

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**VANESSA PINTO BESSA**

**AVALIAÇÃO DA SUPERELEVÇÃO EM FERROVIAS: um estudo de caso**

São Luís - MA  
2018

**VANESSA PINTO BESSA**

**AVALIAÇÃO DA SUPERELEVAÇÃO EM FERROVIAS: um estudo de caso**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Esp. Thasso Colins Gonçalves

São Luís - MA  
2018

**Bessa, Vanessa Pinto.**

**Avaliação da superelevação em ferrovias: um estudo de caso /  
Vanessa Pinto Bessa. – São Luís, 2018.**

**75 f**

**Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade  
Estadual do Maranhão, 2018.**

**Orientador: Prof. Esp. Thasso Colins Gonçalves.**

**1.Parâmetros geométricos. 2.Superelevação. 3.Defeitos. 4.Desgaste.  
5.Velocidade. I.Título**

**CDU: 625.41**

**VANESSA PINTO BESSA**

**AVALIAÇÃO DA SUPERELEVAÇÃO EM FERROVIAS: um estudo de caso**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Esp. Thasso Colins Gonçalves

Aprovado em: 04 / 12 / 18

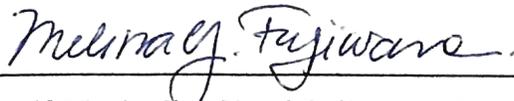
**BANCA EXAMINADORA**



**Prof. Esp. Thasso Colins Gonçalves – Orientador**  
Universidade Estadual do Maranhão



**Prof. Esp. Daniel Maia de Carvalho – 1º membro**



**Prof.ª Me. Melina Yumi Fujiwara – 2º membro**

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família e amigos, pelo suporte de sempre e por acreditar no meu potencial. Ao professor Thasso Colins, pela grande colaboração durante o trabalho. À Vale e a toda a equipe de Engenharia de Via Permanente, pelo apoio nesta jornada final. À UEMA, pela grande contribuição na minha formação profissional.

## RESUMO

A superelevação das curvas é um fator primordial na definição do projeto geométrico de uma ferrovia. A dinâmica ferroviária, contudo, muitas vezes gera atualizações na operação das ferrovias sem que haja simultaneamente a revisão dos parâmetros geométricos da via permanente. Esta pesquisa, baseada nos dados de campo de inspeção do Carro Controle na Estrada de Ferro Carajás, propõe um mapeamento das superelevações de projeto e as superelevações reais, velocidades de projeto e de operação e medições técnicas, verificando o efeito da superelevação no desgaste e na formação de defeitos dos trilhos interno e externo das curvas. Buscou-se correlacionar a superelevação e seus parâmetros (bitola, raio e velocidade) às condições de desgaste (vertical e lateral) e defeitos (RCF) nos trilhos em 7 curvas ferroviárias para os 4 raios tipos da Estrada de Ferro Carajás. Os resultados obtidos são analisados e o papel da superelevação e demais parâmetros geométricos no desgaste de trilhos é discutido. A otimização nos valores de superelevação e/ou velocidades na Estrada de Ferro Carajás, minimiza o desgaste desuniforme dos trilhos, e ameniza o efeito natural de consumo maior de trilhos em curvas, visto que este é um ativo de alto custo para a manutenção ferroviária. Recomendações para prevenção ou redução do desgaste ferroviário e defeitos são apresentadas.

Palavras-chave: Parâmetros Geométricos. Superelevação. Defeitos. Desgaste. Velocidade.

## **ABSTRACT**

The superelevation in curves is a primordial factor in the definition of the geometric design of a railway. Rail dynamics, however, often generates updates on the operation of railways without simultaneously revising the geometric parameters of the rail track. This work, based on data from a field inspection in Carajás Railway Measuring Car, proposes a mapping of design and real superelevation, design and operating speeds and technical measurements, verifying the effect of superelevation on wear and in the formation of defects on low and high rails of the curves. It was sought to correlate the superelevation and its parameters (gauge, radius and speed) to wear conditions (vertical and lateral) and defects (RCF) in the rails of 7 railway curves for the 4 types of radius in Carajás Railway. The results obtained are analyzed and the role of superelevation and other geometrical parameters in the wear of rails is discussed. The optimization of superelevation values and/or speeds in the Carajás Railway minimizes the uneven wear of the rails and reduces the natural effect of greater degradation of rails on curves, since this is a high-cost asset for railway maintenance. Recommendations for prevention or reduction of rail wear and defects are presented.

**Key Words:** Geometric parameters. Superelevation. Defects. Wear. Speed.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Plataforma Ferroviária.....	19
<b>Figura 2</b> - Elementos da Infraestrutura Ferroviária.....	20
<b>Figura 3</b> - Elementos da superestrutura da Via Permanente.....	21
<b>Figura 4</b> - Desenho esquemático de uma bitola.....	22
<b>Figura 5</b> - Alargamento de bitola.....	23
<b>Figura 6</b> - Estreitamento de bitola.....	23
<b>Figura 7</b> - Planimetria Geométrica: Tangentes e curvas.....	24
<b>Figura 8</b> - Jogo de Bitola.....	25
<b>Figura 9</b> - Superelevação ao longo da curva.....	26
<b>Figura 10</b> - Forças atuantes no vagão quando inscrito em uma curva.....	27
<b>Figura 11</b> - Variação nas cargas vertical e lateral de acordo com um intervalo de deficiência de superelevação (a & c) e velocidade (b & d).....	30
<b>Figura 12</b> - Altimetria da rampa.....	31
<b>Figura 13</b> - Representação dos desgastes lateral e vertical no trilho.....	33
<b>Figura 14</b> - Desgaste lateral em curvas.....	33
<b>Figura 15</b> - Trem esmerilhador da MRS.....	36
<b>Figura 16</b> - Representação dos valores ideais de coeficiente de atrito.....	36
<b>Figura 17</b> - Localização da Estrada de Ferro Carajás.....	38
<b>Figura 18</b> - Altimetria da EFC, em cota por quilômetro.....	40
<b>Figura 19</b> - Modelo de carro controle utilizado pela EFC.....	40
<b>Figura 20</b> - Modelo de Planilha extraída das medições do Carro Controle.....	41
<b>Figura 21</b> - Detalhe da sobreposição de um perfil de referência e um perfil medido no campo.....	42
<b>Figura 22</b> - Comparação das velocidades de operação em 2008, do PRO 2018 e velocidade real das curvas.....	44
<b>Figura 23</b> - Comparação das superelevações de projeto e superelevações médias reais das curvas.....	46
<b>Figura 24</b> - Porcentagem de curvas com superelevação real maior e menor que a teórica (PRO).....	47

<b>Figura 25</b> - Situação do desgaste para a) trilho externo e b) trilho interno.....	48
<b>Figura 26</b> - Situação dos defeitos superficiais para a) trilho externo e b) trilho interno. ....	48
<b>Figura 27</b> - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho interno da curva 1. .....	51
<b>Figura 28</b> - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 1 para a) o trilho interno e b) trilho externo.....	51
<b>Figura 29</b> - Correlação entre a superelevação e a soma de RCF para a curva 1 no a) trilho interno e b) trilho externo.....	52
<b>Figura 30</b> - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 1 para a) o trilho interno e b) trilho externo. ....	53
<b>Figura 31</b> - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho externo da curva 2. .....	54
<b>Figura 32</b> - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 2 para a) o trilho interno e b) trilho externo.....	55
<b>Figura 33</b> - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 2 para a) o trilho interno e b) trilho externo. ....	55
<b>Figura 34</b> - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho interno da curva 3. .....	56
<b>Figura 35</b> - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 3 para a) o trilho interno e b) trilho externo.....	57
<b>Figura 36</b> - Correlação entre a superelevação e a soma de RCF para a curva 3 no a) trilho interno e b) trilho externo.....	57
<b>Figura 37</b> - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 3 para a) o trilho interno e b) trilho externo. ....	58
<b>Figura 38</b> - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho externo da curva 4. .....	59
<b>Figura 39</b> - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 4 para a) o trilho interno e b) trilho externo.....	59
<b>Figura 40</b> - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 4 para a) o trilho interno e b) trilho externo. ....	60

<b>Figura 41</b> - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho interno da curva 4. .....	60
<b>Figura 42</b> - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 5 para a) o trilho interno e b) trilho externo.....	61
<b>Figura 43</b> - Correlação entre a superelevação e a soma de RCF para a curva 5 no a) trilho interno e b) trilho externo.....	62
<b>Figura 44</b> - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 5 para a) o trilho interno e b) trilho externo. ....	63
<b>Figura 45</b> - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho externo da curva 6. .....	63
<b>Figura 46</b> - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 6 para a) o trilho interno e b) trilho externo.....	64
<b>Figura 47</b> - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 6 para a) o trilho interno e b) trilho externo. ....	65
<b>Figura 48</b> - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho interno da curva 7. .....	65
<b>Figura 49</b> - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 7 para a) o trilho interno e b) trilho externo.....	66
<b>Figura 50</b> - Correlação entre a superelevação e a soma de RCF para a curva 7 no a) trilho interno e b) trilho externo.....	67
<b>Figura 51</b> - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 7 para a) o trilho interno e b) trilho externo. ....	67

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Critérios para o Cálculo da superelevação Prática. ....	28
<b>Tabela 2</b> - Tolerâncias de bitola para a EFC. ....	39
<b>Tabela 3</b> - Quantitativo de Curvas da EFC por família.....	39
<b>Tabela 4</b> - Categorização por faixa de desgaste de trilhos. ....	42
<b>Tabela 5</b> - Categorização por faixa de defeitos superficiais em trilhos. ....	43
<b>Tabela 6</b> - Comparação das velocidades médias de projeto com as velocidades médias reais em curvas. ....	45
<b>Tabela 7</b> - Características das curvas selecionadas.....	50

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

EFC Estrada de Ferro Carajás

G Grande

M Médio

P Pequeno

RCF Fadiga por Contato

RRFSA Rede Ferroviária Federal S.A.

VMA Velocidade Máxima Permitida

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>15</b>
3.1	Geral .....	17
3.2	Específicos .....	17
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
4.1	O modal ferroviário .....	18
4.2	A Via Permanente .....	19
4.2.1	A Infraestrutura da Via Permanente .....	20
4.2.2	A Superestrutura da Via Permanente.....	20
4.3	Aspectos Geométricos da Via Permanente.....	21
4.3.1	Bitola.....	21
4.3.2	Tangentes .....	23
4.3.3	Curvas Horizontais .....	24
4.3.4	Superlargura .....	25
4.3.5	Superelevação.....	26
4.3.6	Rampas Verticais.....	31
4.4	Vida Útil dos Trilhos.....	32
4.4.1	Desgaste dos Trilhos.....	32
4.4.2	Defeitos.....	34
4.4.3	Gestão do atrito .....	35
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>37</b>
5.1	Metodologia .....	37
5.2	Estrada de Ferro Carajás – EFC .....	38
5.2.1	Características Geométricas .....	39
5.2.2	Inspeção de Via - O Carro Controle .....	40
5.2.3	Critérios de substituição de trilhos .....	41

5.3	Dados Preliminares.....	43
5.3.1	Velocidade de Projeto, Operacional e Real .....	43
5.3.2	Superelevações teóricas, práticas e reais .....	45
5.3.3	Situação dos trilhos nas curvas.....	47
5.4	Seleção das Curvas para Análise.....	49
5.5	Análise das Curvas .....	50
5.5.1	Curva 1 (Excesso de Superelevação).....	50
5.5.2	Curva 2 (Deficiência de Superelevação).....	53
5.5.3	Curva 3 (Excesso de superelevação) .....	56
5.5.4	Curva 4 (Deficiência de Superelevação).....	58
5.5.5	Curva 5 (Excesso de Superelevação).....	60
5.5.6	Curva 6 (Deficiência de Superelevação).....	63
5.5.7	Curva 7 (Excesso de Superelevação).....	65
5.5.8	Modelo de correlação (superelevação, bitola, velocidade e raio) .....	68
5.6	Resultados .....	69
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O projeto geométrico é o fator chave para a definição de uma estrada segura e eficiente, seja ela rodovia ou ferrovia. Alguns aspectos, no entanto, são variáveis dependendo do tipo de estrada, como por exemplo o tipo de veículo que irá circular na via, dinâmica do movimento, além da determinação dos elementos horizontais e verticais ideais para os quais a eficiência da via e a segurança transmitida aos usuários (cargas ou pessoas) são garantidas. Dentre os elementos geométricos deste tipo de projeto, um dos mais importantes é a superelevação.

De acordo com Klein e Sinay (2004), quando um móvel qualquer percorre um caminho curvo, naturalmente ele sofre uma aceleração centrífuga que depende da velocidade do móvel. Esta aceleração pode ser compensada com uma inclinação lateral do caminho, que no caso das ferrovias, é obtida através da superelevação do trilho externo. Através do equilíbrio das forças peso e força centrífuga, pode-se chegar ao cálculo da superelevação teórica, que corresponde ao valor máximo que este desnível pode atingir sem que ocorra o tombamento.

Para Brina (1988):

Para contrabalancear o efeito nocivo da força centrífuga, inclina-se a via ferroviária de um ângulo  $\alpha$ , elevando o trilho externo da curva, através da inclinação do dormente, de modo a criar uma componente que equilibre a força centrífuga. A maior altura do trilho externo em relação ao interno é o que se denomina de superelevação do trilho ou superelevação da via. (BRINA, 1988, p. 124).

Na prática, contudo, diversos tipos de trens de diferentes configurações utilizam uma mesma ferrovia, o que acaba causando uma diferença nas velocidades operacionais com que cada trem distinto percorre uma mesma curva. Para Klein e Sinay (2004), a superelevação teórica calculada não poderá ser mantida se uma mesma via é percorrida por trens com velocidades distintas. Ao aplicar, por exemplo, a superelevação teórica com base no trem de maior velocidade, para os trens de menor velocidade, haverá uma aceleração lateral para dentro da curva (cujo valor absoluto aumenta diretamente em função da diferença dessas velocidades) e com isso uma super-solicitação do trilho interno, dificultando a rodagem e impondo maiores esforços transversais na via. A superelevação necessária para alguns tipos de veículos é excessiva para outros, e nesse sentido, para tentar amenizar esta diferença, utiliza-se a denominada superelevação prática, baseada em fórmulas

empíricas. A superelevação prática normalmente será o valor do desnível que será implantado na superestrutura da via.

Considerando a variação de velocidades de circulação para trens distintos em curvas ferroviárias, não se pode garantir o equilíbrio para todos os trens, pois já é esperado que haja um desgaste não-uniforme nos trilhos, e que este desgaste ocorra de forma acentuada em um dos lados da curva. Normalmente, prefere-se que este desgaste ocorra no trilho externo, uma vez que a outra opção pode trazer efeitos muito mais nocivos para o trilho.

## 2 JUSTIFICATIVA

O modal ferroviário vem cada vez mais sendo utilizado no mundo inteiro, devido a sua grande vantagem no transporte de mercadorias volumosas e pesadas, a médias e longas distâncias. A utilização de ferrovias permite uma elevada capacidade de carga transportada (mercadorias ou pessoas) em um curto período de tempo, com baixo consumo de energia por unidade deslocada.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Ferroviária, o Brasil possui cerca de 28 mil quilômetros de ferrovias que interligam as várias regiões do país e devido a grande produção de minérios, possui três das maiores ferrovias do mundo. Contudo, os desafios a serem enfrentados e gargalos na manutenção ainda são significativos. De acordo com Klein e Sinay (2004), o volume de cargas transportadas por via férrea nos últimos 10 anos teve um aumento de 45% e R\$ 4,5 bilhões foram investidos no setor para atender a crescente demanda de transporte e modernizar a malha ferroviária do país.

Dessa forma, vem sendo exigida, na última década, uma reestruturação das ferrovias, tornando as análises de manutenção um fator primordial para garantir a qualidade da via permanente a longo prazo e sustentar as necessidades de aumento de carga anual transportada.

De acordo com Larsson (2004), pequenas mudanças na estratégia de manutenção podem estender a vida dos ativos em 10%, resultando na melhoria do retorno sob o investimento. Sgavioli, Bernucci e Motta, (2015) ressalta que a degradação da condição da via permanente de carga ocorre rapidamente e assim, o conhecimento deste processo de degradação colabora para análises futuras de mitigação dos problemas relacionados à segurança operacional. Uma das principais causas de ocorrências ferroviárias são os defeitos na via permanente, podendo estes ser estruturais ou geométricos. Os estruturais são ocasionados pela condição da via, levando em consideração a situação da denominada superestrutura (trilho, dormentes, sistema de fixação, lastro, sublastro), assim como da infraestrutura (subleito e sistema de drenagem). Os defeitos geométricos, por sua vez, referem-se àqueles relacionados ao nivelamento transversal e longitudinal, bitola e empeno.

Estudos publicados por Larsson (2004) verificaram que o desgaste e a fadiga do trilho são consideravelmente afetados pela existência da curvatura horizontal. A degradação dos trilhos é um dos maiores problemas enfrentados pelas companhias ferroviárias de todo o mundo, sendo o trilho o ativo responsável pelo maior custo com manutenção dentro do sistema ferroviário. Segundo

Coelho et al. (1982), o desgaste em curvas é sem dúvida alguma a principal razão de substituição de trilhos em todas as ferrovias.

Nesse sentido, análises referentes aos parâmetros geométricos (superelevação, bitola e raio) e operacionais (velocidades) existentes nas curvas e à degradação dos trilhos tornam-se essenciais, colocando em discussão medidas possíveis para a redução do custo de manutenção relacionado a este ativo.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Geral

Avaliar a superelevação em trechos de curva em ferrovia de carga pesada no estado do Maranhão, analisando aspectos geométricos, velocidades e defeitos.

#### 3.2 Específicos

- Comparar os parâmetros geométricos e operacionais, projetados e existentes, através da análise de dados levantados a partir de inspeções de rotina do Carro Controle;
- Relacionar a influência dos parâmetros geométricos e/ou operacionais da superelevação no desgaste e defeitos de trilhos;
- Propor medidas para diminuição do desgaste/degradação dos trilhos.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 O modal ferroviário

Uma ferrovia é um sistema de transporte terrestre, autoguiado, em que os veículos se deslocam com rodas metálicas sobre duas vigas contínuas longitudinais, também metálicas, denominadas trilhos. Os apoios transversais dos trilhos, os dormentes, são regularmente espaçados e repousam geralmente sobre um colchão amortecedor de material granular denominado lastro, que, por sua vez, absorve e transmite ao solo as pressões correspondentes às cargas suportadas pelos trilhos, distribuindo-as, com taxa compatível a sua capacidade de suporte para a infraestrutura (NABAIS, 2014).

De acordo com Brina (1988), a origem das estradas de ferro está intimamente ligada ao trabalho das minas de carvão na Inglaterra. Em 1814, a primeira locomotiva a vapor foi inventada, pelo inglês Jorge Stephenson. No Brasil, depois de algumas tentativas falhas, o banqueiro e político Barão de Mauá inaugurou, em 1854, a primeira Estrada de Ferro do país, com 14,5 km de extensão.

Segundo Nabais (2014), a malha ferroviária brasileira alcançou sua máxima extensão em 1958 com 37.967 km de estradas de ferro, já na gestão da Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA), constituída por lei com o objetivo de unificar e administrar a operação das estradas de ferro no Brasil, entre outras finalidades. Contudo, com a aposta no sistema rodoviário a partir da década de 50, os trilhos perderam espaço com o abandono sistemático das ferrovias (CNT, 2016).

A partir da segunda metade da década de 90, numa tentativa de reaquecer o setor ferroviário de transporte de carga, o governo brasileiro decidiu conceder à iniciativa privada a operação do sistema ferroviário. Era o início das concessões ferroviárias no Brasil. A participação da ferrovia na matriz de transporte de carga cresceu 8%, passando de 17%, em 1997, para 25% em 2005, propiciando um crescimento substancial na sua produtividade (COIMBRA, 2008).

Contudo, a participação do modal ferroviário na grade de transporte do Brasil ainda é muito pequena quando comparada a outros modais. De acordo com ANTF (2018), o transporte rodoviário representa 65% das operações de transporte de carga, contra 15% do transporte ferroviário, enquanto que em outros países os números favoreceram o transporte ferroviário. Na Rússia, por exemplo, 81% do transporte é ferroviário, contra apenas 8% rodoviário. Nos Estados Unidos, os números mostraram 43% contra 32%.

Atualmente, o Brasil possui 30.576 km de ferrovias sendo 29.165 km destinados ao transporte de carga, dos quais apenas 10.000 km funcionam em condições adequadas (CNT, 2016).

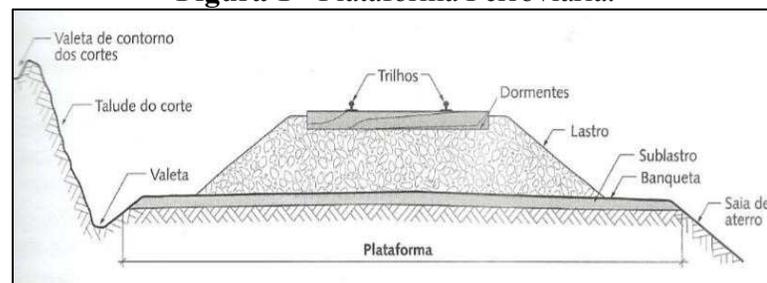
O crescimento econômico do Brasil tem apontado para a retomada dos investimentos em ferrovias, tanto para o transporte de carga como de passageiros. O lançamento do Plano Nacional de Logística e Transportes em 2010 abriu novos horizontes, prevendo um grande investimento para expandir a atual malha ferroviária para 40.000 km até 2020 (UCZAI, 2012 apud CÂMARA, 2016).

#### 4.2 A Via Permanente

Uma estrada de ferro é composta por dois sistemas básicos: o material rodante, cujos elementos dão origem a uma composição ferroviária, e a via permanente, por onde circulam estas composições. Segundo Nabais (2014), o material rodante divide-se em dois grandes grupos: Unidades de Tração (locomotivas) e as Unidades Rebocadas (vagões).

