resultados obtidos.

Considerando as condições de traçado abordadas nas simulações, observa-se que a bitola larga consegue tracionar maiores tonelagens (lotação total do trem), quando comparado com a bitola métrica, da primeira até a quarta simulação realizada. Isso pode ser explicado

pelo fato do cálculo das resistências obterem resultados menores para a bitola larga, ou seja, a locomotiva tem uma taxa de resistência a serem superada “menor” na bitola larga quando comparado com a bitola métrica.

Já na quinta simulação, as condições de traçado são iguais para ambas as bitolas, fornecendo uma análise nas mesmas condições de traçado, onde a bitola métrica se destaca por conseguir tracionar uma tonelagem total maior que bitola larga. Isso é justificado principalmente pelo fato de que a resistência de curva, tanto para a locomotiva quanto para os vagões, foi reduzida em proporção maior na bitola larga, resultando em menor esforço trator da locomotiva e em uma maior capacidade para transportar cargas. Nesse aspecto, é possível concluir que, quando o traçado é melhorado, principalmente o raio, a bitola métrica passa a ter maior competitividade com a bitola larga.

Em referência ao transporte da carga é fundamental conhecer a real quantidade de carga que pode ser embarcado nos vagões, ou seja, a carga útil ou efetiva possível de ser transportar. Para isso é necessário subtrair a tara do vagão ou utilizar os índices de aproveitamento calculado na análise de capacidade de carga, sendo de 0,80 para o vagão carregado de minério de ferro da bitola métrica e 0,75 para a bitola larga. Esses índices estão melhor explicitados nas tabelas 4.11 e 4.12. Porém, cabe ressaltar que esses índices variam de conforme o produto e tipo de vagão.

A tabela 4.20 transcreve os resultados das simulações e as converte utilizando os índices de aproveitamento útil para estimar a carga efetiva transportada.

Tabela 4.20 - Lotação Total do Trem Aproveitamento Útil

Simulações	Lotação Total do Trem (Ton) Bitola		Fator de Aproveitamento Útil		Lotação Total Útil do Trem (Ton) Bitola	
	Métrica	Larga	Métrica	Larga	Métrica	Larga
Simulação 1	1.294,42	1.454,97			1.035,54	1.091,23
Simulação 2	780,92	902,55			624,73	676,91
Simulação 3	615,37	638,38	0,80	0,75	492,30	478,79
Simulação 4	1.044,71	1.083,04			835,77	812,28
Simulação 5	1.425,80	1.388,21			1.140,64	1.041,16

Fonte: Elaborado Pelos Autores

Ao analisar a tabela 4.20, pode-se notar que ao comparar a lotação total do trem com a lotação total útil dos vagões, a bitola métrica mostra-se mais vantajosa na terceira, quarta e quinta simulação. Como exemplo na simulação 3, percebe-se nos resultados de lotação total do trem que a bitola larga, com 638,38 toneladas, traciona 23,01 toneladas a mais que a bitola métrica, porém quando é aplicado o fator de aproveitamento útil para o cálculo da lotação total

útil a bitola métrica acaba tracionado 13,51 toneladas a mais que a bitola larga. Isso pode ser explicado por conta dos vagões projetados para atender as diferentes bitolas, possuírem dimensões e pesos diferentes, causando um desequilíbrio na relação lotação/peso total e consequentemente, impactar de forma mais acentuada nos cálculos referentes a bitola larga.

Diante das simulações realizadas, conclui-se que apesar da bitola ferroviária apresentar-se como um fator fundamental na exploração da ferrovia, as condições geométricas podem minimizar consideravelmente os impactos que a bitola pode oferecer a todo o sistema, haja vista que os cálculos trouxeram resultados operacionais muito próximos à medida que o raio mínimo de curva é ampliado e a rampa máxima é reduzida, fatores técnicos que podem melhorar significativamente o desempenho operacional de uma ferrovia.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

A importância de criar políticas públicas que tragam benefícios e incentivos aos concessionários das ferrovias no sentido de integrarem suas malhas, assim como gozarem do *direito de passagem* e do *tráfego mútuo* estabelecidos em seus respectivos contratos, são legítimos, colaborando com a melhoria na eficiência do sistema ferroviário de cargas do país.

