



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA

João Marcos Hoepers

Análise dos defeitos de geometria em trechos das ferrovias brasileiras

Joinville

2024

João Marcos Hoepers

Análise dos defeitos de geometria em trechos das ferrovias brasileiras

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Ferroviária e Metroviária do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ferroviária Metroviária.

Orientador(a): Marcus Vinicius Volponi Morteau

Joinville

2024

João Marcos Hoepers

Análise dos defeitos de geometria em trechos das ferrovias brasileiras

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de engenheiro e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Ferroviária e Metroviária.

Joinville, 25 de novembro de 2024.

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Prof. Marcus Vinicius Volponi Morteau
Orientador(a)

Prof. Yader Alfonso Guerrero Pérez
Dr. Engenharia Civil

Glauber Sterdi Luiz
Vli S.A

Joinville, 2024.

Dedico esse trabalho a minha família Edilea, Laercio, Samuel e Emilly.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante essa etapa da minha vida.

Primeiramente aos meus pais, Edilea e Laercio, que sempre foram a minha base, inspiração e meus maiores incentivadores. E ao meu irmão, Samuel. Eu não tenho palavras suficientes para agradecer por seu apoio constante.

Minha namorada, Emilly, por toda a paciência e parceria durante todas as semanas de provas e trabalhos da graduação. Aos meus amigos principalmente do grupo *Azar na Sorte*, que estiveram ao meu lado durante essa jornada, deixando-a mais divertida.

Não posso deixar de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador de TCC, o professor Marcus, que com a orientação valiosa, guiou meu trabalho com simplicidade e objetividade.

Também desejo agradecer ao meu orientador de estágio e atual chefe Bruno Saraiva, por sua orientação, incentivo e confiança permitindo utilizar os dados necessários ao estudo. Minha gratidão se estende à equipe da Nomadlog Brastan por sua receptividade e por todas as experiências enriquecedoras que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Outro agradecimento exclusivo ao meu colega de trabalho Thales por sempre lembrar as minhas prioridades e da minha carreira e por me “*atormentar*” até o final da entrega deste documento.

Por fim um agradecimento ao Glauber por sempre ter sido essa figura que todo estudante de engenharia ferroviária quer seguir, por ser um dos pioneiros a trilhar este caminho e por fim, por aceitar fazer parte da banca avaliadora deste trabalho.

Faça o teu melhor na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores para fazer melhor ainda! (Mario Sergio Cortella)

RESUMO

A geometria de via é a posição que os trilhos ocupam no espaço, ela tem a função de guiar as composições para o seu destino com segurança e eficiência. Este trabalho tem como objetivo analisar defeitos de geometria de via em ferrovias brasileiras medidas por carro controle. A análise dos defeitos foi realizada segundo os parâmetros limites recomendados pela norma ABNT NBR 16387 após a reclassificação dos dados que originalmente se encontravam de acordo com o plano de regras da empresa Nomadlog. Para isto foram analisados 15,2 mil defeitos de 28 inspeções em 7 trechos diferentes cobrindo todas as regiões do país exceto região sul afim de observar a recorrência e criticidade dos defeitos registrados. Os resultados deste trabalho mostram que a partir dos defeitos registrados em bitola métrica e larga observou-se 9 tipos de defeitos dos 16 possíveis com destaque para defeitos de torções de base curta, bitola aberta e variação rápida de bitola. Esses três por sua vez são possivelmente causados devido a manutenções inadequadas evidenciando a necessidade de modernização das estruturas ferroviárias.

Palavras-chave: Defeitos de geometria, análise de defeitos, criticidade, via permanente.

ABSTRACT

Track geometry refers to the spatial position of the rails, which serves to guide trains to their destination safely and efficiently. This study aims to analyze track geometry defects in Brazilian railways measured by track inspection cars. The analysis was conducted based on the limit parameters recommended by the ABNT NBR 16387 standard, following the reclassification of data originally aligned with the rule plan of the company Nomadlog. For this purpose, 15.2 thousand defects from twenty-eight inspections across seven different railway sections were analyzed, covering all regions of the country except the South, to see the recurrence and criticality of the recorded defects. The results of this study show that, among the defects recorded in both narrow and broad-gauge tracks, nine types of defects were identified out of sixteen categories. Notable defects included short-wavelength twists, wide gauge, and rapid gauge variation. These three were caused by inadequate maintenance, highlighting the need for modernization of railway infrastructure.

Keywords: Geometry defects, defect analysis, criticality, track infrastructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição da via férrea.....	18
Figura 2 - Dormentes de madeira.....	19
Figura 3 - Dormente de aço.....	20
Figura 4 - Dormente de concreto.....	20
Figura 5 - Dormente de plástico.....	20
Figura 6 - Perfil do trilho.....	22
Figura 7 - Vista do perfil fado trilho.....	22
Figura 8 - Planos de geometria de via.....	23
Figura 9 - Verificação da flecha.....	25
Figura 10 - Elementos de curva.....	26
Figura 11 - Desnivelamento transversal.....	27
Figura 12 - Desnivelamento longitudinal.....	27
Figura 13 – Bitola.....	30
Figura 14 - Leitura de Voidmetro.....	32
Figura 15 - Desalinhamento transversal.....	33
Figura 16- Carro controle.....	35
Figura 17 - Fluxograma de coleta de dados.....	39
Figura 18 - Fluxograma de metodologia de análise de dados.....	51
Figura 19 - Duplicidade de registros.....	53
Figura 20 – Pareto: número de registros por tipo de defeito.....	56
Figura 21 - Número de P0 por tipo de defeito.....	57
Figura 22 - Número de P0 no Trecho C.....	58
Figura 23 - P0 de torção de base curta no Trecho C.....	58
Figura 24 - P1 e P2 para torção de base curta.....	59
Figura 25 – Número de registros de P1 por falha.....	61
Figura 26 - Registro de bitola aberta por trecho.....	62
Figura 27 - Taxa de defeitos por quilômetros.....	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação do nivelamento transversal com segmento de via	31
Quadro 2 - Superelevação de bitola larga	32
Quadro 3 - Informações sobre os trechos escolhido	41
Quadro 4 - Variáveis de criticidade.....	45
Quadro 5 - Classes para bitola métrica segundo a ABNT	46
Quadro 6 - Classes para via para bitola larga segundo a ABNT	46
Quadro 7 - Criticidade de defeitos bitola métrica classe 2.....	47
Quadro 8 - Criticidade de defeitos bitola métrica classe 3.....	48
Quadro 9 - Criticidade de defeitos bitola larga classe 2.....	48
Quadro 10 - Criticidade de defeitos bitola larga classe 2.....	48
Quadro 11 - Duplicidade de defeitos	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidade máxima autorizada segundo sua classe.....	29
Tabela 3 – Número de registros Nomadlog e ABNT.....	53
Tabela 4 – Dados duplicados	54
Tabela 5 - Total de quilômetros inspecionados por inspeção.....	54
Tabela 6 – Defeitos duplicados de torção de base curta.....	55
Tabela 7 – Distribuição dos defeitos em relação a criticidade	55
Tabela 8 - Registro de defeitos por criticidade no Trecho E.....	60
Tabela 9 - Registro por defeito e trecho	61
Tabela 10 - Criticidade por segmento de via	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANTT Agência Nacional de Transportes Terrestres