A via permanente, por sua vez, é a estrutura necessária para suportar e transmitir esforços ferroviários de maneira que permita o movimento do trem com confiabilidade, segurança e disponibilidade (STEFFLER, 2013 apud CÂMARA, 2016). Sgavioli, Bernucci e Motta (2015) afirma que defeitos na via permanente têm sido os líderes da causa de ocorrências ferroviárias nos Estados Unidos desde 2009. Zhang et al. (2004, apud SGAVIOLI, 2015) mostra que 658 de 1.890 (34,8 %) dos acidentes foram causados por defeitos na via. Nesse sentido, entender o papel deste sistema e dos seus componentes dentro da dinâmica ferroviária é fundamental. A Figura 1 mostra os principais elementos de uma plataforma ferroviária.

**Figura 1 - Plataforma Ferroviária.**



Fonte: Nabais, 2014.

Estes elementos são divididos em dois subgrupos: a infraestrutura e a superestrutura.

#### 4.2.1 A Infraestrutura da Via Permanente

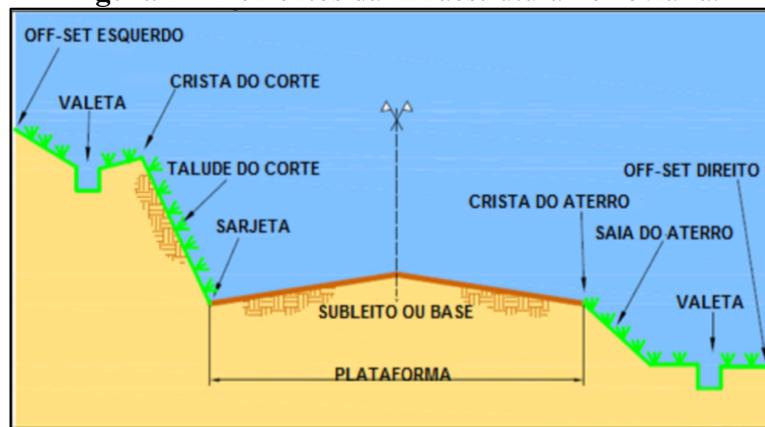
A Infraestrutura é responsável por agir nas condições de contorno à circulação de trens, atuando diretamente na garantia de drenagem, preservação do gabarito de circulação e transposição de relevo acidentado (STEFFLER, 2013 apud CÂMARA, 2016)

Para Brina (1988), a infraestrutura das estradas é constituída pela terraplanagem e todas as obras situadas abaixo do greide de terraplanagem.

De acordo com Nabais (2014), a infraestrutura é o conjunto de obras que formam a plataforma ferroviária e suportam a superestrutura. Os elementos da infraestrutura ferroviária podem ser: cortes, aterros, obras de arte corrente e obras de arte especiais.

Alguns dos principais elementos da infraestrutura ferroviária podem ser observados na Figura 2:

**Figura 2 - Elementos da Infraestrutura Ferroviária.**

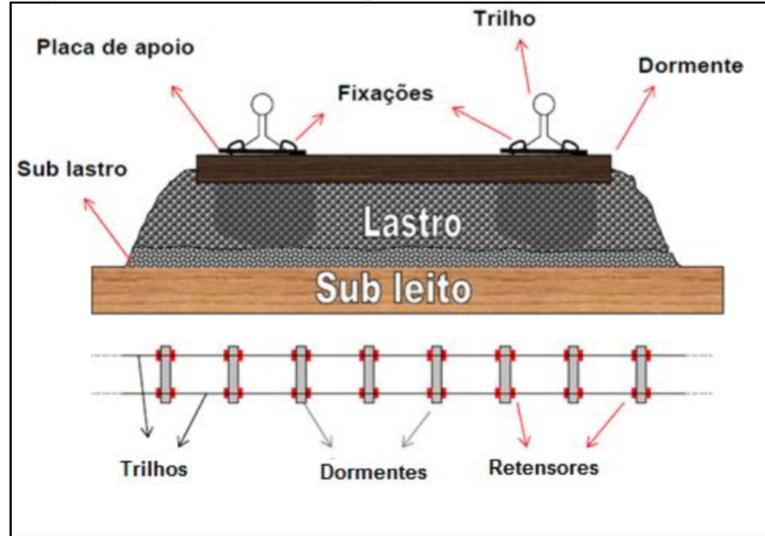


Fonte: VALE, 2013.

#### 4.2.2 A Superestrutura da Via Permanente

A Superestrutura ferroviária refere-se aos trilhos, dormentes, fixações, lastro e sublastro. Para Steffler (2013, apud CÂMARA, 2016), a função da superestrutura é captar as cargas transmitidas pelas rodas ferroviárias, transmiti-las com segurança pelas conexões estruturais da composição e descarregá-las uniformemente na plataforma ferroviária. A Figura 3 ilustra a superestrutura da Via Permanente e os seus componentes:

**Figura 3** - Elementos da superestrutura da Via Permanente.



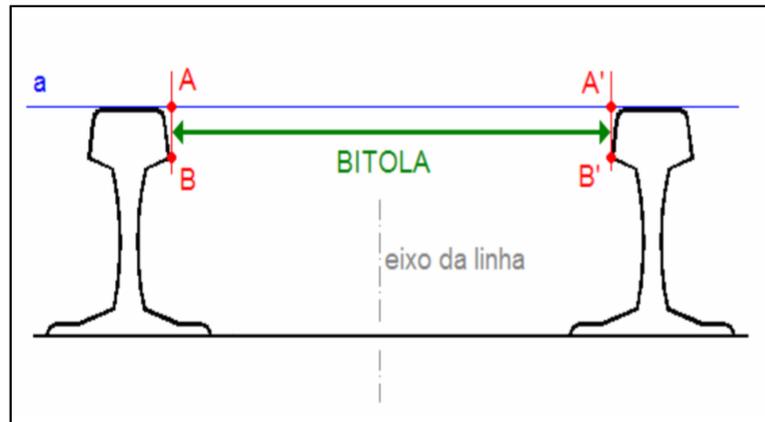
Fonte: Porto, 2004.

### 4.3 Aspectos Geométricos da Via Permanente

#### 4.3.1 Bitola

Bitola é a distância entre as faces internas das duas filas de trilhos, medida a 16 mm abaixo da face superior dos trilhos. Existem vários tamanhos de bitola, os mais utilizados hoje são a métrica (1000 mm), standard (1435 mm) e a larga (1600 mm) VALE (2011 apud CÂMARA, 2016). Sucena (2002) propõe um esquema para caracterização da bitola: traça-se uma reta “a” perpendicular ao eixo da linha e apoiada na superfície de rolamento dos boletos dos trilhos. Em seguida, são traçados dois segmentos de reta perpendiculares a reta “a”, medidos abaixo da superfície de rolamento dos trilhos, de forma que toquem nas faces internas dos boletos dos trilhos, conforme a Figura 4. A distância interna dos boletos, entre estes dois segmentos de reta, é denominada bitola.

**Figura 4** - Desenho esquemático de uma bitola.



Fonte: Coimbra, 2008.

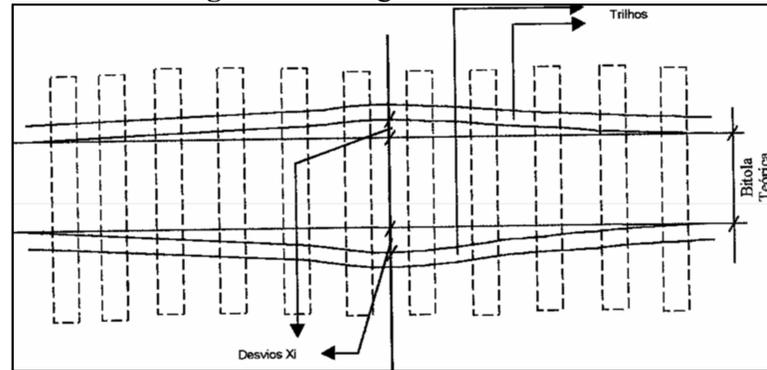
Para Silva (2006 apud LIMA, 1998), a bitola da via é o “parâmetro de maior importância na definição das características geométricas, exatamente por definir a base de uma ferrovia”. É em função da distância entre os dois trilhos da via permanente que se dimensiona o tamanho dos dormentes, quantidade de lastro e a bitola entre as rodas do material rodante.

De acordo com Vale (2013), as deformações do boleto devido ao escoamento de materiais (rebarbas) deverão ser desconsideradas nas medições de bitola, enquanto os desgastes horizontais ocasionados pelo atrito dos frisos deverão ser considerados. Ao longo do tempo, nesse sentido, com a passagem do material rodante, a via adquire defeitos que alteram os valores nominais de bitola. Os limites de alargamento ou estreitamento de bitola são definidos pela própria ferrovia de forma a garantir a segurança operacional.

De acordo com Guidelines for Track Effects & Reports (1996 apud LIMA, 1998) as anomalias na bitola podem ser classificadas em dois tipos: alargamento de bitola e estreitamento de bitola.

#### 4.3.1.1 Alargamento da bitola (Wide Gauge)

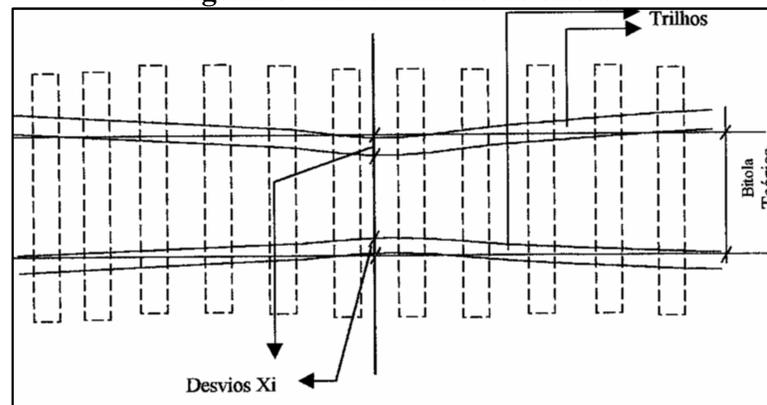
É quando o valor medido é maior do que o valor limite máximo, conforme mostra a Figura 5. As razões causadoras deste tipo de anomalia podem estar vinculadas aos seguintes fatores: dormentes em condições ruins; grupos de dormentes defeituosos; dormentes laqueados; desgaste da placa de apoio dos dormentes e fixações frouxas; desgaste lateral do boleto do trilho, entre outros fatores (LIMA, 1998).

**Figura 5 - Alargamento de bitola.**

Fonte: LIMA, 1998.

#### 4.3.1.2 Estreitamento de bitola (Narrow Gauge)

É quando o valor do parâmetro medido é menor do que o valor limite mínimo, conforme ilustra a Figura 6. Ocorre geralmente quando existem dormentes empenados, deformação do lado interno do trilho, placas de apoio quebradas e dormentes defeituosos (LIMA, 1998).

**Figura 6 - Estreitamento de bitola.**

Fonte: Lima, 1998.

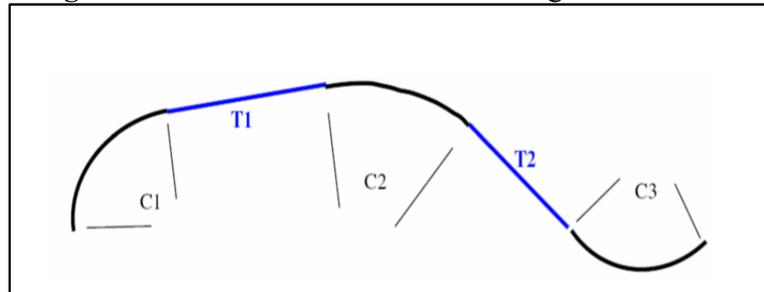
#### 4.3.2 Tangentes

Tangentes são segmentos de reta, partes integrantes da subdivisão do traçado planimétrico da via, que unem duas curvas, tangenciando-as em projeção horizontal (SILVA, 2006).

### 4.3.3 Curvas Horizontais

De acordo com Oliveira e Paz (2015), a curva horizontal é um elemento de projeto utilizado para concordar as tangentes utilizadas na definição do traçado ferroviário, cujo principal parâmetro é o raio de curvatura, conforme mostra a Figura 7.

**Figura 7 - Planimetria Geométrica: Tangentes e curvas.**



Fonte: Duval (2001 apud SILVA, 2006).

Uma curva horizontal é composta por dois elementos distintos: a curva circular e as curvas de transição.

#### 4.3.3.1 Curva Circular

As curvas circulares são aquelas que possuem um raio constante, e podem ter sentido para a direita ou para a esquerda. Segundo Silva (2006), o raio da curva, quando apertado (pequeno) torna-se o principal parâmetro de restrição de velocidade dos trens, já que acarretam grande resistência à circulação. Inversamente ao raio, temos o desgaste dos frisos das rodas e dos trilhos externos da curva, ou seja, menores raios acarretam maiores ângulos de ataque, o que em consequência aumentam o desgaste no material.

#### 4.3.3.2 Curva de Transição

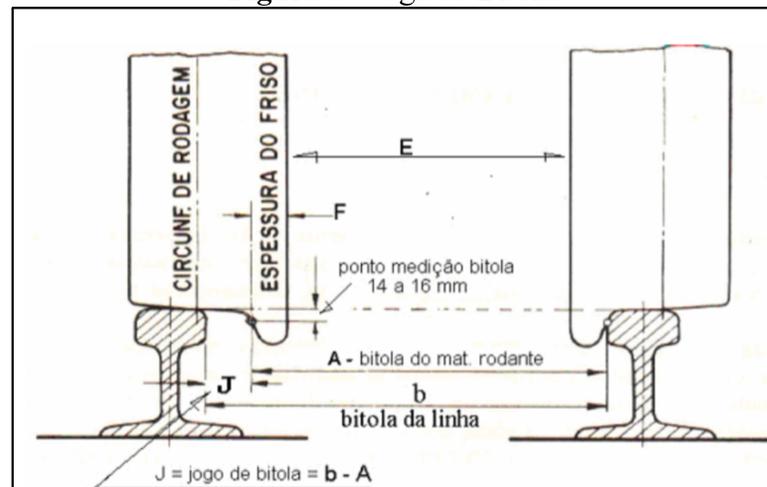
Para Vale (2011), a curva de transição proporciona suavidade de inscrição dos trens que saem de uma tangente (raio infinito) e entram em uma curva circular. Saindo do ponto infinito, o raio gradualmente irá decrescer ao ponto em que virá a ser constante e se iniciará a curva circular. Portanto, a seção entre a tangente (reta) e a curva de raio constante é chamada de curva de transição, também podendo ser chamada de espiral da curva. Sem a curva de transição, o trem que saísse da

tangente, encontrando a curva circular, sofreria modificações imediatas e perigosas em seu movimento, nos planos vertical e horizontal.

#### 4.3.4 Superlargura

Para Silva (2006), existe uma folga denominada “Jogo de Bitola” entre o friso e a lateral do trilho, exigida pela função de guia que a bitola exerce sobre o material rodante, conforme mostra a Figura 8.

**Figura 8 - Jogo de Bitola.**



Fonte: Silva, 2006.

Em curvas de raio muito apertado (pequeno) e truques maiores, o jogo de bitola pode ser insuficiente, comprometendo o livre rolamento do material rodante, exigindo que seja reduzido o valor de “A” ou do próprio truque. Porém, a alternativa mais comum é o aumento da bitola da via nas curvas de raio apertado. Este incremento na bitola é chamado Superlargura (SILVA, 2006).

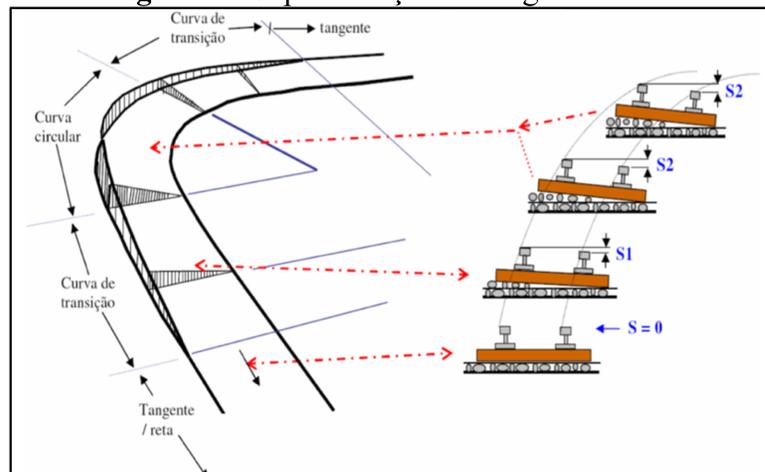
A inserção da base rígida do truque força o trilho externo para sua inscrição, isso provoca desgaste no trilho e na roda por conta do ângulo de ataque do friso da roda na face lateral da parte superior do trilho, o boleto. O emprego da superlargura nas curvas de menor raio objetiva melhorar essa inscrição e diminuir esforços despertados em tal situação (PAIVA, 2016). Brina (1979) recomenda a utilização da superlargura para curvas horizontais com raio inferior a 500 metros.

#### 4.3.5 Superelevação

A superelevação é um desnível transversal aplicado ao pavimento que possibilita a força peso compensar a ação da força centrífuga ao inscrever o movimento do veículo em um trecho circular, podendo ser aplicada em rodovias ou ferrovias. No caso das ferrovias, primeiro calcula-se o valor máximo, chamado Superelevação Teórica, através de fórmulas que contrabalanceiam a Força Peso e Força Centrífuga. Em seguida, aplicam-se regras estabelecidas de redução para se definir a superelevação que será efetivamente implantada na superestrutura da via, também chamada de Superelevação Prática (OLIVEIRA; PAZ, 2015).

A Figura 9 mostra a graduação da superelevação ao longo da curva horizontal. Em tangente, a linha deve se apresentar em nível, com superelevação zero ( $S=0$ ). Na espiral, a superelevação cresce uniformemente, desde o valor zero, no ponto que começa a curva de transição, até o valor final, no início da curva circular. O trilho externo assume inclinações crescentes e gradativas ( $S = S1$ ). Na curva circular a inclinação será constante, igual a  $S2$  para decrescer na curva de transição seguinte, uniformemente, até o valor zero, o ponto onde inicia-se a nova tangente (SILVA, 2006).

**Figura 9 - Superelevação ao longo da curva.**



Fonte: Duval (2001 apud SILVA, 2006).

Para Vale (2011), a superelevação tem como funções: distribuir melhor as cargas nos dois trilhos; diminuir os defeitos superficiais e o desgaste dos trilhos e dos materiais rodantes;

compensar o efeito de força centrífuga, parcialmente ou totalmente, diminuindo suas consequências, além de dar mais conforto aos passageiros, quando vem ao caso.

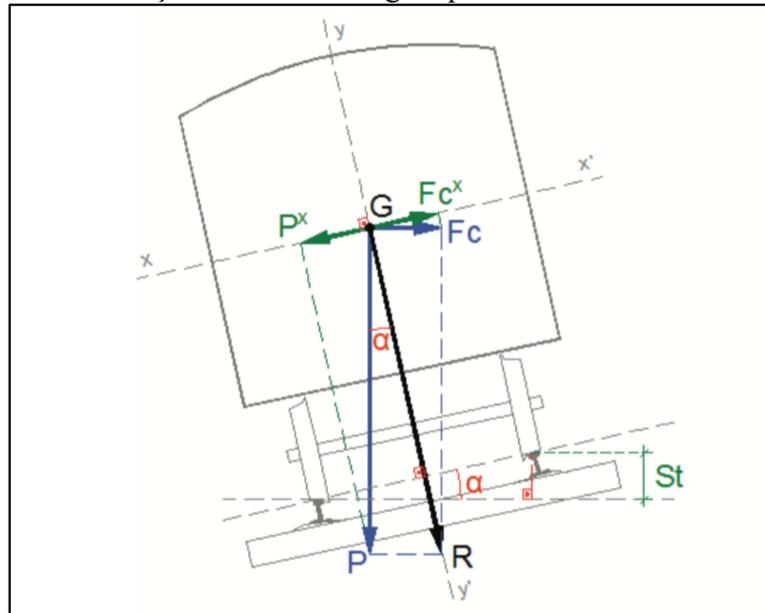
#### 4.3.5.1 Superelevação Teórica

De acordo com Oliveira e Paz (2015), para que o veículo atinja a condição de equilíbrio, é necessário que a intensidade da componente horizontal da força peso seja igual à intensidade da componente horizontal da força centrífuga, conforme mostra a Figura 10. Realizando os cálculos de igualdade de forças, o valor da Superelevação Teórica ( $St$ ) será calculado através da equação:

$$St = \frac{(B+b) \cdot V^2}{127 \cdot R} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: B (bitola da via), b (largura do boleto) e R (raio da curva) são dados em metros, e V (velocidade do veículo) em km/h.

**Figura 10** - Forças atuantes no vagão quando inscrito em uma curva.



Fonte: Oliveira e Paz, 2015.

#### 4.3.5.2 Superelevação Prática

Analisando-se a Eq. 1, no entanto, nota-se que para cada valor de raio e velocidade diferente, tem-se um valor diferente de superelevação. Contudo, em uma mesma ferrovia é comum que circulem trens com velocidades diferentes, como por exemplo trens de minério, trens de carga geral e trens de passageiros, uma vez que seus pesos por eixo são distintos. Assim, Duval (2001 apud SILVA, 2006) afirma que passa a ser necessário se “adotar um critério de cálculo da superelevação no sentido de se obter uma melhor situação de compromisso entre os trens leves (rápidos) e os trens pesados (lentos)”. Dessa forma, foi criada um termo denominado superelevação prática.

Os critérios de definição da superelevação prática subdividem-se em dois tipos; empíricos, baseados em aplicação prática que obtiveram resultados positivos na manutenção da circulação da via, e racionais, cunhados em algum tipo de raciocínio matemático com objetivo de evitar que ocorra o tombamento de veículos ao inscrever o movimento em curva. Ambos os tipos estão explícitos na Tabela 1 (OLIVEIRA; PAZ, 2015).