Para que o transporte ferroviário passe a ter a participação que merece no mercado e que tenha o crescimento que o país exige, são necessárias ações que promovam a integração entre as diversas operadoras, permitindo que elas busquem cargas em qualquer ponto do país, estejam ou não dentro de sua área de controle. Portanto, o Governo e as empresas concessionárias devem dividir as responsabilidades e ações para que o transporte ferroviário reverta a atual matriz de transportes.

A integração favorece não somente aos concessionários, mas também amplia as oportunidades de quem a utiliza direta e indiretamente para planejar a logística de escoamento de suas mercadorias, ou seja, o cliente (usuário da via) e o consumidor final (sociedade) são beneficiados com menor custo de um transporte integrado.

No contexto de integração ferroviária, a análise entre as principais bitolas ferroviárias em operação no país buscou, dentre os fatores técnicos e operacionais, nortear os critérios para a escolha da melhor bitola a ser empregada na uniformização da malha ferroviária de cargas do Brasil, atribuindo às linhas já implantadas peso significativo em uma análise de integração, preservando a estabilidade econômica e operacional das ferrovias que as operam e dando a oportunidade dessas mesmas empresas de ampliar o seu mercado de atuação.

Para a análise desse estudo, foram considerados elementos de traçado como rampas máximas e raios mínimos, elementos de superestrutura e infraestrutura, assim como elementos fundamentais para a operação como gabaritos, velocidade e capacidade de carga, que subsidiaram os cálculos de resistência e de tração, resultando no cálculo de lotação de um trem em cada uma das bitolas estudadas.

Nos comparativos de raios mínimos de curva e rampas máximas, a análise indicou desempenho muito próximo entre as bitolas estreita e larga quando esses elementos de traçado são melhorados. A bitola métrica é mais indicada para situações desfavoráveis de geometria da via, ou seja, é mais adequada para locais onde o relevo é mais acidentado.

Nos elementos de seção transversal da via, como materiais de superestrutura (dormentes, lastro e sublastro) por exemplo, as análises apontaram para um consumo maior na bitola larga, resultando em custos de implantação e manutenção mais elevadas nessa bitola, sendo nesse quesito mais vantajoso economicamente a bitola métrica.

Nas análises de velocidade e superelevação, houve variações entre as bitolas na velocidade de projeto favorável à bitola larga quanto ao desempenho, vantagem esta que pode ser alterada em função da velocidade operacional da ferrovia, motivada por fatores externos à operação, ou seja, neste caso, a análise torna-se subjetiva, não sendo a bitola o fator preponderante para determinar a velocidade comercial de uma ferrovia.

Nos gabaritos de via, foi utilizado como referência a norma técnica brasileira que trata desse assunto, concluindo que no gabarito entrelaço não ocorre nenhuma variação conforme mudança de bitola, porém nos gabaritos de obras de arte especiais e nos gabaritos de terraplenagem haverá impactos econômicos à medida que a bitola de maior seção for escolhida para construção.

Nos cálculos de capacidade de carga, os vagões de minério de ferro utilizados para os comparativos ofereceram maior capacidade de carga para a bitola larga, porém o aproveitamento útil do vagão de minério de ferro da bitola métrica foi maior, fator este considerado, para determinar nos cálculos de esforço trator a lotação total útil transportada.

Em simulações com os elementos técnico-operacionais, foi calculado para as bitolas métrica e larga, as resistências ao movimento, cujo esforço trator da locomotiva deve superar para movimentar cada composição dimensionada. Foi observado que em análise geral, a bitola larga possui menores resistências ao movimento, porém ao analisar a quantidade de vagões carregados, a bitola métrica transporta maior número de vagões. Isso pode ser explicado pela grande diferença de tara entre os vagões de bitola estreita e larga.

Os cálculos de lotação total do trem e de lotação total útil trouxeram resultados que destacam a importância dos elementos geométricos da via na capacidade de carregamento do comboio, pois a melhoria do traçado permite o maior aproveitamento da potência efetiva da locomotiva.

Considerando as análises e aspectos apresentados neste trabalho entre as bitolas métrica e larga, conclui-se que é uma alternativa conveniente para a integração da malha ferroviária do Brasil, de forma racional, a aplicação da bitola mista, utilizando as duas bitolas abordadas nas análises na mesma infraestrutura, desde que implementada em trechos

estratégicos para este objetivo. Neste caso, a medida de unificar através da bitola mista não inutiliza o material rodante e não promove outros custos com adequações em infraestrutura do modal ferroviário, restringindo os custos apenas ao lançamento do terceiro trilho nas vias conforme forem surgindo as demandas de integração ferroviária.