EN Europeia Norm (Normas Europeias)

NBR Norma Brasileira

SE Superelevação

TBC Torção Base Curta

TBL Torção Base Longa

VMA Velocidade Máxima Autorizada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	VIA PERMANENTE	17
2.1.1	Dormente	18
2.1.2	Lastro e Sublastro	21
2.1.3	Trilhos	21
2.2	GEOMETRIA DE VIA	23
2.2.1	Plano Horizontal	24
2.2.2	Plano transversal	26
2.2.3	Plano Longitudinal	27
2.2.4	Desvios de cotas	28
2.3	DEFEITOS DE GEOMETRIA	28
2.3.1	Bitola aberta ou fechada	29
2.3.2	Varição rápida de bitola 5m	30
2.3.3	Torções e Empenos	31
2.3.4	Superelevação máxima excedida	32
2.3.5	Desalinhamento de curva excedido	33
2.4	MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS DE GEOMETRIA.....	34
2.4.1	Carro controle	35
2.5	REVISÃO DA LITERATURA	36
3	METODOLOGIA	39
3.1	LEVANTAMENTO DE DADOS.....	40
3.2	BANCO DE DADOS	40
3.3	TRECHOS SELECIONADOS.....	41
3.3.1	Trecho A	42
3.3.2	Trecho B	42
3.3.3	Trecho C	42

3.3.4	Trecho D.....	43
3.3.5	Trecho E.....	43
3.3.6	Trecho F.....	43
3.3.7	Trecho G.....	43
3.4	BANCO DE DADOS E ABNT	44
3.4.1	Adequação do nível de criticidade para a ABNT	45
3.4.2	Níveis de criticidade para ABNT	47
3.5	ETAPAS DA ANÁLISE DE DADOS.....	49
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	52
4.1	IMPORTAÇÃO DOS DADOS E VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE	52
4.2	REAVLIAÇÃO DOS DEFEITOS DE ACORDO COM A ABNT.....	52
4.3	FILTRAGEM DE DADOS DUPLICADOS	53
4.4	ANÁLISE DA DESCRIÇÃO DE DEFEITOS	56
4.4.1	Análise do defeito de torção de base curta	57
4.4.2	Análise do defeito de bitola aberta e variação rápida de bitola	60
4.5	DEFEITOS POR SEGMENTO DE VIA.....	62
5	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	67
	ANEXO A – TABELA REGISTROS DE DEFEITOSERRO! INDICADOR	
	NÃO DEFINIDO.	

1 INTRODUÇÃO

O setor ferroviário brasileiro, apesar de sua importância estratégica para a economia, enfrenta desafios crescentes relacionados à manutenção da infraestrutura e à segurança operacional. Com uma rede extensa e diversa, a preservação da geometria da via é um dos fatores mais críticos para garantir o transporte seguro e eficiente (Nascimento, 2010). No entanto, problemas de geometria impactam diretamente a capacidade das ferrovias em atender à crescente demanda logística do país.

Defeitos de geometria, como desalinhamento, falhas no nivelamento e variações de bitola, são causas recorrentes de interrupção de tráfego, restrição de velocidade e até mesmo descarrilamentos. Esses problemas podem surgir devido ao desgaste natural da via, e à falta de manutenção adequada. (Frazão, 2018)

O contexto brasileiro apresenta particularidades que intensificam essa problemática, como deficiência nos processos de manutenção, o uso intenso de trechos de ferrovia antigos e principalmente a falta de pesquisas relacionadas a defeitos de geometria de via, mesmo com um aumento significativo de investimentos em modernização e automação da infraestrutura nos últimos dois anos (Zanatta, 2023).

Neste cenário, torna-se evidente a necessidade de aprofundar a análise sobre os tipos e causas dos defeitos de geometria nas ferrovias brasileiras. Este trabalho busca dar início a discussões sobre o tema.

Neste contexto, esse trabalho tem como principal objetivo realizar uma análise dos defeitos de geometria em trechos das ferrovias brasileiras seguindo a norma ABNT NBR 16387. Além disso, este é o primeiro trabalho que realiza um levantamento dos principais defeitos de geometria existentes nas ferrovias brasileira. No total foram avaliados 7 trechos, durante um período de 4 anos, fazendo um levantamento total de 15,2 mil defeitos em um total de 293 quilômetros inspecionados.

Este trabalho é organizado da seguinte maneira: capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre via permanente e defeitos de geometria; o capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para análise dos defeitos de via; o capítulo 4 expõe uma breve discussão sobre os resultados das análises e por fim o capítulo 5, com a conclusão deste trabalho.

1.1 OBJETIVOS

A fim de documentar as pesquisas feitas sobre o assunto temos os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise dos defeitos de geometria nas ferrovias brasileiras em relação a norma ABNT NBR 16387.

1.1.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Apresentar os principais defeitos existentes nas ferrovias segundo a norma ABNT NBR 16387;
- Fazer um levantamento dos defeitos existentes em diferentes trechos de ferrovias no Brasil;
- Avaliar do número de ocorrências e criticidade dos defeitos nos trechos das ferrovias no Brasil segundo a ABNT;
- Determinar os principais defeitos existentes nos trechos ferroviários no Brasil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica deste trabalho, abordando os temas de via permanente e geometria de via.

2.1 VIA PERMANENTE

Atualmente, com a incorporação de tecnologias, locomotivas, vagões e veículos rodoferroviários podem estar equipados com uma ampla variedade de sensores, capazes de registrar eventos e falhas em tempo real. Esses sensores monitoram diversos componentes associados ao contato entre roda e trilho, bem como à via permanente, foco deste trabalho (Bilheri, 2001)

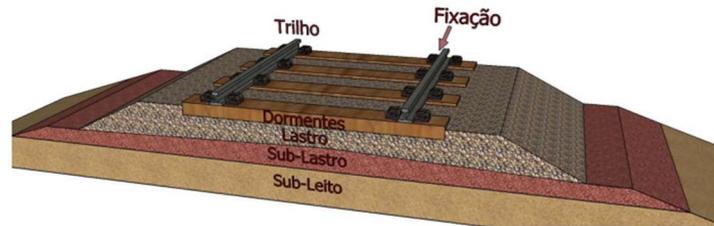
A introdução dessas tecnologias possibilita uma análise mais precisa dos componentes. No entanto, para que essa modernização seja eficaz, é fundamental entender a estrutura da via férrea e como se comporta diante dos esforços.