**Tabela 1 - Critérios para o Cálculo da superelevação Prática.**

<b>Critérios</b>	<b>Item</b>	<b>Equações</b>
<b>Empíricos</b>	(a)	$V = \frac{2}{3} * V_{proj}$
	(b)	$V = \frac{3}{4} * V_{proj}$
	(c)	$V = \frac{V_{proj}}{\sqrt{2}}$
	(d)	$S_p = \frac{2}{3} * S_t$
<b>Racional</b>	(e)	$S_p = S_t - \frac{B + b}{n * H} * \left( \frac{B + b}{2} - d \right)$

Fonte: Oliveira e Paz, 2015.

É importante ressaltar que a velocidade e a superelevação estão diretamente relacionadas, e nesse sentido, conforme mostra a Tabela 1, alguns critérios consideram um fator de redução para a velocidade, enquanto outros o consideram para a superelevação. O critério de cálculo para

a superelevação prática pode ser definido por cada ferrovia, considerando suas características específicas de tráfego e segurança.

Os critérios empíricos são métodos baseados em aplicação prática que obtiveram resultados positivos na manutenção da circulação da via. O critério racional é baseado em um raciocínio matemático que objetiva garantir melhor condição de circulação e/ou economia dos materiais da via (OLIVEIRA; PAZ, 2015).

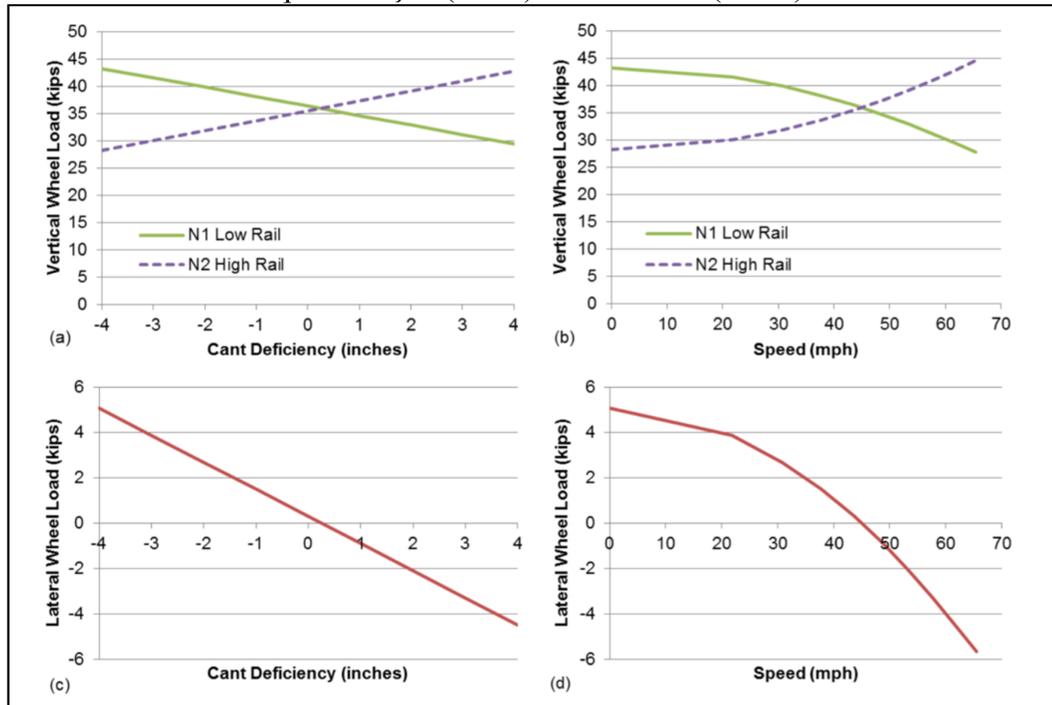
Steffler (2013, apud OLIVEIRA; PAZ, 2013) explica que a adoção da superelevação prática consiste em reduzir o valor original da superelevação teórica com o objetivo de minimizar a probabilidade de tombamento do veículo ao inscrever a curva em baixa velocidade. No entanto, esta redução gera uma parcela de força centrífuga que não é absorvida quando o veículo circula em velocidade superior à de equilíbrio, da mesma forma que uma parcela de força peso não é absorvida quando o veículo circula em velocidade inferior à de equilíbrio, resultando em um consumo de trilhos não uniforme. Quando há força centrífuga não absorvida, o esforço maior tende a ser no trilho externo, e quando há força peso, a tendência é de um esforço predominante no trilho interno.

#### 4.3.5.3 Influência da velocidade nos esforços dos trilhos em curvas

Pelas expressões clássicas da Engenharia Ferroviária, pode-se observar que a superelevação varia com o quadrado da velocidade e que é, portanto, extremamente sensível às variações nesta velocidade (GAZABIM, 2008).

De acordo com Dick et al. (2016), definida uma superelevação e velocidade para uma curva, os trens que circularem com uma velocidade abaixo da definida, sofrerão com excesso de superelevação, enquanto os trens que circularem acima, sofrerão com deficiência de superelevação. A deficiência de superelevação é a opção mais desejável para os trilhos, apesar de ocasionar um desgaste maior nos trilhos externos, isso porque, o excesso de superelevação causa um aumento de desgaste nos trilhos internos, além de provocar defeitos superficiais de forma acelerada. A Figura 11 mostra um estudo de caso realizado em uma curva de grau 3 e com um veículo ferroviário carregado com aproximadamente 122 tonelada-força.

**Figura 11** - Variação nas cargas vertical e lateral de acordo com um intervalo de deficiência de superelevação (a & c) e velocidade (b & d).



Fonte: Dick et al. (2016).

Pode-se observar pela figura que tanto a carga vertical quanto a lateral aumentam linearmente à medida que a deficiência de superelevação aumenta. Em velocidades mais altas, pequenos aumentos na velocidade do trem resultam em uma maior alteração nas cargas do que em velocidades mais baixas. Na velocidade de equilíbrio, as forças no trilho externo e interno são equivalentes e a força lateral é desprezível. Quando a velocidade do trem aumenta e há uma deficiência de superelevação de 4 polegadas, a carga no trilho externo aumenta em mais de 20%. Da mesma forma, com um excesso de superelevação de 4 polegadas, a carga no trilho interno aumenta em mais de 20% (DICK et al., 2016).

#### 4.3.5.4 Superelevação máxima e mínima

De acordo com Esveld (2001), a superelevação máxima é definida considerando uma possível parada total do trem numa curva, ou circulação muito lenta. A superelevação máxima considera os seguintes aspectos: desconforto de passageiros, risco de descarrilamento para trens de carga devido a carregamentos desiguais nos trilhos; possíveis deslocamentos das cargas, além de

um possível desacoplamento do trem de carga devido a um alto valor de atrito das rodas contra o trilho interno. Este problema pode ser agravado devido a ventos com alta velocidade.

As recomendações da VALEC (2011) definem o valor máximo da superelevação como um décimo do valor da bitola, ou 100 milímetros para bitola métrica e 160 milímetros para bitola larga.

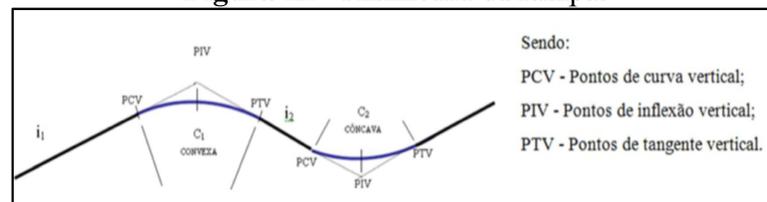
Alguns autores sugerem que a superelevação deverá ter um valor mínimo, com a justificativa de que adotar um valor abaixo deste pode dar origem ao processo de inversão da superelevação no trecho, mesmo em curvas de grandes raios. Entre estes autores, VALE (2009) define o valor mínimo de 5 milímetros para a superelevação prática, enquanto Steffler (2013, apud OLIVEIRA; PAZ, 2015) sugere que não se utilize superelevação inferior a 10 milímetros para bitola métrica e 20 milímetros para bitola larga.

#### 4.3.6 Rampas Verticais

De acordo com Paiva (2016), o projeto geométrico vertical é composto de sucessões de rampas longitudinais. Sempre é necessário que exista alguma declividade longitudinal em traçado ferroviário, para que o escoamento nos dispositivos de drenagem seja garantido. Os veículos de tração ferroviários (locomotivas) nas rampas verticais enfrentam grande resistência ao movimento. Portanto, os greides devem ser adotados no projeto vertical com menor valor possível, de forma a garantir o melhor desempenho de tração. Longo trecho com greide ascendente tem operação ferroviária em baixa velocidade e, na via singela, significa grande período de ocupação da via.

Para Vale (2013), a concordância vertical resume-se em considerar dois greides retos definidos por suas respectivas declividades ou rampas, “ $i_1$ ” e “ $i_2$ ”, concordados por uma curva, que podem ser côncavas ou convexas, conforme mostra a Figura 12.

**Figura 12 - Altimetria da rampa.**



Fonte: VALE, 2013.

Ao desenvolverem-se traçados geométricos, pode ocorrer a coincidência de curvas horizontais concomitante às rampas verticais e, nessa situação, considera-se a soma das duas resistências, chamada de resistência compensada, que origina a rampa compensada. A rampa compensada normalmente define o valor máximo de resistência que um trem deve enfrentar ao longo de um traçado (PAIVA, 2016).

#### 4.4 Vida Útil dos Trilhos

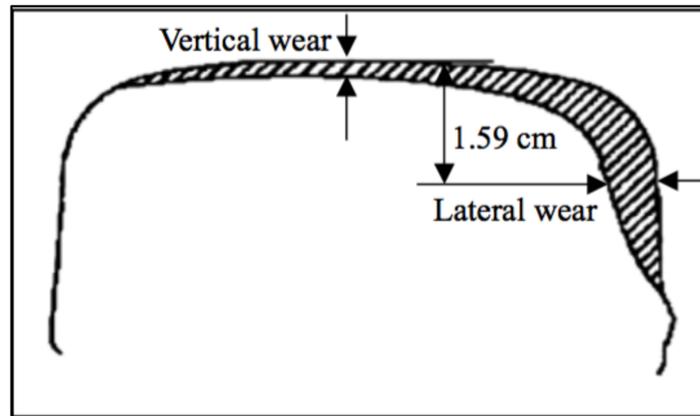
O trilho é o componente com maior custo para a manutenção ferroviária. Brina (1979) destaca que o desgaste ou defeitos prematuros em trilhos afetam muito a exploração ferroviária, tendo em vista o custo do material e sua substituição, além de comprometerem a segurança, pois uma fratura no trilho pode acarretar acidentes de graves proporções, principalmente em trens de passageiros.

A vida útil de um trilho varia em função de fatores como número de passadas de rodas, condições de infra e superestrutura da via, clima, peso exercido pelos eixos do material rodante, bem como seu estado. Dentre as condições da via, a inclinação, raio e quantidade de curvas estão entre os principais fatores determinantes do seu desempenho. Com isso, vem a necessidade do melhor entendimento do desempenho dos trilhos da malha ferroviária e os critérios de avaliação da vida baseados em desgaste ou fadiga, a fim de otimizar o uso diminuindo perdas e balizando a escolha de trilhos (PETRONI, 2006).

##### 4.4.1 Desgaste dos Trilhos

O desgaste é aferido através do cálculo do seu módulo de resistência mínimo em função do seu perfil, e se dá em função da carga e classe de via (VALE, 2013). Na prática, o desgaste trata-se da porcentagem da área desgastada do boleto de um trilho em relação à área total deste boleto. Petroni (2006) afirma que o desgaste de um trilho pode ser lateral no canto de bitola do boleto, no caso de trilhos externos em curvas; ou vertical, com perda de altura no centro do boleto (amassamento), no caso de tangentes ou trilho interno de curvas, conforme mostra a Figura 13.

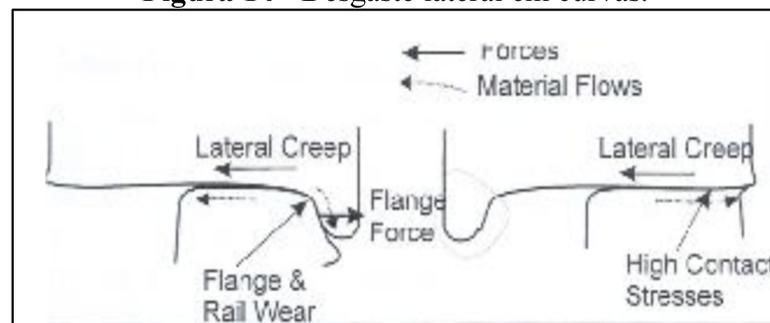
**Figura 13** - Representação dos desgastes lateral e vertical no trilho.



Fonte: Sadeghi e Akbari, 2006.

Os desgastes verticais são causados pela abrasão das rodas e pela corrosão devido às intempéries. A corrosão da superfície de rolamento é a grande responsável pela perda de material, em vias de tráfego muito intenso. Os desgastes laterais ocorrem principalmente nas curvas, acentuando-se nas de pequeno raio e também em retas onde há irregularidades na via. Tais desgastes devem-se à pressão horizontal dos frisos das rodas contra a face lateral do boleto do trilho externo, conforme mostra a Figura 14 (RIVES; PITA; PUENTE, 1977 apud SEMPREBONE, 2006). A soma dos desgastes vertical e lateral resulta no desgaste total.

**Figura 14** - Desgaste lateral em curvas.



Fonte: William (2001 apud PETRONI, 2006).

De acordo com Macêdo (2009) é estabelecido pela RFFSA que o desgaste máximo não poderá ultrapassar 25% da área do boleto e que o desgaste lateral não poderá atingir a superfície inferior do boleto ou superior a tala de junção. As bitolas, larga e métrica, não poderão exceder 1,620m e 1,020m respectivamente.

#### 4.4.2 Defeitos

Um defeito pode ser classificado por pequeno (P), médio (M) ou grande (G), de acordo com suas dimensões. A partir daí é possível se fazer, com base em critérios pré-definidos, a conceituação de sua criticidade. Os defeitos em trilhos podem ser de três tipos: de fabricação, superficiais ou internos (VALE, 2013).

##### 4.4.2.1 Defeitos de fabricação

Durante o processo de fabricação do trilho, podem ocorrer anomalias que acarretam o aparecimento de defeitos, principalmente internos. Os principais defeitos oriundos deste processo são: inclusão de materiais nocivos ao processo (impurezas: escória, metais, etc.), formação de bolhas e porosidade. Deve-se considerar que o tráfego das rodas dos veículos ferroviários também pode acarretar defeitos no trilho, exacerbando eventuais defeitos de fabricação e propiciando o aparecimento de outros (VALE, 2013)

##### 4.4.2.2 Defeitos superficiais

De acordo com Vale (2013), os defeitos de Fadiga por Contato (Rolling Contact Fatigue) são considerados como defeitos superficiais e geralmente provenientes de colapso ou fadiga de material. Os principais defeitos superficiais ou de Fadiga por Contato (RCF) são:

- Head Checks;
- Craking;
- Shelling;
- Corrugação;
- Dark spot/ SQUAT;
- Flaking;
- Escoamento (Metal Flow).

#### 4.4.2.3 Defeitos internos

De acordo com Vale (2013), os defeitos internos se dividem nos seguintes subgrupos:

- Fraturas ou trincas transversais ;
- Trincas nos Furos (Bold Hole Crack).

#### 4.4.3 Gestão do atrito

De acordo com Vale (2013), a gestão de atrito é o controle do coeficiente de atrito existente na área de contato roda- trilho para atingir valores ótimos para redução na taxa de desgaste da roda e do trilho, minimizando as trincas e fraturas por RCF, a força lateral nas curvas e consequentemente aumentando a segurança operacional e economia de combustível. Faz parte da gestão do atrito a atuação de esmerilhamento de trilhos com perfil adequado a geometria, dinâmica e periodicidade e perfilamento de rodas definida em cada ferrovia.

##### 4.4.3.1 Esmerilhamento

Ao longo dos anos, três tipos de esmerilhamento foram desenvolvidos: corretivo, de manutenção e preventivo Kalousek e Magel (1997 apud SEMPREBONE, 2006).

O esmerilhamento corretivo requer remoção substancial de metal através de múltiplos passes do trem esmerilador em velocidade baixa para remover defeitos e corrugação. A técnica de esmerilhamento de manutenção, por sua vez, serve para remover defeitos de superfície e reperfilear o trilho. Dependendo das condições do trilho podem ser necessários de um a três passes do trem esmerilador. E, finalmente, o esmerilhamento preventivo, que é feito com um único passe do trem esmerilador para se remover somente uma camada de material, a fim de se controlar a fadiga de superfície. Esse esmerilhamento preventivo produz um acréscimo significativo na vida útil do trilho, um decréscimo nos níveis de ruído e retarda a ocorrência de corrugação do trilho, permitindo ainda que se estabeleça um perfil particular para cada trecho, melhorando o contato roda-trilho, reduzindo o consumo destes e diminuindo os custos (SEMPREBONE, 2006).

**Figura 15** - Trem esmerilhador da MRS.



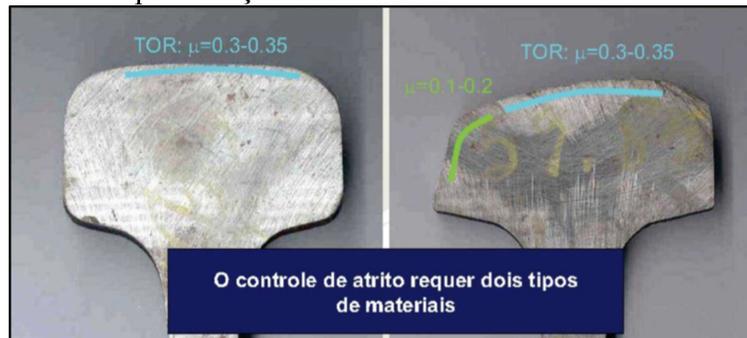
Fonte: MRS, 2018.

#### 4.4.3.2 Lubrificação

A lubrificação tem-se mostrado ser um dos menos onerosos caminhos para aumentar a vida dos trilhos em curvas fechadas. Dependendo das circunstâncias, um aumento de 50% na vida do trilho tem sido atribuído apenas ao uso de lubrificação. Com isso, porém, os trilhos se tornam mais suscetíveis à fadiga. Assim, o esmerilhamento é ainda mais eficiente para controlar estes defeitos Tuzik (1995 apud SEMPREBONE, 2006)

Para o controle do coeficiente de atrito, são utilizados principalmente dois tipos de lubrificantes: de canto de bitola e de topo de trilho. Cada um dos lubrificantes tem funções e características específicas para controlar o atrito e mantê-lo a níveis adequados para cada aplicação, conforme mostra a Figura 20 (VALE, 2013).

**Figura 16** - Representação dos valores ideais de coeficiente de atrito.



Fonte: Vidon (2006 apud VALE, 2013).

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 Metodologia

A metodologia deste trabalho de graduação se deu através de um estudo de caso em uma ferrovia de carga no Estado do Maranhão. A posposta compreendeu os seguintes segmentos: (i) revisão bibliográfica e análise de dados disponíveis na literatura existente (as consultas foram feitas em livros, trabalhos de outras Universidades no Brasil e no exterior, pesquisas, teses e dissertações dentro da área de proposta do trabalho a ser desenvolvido), (ii) levantamento de dados de projeto, operação e inspeções de rotina e (iii) modelagem, simulação e análise de dados. A análise dos resultados foi feita de forma qualitativa, com interpretação dos dados e análise subjetiva pelo autor.

O trabalho propôs-se a analisar as superelevações das curvas ferroviárias, buscando relacioná-las com o desgaste e/ou defeitos em trilhos e minimizar um problema comum existente em ferrovias de carga do mundo inteiro. Primeiramente, foram levantados os dados de projeto geométrico da ferrovia e em seguida, foram levantados dados da operação ferroviária em 2018, como velocidade de condução e locais de parada programadas. Os dados de campo, foram obtidos através de medições de inspeções do Carro Controle.

Para avaliar excesso e deficiência de superelevação, foram selecionadas 7 curvas, para todos os 4 (quatro) raios tipo da ferrovia. Para cada curva selecionada, foram analisados dados de superelevação real e recomendada, comparando-os com o desgaste vertical e lateral e defeitos de trilhos interno e externo, além de dados de bitola e velocidade. Assim, através do método da regressão linear, foram obtidas relações para quantificar a influência destes fatores na evolução do desgaste e/ou degradação de trilhos.

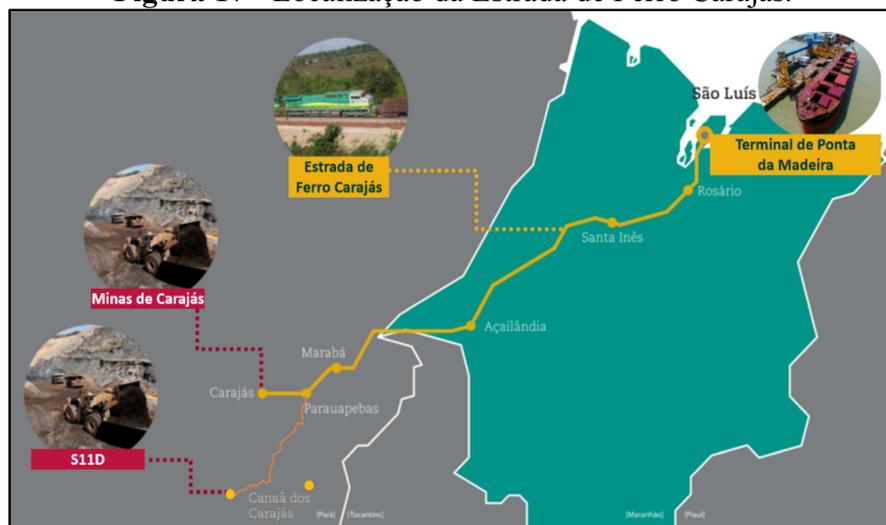
Após a elaboração do estudo de caso, os resultados encontrados foram expostos e analisados, assim como as argumentações finais a respeito da relevância do trabalho e propostas para trabalhos futuros.