Com relação a novos projetos, ou seja, ações de ampliação da malha de médio a longo prazo, os trechos devem ser construídos em bitola larga com preparação para o terceiro trilho em bitola métrica, pois, na bitola larga os parâmetros de traçados geométricos por força de normas e especificações técnicas são mais rigorosos, permitindo desempenho operacional semelhante entre as bitolas. O aporte financeiro na elaboração de projetos e nos aspectos construtivos na bitola larga vão resultar na mitigação dos efeitos da falta de integração da malha nacional e, ao mesmo tempo, aumentando a produtividade das ferrovias, uma vez que são medidas em tonelada quilômetro-útil (TKU), ou seja, a maior distância percorrida de forma contínua evitará custos excepcionais com transbordo e aumentará a rentabilidade.

Para complementação desta análise, recomenda-se para trabalhos futuros um estudo sobre fatores econômicos importantes à integração ferroviária, se possível realizando estudo de caso aplicado às ferrovias de cargas no Brasil.

No trabalho realizado foram citados fatores limitantes ao desempenho operacional, que também podem ser estudados com maior profundidade em trabalhos futuros, como as invasões de faixa de domínio da ferrovia, traçados urbanos críticos e ações de vandalismo em ativos operacionais, fatores estes que afetam principalmente a velocidade comercial e o ciclo de carga e descarga dos vagões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 12915 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12915: Via Férrea - Gabarito Ferroviário e Entrelaço - Especificações**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 28. 2020. (ABNT NBR 12915:2020).

ANTT. **Relatório Anual de Atividades**. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Brasília, p. 169. 2018.

ARAÚJO, DÉLIO. Bitola métrica ou larga: Um estudo do ponto de vista econômico das ferrovias (I). **Centro-Oeste**, Abril-Maio 1986. Disponível em: <http://vfco.brazilia.jor.br/ferrovias/bitolas/CO-15-bitola-Metrica-Larga-estudo-economia-1.shtml>. Acesso em: 22 outubro 2022.

ARAÚJO, DÉLIO. Bitola Métrica ou Larga: Um Estudo do Ponto de Vista Econômico das Ferrovias (II). **Centro-Oeste**, julho e agosto 1986. Disponível em: <http://vfco.brazilia.jor.br/ferrovias/bitolas/CO-17-bitola-Metrica-Larga-estudo-economia-2.shtml>. Acesso em: 22 abril 2023.

ARAÚJO, DÉLIO. A Unificação das Bitolas Ferroviárias (I): O Caso das Ferrovias da Inglaterra. **Centro-Oeste**, 10 abril 1992. Disponível em: <http://vfco.brazilia.jor.br/ferrovias/bitolas/unificacao-bitola-ferrovias-Inglaterra.shtml>. Acesso em: 7 março 2023.

ARAÚJO, DÉLIO. A Unificação das Bitolas Ferroviárias (II): O Caso das Ferrovias dos Estados Unidos e Canadá. **Centro-Oeste**, 1 julho 1992. Disponível em: <http://vfco.brazilia.jor.br/ferrovias/bitolas/unificacao-bitola-ferrovias-Estados-Unidos-Canada.shtml>. Acesso em: 7 março 2023.

ARAÚJO, DÉLIO. A Unificação das Bitolas Ferroviárias (III): O Caso da Europa Continental. **Centro-Oeste**, 1 fevereiro 1993. Disponível em: <http://vfco.brazilia.jor.br/ferrovias/bitolas/unificacao-bitola-ferrovias-Europa.shtml>. Acesso em: 7 março 2023.

ARAÚJO, DÉLIO. A Unificação das Bitolas Ferroviárias (IV): O Caso das Ferrovias do Japão. **Centro-Oeste**, 1 março 1993. Disponível em:

<http://vfco.brazilia.jor.br/ferrovias/bitolas/unificacao-bitola-ferrovias-Japao.shtml>. Acesso em: 7 março 2023.