Conforme descrito por Steffler (2013), as vias férreas são compostas por duas partes principais: a infraestrutura e a superestrutura. A infraestrutura corresponde à terraplanagem, também chamada de subleito, cujo objetivo é nivelar o terreno, eliminando inclinações que possam dificultar a passagem das composições ferroviárias.

Já a superestrutura ou via permanente, é toda a parte acima da infraestrutura. A via permanente recebe, suporta e transmite os esforços gerados pelo material rodante, isto é, qualquer veículo que se desloca sobre trilhos. Os principais componentes são os trilhos, dormentes, lastro e sublastro (Passos, 2018).

Os componentes da via férrea, citados anteriormente são mostrados na Figura 1.

Figura 1 – Composição da via férrea



Fonte: Steffler (2013)

O trilho é o principal componente responsável pela sustentação longitudinal e pelo apoio das rodas, sendo fixado transversalmente aos dormentes por meio de travas metálicas. Os dormentes, por sua vez, garantem que a fixação dos trilhos seja suficiente para resistir aos esforços laterais e longitudinais. A distância entre os trilhos, conhecida como bitola, é um parâmetro crítico, pois influencia diretamente a estabilidade e a segurança da via (Steffler, 2013).

Ainda de acordo com Steffler (2013), o lastro é composto por pedras britadas de granulometria adequada e tem a função de distribuir os esforços transmitidos pelos dormentes de maneira uniforme para a plataforma. Além disso, o lastro contribui para a estabilidade da via, proporcionando drenagem eficiente das águas superficiais e oferecendo ancoragem longitudinal e transversal.

2.1.1 Dormente

Os dormentes são componentes fundamentais da superestrutura ferroviária, cuja função principal é transmitir ao lastro os esforços gerados pelos veículos ferroviários. Além disso, eles proporcionam suporte aos trilhos, garantindo que a bitola permaneça estável, prevenindo variações que comprometam a segurança e a eficiência das operações (Brina, 1983).

No passado, os dormentes de madeira eram amplamente utilizados nas ferrovias devido às suas boas propriedades de resistência mecânica e durabilidade, que atendiam às demandas da época. As condições operacionais, como baixo volume de tráfego, cargas por eixo reduzidas e velocidades mais baixas, combinadas a uma legislação ambiental permissiva, permitiam a exploração desenfreada de madeiras nobres em escalas que hoje seriam insustentáveis (Steffler, 2013).

No entanto, com o passar do tempo e o aumento das exigências de desempenho, segurança e sustentabilidade, surgiram novos desafios. A evolução tecnológica e a maior preocupação com a gestão ambiental impuseram a necessidade de desenvolver alternativas aos dormentes de madeira, visando aumentar o desempenho em termos de suporte de cargas, velocidade e durabilidade.

Assim, novos materiais começaram a ser empregados na fabricação de dormentes, como concreto, aço e plástico, cada um com características próprias de durabilidade, custo e resistência mecânica. A escolha do material ideal depende de fatores como o volume de tráfego, a velocidade da linha, a carga máxima por eixo, os custos de manutenção e a visão estratégica de longo prazo da empresa (Câmera, 2018).

Conforme aponta Porto (2004), os dormentes desempenham várias funções essenciais, incluindo: a distribuição das cargas sobre o lastro, a manutenção da bitola, o suporte seguro aos trilhos, e a garantia da estabilidade transversal, horizontal e longitudinal da via. Além disso, eles ajudam a amortecer parcialmente as vibrações geradas pelo tráfego ferroviário, contribuindo para a preservação da estrutura da via e para a segurança das operações.

As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram os dormentes de madeira, aço, concreto e plástico respectivamente.

Figura 2 - Dormentes de madeira



Fonte: Brasil ferroviário (2015)

Figura 3 - Dormente de aço



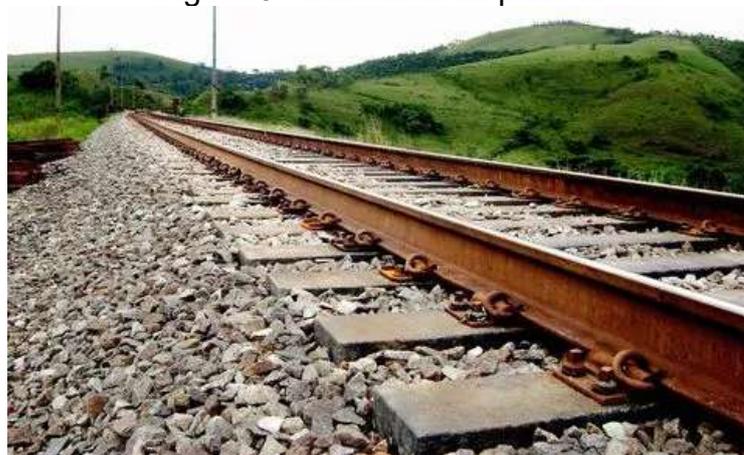
Fonte: Observatório Ferroviário (2015)

Figura 4 - Dormente de concreto



Fonte: UFJF (2014)

Figura 5 - Dormente de plástico



Fonte: Observatório Ferroviário (2015)

2.1.2 Lastro e Sublastro

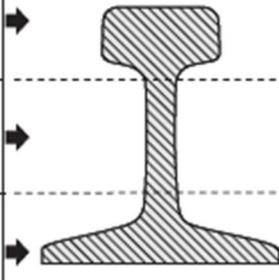
De acordo com Câmara (2016), o lastro ferroviário é uma camada de material permeável e resistente, de granulometria adequada, posicionada entre os dormentes e leito/sublastro. O lastro, geralmente utiliza pedra britada para proporcionar suporte adequado à passagem dos trens apresenta granulometria específica para garantir a estabilidade da linha. Além de sustentar a via, ele deve garantir uma drenagem eficiente das águas e dissipar suavemente as cargas transmitidas pelos trilhos.

O sublastro, de acordo com Porto (2004) está situado entre o lastro e o subleito, e tem atua como um filtro impedindo que a lama suba do e contamine o lastro. Segundo Brina (1983), suas principais funções incluem: aumentar a capacidade de suporte da plataforma, o que eleva a taxa de trabalho do terreno e permite reduzir a altura do lastro; impedir que o lastro penetre na plataforma; e aumentar a resistência do subleito contra erosão e infiltração de água, preservando suas características estruturais.