## 5.2 Estrada de Ferro Carajás – EFC

A Estrada de Ferro Carajás (EFC) foi inaugurada em 1985 com o objetivo de interligar a maior mina de minério de ferro a céu aberto do mundo, em Carajás, no sudeste do Pará, ao Porto de Ponta da Madeira, em São Luís do Maranhão. O principal produto transportado pela EFC é o minério de ferro, porém hoje ela também transporta granéis sólidos (soja e outros grãos), líquidos (combustíveis e fertilizantes, entre outros), além do trem de passageiros, que conduz cerca de 350 mil pessoas por ano. O trem-tipo para o transporte do minério de ferro é o maior trem de carga em operação regular do mundo, com 330 vagões, 4 locomotivas e mais de 3 km de extensão. O projeto S11D, recentemente finalizado, foi responsável pela ampliação da ferrovia e do processo de mineração com a construção do ramal ferroviário do Sul do Pará, interligando a EFC até a mina de Canaã dos Carajás, conforme mostra a Figura 21. O ramal tem extensão de 100 km entre a linha principal e a pêra ferroviária (VALE, 2018b).

A EFC transporta um peso por eixo de 32,5 toneladas, utiliza trilhos TR-68 e encontra-se em processo de renovação da grade de dormentação de madeira para concreto. A carga anual transportada em 2017 foi de 273 MTBT e a carga anual prevista para 2018 é de 322 MTBT.

**Figura 17 - Localização da Estrada de Ferro Carajás.**



Fonte: Vale, 2018d.

### 5.2.1 Características Geométricas

A EFC possui bitola larga em toda a sua extensão (1600 mm). A Tabela 2 mostra os limites máximo e mínimo de bitola permitidos.

**Tabela 2** - Tolerâncias de bitola para a EFC.

<b>TOLERÂNCIAS EM LINHAS DE BITOLA DE 1600 mm</b>			
<b>Ferrovias</b>	<b>Bitola (mm)</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>
EFC	1600	1620	1592

Fonte: Vale, 2009.

Na Linha 1, que será o foco deste trabalho, tem 892 km de extensão, sendo 73% correspondente a tangentes e 27% a trechos curvos, com um total de 343 curvas circulares na linha tronco. Os raios da Linha 1 são padronizados, conforme concepção original de projeto, e assim, as curvas podem ser agrupadas em famílias de mesmo raio, conforme mostra a Tabela 3.

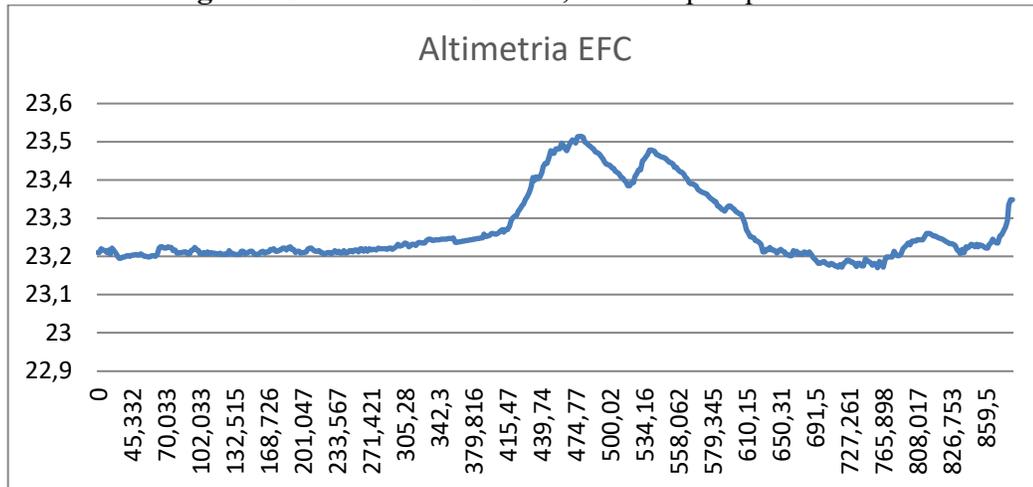
**Tabela 3** - Quantitativo de Curvas da EFC por família.

<b>RAIO PADRÃO</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>PERCENTUAL</b>
859 m	83	24,2%
1.146 m	64	18,7%
1.719 m	169	49,3%
3.438 m	27	7,9%
TOTAL	343	100%

Fonte: Vale, 2018c.

A altimetria da EFC se dá conforme mostra a Figura 18. A rampa máxima compensada é de 0,4% para trens carregados (sentido mina – porto) e 1,0% para trens vazios (sentido porto – mina). Existe um trecho na ferrovia no qual alguns trens não conseguem vencer a resistência necessária, e, portanto, utiliza-se uma locomotiva adicional denominada Helper, que é acoplada à composição ferroviária para somar mais potência ao trem, fazendo com que este consiga prosseguir em movimento.

**Figura 18 - Altimetria da EFC, em cota por quilômetro.**



Fonte: O Autor, 2018

### 5.2.2 Inspeção de Via - O Carro Controle

Além da inspeção visual, que ocorre periodicamente na EFC, a manutenção da via permanente também conta com um equipamento para inspeção mecanizada, denominado Carro Controle.

O Carro Controle utilizado pela EFC foi fabricado pela empresa Plasser & Theurer e é do modelo EM100, conforme Figura 19. Foi adquirido pela Vale em 2011 e começou a operação em 2012, para atender à demandas de manutenção da via permanente.

**Figura 19 - Modelo de carro controle utilizado pela EFC.**



Fonte: Vale, 2018d.

O sistema de medição do CC EM100 é capaz de ler e gravar as condições da via capturadas a cada 25 centímetros, porém os relatórios extraídos mostram uma média destas leituras

dentro de blocos de 25 metros. Os dados são obtidos através de sensores, sistemas de lasers e câmeras de vídeo de alta velocidade e definição para captação de imagens. A partir deste equipamento, pode-se extrair dados importantes para a manutenção de via, como empeno, alinhamento, nivelamento, desgaste de trilho, bitola, superelevação média e máxima, descontinuidades, entre outros parâmetros.

A Figura 20 ilustra um relatório extraído de uma viagem do carro controle. Geralmente, as viagens ocorrem mensalmente.

**Figura 20 - Modelo de Planilha extraída das medições do Carro Controle.**

EVENTOS AMV_N ATUALIZADO	DISTRITO	KM	KM INICIO	X9	BITOLA (MÉDIA)	BITOLA (MÁXIMA)	RCE_RH_LE	RCE_RH_LE > 1m	RCE_RH_LE (2016)	RCE_RH_LE	FIXAÇÃO_LE	FIXAÇÃO (%_LE)	DESGASTE (MÉD) LE	DESGASTE (MÁX) LE	STD_LE_25m	DEFLEXÃO (c05)_LE	DEF_LE	TLS_LE	TLS_LD	DEF_LD	RCE_RH_LD	RCE_RH_LD > 1m	RCE_RH_LD (métrico)	RCE_RH_LD	FIXAÇÃO_LD	FIXAÇÃO (%_LD)	DESGASTE (MÉD) LD	DESGASTE (MÁX) LD	STD_LD_25m	DEFLEXÃO (c05)_LD	SEGMENTO_VIA	PLANIMETRIA_CC	PLANIMETRIA_ENG
6. ACD 572 572,175					10,08	11,52	0				0	0%	18,31	20,51	0,37	0,98						0			0	0%	7,80	9,77	0,25	0,66		1	CV
6. ACD 572 572,200					10,05	11,66	84				1	1%	17,95	20,66	0,93	3,28						0			0	0%	8,46	9,84	0,56	1,33		1	CV
6. ACD 572 572,225					11,49	13,84	47				0	0%	18,62	21,02	1,11	3,28						0			0	0%	8,44	10,04	0,50	1,06		1	CV
6. ACD 572 572,250					12,39	15,08	20				0	0%	18,81	22,03	0,86	1,76						27			1	1%	8,37	10,47	0,66	1,41		1	CV
6. ACD 572 572,275					10,26	14,77	71			1	1	1%	13,69	18,91	2,03	5,70						0			1	1%	8,18	9,73	1,56	3,44		1	CV
6. ACD 572 572,300					6,91	10,65	0			1	2	2%	7,22	10,16	2,03	5,70						0			0	0%	7,05	8,59	0,75	2,31		1	CV
6. ACD 572 572,325					8,46	10,73	0				0	0%	10,75	12,46	0,59	1,84						0			2	2%	6,09	7,73	0,38	0,98		1	CV
6. ACD 572 572,350					8,94	13,27	34			1	1	1%	10,74	13,13	2,43	7,54						17			2	2%	6,44	7,46	1,07	3,40		1	CV
6. ACD 572 572,375					11,46	19,07	0			1	1	7	8%	11,75	14,61	1,91	5,59					0			1	1%	6,71	8,40	0,70	1,91		1	CV
6. ACD 572 572,400					10,30	14,03	112			1	1	1%	12,70	19,45	2,19	6,45						0			2	2%	7,05	8,91	1,29	3,48		1	CV
6. ACD 572 572,425					13,80	16,88	102			1	1	1%	18,70	20,35	1,61	4,53						0			8	9%	7,14	8,98	0,85	1,91		1	CV
6. ACD 572 572,450					11,24	14,88	65			1	2	8	9%	11,46	13,28	2,75	7,19					0			8	9%	7,38	8,98	1,05	2,93		1	CV
6. ACD 572 572,475					10,41	12,15	0				1	1%	12,28	18,71	0,97	3,13						0			4	4%	9,40	14,18	0,51	0,98		1	CV
6. ACD 572 572,500					12,25	14,87	0			1	1	1%	19,74	22,23	1,98	6,06						0			2	2%	12,82	14,38	0,84	2,42		1	CV
6. ACD 572 572,525					12,49	14,77	0			1	1	0	0%	19,19	21,80	2,31	6,80					0			1	1%	12,34	13,79	0,95	2,31		1	CV
6. ACD 572 572,550					12,89	15,18	17				0	0%	19,00	20,78	0,88	2,54						0			1	1%	12,68	14,41	0,67	2,11		1	CV
6. ACD 572 572,575					12,05	14,63	0				1	1%	18,91	21,56	1,13	2,97						0			0	0%	12,78	15,16	0,59	1,37		1	CV

Fonte: O Autor, 2018.

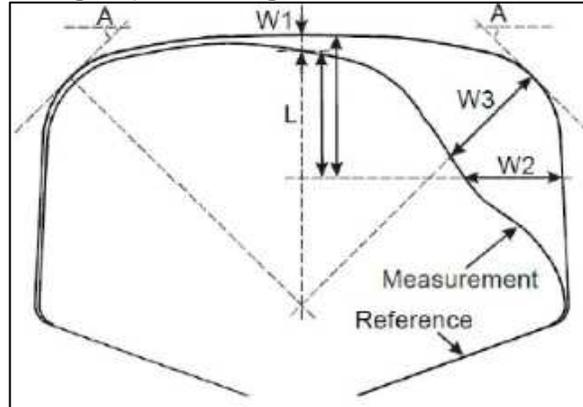
### 5.2.3 Critérios de substituição de trilhos

Os principais critérios para substituição de trilhos na EFC são: defeito superficial, defeitos internos (detectados por ultrassom) e desgaste. É preciso considerar, no entanto, que não há um controle rígido sob o modo de falha dos trilhos, e, portanto, os dados percentuais dos motivos pelos quais os trilhos estão sendo substituídos são desconhecidos.

#### 5.2.3.1 Substituição por desgaste

A medição do desgaste do boleto é feita através do sistema de leitura e medição de perfil do Carro Controle. A área total desgastada do boleto (em percentual) é obtida em função da relação de sobreposição de um perfil de referência e os perfis medidos no campo nas duas fileiras de trilhos, conforme mostra Figura 21.

**Figura 21** - Detalhe da sobreposição de um perfil de referência e um perfil medido no campo.



Fonte: Vale, 2018a.

A tabela abaixo mostra as categorias e seus limites definidos pela EFC de acordo com o percentual de desgaste.

**Tabela 4** - Categorização por faixa de desgaste de trilhos.

FAIXA DE DESGASTE	CATEGORIZAÇÃO
Desgaste < 10%	LEVE
$10 \leq \text{Desgaste} < 20\%$	MODERADO
$20 \leq \text{Desgaste} \leq 28\%$	PESADO
$\geq 28\%$	SEVERO (P0)
$\geq 31\%$	SUBSTITUIÇÃO

Fonte: Vale, 2018a.

#### 5.2.3.2 Substituição por defeito superficial (RCF)

Dois métodos de inspeção são utilizados para obtenção de um mapeamento dos defeitos de RCF ao longo da ferrovia: o método visual e o método mecanizado, através do carro controle. A inspeção visual de trilhos ocorre uma vez a cada 6 (seis) meses, e é feita a pé, auto de linha ou mesmo em acompanhamento de viagem do carro controle. A extensão de trilho comprometida por defeito RCF é estratificada e distribuída por grau de categorização, conforme mostra a Tabela 5. O carro controle geralmente faz uma viagem por mês e a sua leitura é soma a extensão dos defeitos superficiais dentro de cada bloco, em milímetros.

**Tabela 5** - Categorização por faixa de defeitos superficiais em trilhos.

FAIXA DE RCF	CATEGORIZAÇÃO
$RCF < 2000$	LEVE
$2000 \leq RCF < 2500$	MODERADO
$2500 \leq RCF \leq 3000$	PESADO
$\geq 3000$	SEVERO (P0)

Fonte: Vale, 2018a.

É importante ressaltar que a tecnologia para medição de RCF através do Carro Controle normalmente prospecta somente defeitos RCF nas categorias PESADO e SEVERO. Isso acontece em razão destes defeitos apresentarem visível perda de material, o que, facilita sua detectibilidade pelo sistema.

### 5.3 Dados Preliminares

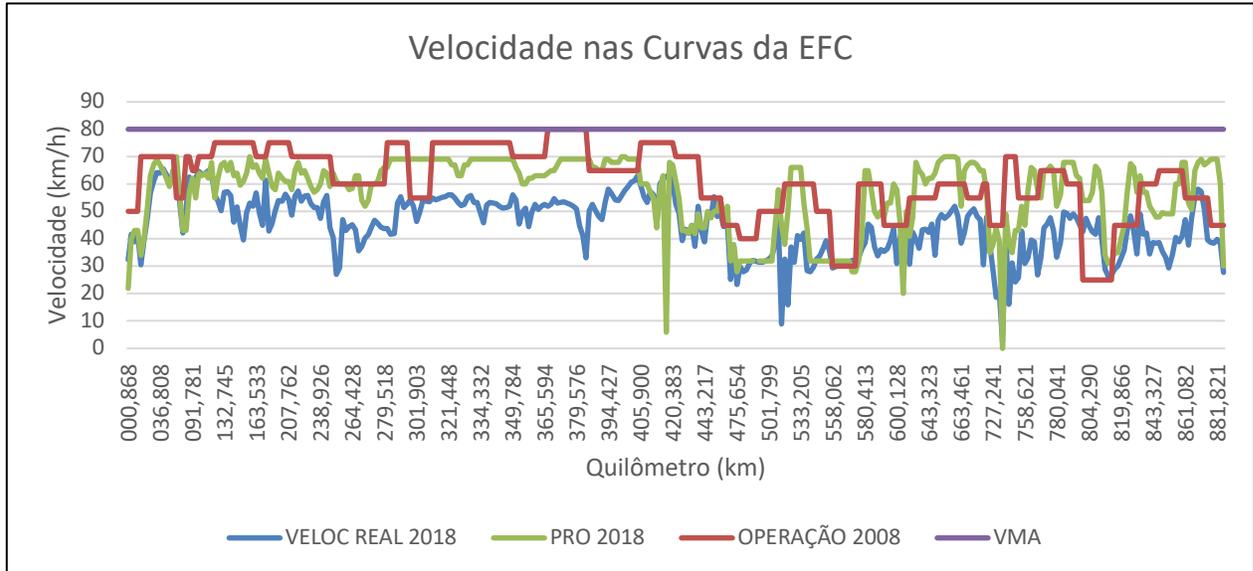
#### 5.3.1 Velocidade de Projeto, Operacional e Real

A velocidade de projeto da EFC é de 80 km/h, porém circunstâncias locais e aspectos operacionais exigem a circulação dos trens a uma velocidade inferior à velocidade de projeto, que é genericamente denominada velocidade de operação, ou velocidade operacional. Para que houvesse um controle da operação e uma padronização na prática da condução dos trens, foi criado o denominado PRO de Condução, que define os procedimentos operacionais aos quais o maquinista deve cumprir ao conduzir uma composição ferroviária na EFC, incluindo a máxima velocidade em cada trecho da ferrovia. É importante ressaltar, no entanto, que este procedimento é revisado constantemente.

Serão consideradas neste trabalho, apenas características operacionais dos trens de minério carregados, uma vez que são a pior situação em termos de esforços para a via permanente.

A Figura 22 mostra um as velocidades de operação do trem de minério carregado de projeto, em comparação com a velocidade de operação definida no PRO de Condução atual, além das velocidades médias reais praticadas e a Velocidade Máxima Autorizada (VMA). Cabe ressaltar que a velocidade considerada como velocidade de operação de projeto é a velocidade considerada para cálculo dos parâmetros geométricos da via permanente na última revisão, em 2008.

**Figura 22** - Comparação das velocidades de operação em 2008, do PRO 2018 e velocidade real das curvas.



Fonte: Autor, 2018.

A velocidade média real considerada neste trabalho foi medida através de logs de trens, baseada nas velocidades de seis trens de minério carregado que circularam entre os meses de janeiro, junho e outubro. É importante ressaltar que a velocidade real leva em consideração alguns fatores não determinantes para o PRO, como as restrições de velocidade, que variam diariamente, e as paradas comandadas pelo Centro de Controle Operacional (CCO).

Percebe-se, de acordo com a Figura 22, que no decorrer da última década, as velocidades médias anteriormente consideradas como fator de cálculo para parâmetros geométricos nas curvas, já não são mais praticadas ou sequer programadas no procedimento. Das 343 curvas da EFC, 64% reduziram a velocidade com a atualização das velocidades do procedimento, enquanto 32% aumentaram. Apenas 3% das curvas permaneceram com a mesma faixa de velocidade no procedimento atual. Além disso, percebe-se que para algumas curvas, a velocidade real média, encontra-se consideravelmente mais baixa do que a velocidade que consta no PRO de Condução, provavelmente devido a um alto número de restrições ou paradas não programadas.

Na comparação da velocidade de operação revisada em 2008 com a média da velocidade real com que os trens de minério circulam na via permanente hoje, obtém-se que 93% das curvas estão praticando uma velocidade abaixo da velocidade de operação definida em 2008, conforme mostra a Tabela 6.

**Tabela 6** - Comparação das velocidades médias de operação em 2008 com as velocidades médias reais em curvas.

VELOCIDADE NAS CURVAS		
ESPECIFICAÇÃO	QUANT.	PERCENTUAL
VELOC REAL 2018 > VELOC DE OPERAÇÃO 2008	24	7%
VELOC REAL 2018 < VELOC DE OPERAÇÃO 2008	318	93%
VELOC REAL 2018 = VELOC DE OPERAÇÃO 2008	1	0%

Fonte: Autor, 2018.

### 5.3.2 Superelevações teóricas, práticas e reais

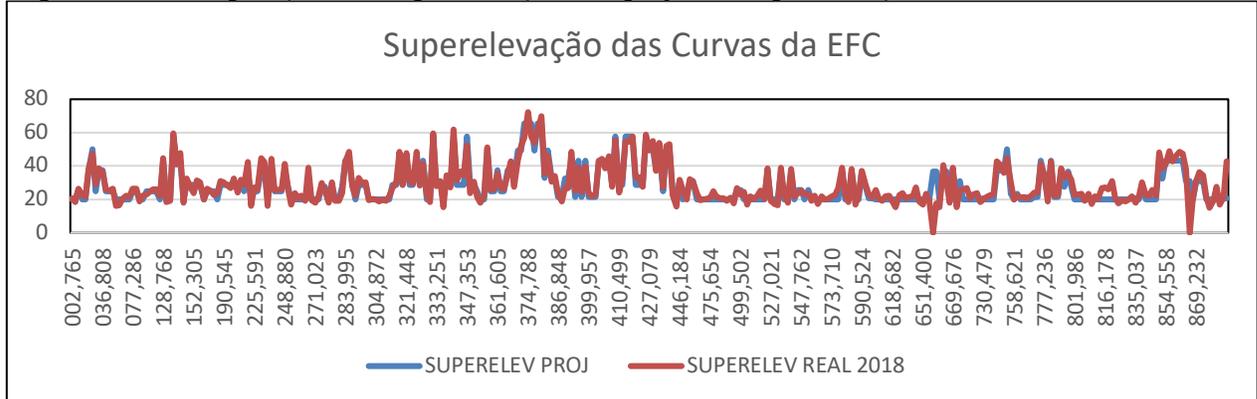
Em linhas de carga, como é o caso da EFC, a variação de velocidade numa curva é muito intensa pela presença de trens lentos no sentido ascendente das rampas e mais rápidos no sentido oposto. Além disso, mesmo que em menor escala, a EFC também transporta trens de passageiros, o que contribui mais ainda para a variação de velocidade. Nestes casos, é usual e recomendável que a ferrovia adote valores práticos de superelevações menores que os teóricos calculados sem que haja, porém, comprometimento da segurança operacional de todos os trens que circulam. A EFC adota um valor de superelevação prática de acordo com a equação a seguir:

$$Sp = \frac{2}{3} \times St \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: Sp é a superelevação prática e St a superelevação teórica.

Mesmo com uma variação considerável de velocidade na última década, a superelevação considerada na EFC para efeitos de correção geométrica ainda segue os parâmetros definidos em 2008. Através das medições do Carro Controle, foi calculada uma média da superelevação real para o mês de Outubro de 2018, expurgando trechos de transição e picos muito altos ou baixos. Os valores encontrados foram então comparados com as superelevações de projeto, conforme mostra a Figura 23.