BARROS, JOSÉ M. F. M. Avaliação dos Principais Métodos Analíticos de Cálculo de Capacidade de Tráfego Utilizados em Ferrovias. **ANTF - Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários**, Setembro 2021. Disponível em: https://www.antf.org.br/_uploads/2021/09/Avalia%C3%A7%C3%A3o-dos-principais-m%C3%A9todos-anal%C3%ADticos-de-c%C3%A1lculo-de-capacidade-de-tr%C3%A1fego.pdf. Acesso em: 18 Setembro 2023.

BNDES. Ferrovias de Carga Brasileiras: Uma Análise Setorial. **BNDES**, setembro 2017. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14136/2/BNDES-Setorial-46_Ferrovias_P.pdf. Acesso em: 23 abril 2023.

BOITEUX, PAULO C. S. **História das Ferrovias Brasileiras**. 1. ed. Retiro das Palmeiras: Letra Capital Editora, 2014. 98 p.

BRASIL FERROVIÁRIO. História da Ferrovia. **Brasil Ferroviário**, 18 agosto 2010. Disponível em: <https://www.brasilferroviario.com.br/historia-da-ferrovia/>. Acesso em: 9 setembro 2023.

BRASIL FERROVIÁRIO. Trilho. **Brasil Ferroviário**, 12 março 2018. Disponível em: <https://www.brasilferroviario.com.br/trilho/>. Acesso em: 7 maio 2023.

BRASIL FERROVIÁRIO. Ferroeste. **Brasil Ferroviário**, 10 janeiro 2020. Disponível em: <https://www.brasilferroviario.com.br/ferroeste/>. Acesso em: 7 maio 2023.

BRASIL FERROVIÁRIO. Gabarito Ferroviário. **Brasil Ferroviário**, Junho 2021. Disponível em: <https://www.brasilferroviario.com.br/gabarito-ferroviario/>. Acesso em: 7 maio 2023.

BRINA, HELVÉCIO L. **Estradas de Ferro 1: Via Permanente**. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 1983. 480 p.

BRINA, HELVÉCIO L. **Estradas de Ferro 2: Material Rodante, Tração e Dinâmica dos Trens**. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 1988. 216 p.

CASSEMIRO, SÉRGIO L. D. S. **Procedimento para Planejamento de Alocação de Locomotivas**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, p. 129. 2017.

CAVALCANTI, FLAVIO R. Gabaritos de via: EFCB - Estrada de Ferro Central do Brasil, VFRGS - Viação Férrea do Rio Grande do Sul. **Centro-Oeste**. Disponível em:

<http://vfco.brazilia.jor.br/ferrovias/bitolas/gabaritos-de-via-EFCB-VFRGS.shtml>. Acesso em: 9 maio 2023.

CHANDRA, SATISH; AGARWAL, M.M. **Railway Engineering**. New Delhi: Oxford University Press, 2007. Disponível em: https://priodeep.weebly.com/uploads/6/5/4/9/65495087/ebook_-_railway_engineering_.pdf. Acesso em: 25 set. 2023.

CNT. O Sistema Ferroviário Brasileiro. **CNT**, 2013. Disponível em: <file:///C:/Users/romul/Downloads/Transporte%20&%20Economia%20-%20O%20Sistema%20Ferrovi%C3%A1rio%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 16 set. 2023.

CNT. Pesquisa CNT de Ferrovias 2015. **CNT**, 2015. Disponível em: <https://cnt.org.br/pesquisa-cnt-ferrovias>. Acesso em: 23 abril 2023.

CURY, MARCUS V. Q. Escolha Entre a Bitola Larga Brasileira e a Bitola Internacional Padrão para a Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 19, 5 janeiro 2011. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/581703111/ESTUDO-DE-BITOLAS#>. Acesso em: 8 abril 2023.

DIÁRIO DO AMAPÁ. Diário do Amapá. **Diário**, 1 setembro 2017. Disponível em: <https://www.diariodoamapa.com.br/cadernos/turismo/estrada-de-ferro/>. Acesso em: 22 maio 2023.

DNIT. **ISF-2016: Projeto de Obras de Arte Especiais**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. [S.l.]. 2015.

DNIT. Glossário de Termos Ferroviários. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**, 31 maio 2016a. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/ferrovias/glossario-de-termos-ferroviarios/glossario-de-termos-ferroviarios>. Acesso em: 25 set. 2023.

DNIT. **Procedimento de Inspeção de Material: PIM 14 - Dormente de Madeira**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasília, p. 46. 2016b. (PIM 014).