2.1.3 Trilhos

Segundo Brina (1983), os trilhos são componentes da superestrutura ferroviária que formam a superfície de rolamento sobre a qual os veículos ferroviários se deslocam. Cada trilho é composto por três partes principais: boleto, alma e patim, como ilustrado na figura. O formato do trilho foi desenvolvido para combinar características que garantem uma capacidade de transmissão de esforços.

Figura 6 - Perfil do trilho

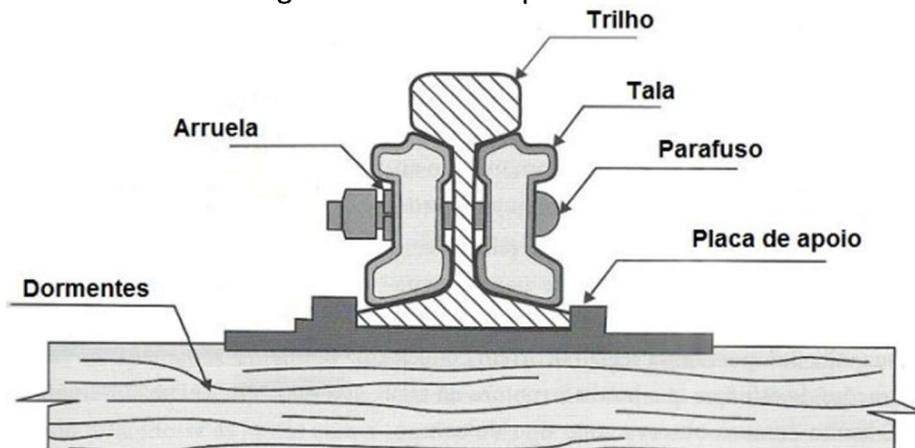
Região	Característica	Perfil
Boleto	Recebe a carga das rodas. Deve ter uma área de contato adequada para reduzir a pressão e permitir o desgaste.	
Alma	Liga o bolete ao patim e sua altura determina a inércia e, conseqüentemente, grande parte da resistência do perfil à carga máxima por eixo.	
Patim	Transfere as cargas para os dormentes. É achatada para reduzir a pressão de contato e facilitar o acesso às fixações.	

Fonte: Brina (1983)

O bolete deve ter uma massa adequada para garantir sua durabilidade, visto que ele faz contato diretamente com as rodas. Esse contato constante faz com que o bolete seja o principal determinante da vida útil do trilho, que será retirado de operação quando atingir um determinado nível de desgaste. (Steffler, 2013)

A alma, por sua vez, é a seção mais estreita do trilho e define a altura ao perfil. Quanto maior a altura da alma, maior a capacidade de flexão do trilho, o que o torna mais resistente à pressão. Por fim, o patim, localizado na base do trilho, recebe as cargas transmitidas pela alma. Devido a seu formato aumenta a área de contato com as placas e fixações, proporcionando uma transferência mais suave das cargas para a via, conforme a figura 7.

Figura 7 - Vista do perfil fado trilho



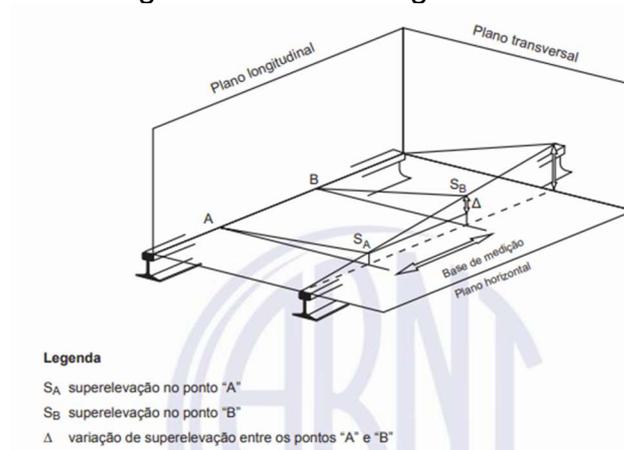
Fonte: Steffler (2013)

2.2 GEOMETRIA DE VIA

Enquanto o item anterior focou em apresentar os componentes pertencentes a via permanente, esse capítulo irá apresentar as partes referentes a geometria de via. Segundo Lobato (2021), a geometria de via é o traçado propriamente dito, é o que vai conduzir as composições até o destino. E influencia diretamente na segurança e no desempenho do sistema ferroviário

A geometria da via, que se refere à configuração espacial da via ferroviária em termos de alinhamento (horizontal), nivelamento (vertical), bitola (distância entre trilhos) e superelevação (inclinação transversal em curvas) conforme mostra a Figura 8. Além disso, a geometria de via influencia diretamente a VMA (Velocidade Máxima Autorizada). Deste modo, qualquer desvio desses parâmetros pode resultar em defeitos ou falhas, como desalinhamento, afundamentos ou até descarrilamentos.

Figura 8 - Planos de geometria de via



Fonte: ABNT NBR 16387:2020

De acordo com (Nabais, 2014), os limites de variações aceitáveis para os parâmetros relacionados a geometria de via dependem das condições que esta via será utilizada como bitola, velocidade, curvatura, peso por eixo e se o tipo o transporte é de carga ou de pessoas. Com base nestas condições, cada ferrovia estabelece os critérios de tolerâncias para os defeitos de geometria de via seguindo as recomendações da norma técnica em vigor ABNT NBR 16387:2020 Via Férrea - Classificação de Vias.

Segundo a ABNT NBR 16387:2020, uma maneira de organizar estes defeitos é referenciando o plano em que eles se encontram como horizontal, transversal e longitudinal. Os planos são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Plano Horizontal

O plano horizontal é caracterizado pela posição dos trilhos com relação ao dormente e lastro, sendo a bitola a principal medida deste plano. A bitola é a distância entre as laterais internas dos trilhos, medindo a partir de 16 milímetros abaixo do topo do trilho do boleto. Isso ocorre para evitar qualquer erro de medição devido ao desgaste dos trilhos causado pelo contato roda-trilho. (ABNT NBR 16387:2020).