**Figura 23** - Comparação das superelevações de projeto e superelevações médias reais das curvas.

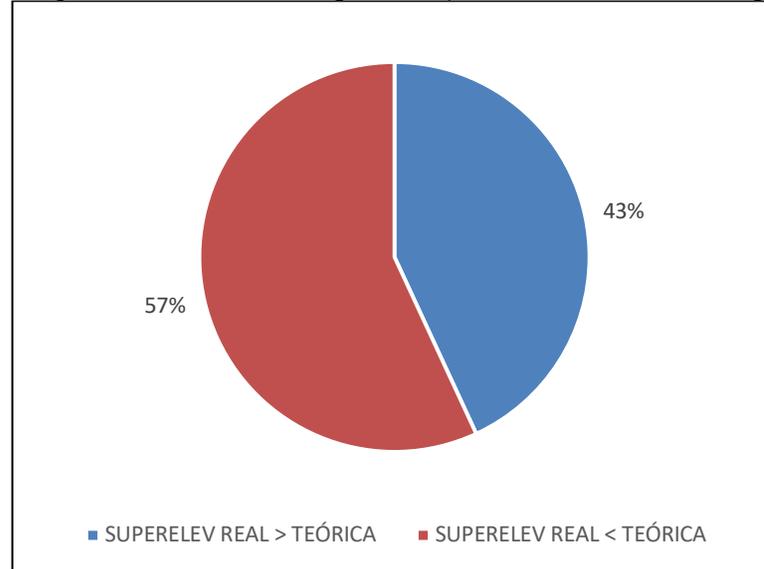


Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que, para a maioria das curvas, a superelevação média ainda se encontra dentro dos parâmetros de projeto definidos. Nesse sentido, apesar de a velocidade de operação dos trens de minério carregado ter sofrido uma redução significativa, pode-se dizer que a superelevação da via não foi alterada simultaneamente.

Uma vez que a média da velocidade real tem uma variação significativa diariamente, foi considerada como referência para este trabalho a velocidade de procedimento (PRO), devendo esta representar a velocidade com que a maioria dos trens de minério circulam normalmente. Para efeitos de análise de consumo de trilhos, foi adotada a superelevação teórica como referência, uma vez que esta é a superelevação para a qual as forças estão equilibradas. Para outros objetivos, no entanto, sabe-se que a adoção de uma superelevação prática é recomendada. A Figura 24 mostra uma comparação da superelevação média de outubro de 2018 com a superelevação teórica calculada considerando a velocidade de procedimento.

**Figura 24** - Porcentagem de curvas com superelevação real maior e menor que a teórica (PRO).



Fonte: Autor, 2018

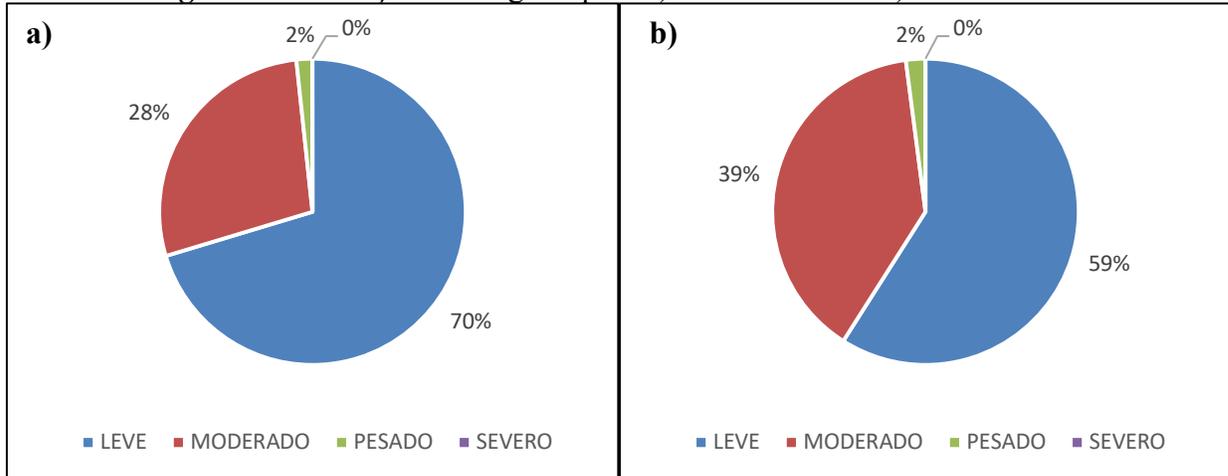
Assim, conforme mostra a Figura 24, 43% das curvas encontram-se com superelevação real maior que a teórica, e nesse sentido, estão com excesso de superelevação, enquanto 57% estão com valor de superelevação real menor que a teórica, com deficiência de superelevação.

É preciso considerar, no entanto, que neste trabalho não estão sendo considerados fatores de segurança, como superelevação mínima e máxima, uma vez que o objetivo é analisar somente o efeito da superelevação no consumo de trilhos.

### 5.3.3 Situação dos trilhos nas curvas

Através da análise dos dados do Carro Controle do mês de Outubro/2018, foi feita uma análise da situação dos trilhos das curvas categorizando em patamares já adotados na EFC e descritos nas Tabelas 4 e 5. A Figura 25 mostra os resultados obtidos quanto a situação dos trilhos das curvas da EFC:

**Figura 25 - Situação do desgaste para a) trilho externo e b) trilho interno.**

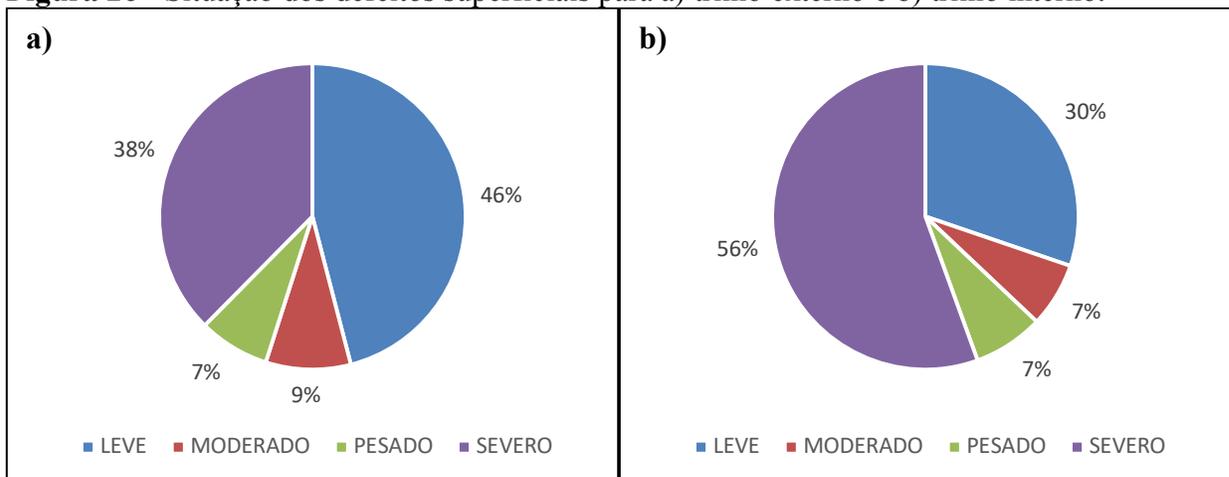


Fonte: Autor, 2018.

Pode-se observar, nesse sentido, que a porcentagem de trilhos que estão sendo substituídos por desgaste é muito baixa, uma vez que em sua maioria estes estão em situação de desgaste leve ou moderado.

Para os defeitos superficiais, uma vez que o carro controle mede a soma do comprimento do defeito, foi calculada a porcentagem da soma total correspondente a cada categoria, conforme mostra a Figura 26.

**Figura 26 - Situação dos defeitos superficiais para a) trilho externo e b) trilho interno.**



Fonte: Autor, 2018.

Pode-se perceber, neste sentido, que para o trilho externo, a maior parte dos defeitos superficiais encontram-se no estado leve. Para o trilho interno, por sua vez, a maioria está na categoria do defeito severo. Dessa forma, pode-se perceber que, para o mês de Outubro/2018, as trocas de trilho nas curvas ocorreram mais por RCF do que por desgaste, e mais no trilho interno. O outro modo de substituição de trilho possível seria devido a defeitos internos ou de fabricação. No entanto, neste trabalho este tipo de defeito não será analisado, uma vez que este tipo de medição é inspecionado por outro tipo de equipamento.

#### 5.4 Seleção das Curvas para Análise

Sabe-se que ao longo de uma curva é pouco provável haver um alinhamento perfeito da superelevação, principalmente em ferrovias de carga pesada. No entanto, é provável que pontos onde as anomalias sejam maiores, tenham comportamentos diferentes de pontos em que a superelevação está próxima do equilíbrio. Dessa forma, a intenção deste trabalho foi analisar o efeito destas diferenças no desgaste e defeitos nos trilhos (interno e externo), além de comparar o grau de influência desta diferença e de outros parâmetros geométricos e operacionais nesta anomalia.

Foram analisadas sete curvas, abrangendo todos os raios tipo da EFC, em diferentes situações de superelevação (excessiva ou deficiente) e verificada a existência de uma correlação entre a diferença de superelevação e o desgaste nos trilhos ao longo da curva, tanto para o trilho interno quanto para o externo.

Foram utilizadas medições a cada 25 metros, extraídas de inspeção do Carro Controle ocorrida no mês de Outubro/2018. Para o trilho interno, foi considerado o desgaste vertical como predominante e para o externo, o desgaste lateral, conforme a literatura. Primeiramente, fez-se uma comparação entre a diferença de superelevação e os desgastes ao longo das curvas. Em seguida, através da regressão linear, buscou-se criar uma equação tendência relacionando a diferença de superelevação com o desgaste, e a diferença de bitola com o desgaste, para efeitos de comparação da influência destes fatores no consumo de trilhos. A diferença de superelevação considerada neste trabalho refere-se a superelevação teórica menos a superelevação real. Neste sentido, valores positivos referem-se a uma deficiência de superelevação, e valores negativos a um excesso de superelevação. Os dados de diferença de bitola extraídos do Carro Controle referem-se a diferença em relação a referência, em milímetros. Sabe-se que a referência para a bitola larga é de 1600 mm,

e nesse sentido, valores positivos referem-se ao excesso de bitola (bitola aberta), e valores negativos à deficiência de bitola (bitola fechada).

Na escolha das curvas para análise, buscou-se curvas com dormentação renovada, ou seja, em concreto. Isso porque em linhas com dormentes de madeira são mais antigas e maior probabilidade de existência de fixações soltas, dormentes inservíveis e lastro colmatado, fatores os quais são propensos a poluir os dados de análise.

É importante ressaltar que existe uma grande heterogeneidade nas curvas da EFC devido a fatores externos não considerados neste trabalho, como por exemplo a diversificação no tipo de dormente, padrões de qualidade de manutenção diferentes ao longo da ferrovia, esmerilhamento desuniforme, infraestrutura ineficiente, entre outros.

A Tabela 7 mostra as características das curvas selecionadas para análise:

**Tabela 7 - Características das curvas selecionadas.**

CURVA	RAIO	DORM.	KM INICIO	KM FIM	SUP. REAL	SUP. TEO	DIF	VEL	SITUAÇÃO
1	859	CONCRETO	562,832	564,258	22	10,0	12	32	Excesso
2	859	CONCRETO	453,755	454,849	30,8	36,69	5,89	50	Deficiência
3	1.145	CONCRETO	818,499	818,873	20,7	13,5	7,2	35	Excesso
4	1.145	CONCRETO	388,253	388,679	26,8	30,9	4,1	65	Deficiência
5	1.719	CONCRETO	579,265	580,040	22,9	7,8	15,1	40	Excesso
6	1.719	CONCRETO	381,643	382,134	30,7	23,3	7,4	69	Deficiência
7	3.438	CONCRETO	585,748	586,952	17,0	8,2	8,8	58	Excesso

Fonte: Autor, 2018

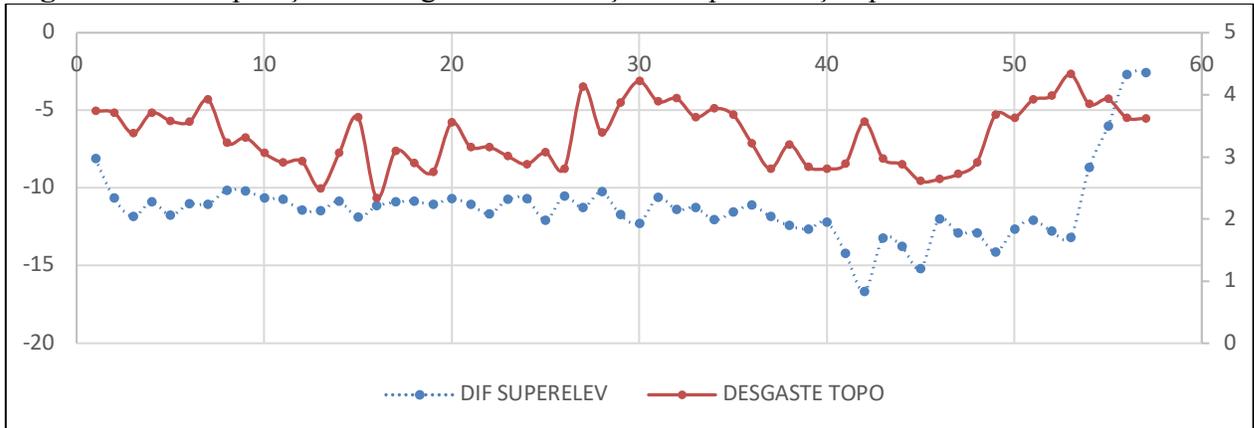
Para o raio de 3.438 metros, não foram encontradas curvas com deficiência de superelevação. Dessa forma, foi considerada somente uma curva com excesso de superelevação.

## 5.5 Análise das Curvas

### 5.5.1 Curva 1 (Excesso de Superelevação)

A Figura 27 mostra uma comparação do desgaste do trilho interno com a diferença de superelevação para a Curva 1.

**Figura 27** - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho interno da curva 1.

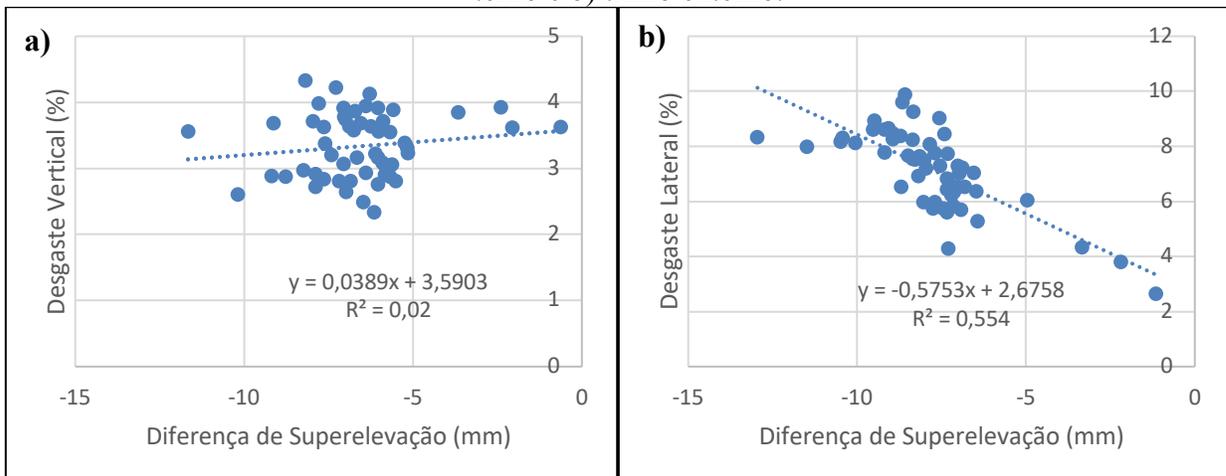


Fonte: Autor, 2018

Nota-se que, em pontos onde o excesso de superelevação cresce, o desgaste do trilho interno também cresce, confirmando a teoria da literatura. Segundo Sadeghi e Akbari (2006), para curvas com excesso de superelevação, onde a superelevação é maior do que o valor teórico, a literatura mostra que o trilho interno é exposto a cargas mais pesadas e, por sua vez, o desgaste vertical no trilho interno aumenta.

A Figura 28 mostra uma correlação e equação tendência gerada entre o desgaste predominante e a diferença de superelevação para os trilhos interno e externo.

**Figura 28** - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 1 para a) o trilho interno e b) trilho externo.

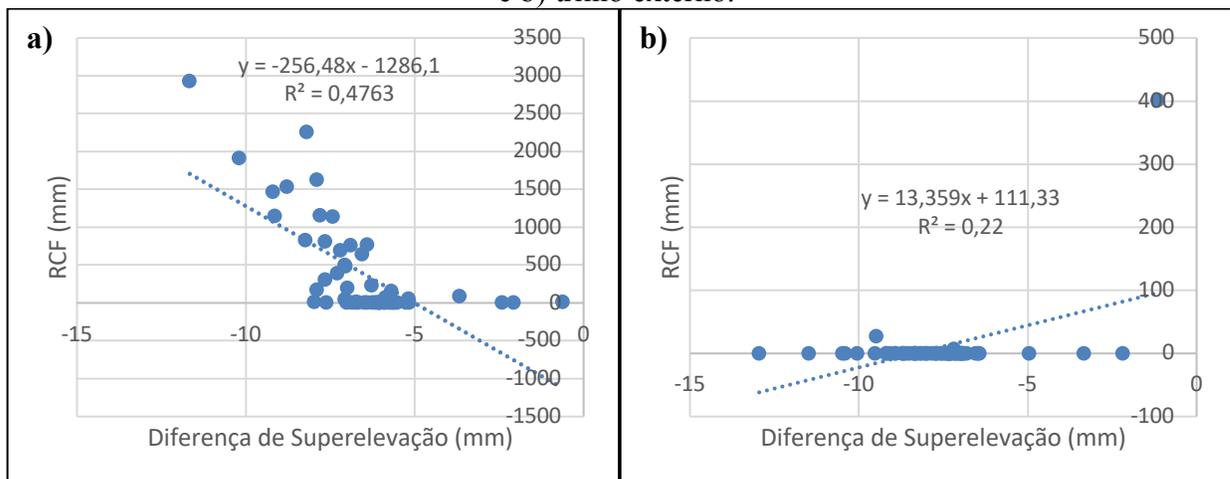


Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que para o trilho interno, o fator de correlação resultante foi muito baixo, e portanto, pode-se afirmar que não existe uma grande influência da diferença de superelevação no desgaste vertical para a curva 1, contrariando a proposta da literatura. A influência da superelevação no desgaste lateral do trilho externo foi mais significativa.

Supõe-se que isso acontece devido a influências externas a esta análise, como o surgimento de defeitos superficiais e a falta de tratamento adequado. Dessa forma, analisou-se a influência da diferença de superelevação no surgimento destes defeitos. Os resultados foram explicitados na Figura 29.

**Figura 29** - Correlação entre a superelevação e a soma de RCF para a curva 1 no a) trilho interno e b) trilho externo.

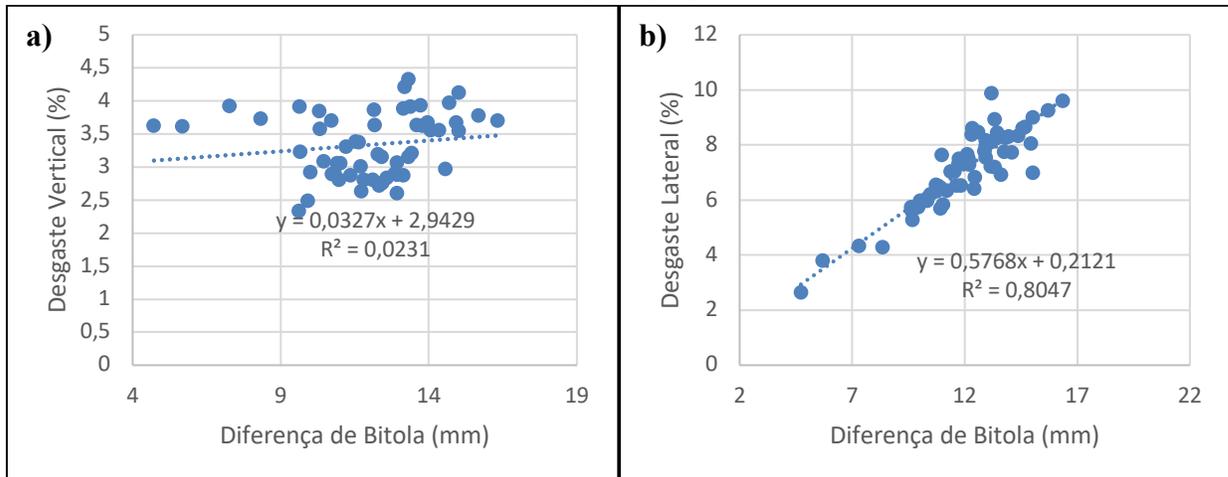


Fonte: Autor, 2018.

Verifica-se que para a curva 1, a soma de RCF tem uma relação significativa com o excesso de superelevação. Conclui-se, portanto, que para esta curva, o excesso de superelevação está mais relacionado a geração de defeitos superficiais no trilho interno do que com o desgaste vertical. O efeito da superelevação no RCF no trilho externo pode ser desconsiderado, uma vez que observa-se que a maioria dos valores encontrados para este trilho são nulos.

Para efeitos de comparação, foi investigada a influência dos defeitos de bitola (aberta e fechada) nos desgastes do trilho interno e externo. A Figura 30 mostra os resultados obtidos.

**Figura 30** - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 1 para a) o trilho interno e b) trilho externo.



Fonte: Autor, 2018.

Conforme mostra a Figura 30, a correlação entre o desgaste lateral do trilho externo e a condição da bitola é significativa. Quanto mais a bitola é aberta, maior o desgaste lateral no trilho externo. No entanto, para o trilho interno essa correlação não é significativa, uma vez que o fator de correlação é muito baixo.