ESVELD, C. **Modern Railway Track**. Second Edition. ed. Delft: MRT-Productions, 2001. Disponível em: https://www.academia.edu/40921895/MODERN_RAILWAY_TRACK_Second_Edition. Acesso em: 25 ago. 2023.

FERROVIAS E TRENS. Facebook. **Ferrovias & Trens - Medidas de Trilhos**, 15 nov. 2018. Disponível em: <https://www.facebook.com/ferroviastrens1/posts/medidas-de-trilhos/1164359630393779/>. Acesso em: 12 out. 2023.

FILOMENO, PAULO R. Unificação de bitolas ferroviárias no Brasil: sonho ou mera possibilidade? **Potogente**, 17 novembro 2008. Disponível em: <https://portogente.com.br/noticias/transporte-logistica/20465-unificacao-de-bitolas-ferroviarias-no-brasil-sonho-ou-mera-possibilidade>. Acesso em: 8 abril 2023.

KLINCEVICIUS, MARY G. Y. Teses e Dissertações - USP. **Biblioteca Digital**, 2011. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-27032012-121114/publico/>. Acesso em: 9 Junho 2013.

MAURÍCIO, PAULO. Paulo Maurício Ferrovias. **Classificação de Vagões no Brasil**, 5 jul. 2023. Disponível em: <https://paulomauricioferrovia.com.br/2022/06/01/classificacao-de-vagoes-no-brasil/>. Acesso em: 13 out. 2023.

MOREIRA, WELISON S.; MARQUES, JAFFER J.; OLIVEIRA, JUCELAINE L. D. Diferenças Métricas de Bitolas: Impactos Causados nas Operações Ferroviárias no Sudeste Brasileiro. **FatecLOG**, p. 10, 29 e 30 maio 2020. Disponível em: [https://fateclog.com.br/anais/2020/DIFEREN%C3%87AS%20M%C3%89TRICAS%20DE%20BITOLAS%20IMPACTOS%20CAUSADOS%20NAS%20OPERA%C3%87%C3%95ES%20FERROVI%C3%81RIAS%20NO%20SUDESTE%20BRASILEIRO\(1\).pdf](https://fateclog.com.br/anais/2020/DIFEREN%C3%87AS%20M%C3%89TRICAS%20DE%20BITOLAS%20IMPACTOS%20CAUSADOS%20NAS%20OPERA%C3%87%C3%95ES%20FERROVI%C3%81RIAS%20NO%20SUDESTE%20BRASILEIRO(1).pdf). Acesso em: 13 abril 2023.

MUNDREY, J. S. **Railway Track Engineering**. Fourth Edition. ed. New Delhi: Tata McGraw, 2010. Disponível em: <http://ndl.ethernet.edu.et/handle/123456789/45391>. Acesso em: 20 set. 2023.

NABAIS, RUI J. D. S. **Manual Básico de Engenharia Ferroviária**. São Paulo: ABP, 2014.

ONTL. A Retomada dos Investimentos Ferroviários para Aumentar a Eficiência da Matriz de Transportes. **Boletrim de Logística**, Brasília, junho 2021. 46. Disponível em: <https://ontl.epl.gov.br/wp-content/uploads/2021/06/Setor-Ferroviario-Brasileiro.pdf>. Acesso em: 24 março 2023.

PAIVA, CASSIO E. L. D. **Super e Infraestruturas de Ferrovias: Critérios para Projeto**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

PAZ, IZAKIEL B. F.; OLIVEIRA, FRANCISCO H. L. Análise dos Métodos de Cálculo de Superelevação Ferroviária em Transporte de Cargas. **Anais do XXIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, ANPET**, Fortaleza, Novembro 2015. Disponível em: http://146.164.5.73:20080/ssat/interface/content/anais_2015/TrabalhosFormatados/AC648.pdf. Acesso em: 28 Agosto 2023.

PEREIRA, ANTÔNIO L. **Estradas Rodovias e Ferrovias: Projeto e Construção**. Rio de Janeiro: LTDA, 1958. 594 p.

PLANETA FERROVIA. Bitolas Ferroviárias. **Planeta Ferrovia**, 22 março 2014. Disponível em: <http://planetaferrovia.blogspot.com/2014/01/bitolas-ferroviarias.html>. Acesso em: 7 março 2023.