A bitola é a principal medida do plano horizontal e uma das mais importantes medidas para se assegurar a qualidade da via (ABNT NBR 16387:2020). No Brasil são utilizados três diferentes tipos de bitola:

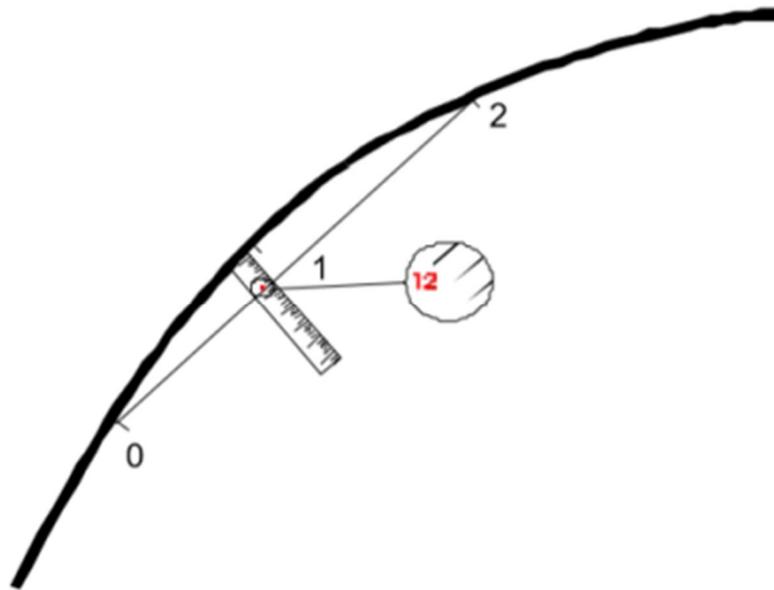
- Bitola métrica ou estreita: Com uma distância entre os trilhos de 1000 mm;
- Bitola larga: Com uma distância entre os trilhos de 1600 mm;
- Bitola Standard ou “padrão”: Com uma distância entre os trilhos de 1.435 mm.

Segundo Felix, M. K. R. (2018), a bitola métrica é mais utilizada no Brasil e possui uma extensão de aproximadamente 23.341 quilômetros de extensão. Em seguida a bitola larga com 5822 quilômetros. E por fim a bitola padrão com menos de 200 quilômetros de utilização.

Além disso, é no plano horizontal onde o alinhamento dos trilhos é verificado, com base na variação da medida de flecha. A flecha é calculada utilizando a base de 10 ou 20 sendo a base de 10 metros para bitolas métricas e base de 20 metros para bitola larga (ABNT NBR 16387:2020).

Em uma medição manual, uma corda de tamanho correspondente a base indicada é esticada entre duas estacas posicionadas verticalmente rente à altura do trilho. Retornando ao ponto médio da base, utiliza-se uma régua para medir a distância (flecha) entre o trilho (arco) e a corda, obtendo assim a medida conforme mostra a Figura 9 (Junior, 2019).

Figura 9 - Verificação da flecha

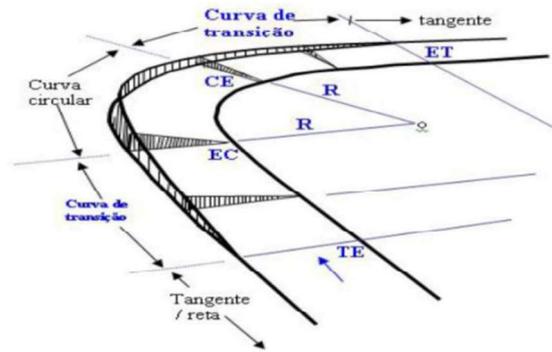


Fonte: (ABNT NBR 16387:2020)

Para a ferrovia existe 3 tipos de segmento de via (Steffler, 2013) conforme mostra a Figura 10:

- Tangente - Segmento de via que possui flecha próxima de zero;
- Curva Circular - Segmento de via que possui flecha constante e diferente de zero;
- Espiral de entrada ou saída - Também conhecido como transição é o segmento de via que varia a flecha gradualmente do valor da tangente para o valor da curva circular (espiral de entrada) e varia do valor da curva circular até a tangente novamente (espiral de saída).

Figura 10 - Elementos de curva



Fonte: FCA, 2009

A flecha é o principal dado de curvatura da via e pode ser usado para obter analiticamente o raio de curva do ponto de medição. Utilizando este dado de flecha e seus valores subsequentes conseguimos obter a cota de alinhamento do perfil horizontal.

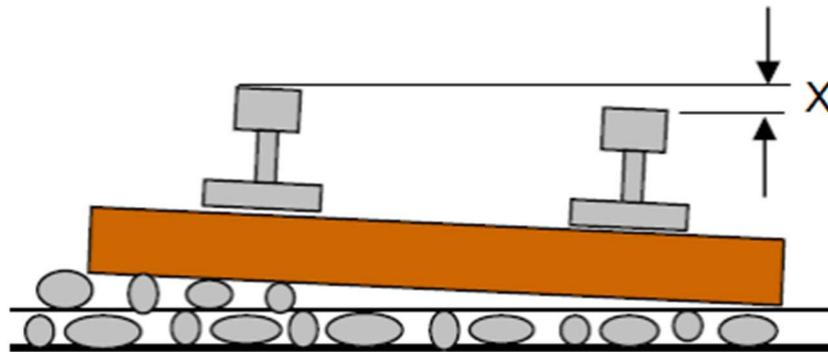
2.2.2 Plano transversal

Conforme definido por (Passos, 2018) o plano ou nivelamento transversal pode ser definido como a variação de altura entre os dois trilhos quando medido em um mesmo ponto. Essa variação de altura é relacionada com a curvatura e é a principal cota que irá definir a velocidade de trânsito da via permanente visto que o desequilíbrio do veículo sobre a via levar ao descarrilamento.

Enquanto a nivelamento transversal deve ser mínimo em tangentes, em curvas a variação de altura dos trilhos deve existir para compensar a força centrífuga gerada. Essa variação é chamada de Superelevação. Esta cota deve ser devidamente parametrizada para evitar tombamentos e desgastes excessivos, considerando a velocidade, bitola e o raio da curva. (Steffler, 2013)

A partir da superelevação outras cotas são calculadas como a torção, calculado apenas nas espirais, e empeno calculado tanto na tangente quanto na curva circular. Ambas as medidas são referentes a variação de nivelamento transversal em uma base curta ou longa, e para a bitola métrica a ABNT define bases de 2 e 10 metros para torção e uma base de 10 metros para empeno, já para a bitola larga a ABNT define uma base de 10 metros para torção e de 20 metros para empeno.