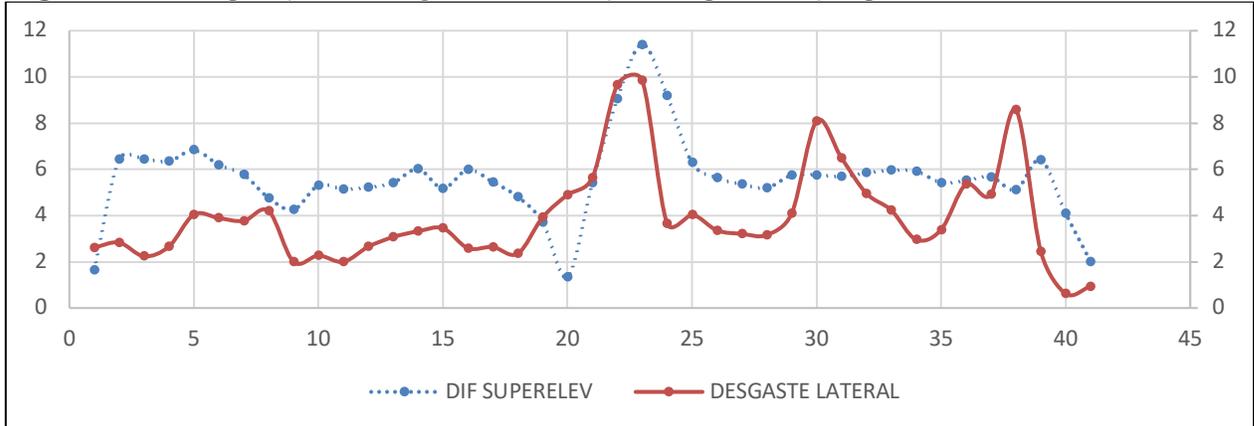
Conclui-se, portanto, que para a curva 1, o desgaste do trilho externo está mais relacionado a diferença de bitola do que a diferença de superelevação. Para o trilho interno, o desgaste não se comporta conforme esperado devido a existência de um alto índice de defeitos superficiais (RCF). O surgimento destes defeitos, por sua vez, está diretamente relacionado a diferença de superelevação. Verifica-se que em pontos com alto excesso de superelevação, a soma de RCF também é alta.

### 5.5.2 Curva 2 (Deficiência de Superelevação)

De acordo com a literatura (DICK et al. 2016) quando há deficiência de superelevação, a carga lateral do trilho externo aumenta consideravelmente à medida que esta deficiência de superelevação aumenta. Nesse sentido, o desgaste cresce conforme esta deficiência cresce. Quando a velocidade do trem aumenta e há uma deficiência de superelevação de 4 polegadas, a carga no trilho externo aumenta em mais de 20%.

A Figura 31 mostra uma comparação entre a diferença da superelevação com o desgaste no trilho externo, para a curva 2.

**Figura 31 - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho externo da curva 2.**

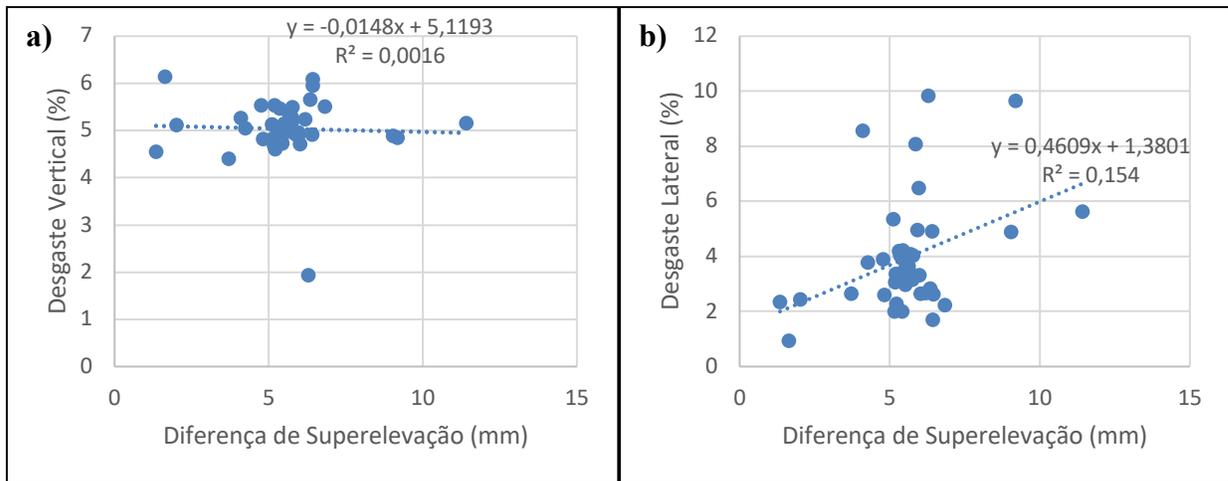


Fonte: Autor, 2018

Percebe-se que para alguns pontos, onde a deficiência de superelevação tende a subir, o desgaste predominante também cresce, e vice-versa, confirmando a teoria da literatura. Porém, nota-se que a correlação não é tão perceptível quanto foi para o trilho interno na curva 1. Neste sentido, comparando estas duas curvas, pode-se afirmar que, para um mesmo raio, o excesso de superelevação causa um efeito mais perceptível no desgaste do trilho interno do que a deficiência no trilho externo.

A figura 32 mostra a correlação e uma linha de tendência entre o desgaste predominante e a superelevação para os trilhos interno e externo.

**Figura 32** - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 2 para a) o trilho interno e b) trilho externo.

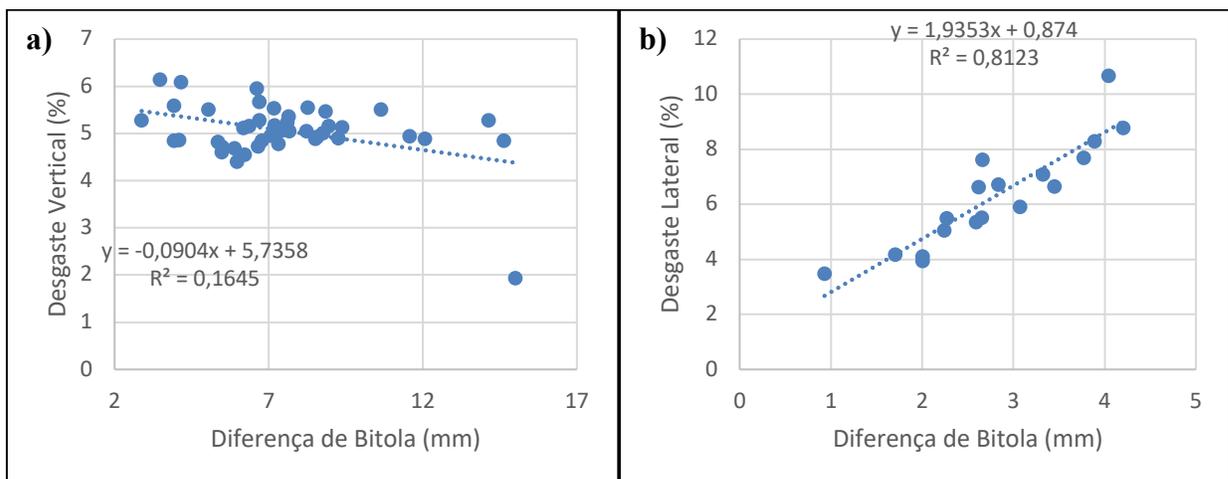


Fonte: Autor, 2018

Percebe-se, analisando as figuras, que para o trilho interno não existe uma correlação entre o desgaste e a deficiência de superelevação, enquanto que para o trilho externo esta correlação é um pouco maior, confirmando a teoria de que para deficiência de superelevação tem-se uma influência maior no desgaste do trilho externo.

Para efeitos de comparação destas influências, foi investigado o efeito da diferença de bitola no desgaste dos trilhos interno e externo, conforme mostra a Figura 33.

**Figura 33** - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 2 para a) o trilho interno e b) trilho externo.



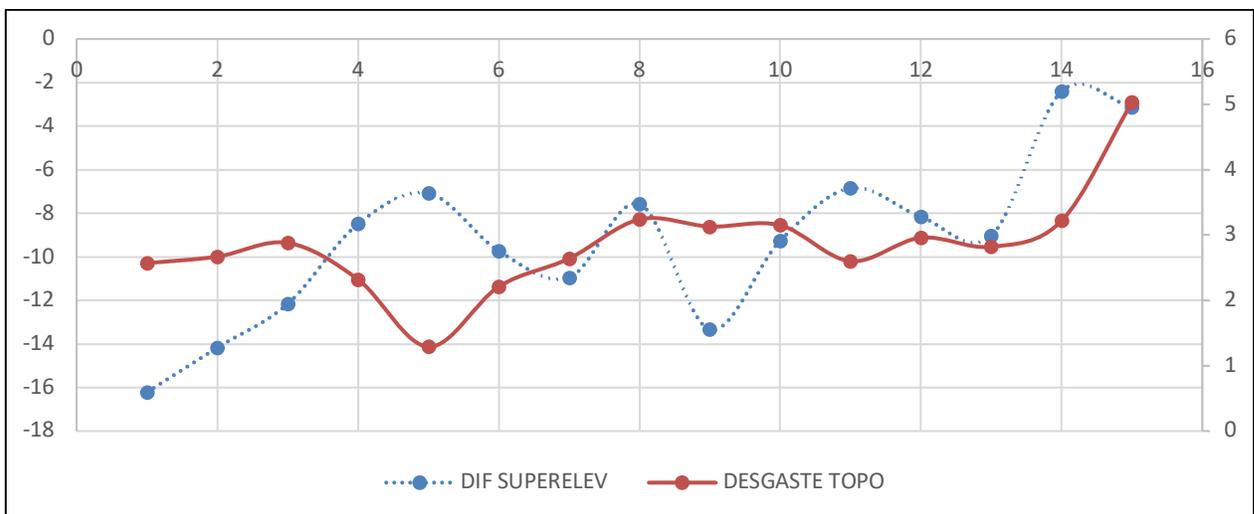
Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que, para a curva 2, a abertura de bitola tem uma maior correlação com o desgaste no trilho externo do que no trilho interno. Quanto mais abertura a bitola, maior o desgaste lateral. Pode-se afirmar também que, para a curva 2, a bitola influencia mais no desgaste dos trilhos do que a superelevação. A existência de defeitos superficiais na curva 2, para ambos os trilhos, foi insignificante.

### 5.5.3 Curva 3 (Excesso de superelevação)

A Figura 34 mostra uma comparação entre o desgaste e a diferença de superelevação na curva 3 para os trilhos interno.

**Figura 34** - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho interno da curva 3.

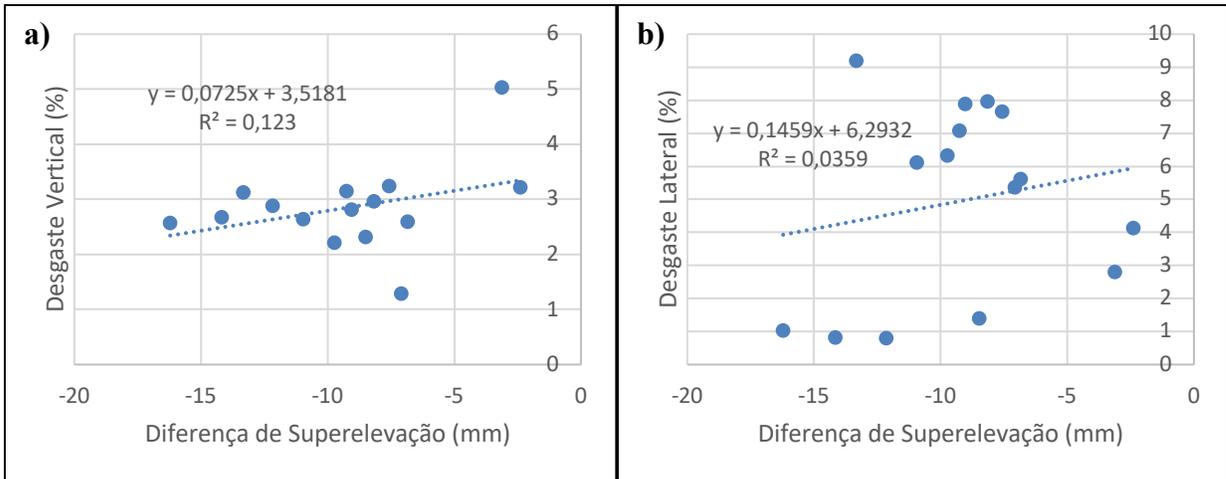


Fonte: Autor, 2018

Nota-se que existe uma relação direta entre estes dois fatores, ou seja, em pontos onde o excesso de superelevação é alto, o desgaste vertical aumenta. Nos pontos onde a superelevação está mais próxima da teórica, o desgaste diminui, confirmando a teoria apresentada.

A Figura 35 mostra uma linha de tendência entre a superelevação e o desgaste para os trilhos interno e externo.

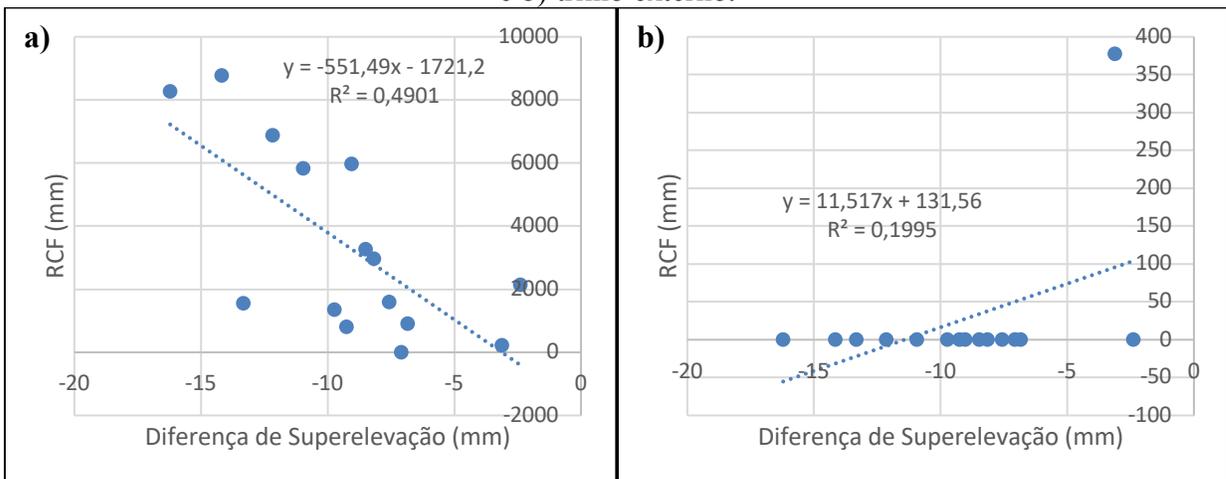
**Figura 35** - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 3 para a) o trilho interno e b) trilho externo.



Fonte: Autor, 2018.

Pode-se afirmar que, para a curva 3, a influência do excesso de superelevação no desgaste do trilho interno é maior do que no trilho externo, confirmando a teoria apresentada. Nota-se, no entanto, que o coeficiente que relaciona estes fatores é muito baixo. Acredita-se que isto acontece devido a influências externas ao desgaste, como a existência de defeitos superficiais (RCF). Investigou-se, portanto a relação da soma de RCF com o excesso de superelevação, conforme mostra a Figura 36.

**Figura 36** - Correlação entre a superelevação e a soma de RCF para a curva 3 no a) trilho interno e b) trilho externo.

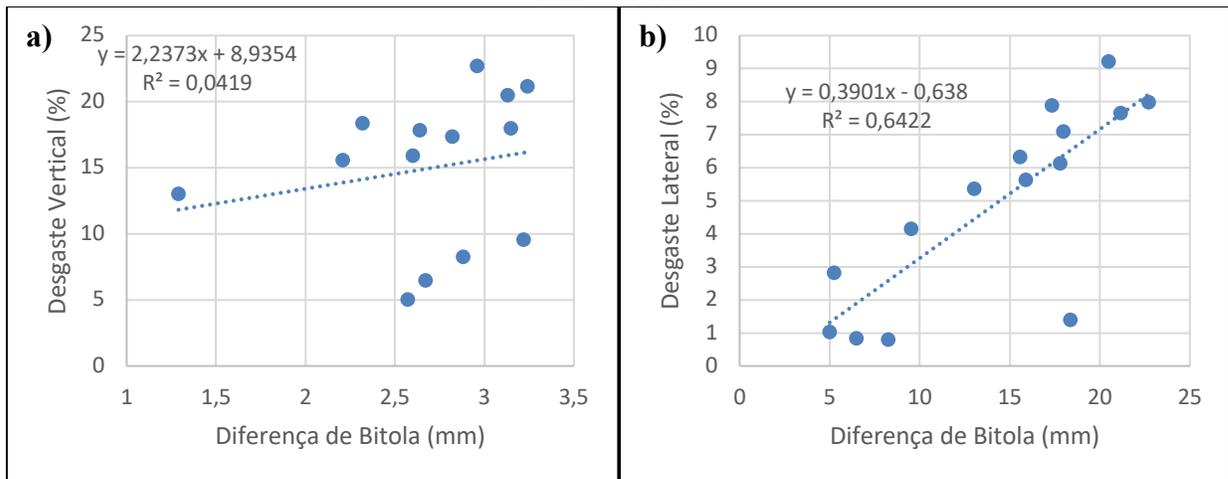


Fonte: Autor, 2018.

Observando a Figura 36, pode-se afirmar que para o trilho interno da curva 3, o excesso de superelevação tem uma correlação maior com os defeitos superficiais do que com o desgaste vertical. Quanto maior o excesso, maior a soma de RCF. Para o trilho externo, por sua vez, esta influência com o RCF é insignificante, uma vez que a maioria das medições de RCF neste trilho mostram um valor nulo. Alguns pontos fora da tendência são desconsiderados, considerando uma margem de erro da medição do Carro Controle.

Para efeitos de comparação, foi investigado o efeito da diferença de bitola no desgaste dos trilhos interno e externo, conforme mostra a Figura 37.

**Figura 37** - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 3 para a) o trilho interno e b) trilho externo.



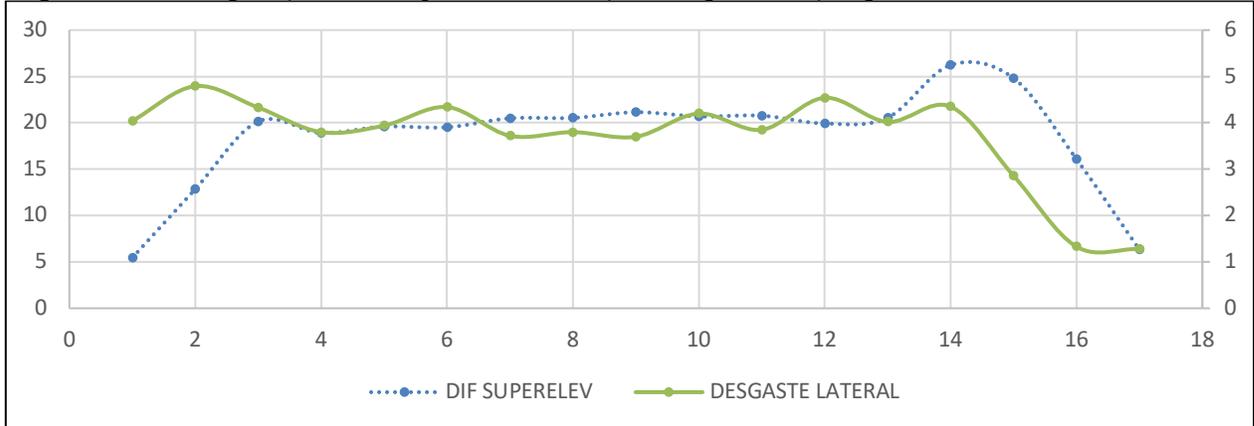
Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que para a curva 3, a influência da abertura de bitola é mais significativa para o desgaste do trilho externo. Para o trilho interno, a influência da bitola no desgaste vertical é insignificante.

#### 5.5.4 Curva 4 (Deficiência de Superelevação)

A Figura 38 mostra uma comparação entre o desgaste do trilho externo e a deficiência de superelevação da curva 4.

**Figura 38** - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho externo da curva 4.

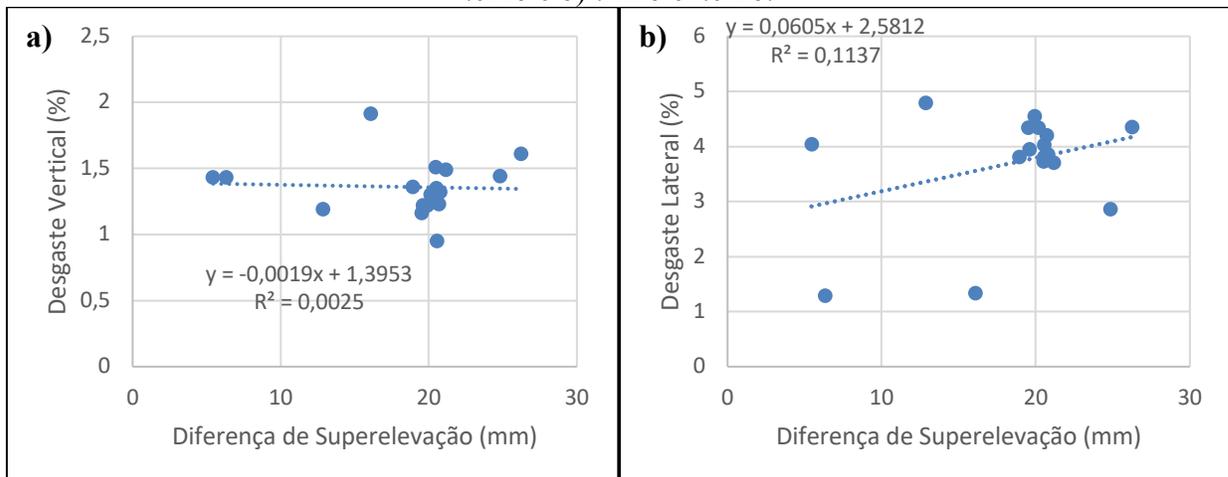


Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que, para a maioria dos pontos, existe uma relação direta entre estes fatores. A associação entre o desgaste e a diferença de superelevação pode ser percebida: onde a deficiência aumenta, o desgaste lateral aumenta; onde a deficiência é constante, o desgaste tende a se manter constante, confirmando a teoria apresentada.