PORTO, PROF. D. T. G. USP - Universidade de São Paulo. **Departamento de Engenharia de Transportes - PTR 2501 Ferrovias**, 2004. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/ptr0540/download/ApostilaNova.pdf>. Acesso em: 9 Agosto 2023.

PROFILLIDIS, V.A. **Railway Management and Engineering**. Fourth Edition. ed. England: Ashgate Publishing Limited, 2014. Disponível em: https://www.academia.edu/43349392/V_A_PROFILLIDIS_RAILWAY_MANAGEMENT_AND_ENGINEERING. Acesso em: 20 set. 2023.

RIBEIRO, RÔMULO L. P. **ANÁLISE AUTOMÁTICA DE NORMAS APLICADA EM PROJETO GEOMÉTRICO DE SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA**. UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Belo Horizonte, p. 115. 2018.

RITA, LEONARDO D. C. S. S. **Projeto geométrico de rodovias e ferrovias: especificidades (ou diferenças) do projeto geométrico das ferrovias em comparação com o projeto geométrico**. São Cristóvão: [S.n.], 2015. Disponível em: https://www.academia.edu/19345666/Projeto_Geom%C3%A9trico_Rodovia_x_Ferrovia. Acesso em: 8 Junho 2023.

RODRIGUES, RUI F. Mudanças de Bitola: Imperativo Nacional, Junho 2001. Disponível em: <https://web.fe.up.pt/~ee96127/artigos/BIBITOLA2.pdf>. Acesso em: 2 abril 2023.

ROSA, RODRIGO D. A. **Operação Ferroviária: Plabejamento, Dimensionamento e Acompanhamento**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

ROSA, RODRIGO D. A.; RIBEIRO, RÔMULO C. H. **Estradas de Ferro: Projeto Especificações & Construção**. Espírito Santo: EDUFES, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/11609>. Acesso em: 23 Agosto 2023.

SANTOS, SÍLVIO D. A Origem das Bitolas das Ferrovias. **Portogente**, 29 outubro 2007. Disponível em: <https://portogente.com.br/artigos/14742-a-origem-das-bitolas-das-ferrovias>. Acesso em: 5 março 2023.

SANTOS, SILVIO D. A Capacidade dos Trens de Carga. **Portogente**, 30 junho 2020. Disponível em: <https://portogente.com.br/colunistas/silvio-dos-santos/13884-a-capacidade-dos-trens-de-carga>. Acesso em: 5 março 2023.

SANTOS, SÍLVIO D. **Transporte Ferroviário: História e Técnicas**. 2. ed. Florianópolis: [S.n.], 2021. Disponível em: <https://www.sie.sc.gov.br/webdocs/sie/doc-tecnicos/livros-e-publicacoes/Transporte%20Ferrovi%C3%A1rio%20Hist%C3%B3ria%20e%20T%C3%A9cnicas%20-%202022%20-%20%202%C2%AA%20Edi%C3%A7%C3%A3o%20S%C3%ADlvio%20dos%20Santos.pdf>. Acesso em: 09 out. 2023.

SETTI, JOSÉ R. A. USP - Universidade de São Paulo, Repositório Institucional EESC. **Tecnologia de Transportes**, São Carlos, 23 out. 2002. Disponível em: <http://repositorio.eesc.usp.br/server/api/core/bitstreams/ac62a4f5-de15-42a1-88eb-1c0551b2a704/content>. Acesso em: 23 out. 2023.

TAMAGUSKO, TIAGO B. Custo da Falta de Padronização das Bitolas. **https://www.researchgate.net/publication/343628852_Custo_da_Falta_de_Padronizacao_das_Bitolas_Ferrovias_no_Brasil**, Florianópolis, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343628852_Custo_da_Falta_de_Padronizacao_das_Bitolas_Ferrovias_no_Brasil. Acesso em: 2 maio 2023.

UFSC. Sistema de Troca Automática de Bitola tem Primeira Fase de Testes Concluída. **Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville - Observatório Metro-Ferroviário**, 25 julho 2017. Disponível em: <https://observatoriometroferro.ufsc.br/2017/07/25/sistema-de-troca-automatica-de-bitola-tem-primeira-fase-de-testes-concluida/>. Acesso em: 8 abril 2023.

VALE. **Manual Técnico da Via Permanete**. [S.l.], p. 326. 2009.