Figura 11 - Desnívelamento transversal

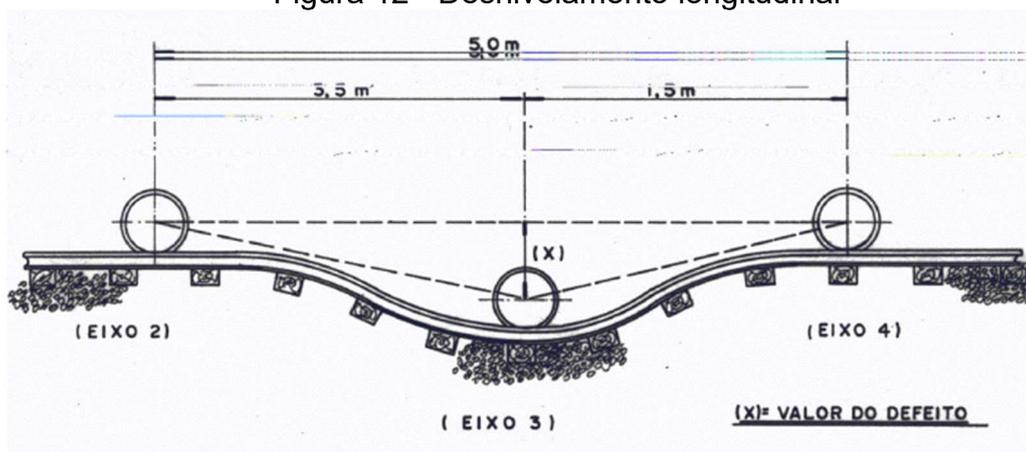


Fonte: Aguiar (2011)

2.2.3 Plano Longitudinal

No plano longitudinal, o nivelamento é medido em relação a dois pontos na superfície do boleto de um mesmo trilho. Essa cota é conhecida como nivelamento longitudinal e uma linha é considerada nivelada quando não existem depressões ou pontos altos na via, que possam gerar alívio de rodas nos veículos ferroviários (BILHERI *et al.*, 2021). Conforme a Figura 12 o desnívelamento pode levar a roda do veículo a flutua e até mesmo descarrilar.

Figura 12 - Desnívelamento longitudinal



Fonte: Rodrigues (2001)

2.2.4 Desvios de cotas

A As cotas geométricas da via permanente, como bitola, superelevação e nivelamento transversal representam as medidas padrão que garantem a segurança e a eficiência das operações ferroviárias. Contudo, essas cotas podem apresentar variações, que não introduzem novos parâmetros, mas permitem visualizar essas medidas de forma mais detalhada.

Por exemplo, a bitola métrica, definida como a distância padrão entre os trilhos, possui um valor nominal de 1000 mm. Quando ocorre uma "bitola métrica aberta", significa que essa medida ultrapassou o valor nominal, configurando uma variação em relação à bitola padrão.

Na prática, tais variações podem ocorrer sem serem necessariamente classificadas como defeitos, já que há limites de tolerância estabelecidos pelas especificações de cada operadora ou pela ABNT. Enquanto a variação permanecer dentro desses limites, ela é considerada aceitável. No entanto, caso exceda os valores tolerados, o desvio passa a ser considerado um defeito e demanda correção.

2.3 DEFEITOS DE GEOMETRIA

Diferentes lugares no mundo tratam o defeito de geometria de forma diferente, segundo a Normas Europeias (EN) os limites aceitáveis de uma ferrovia variam dependendo o tipo de carga transportada, velocidade e qual o padrão de bitola utilizado (valores de limites aplicados para bitolas de tamanhos 1435 mm, 1524 mm e 1668 mm). (EN 13848-2:2021)

A ABNT por outro lado, possui uma classificação de ferrovias variando de 1 a 5 com o único fator diferencial entre eles sendo a velocidade máxima autorizada (VMA) conforme mostra a Tabela 1. A ABNT recomenda valores de limites de defeitos segundo estas classes e segundo a bitola do trecho (métrica e larga).

Tabela 1 - Velocidade máxima autorizada segundo sua classe.

Codificação (NA)	Trens de carga km/h	Trens de passageiro km/h
1	0 a 15	0 a 25
2	16 a 40	26 a 45
3	41 a 64	46 a 95
4	65 a 95	96 a 128
5	96 a 128	Não aplicável

Fonte: ABNT NBR 16387:2020

Esses limites de tolerância são fundamentais para o controle de qualidade das ferrovias, sendo que variações além desses limites indicam a presença de falhas e/ou defeitos geométricos. Para evitar tais defeitos, a maioria das operadoras ferroviárias brasileiras adota criticidades intermediárias, classificadas em interdição, restrição de velocidade, monitoramento da falha e início da falha.

Valores abaixo do início da falha são considerados tolerâncias aceitáveis dentro das medidas de projeto da via, garantindo que pequenos desvios não comprometam a operação segura. Deste modo as tolerâncias para as cotas e desvios que caracterizam ou não um defeito de geometria de via de acordo com a ABNT.

Segundo a NBR 5462 um defeito é um desvio de característica de um item em relação aos seus requisitos e uma falha é um evento observável que resulta da incapacidade de um sistema ou componente de executar a tarefa para a qual foi projetado. Portanto qualquer criticidade de desvio de geometria de via permanente que será apresentado neste trabalho será considerado defeito, visto que mesmo no caso mais grave de desvio não houve a perda da função.

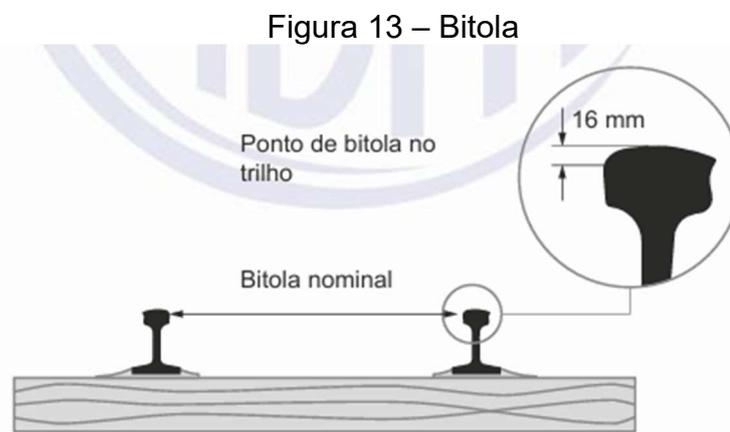
2.3.1 Bitola aberta ou fechada

A bitola aberta é um defeito que ocorre quando a distância entre os lados internos dos boletos direito e esquerdo for maior que um limite pré-definido. Este defeito acontece na maioria dos casos por problema de fixação do trilho ao dormente (Almeida *et al.*, 2022).

Se esta distância entre os trilhos for maior que o comprimento do rodeiro ferroviário o veículo pode sofrer um acidente caindo para dentro dos trilhos causando

severos dados à via permanente e ao material rodante. Como este defeito provém da falha da fixação uma medição mais precisa desta cota é chamada de bitola carregada ou dinâmica onde a medição deve ser feita no momento que uma carga lateral é aplicada entre os trilhos (Almeida *et al.*, 2022).