A Figura 39 mostra uma linha de tendência para a relação entre a diferença de superelevação e o desgaste para os trilhos interno e externo.

**Figura 39** - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 4 para a) o trilho interno e b) trilho externo.

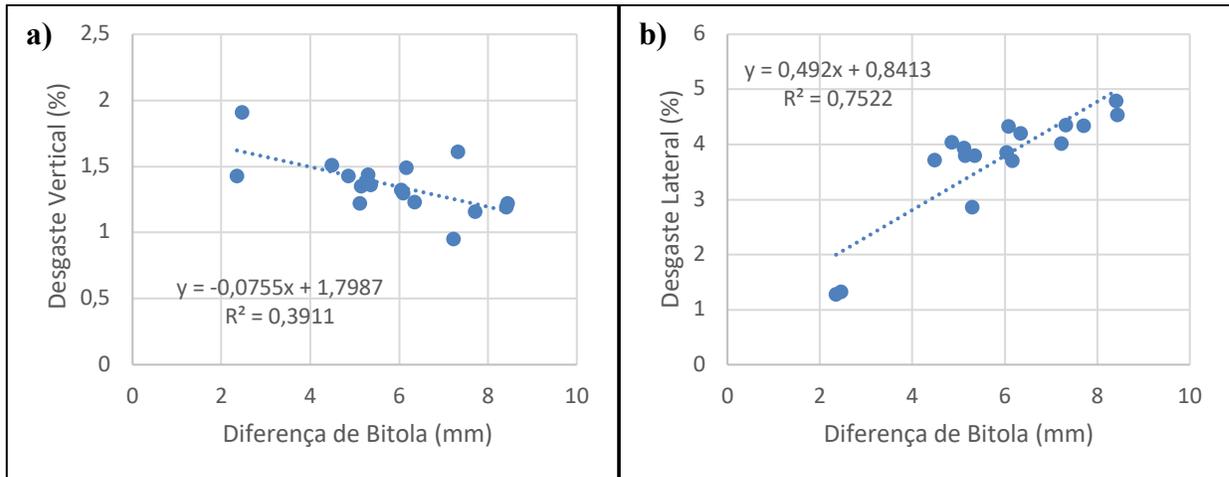


Fonte: Autor, 2018.

Pode-se perceber que, para a curva 4, a influência da deficiência de superelevação é maior no trilho externo, confirmando a teoria. No entanto, o coeficiente de correlação apresenta

um fator muito baixo. A existência de RCF para a curva 4 foi nula ou muito baixa, para ambos os trilhos. Verificou-se então, a influência da bitola no desgaste, conforme mostra a Figura 40.

**Figura 40** - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 4 para a) o trilho interno e b) trilho externo.



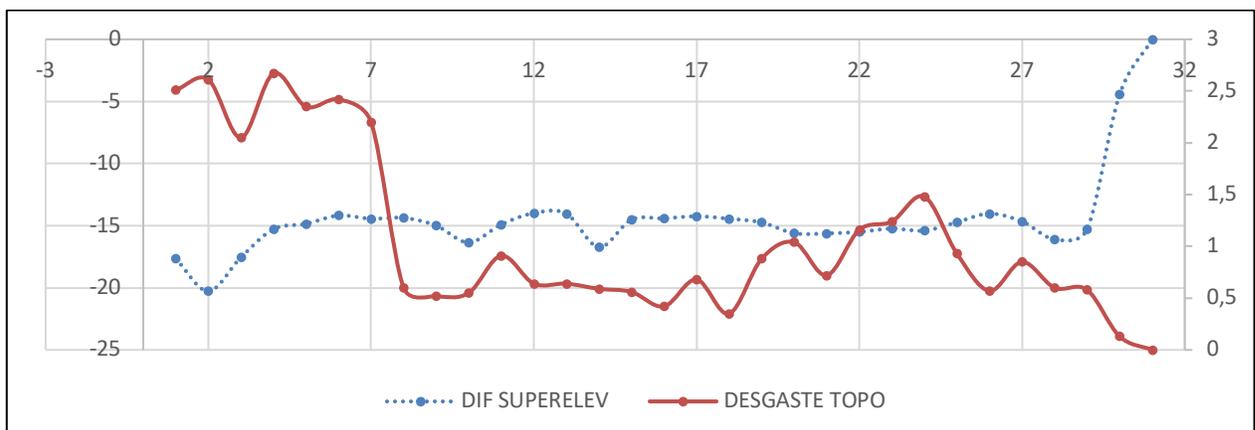
Fonte: O Autor, 2018

Nota-se que a bitola aberta tem uma influência mais significativa no desgaste do trilho externo do que a diferença de superelevação. Quanto maior a bitola, maior o desgaste.

#### 5.5.5 Curva 5 (Excesso de Superelevação)

A Figura 41 mostra uma comparação, para a curva 5, entre a diferença de superelevação e o desgaste para o trilho interno.

**Figura 41** - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho interno da curva 4.

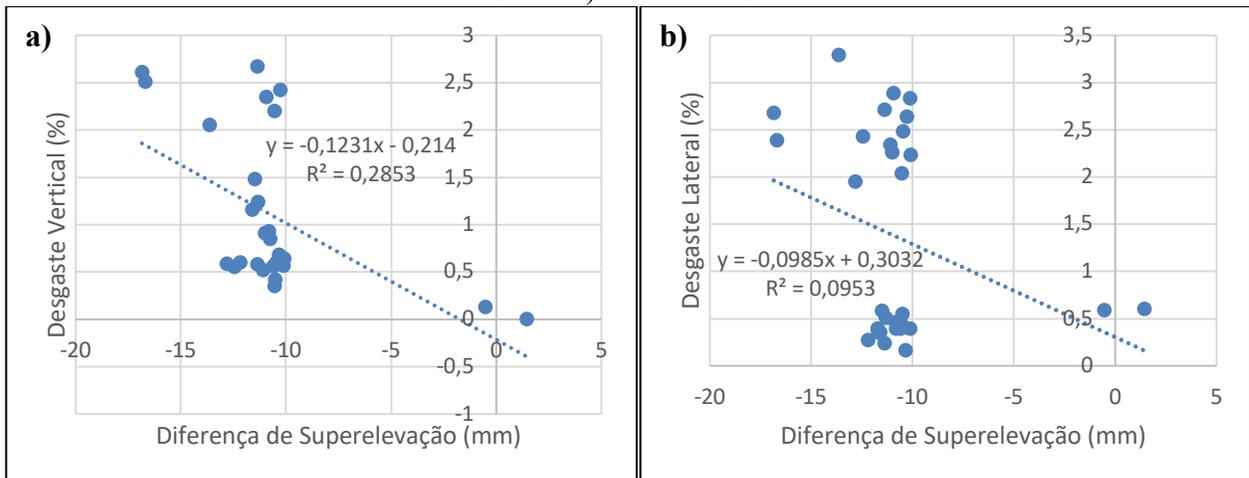


Fonte: Autor, 2018.

Nota-se, em alguns pontos, que onde o excesso de superelevação é alto, o desgaste cresce; em pontos em que a diferença permanece constante, o desgaste também tende a se mostrar constante, confirmando a teoria apresentada.

A Figura 42 mostra uma tendência para a relação entre a superelevação e o desgaste para os trilhos interno e externo, respectivamente.

**Figura 42** - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 5 para a) o trilho interno e b) trilho externo.

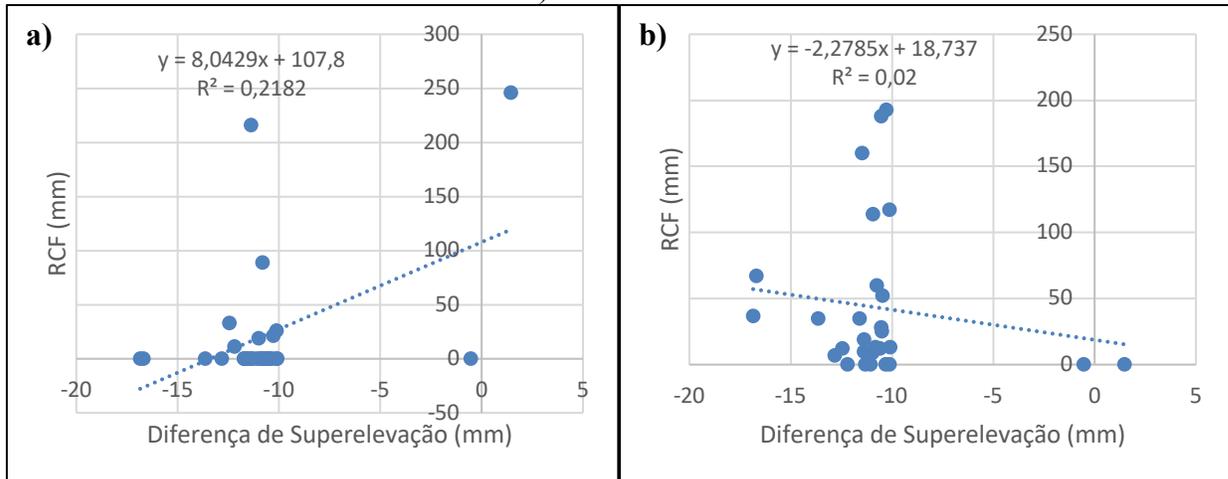


Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que, para a curva 5, o excesso de superelevação tem uma maior correlação com o desgaste no trilho interno.

Investigou-se também a influência da superelevação na formação de defeitos superficiais, conforme mostra a Figura 43.

**Figura 43** - Correlação entre a superelevação e a soma de RCF para a curva 5 no a) trilho interno e b) trilho externo.

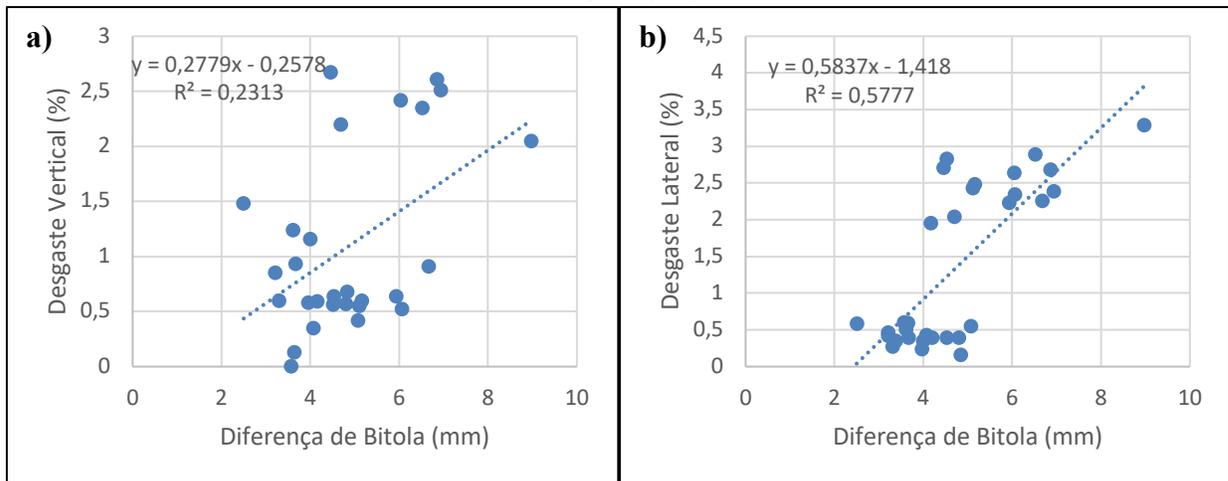


Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que para o trilho externo, a relação entre RCF e diferença de superelevação é insignificante, uma vez que o coeficiente de correlação encontrado é muito baixo. Para o trilho interno, por sua vez, apesar do alto coeficiente de correlação, nota-se que os valores encontrados na soma do RCF são muito baixos, e, portanto, considera-se que não existe uma alta influência do excesso de superelevação no trilho interno. Acredita-se que esta influência diminua à medida em que o raio aumenta.

Foi investigada também a influência da bitola no desgaste dos trilhos interno e externo, conforme mostra a Figura 44.

**Figura 44** - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 5 para a) o trilho interno e b) trilho externo.



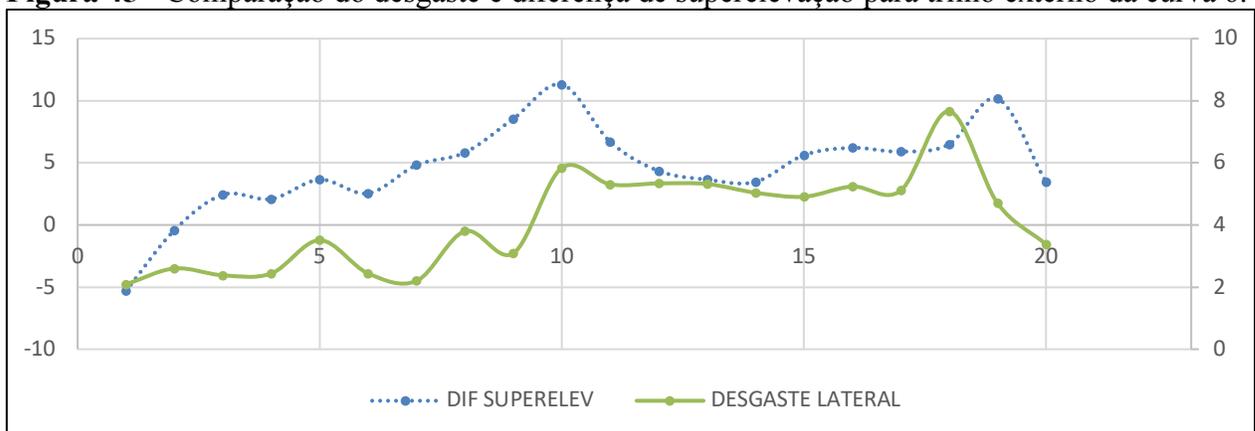
Fonte: Autor, 2018.

Verifica-se que a diferença de bitola possui maior influência no desgaste do trilho externo do que no trilho interno. Contudo, em relação a curvas de 1 a 4, anteriormente apresentadas, percebe-se a curva 5 possui uma menor influência da bitola no desgaste. Acredita-se que esta diminuição de coeficiente de correlação tenha ocorrido devido ao aumento do raio.

#### 5.5.6 Curva 6 (Deficiência de Superelevação)

A Figura 45 mostra uma comparação entre a diferença de superelevação e o desgaste para o trilho externo.

**Figura 45** - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho externo da curva 6.

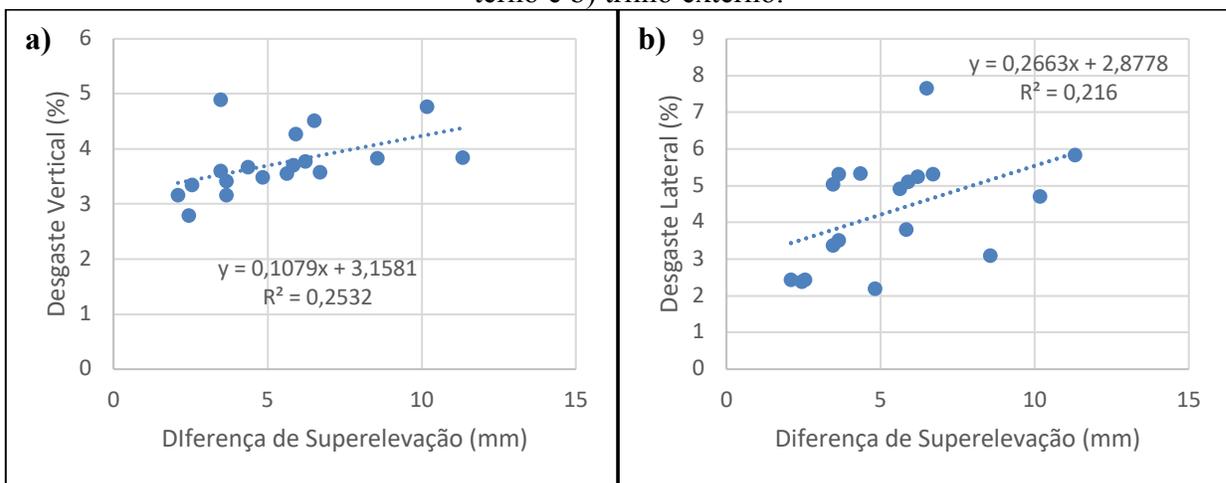


Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que, para a maioria dos pontos de medição, conforme a deficiência de superelevação aumenta, o desgaste lateral também aumenta, e vice-versa. Quando a diferença permanece constante, o desgaste também tende a ser constante, confirmando a teoria apresentada.

A Figura 46 mostra uma correlação entre a diferença de superelevação e desgaste para os trilhos interno e externo da curva 6.

**Figura 46** - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 6 para a) o trilho interno e b) trilho externo.



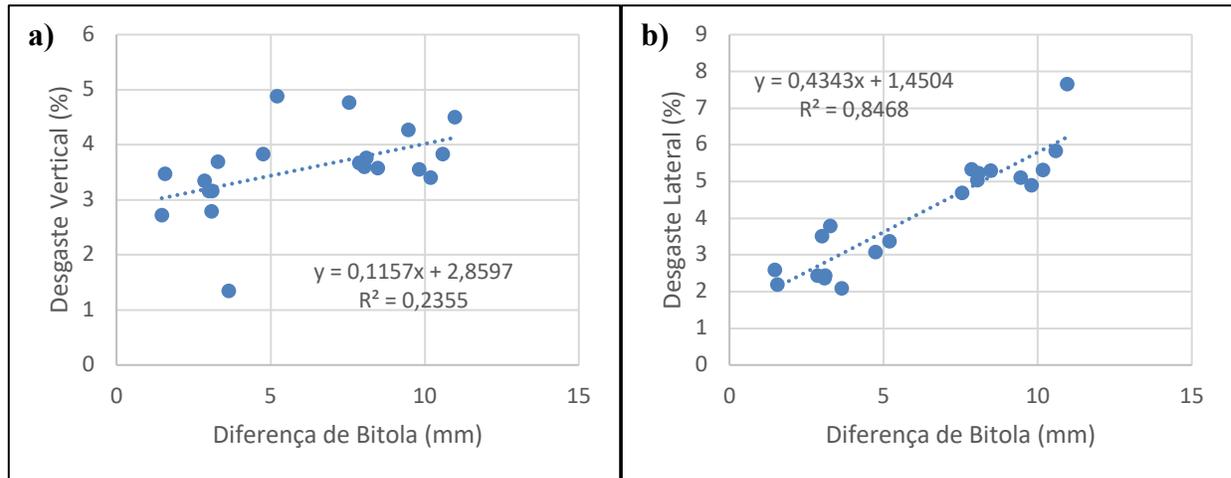
Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que para a curva 6, os valores do coeficiente de correlação estão próximos, tanto para o trilho interno, quanto para o externo. Acredita-se que esta variação pequena entre os coeficientes de correlação pode estar sendo influenciada por variações constantes de velocidade no trecho em questão. Comparando as equações, no entanto, pode-se notar que a deficiência de superelevação gera um maior desgaste no trilho externo.

A existência de RCF para a curva 6 foi nula ou muito baixa, para ambos os trilhos.

A Figura 47 mostra uma correlação entre a diferença de bitola e o desgaste para o trilho interno e externo da curva 6.

**Figura 47** - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 6 para a) o trilho interno e b) trilho externo.



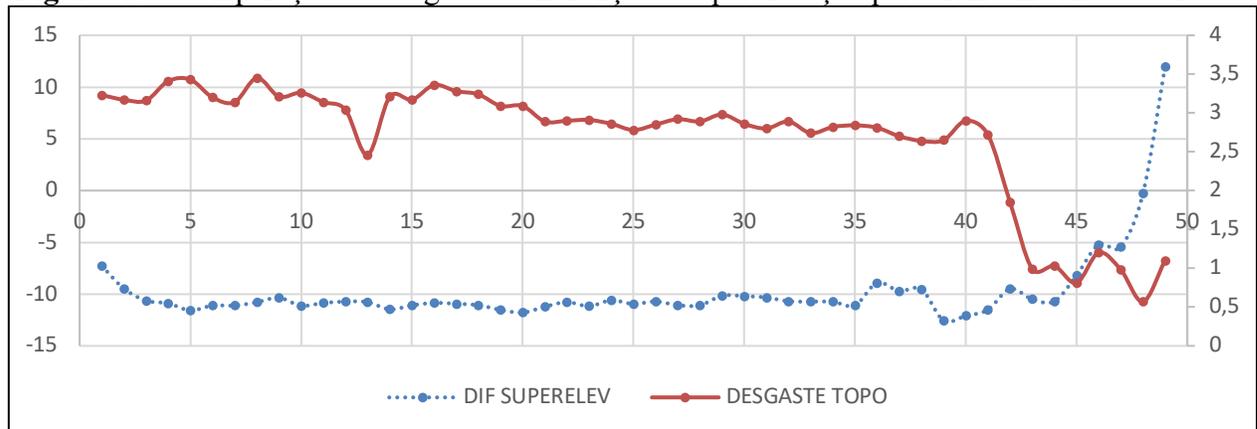
Fonte: Autor, 2018.

Para a curva 6, a influência da abertura de bitola tem maior efeito no desgaste do trilho externo.

### 5.5.7 Curva 7 (Excesso de Superelevação)

A Figura 48 mostra uma comparação entre a diferença de superelevação e o desgaste para o trilho interno.