Caso a distância entre os trilhos for menor que a bitola definida, pode ocorrer o efeito de bitola fechada. Este defeito pode causar desgaste prematuro a área do boleto assim como o desgaste do friso das rodas do material rodante e em casos mais graves pode contribuir para uma escalada do rodeiro no trilho causando um descarrilamento (Seraco, 2019)



Fonte: ABNT NBR 16387:2020

2.3.2 Variação rápida de bitola 5m

Como mencionado na seção anterior, a medição da bitola aberta ou fechada é extremamente importante para a prevenção de acidentes. Para a mesma cota existe também o defeito chamado de “variação rápida de bitola” que estipulado na ABNT deve ter uma base de 5 metros.

Este defeito também acontece por problema de fixação dos trilhos nos dormentes e se deve a uma variação brusca do valor medido de bitola. Neste caso o defeito causa instabilidade na dinâmica do material rodante e pode causar desgaste prematuro e um possível descarrilamento.

2.3.3 Torções e Empenos

Variações bruscas do plano transversal ou variações de superelevação causam as torções e empenos, sendo eles diferenciados pelo segmento de via em que eles se encontram. Os empenos se localizam em tangentes e curvas circulares onde a curvatura é constante e as torções são em regiões de espirais de entrada e saída.

Segundo a ABNT, o tamanho da base onde essa cota é analisada muda de acordo com o tamanho de bitola como mostra o quadro a seguir:

Quadro 1 – Relação do nivelamento transversal com segmento de via

Defeito	Bitola	Base	Segmento de via
Torção base Curta	Métrica	2 metros	Espirais
Torção Base Longa	Métrica	10 metros	Tangente e Circular
Torção 10m	Larga	10 metros	Espirais
Empeno 20m	Larga	20 metros	Tangente e Circular

Fonte: elaborado pelo autor

Lembrando que o nome do defeito está de acordo com a base de dados utilizada para este trabalho.

Este defeito tem relação com as juntas pois em vias com maior quantidade de juntas possuem maior quantidade deste defeito como aponta (Seraco, 2019). Este defeito de nivelamento aplicado na geometria da linha pode causar uma instabilidade considerável em veículos que apresentam a caixa (corpo do veículo) muito rígido (Almeida *et al.*, 2022).

Para os casos de torções em juntas temos, da mesma forma que a bitola estática e bitola dinâmica, uma consideração a se fazer ao medir a torção em modo estático (simplesmente pegando as medidas da via sem estar sob uma carga) e medir o valor durante a passagem de uma carga em cima. Como podemos ver na Figura 14 em um teste realizado com um Voidmetro.

Figura 14 - Leitura de Voidmetro



Fonte: elaborado pelo autor

O voidmetro é um instrumento utilizado para medir a movimentação vertical de um trilho ferroviário quando uma composição passa por cima dele. No caso da imagem acima, o aparelho mediu uma variação de altura do trilho em relação ao lastro de 4.32 milímetros durante a passagem do carro controle.

2.3.4 Superelevação máxima excedida

O nivelamento transversal ou Superelevação (SE) é um valor que muda de acordo com o segmento de via, pois em tangente ela deve ser zero e em espirais e curvas ela deve ter um valor referente ao projeto da curva que leva em conta velocidade, bitola e raio de curva. A abordagem da ABNT para esta cota em bitola métrica é apenas limitar o valor máximo em 100 milímetros em curvas.

Para a bitola larga este valor de limitação é diferente como mostra a tabela abaixo, sendo o X o valor de superelevação de projeto para aquela curva:

Quadro 2 - Superelevação de bitola larga

Classe do trecho	1	2	3	4	5
Valores limites [mm]	X+76	X+51	X+45	X+32	X+25

Fonte: adaptada ABNT NBR 16387:201

Este defeito está muito relacionado com a infraestrutura da via permanente e por se tratar de um valor de projeto qualquer alteração na velocidade de operação, transposição de curva, lastro e sublastro laqueados, podem alterar este valor e gerar uma compensação insuficiente ou em excesso da força centrífuga para a curva. (Almeida *et al.*, 2022)

2.3.5 Desalinhamento de curva excedido

O alinhamento da via é a variação da medida de flecha ou curvatura como mencionado na seção 2.2.1. Os desalinhamentos seriam então uma variação brusca desta medida em bases de 10 metros para bitola métrica e bases de 10 e 20 metros para bitola larga sendo 10 metros para curva e 20 metros para tangente. (ABNT NBR 16387:2020)

Um bom alinhamento em tangentes é crucial para evitar o movimento de *hunting*, que provoca oscilações devido à conicidade das rodas e pode causar alargamento da bitola se não houver amortecimento suficiente nos truques. Esse movimento pode resultar em choques da roda com o trilho, comprometendo a estabilidade da via. (Almeida *et al.*, 2022)

Esta medida é percebida em regiões com uma grande variação de temperatura e trilhos com poucas juntas e é conhecido também pelo nome de flambagem do trilho. Devido a dilatação do material, a variação de temperatura e a fixação, o trilho tende a se curvar criando estas regiões de defeitos como mostra a Figura 15. (Santos *et al.*, 2021)

Figura 15 - Desalinhamento transversal



Fonte: Santos (2021)

2.4 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS DE GEOMETRIA

No Brasil, a normativa técnica vigente relacionada à geometria de via permanente (ABNT NBR 16387:2020) define apenas a frequência que deve ser feita a inspeção com relação a quantidade de carga transportada, estabelecendo limites de segurança para os parâmetros geométricos. No entanto, o monitoramento contínuo da via é essencial para gerar dados que permitam uma manutenção eficiente, minimizando o impacto nas operações ferroviárias. (Junqueira, 2023)

A medição dos parâmetros geométricos da via, previamente discutidos, pode ser realizada por meio de uma variedade de ferramentas e métodos, que vão desde dispositivos manuais utilizados em inspeções periódicas até sistemas automatizados de alta precisão, capazes de operar em tempo real.

Os principais métodos e equipamentos utilizados para medição da geometria de via são:

- **Inspeção visual:** A inspeção visual, também conhecida como "ronda de linha", é uma prática tradicional em que ferramentas simples como trenas e paquímetros são usadas para verificar manualmente bitola e superelevação;
- **Régua de Bitola:** A régua de bitola é posicionada sobre os trilhos. Este equipamento permite medir tanto a bitola quanto a superelevação, no entanto, esse equipamento é digital ou analógico.
- **Trolley:** O *trolley* é um dispositivo móvel que é colocado sobre os trilhos, com a capacidade de medir parâmetros como bitola, superelevação e torção continuamente. Além disso, ele registra a distância percorrida. O *trolley* é portátil, pode ser empurrado manualmente e não requer instalação fixa em veículos.
- **Carro controle:** Os carros controles são veículos capazes de operar tanto em estradas quanto em trilhos. Eles são equipados com sensores, câmeras e sistemas a laser, cujos dados são transmitidos para registradores no interior do veículo. Esses sistemas geram relatórios detalhados para orientar as equipes de manutenção. O próximo tópico irá abordar mais este tema.