**Figura 48** - Comparação do desgaste e diferença de superelevação para trilho interno da curva 7.

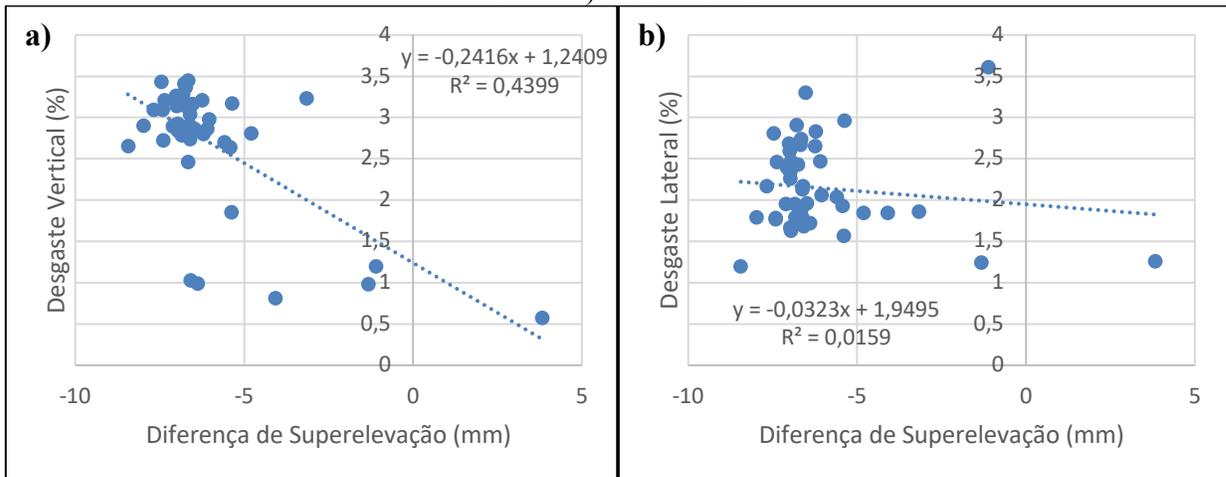


Fonte: Autor, 2018.

Analisando as figuras, pode-se perceber que para alguns pontos, existe uma relação direta entre a diferença de superelevação e o desgaste nos trilhos. Em pontos onde o excesso de superelevação é maior, o desgaste também cresce, e vice-versa, confirmando a teoria apresentada.

A Figura 49 mostra uma correlação entre o desgaste e a diferença de superelevação para a curva 7.

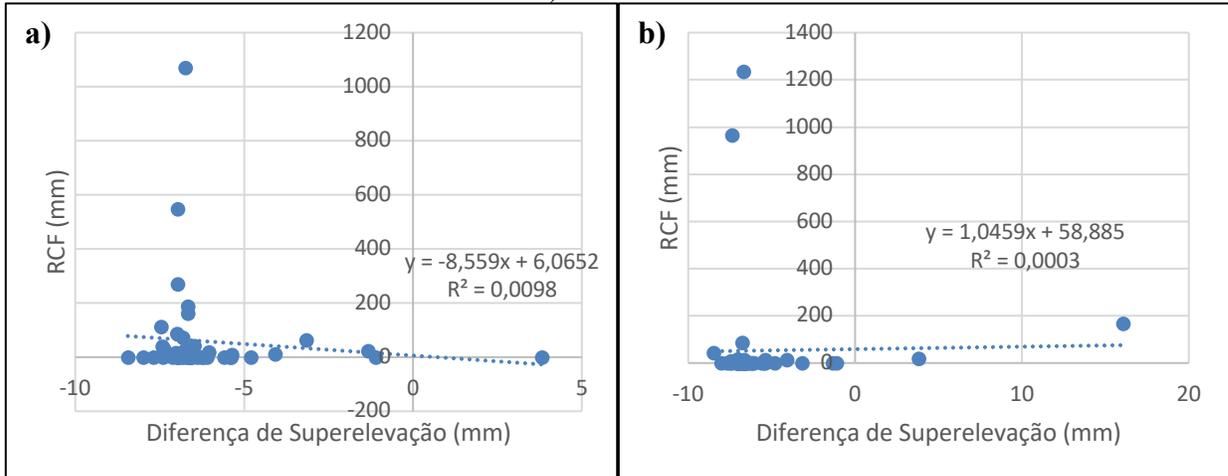
**Figura 49** - Correlação entre desgaste e diferença de superelevação da curva 7 para a) o trilho interno e b) trilho externo.



Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que, na curva 7, a influência do excesso de superelevação no desgaste vertical do trilho interno é significativa, enquanto para o desgaste lateral não existe uma correlação considerável. Em relação às curvas anteriormente apresentadas com excesso de superelevação, pode-se notar que a curva 7 foi a que teve uma maior correlação com o desgaste vertical do trilho interno. Acredita-se que isto ocorreu devido ao fato de que para raios maiores, a influência do RCF não é significativa, conforme mostra a Figura 50.

**Figura 50** - Correlação entre a superelevação e a soma de RCF para a curva 7 no a) trilho interno e b) trilho externo.

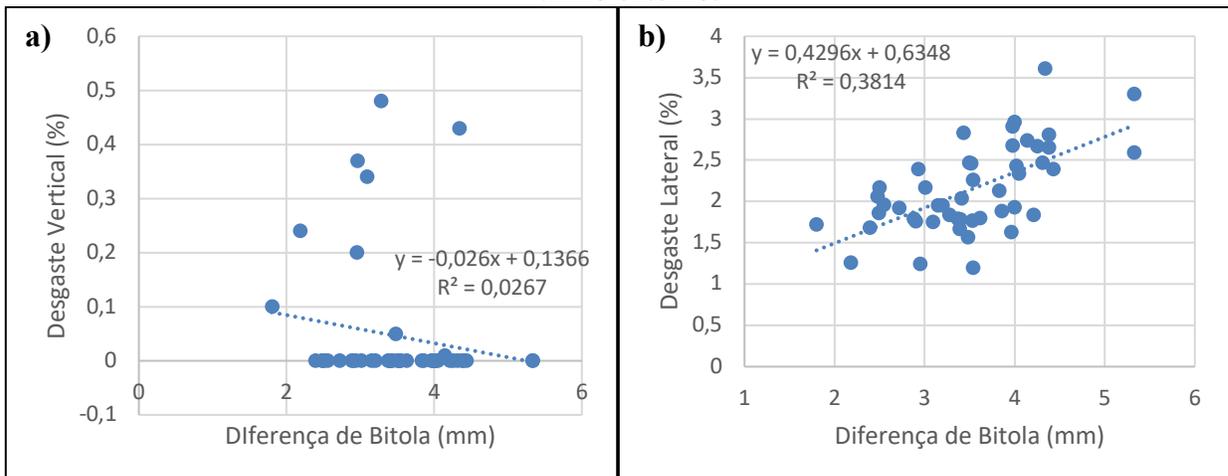


Fonte: Autor, 2018.

Nota-se que, tanto para o trilho interno quanto para o externo, a maioria dos valores de RCF para a curva 7 se aproximam de zero. Assim, conclui-se que quanto maior o raio, menor a influência do RCF e portanto, o desgaste da curva passa a se comportar cada vez mais conforme esperado.

Por fim, foi feita uma correlação entre a diferença de bitola e o desgaste para a curva 7, conforme mostra a Figura 51.

**Figura 51** - Correlação entre desgaste e diferença de bitola da curva 7 para a) o trilho interno e b) trilho externo.



Fonte: Autor, 2018.

Para a curva 7, a influência da bitola no desgaste vertical do trilho interno não é considerável, enquanto para o trilho externo sim. Quanto maior abertura da bitola, maior o desgaste lateral.

#### 5.5.8 Modelo de correlação (superelevação, bitola, velocidade e raio)

Para a determinação de um modelo matemático geral, fez-se uma análise genérica de todas as curvas da Estrada de Ferro Carajás, e, através do método da regressão linear, determinou-se uma equação representativa para o desgaste de topo, desgaste lateral e defeitos superficiais a partir de parâmetros geométricos e operacionais, conforme descritos abaixo:

a) Desgaste de topo trilho interno

$$D_{TOPO} = 4,094 - 0,063 \cdot X1 - 0,72 \cdot X2 + 0,012 \cdot X3 - 0,018 \cdot X4 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$(R^2 = 0,03)$$

Onde:  $D_{TOPO}$  é desgaste de topo (%), X1 é diferença de superelevação (mm), X2 é o raio da curva (m); X3 é a diferença de bitola (mm), e X4 a velocidade operacional (km/h).

b) Desgaste lateral trilho externo

$$D_{LATERAL} = 0,787 - 0,005 \cdot X1 + 0,067 \cdot X2 + 0,387 \cdot X3 - 0,0096 \cdot X4 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$(R^2 = 0,55)$$

Onde:  $D_{LATERAL}$  é desgaste lateral (%), X1 é diferença de superelevação (mm), X2 é o raio da curva (m); X3 é a diferença de bitola (mm), e X4 a velocidade operacional (km/h).

c) Defeito por RCF trilho interno

$$D_{RCF} = 2245,349 - 7,894 \cdot X1 - 90,995 \cdot X2 + 49,468 \cdot X3 - 1,401 \cdot X4 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$(R^2 = 0,02)$$

Onde:  $D_{RCF}$  é defeito RCF (mm),  $X_1$  é diferença de superelevação (mm),  $X_2$  é o raio da curva (m);  $X_3$  é a diferença de bitola (mm), e  $X_4$  a velocidade operacional (km/h).

De acordo com os modelos, verifica-se que o desgaste lateral do trilho externo é o mais bem representado pelas premissas abordadas, pois apresenta  $R^2 = 0,55$ . Deve-se considerar, no entanto, que a diferença de bitola e o desgaste lateral são fatores que andam juntos, e dessa forma, é inevitável que sua correlação seja alta. Quanto mais o trilho desgasta lateralmente, mais a bitola tenderá a abrir. Os demais modelos possivelmente estão sendo influenciados por fatores externos, que não sejam fatores geométricos, como condições de operação, propriedades dos materiais e variáveis geológicas.

## 5.6 Resultados

Com base na revisão da literatura e na coleta de dados realizada a partir do Carro Controle, foi feita uma avaliação das superelevações na EFC e uma análise dos efeitos da superelevação nos desgastes dos trilhos e na geração de defeitos superficiais (RCF).

Como mostrado na análise das 7 curvas separadamente, para curvas com excesso de superelevação o desgaste vertical do trilho interno tende a aumentar quanto maior o raio, ou seja, enquanto a curva 1 ( $R = 859\text{m}$ ) apresenta uma taxa da equação em módulo de 0,0389, a curva 7 ( $R = 3.438$ ) apresenta taxa de 0,2416. Acredita-se que isto acontece devido ao fato de que quanto maior o raio, menor a influência de fatores externos ao desgaste, como os defeitos superficiais (RCF). A influência da superelevação no RCF do trilho interno para os raios mais baixos é muito alta, apresentando uma taxa em módulo de 225 para curva 1 ( $R = 859$ ). Porém, à medida que o raio cresce, esta correlação vai diminuindo, e nesse sentido, para a curva 7 ( $R = 3438\text{m}$ ), a taxa cai para 8. Conclui-se então, que para o trilho interno, a influência da superelevação no desgaste se mostrou diretamente proporcional ao raio, enquanto no RCF, esta relação é inversa.

Na situação de trilho externo, a análise do desgaste lateral é semelhante, ou seja, enquanto a curva 1 ( $R = 859\text{m}$ ) apresenta uma taxa em módulo de 0,5753, a curva 7 ( $R = 3.438$ ) apresenta taxa de 0,0323, confirmando a ideia de Sadeghi e Akbari (2006). Segundo estes autores, ao reduzir o raio da curva, as forças exercidas da roda para o trilho externo aumentam, resultando no maior desgaste lateral do trilho externo. Com base nos resultados apresentados pelas curvas

analisadas, no entanto, quando há excesso de superelevação, o efeito no desgaste do trilho externo se mostrou irrelevante. O fator que mais influencia no desgaste do trilho externo para excesso de superelevação é a bitola. A influência no RCF do trilho externo também se mostrou muito baixa.

Para curvas com deficiência, por sua vez, a superelevação influencia mais no trilho externo do que no interno, uma vez que todas as taxas das equações são maiores para este trilho. Os valores dos coeficientes de correlação, no entanto, mostram que essa influência não é tão significativa quanto a influência da bitola. Quanto a influência da bitola, além de causa, é importante ressaltar que ela também é uma consequência, pois o efeito do desgaste proporciona também o aumento da abertura de bitola.

Para a análise de todas as curvas da EFC, verificou-se a influência de cada um dos fatores geométricos analisados na evolução dos desgastes e defeitos. Considerou-se como representativas para o desgaste de topo e para a formação de RCF somente as curvas com excesso de superelevação, e para o desgaste lateral, somente as curvas com deficiência. Comparou-se então os coeficientes de correlação de cada um dos parâmetros com o desgaste/defeitos, individualmente. No trilho interno das curvas, notou-se que os fatores mais influentes no desgaste vertical, em sua ordem de importância são: diferença de superelevação, velocidade, raio e bitola. No trilho externo das curvas, bitola, diferença de superelevação, raio e velocidade têm mais influência no caso de desgaste lateral. Quanto aos defeitos por RCF no trilho interno, verifica-se que superelevação, bitola, velocidade e raio estão influenciando nesta ordem.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho mostrou um estudo de avaliação das superelevações nas curvas da EFC e a sua influência no consumo de trilhos, considerando dados de projeto e dados reais retirados das medições do Carro Controle. Primeiramente, foi feita uma análise das velocidades e constatou-se que, para a maioria das curvas, as velocidades médias reais encontram-se abaixo das velocidades operacionais de projeto, para as quais foram calculados os parâmetros de superelevação adotados na ferrovia. Em seguida, foi feita uma comparação entre as superelevações de projeto e as superelevações reais encontradas na via, e constatou-se que, para a maioria das curvas, as superelevações médias não tiveram uma variação significativa em relação aos valores de projeto. Assim, analisando as equações básicas da Engenharia Ferroviária, mostrou-se que, no geral, existe uma incompatibilidade entre a superelevação da EFC e as velocidades praticadas pelos trens de minério carregado atualmente.

Posteriormente, foi feita uma análise da situação dos trilhos para o mês de outubro de 2018, e constatou-se que a maioria dos trilhos nas curvas neste mês não estão sendo substituídos por critérios de desgaste, uma vez que apenas 2% das medições encontrava-se dentro de uma categoria próxima a situação de substituição. No entanto, observou-se que, para o critério de substituição por defeito superficial (RCF), 56% dos trilhos internos e 38% dos externos com este tipo de defeito encontravam-se em situação próxima a de substituição. Percebeu-se, então, que é provável que a maioria dos trilhos em curvas estão sendo substituídos por defeitos superficiais, com predominância do trilho interno.

Foram analisadas então 7 curvas, incluindo os 4 raios tipo da EFC, que se encontram com superelevação desbalanceada (excesso ou deficiência), para verificar o efeito desta diferença no consumo dos trilhos. Analisando os coeficientes de correlação encontrados e as equações de regressão, constatou-se que, para curvas com excesso de superelevação, existe uma influência significativa da superelevação no desgaste do trilho interno para raios altos. Esta influência, no entanto, vai decrescendo conforme o raio diminui. Isso porque para raios baixos, a superelevação está influenciando mais no surgimento de RCF no trilho interno do que no desgaste vertical. Para o trilho externo, a influência maior no desgaste é da abertura de bitola, tanto para deficiência quanto para excesso de superelevação.

Na análise geral e modelagem matemática de todas as curvas da EFC, concluiu-se que para o trilho interno das curvas, os seguintes fatores são influentes no desgaste vertical, em sua ordem de importância: diferença de superelevação, velocidade, raio e bitola. No trilho externo das curvas, bitola, diferença de superelevação, raio e velocidade são mais influentes no caso de desgaste lateral. Quanto aos defeitos por RCF no trilho interno, verifica-se que superelevação, bitola, velocidade e raio estão influenciando nesta ordem.

Neste sentido, recomenda-se a realização de um estudo para calibração das superelevações na EFC ou ajuste de velocidade para curvas em que houver muita discrepância, priorizando curvas com excesso de superelevação e raios mais baixos, uma vez que estas têm uma maior tendência ao aparecimento de defeitos, a principal causa de substituição de trilhos atualmente na EFC. Sabe-se, no entanto, que uma diminuição da superelevação em uma via pode gerar impactos de grande escala na produção de uma ferrovia, e dessa forma, recomenda-se primeiramente a verificação da possibilidade de retomada da velocidade para os parâmetros de projeto definidos previamente. Além disso, é extremamente importante o tratamento adequado de defeitos em trilhos, através do esmerilhamento. Recomenda-se também uma maior eficiência na manutenção da geometria das curvas, evitando pontos altos ou baixos de superelevação que comprometam o desgaste dos trilhos na curva e até a segurança operacional.

## REFERÊNCIAS

- ANTF, Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários. **Maior valor em TKU da série histórica**. Disponível em <<https://www.antf.org.br/releases/mais-eficiencia-mais-tku/>>. Acesso em 15 set. 2018.
- BRINA, H. L. **Estradas de Ferro 1: Via Permanente**. 1ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S.A, 1979.
- \_\_\_\_\_, H. L. **Estradas de Ferro Volume 1: Via Permanente**. 2ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S.A, 1988.
- CÂMARA, Guilherme Becker da. **Procedimento e software para identificar, classificar e analisar problemas na linha ferroviária de trem de carga**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- CNT, Confederação Nacional do Transporte. **Anuário CNT do Transporte- Estatísticas consolidadas 2016**. Brasília, 2016;
- COÊLHO, A. B. et al. **Desgaste de trilhos**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 1982.
- COIMBRA, Marcelo do Vale. **Modos de Falha dos Componentes da Via Permanente Ferroviária e seus Efeitos no Meio Ambiente**. Tese (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, 2008.
- DICK, C.T. et al. **Superelevation Optimization for Mixed Freight and Higher-Speed Passenger Trains**. Proceedings, American Railway Engineering and Maintenance of Way Association Annual Conference, Orlando, FL, 2016.
- ESVELD, Coenraad. **Modern Railway Track**, 2 ed. The Netherlands, MRT-Productions, 2001. a referencia para Esveld, 2001
- GAZABIM, G. S. **Uma contribuição aos estudos para adequação de superelevações no circuito do minério da MRS**. Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Carga, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.
- KLEIN, M. P., SINAY, L. Minimização do desgaste nas curvas com rampas retas em ferrovias. **Rev. Tecnol. Fortaleza**, v. 25, n. 2, p. 32-40, dez. 2004.
- LARSSON, D. **A Study of Track Degradation Process Related to Changes in Railway Traffic**. Licenciante Thesis, Lulea University of Technology. 2004.

LIMA, Henrique Alexandre Dourado. **Procedimento para seleção de método de manutenção para a superestrutura ferroviária**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 1998.

MACÊDO, Fernanda Bittencourt. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2009.

MRS. **Esmerilhadora de Trilhos**. 2018. Disponível em: < <https://www.mrs.com.br/post-blog-inovacao/esmerilhadora-de-trilhos/>>. Acesso em: 12 out. 2018.

NABAIS, Rui José da Silva (Org.). **Manual básico de engenharia ferroviária**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014

OLIVEIRA, F. H. L.; PAZ, I. B. F. **Análise dos métodos de cálculo de superelevação ferroviária em transporte de cargas**. HG Consultoria e Engenharia Universidade de Fortaleza – UNIFOR. Fortaleza, 2015.

PAIVA, Cassio Eduardo Lima de. **Super e infraestruturas de ferrovias: critérios para projeto**, 1 ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

PETRONI, Caio Vilhena. **Estudo da performance dos diversos tipos de trilhos assentados na via da mrs, critérios de desgaste, fadiga de contato**. Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Carga, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006.

SADEGHI, J.; AKBARI, B. J. Field investigation on effects of railway track geometric parameters on rail wear. **Journal of Zhejiang University SCIENCE A**, Narmak, Tehran, Iran, 2006.

SEMPREBONE, Paula da Silva. **Desgaste em trilhos ferroviários – um estudo teórico**. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2006.

SGAVIOLI, F., BERNUCCI, L., MOTTA, R. **Sistema de gerência de pavimentos ferroviários com ênfase na geometria e desgaste de trilhos**. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da Anpet. Ouro Preto, 2015

SILVA, Eduardo Teixeira Fonseca e. **Análise da evolução dos defeitos da via permanente da MRS para planejamento de intervenções preditivas de manutenção**. Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Carga, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006.

SUCENA, Marcelo Prado. **Subsídios para a Alocação de Recursos Financeiros em Sistemas de Transportes Urbanos Sobre Trilhos Baseado em Critérios Técnicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2002.

VALE. **Manual Técnico Da Via Permanente**. [s.i]: Vale S.A, 2009.

\_\_\_\_\_. **Elementos de Vistoria de Via Permanente**. [s.i]: Vale S.A, 2011.

\_\_\_\_\_. **Manual Técnico Da Via Permanente.** [s.i]: Vale S.A, 2013.

\_\_\_\_\_. **Estratégia de Manutenção para Superestrutura EFC 2019-2023** (Arquivo Interno). 2018a.

\_\_\_\_\_. **Estrada de Ferro Carajás:** o caminho por onde passa a nossa riqueza. 2018b. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/carajas-railway/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 20 out. 2018.

\_\_\_\_\_. **Velocidade 80 km/h Trem M Carregado Linha 1 EFC** (Arquivo Interno). 2018c.

\_\_\_\_\_. **Manutenção de Trilhos EFC** (Arquivo Interno). 2018d.

VALEC, Engenharia, Construções e Ferrovias. 80-EG-000A-18-0001: **Superelevação em curvas ferroviárias.** Disponível em <[http://www.valec.gov.br/documentos/normativos\\_tecnicos/especificacoes\\_de\\_projeto/Superelevação%20em%20curvas%20ferroviárias%20-%2080-EG-000A-18-0001%20Rev2.pdf](http://www.valec.gov.br/documentos/normativos_tecnicos/especificacoes_de_projeto/Superelevação%20em%20curvas%20ferroviárias%20-%2080-EG-000A-18-0001%20Rev2.pdf)>. Acesso em: 30 out. 2018.