- Vagão instrumentado: Um vagão instrumentado é um veículo ferroviário equipado com sensores e dispositivos de medição usados para monitorar e avaliar o desempenho da via férrea e do próprio veículo durante a operação. O ponto positivo deste tipo de sistema de medição é poder transitar na via juntamente com uma composição deslocando-se na velocidade normal sem criar mais uma ocupação de via.

Existem muitas frentes de trabalho pelo mundo de desenvolvimento de produtos diferentes para analisar a geometria de via como drones, inspeção por imagem com IA e instrumentos para monitoramento e gravação das grandezas dinâmicas do material rodante.

2.4.1 Carro controle

O carro controle, também conhecido como carro de medição de via ou carro de inspeção de geometria, é um veículo especializado utilizado pelas ferrovias para inspecionar e avaliar a condição da infraestrutura ferroviária. Equipado com diversos sensores e sistemas de medição, ele percorre os trilhos coletando dados sobre a geometria da via, como alinhamento, nivelamento, bitola e superelevação. Essas informações são fundamentais para detectar defeitos e anomalias que possam comprometer a segurança e a eficiência da operação ferroviária. (EN 13848-2:2021)

Figura 16- Carro controle



Fonte: Nomadlog (2023)

Os carros controles são capazes de medir parâmetros com alta precisão em velocidades elevadas, sem interromper o tráfego normal dos trens. Isso permite a identificação rápida de problemas e o planejamento de ações de manutenção preventiva, contribuindo para a redução de custos e aumento da segurança. Em muitas ferrovias modernas, o uso de carros controle está associado a tecnologias avançadas, como sistemas de posicionamento por GPS, sensores inerciais, lasers e câmeras de alta definição, que aumentam a precisão e a eficácia das inspeções.

De acordo com o Manual Interno Nomadtan (2024), as vantagens do carro controle, comparado com os outros métodos de inspeção geométrica são:

- A velocidade de inspeção, podendo chegar a até 50 quilômetros por hora;
- Erros de medidas inferiores a 2mm;
- Autonomia operacional na ferrovia.

Deste modo as equipes de operação conseguem inspecionar dezenas de quilômetros de linha férrea diariamente.

A desvantagem do carro controle estão relacionadas com a concorrência de disponibilidade de via devido a circulação de trens. As condições da via permanente como vegetação, lastro alto, regiões de aparelho de mudança de via e passagem de nível podem também impactar a qualidade da inspeção.

2.5 REVISÃO DA LITERATURA

A análise de defeitos na ferrovia tem sido um tema amplamente estudado, com foco predominante na identificação de falhas em trilhos utilizando tecnologias como ultrassom. Estudos nessa área são numerosos e abrangem desde o desenvolvimento de equipamentos de inspeção até métodos de detecção e análise de trincas internas.

Em seu estudo, Lodhi *et al.* (2022), destaca a importância da inspeção regular dos trilhos ferroviários para garantir operações seguras e confiáveis. Foram abordados problemas como deformações, descontinuidades, porcas e parafusos soltos, além de trincas internas nos trilhos. O trabalho destacou a eficácia do uso de sistemas computadorizados para a detecção de defeitos, reduzindo erros humanos e otimizando os processos de manutenção.

Já os autores Kumar e Harsha (2024), abordaram metodologias voltadas à detecção de defeitos em ferrovias com o uso de técnicas de processamento de imagem. O estudo apresentou inovações relacionadas à criação de algoritmos precisos. Além disso, enfatizou a importância de inspeções rápidas e em tempo real, especialmente no contexto de ferrovias de alta velocidade, e a aplicação de tecnologias emergentes para melhorar a segurança ferroviária.

Complementando essa perspectiva, Li *et al* (2023), apresentou uma revisão sobre a detecção e manutenção de defeitos em trilhos ferroviários. O artigo destacou os desafios de identificar e tratar danos em trilhos que operam sob alta velocidade e grande carga, enfatizando a relevância da manutenção frequente para prevenir acidentes e custos elevados. O autor ressalta que a crescente complexidade do transporte ferroviário exige melhorias contínuas para garantir a segurança, reduzir custos e aumentar a confiabilidade.

Os autores Wu *et al.* (2022), por sua vez, investigou métodos de detecção de defeitos internos em trilhos ferroviários utilizando imagens ultrassônicas. Foi proposta uma metodologia baseada na classificação do defeito de acordo com a forma do defeito e localização. O estudo demonstrou que o método é adaptável e eficaz, mesmo em ambientes complexos, tornando-se uma solução promissora para inspeções de alta precisão.

Embora os quatro autores abordem questões importantes relacionadas à detecção de defeitos em ferrovias, todos direcionam suas análises aos trilhos, tratando de problemas como trincas e defeitos internos. Entretanto, a análise de defeitos de geometria da via, que inclui parâmetros como alinhamento, nivelamento, bitola e superelevação, são menos abordados na literatura científica.

Mesmo que existam publicações sobre a importância da manutenção da geometria da via para evitar descarrilamentos, a quantidade de estudos específicos publicados que investigam detalhadamente esses defeitos e suas causas ainda é limitada, especialmente no contexto das ferrovias brasileiras. Assim, este trabalho busca dar início a discussões sobre o tema, analisando especificamente os defeitos geométricos da via em trechos ferroviários brasileiros.

2.6 LIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho apresenta limitações decorrentes do acesso restrito às informações disponíveis. Os dados analisados foram limitados aos registros de defeitos e às diretrizes estabelecidas pelas normas, sem acesso a históricos detalhados de manutenção, planos de manutenção ou outros dados operacionais que poderiam enriquecer as análises.

Essas limitações restringem a possibilidade de explorar relações mais amplas entre os defeitos identificados e os fatores que possam influenciá-los, como práticas de manutenção ou intervenções realizadas ao longo do tempo. Conseqüentemente, o estudo foca nos dados disponíveis, reconhecendo que o acesso a informações adicionais poderia trazer novas percepções e contribuir para uma compreensão mais abrangente do tema.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão descritos os procedimentos adotados para a coleta, tratamento e análise dos dados utilizados neste trabalho. O objetivo principal da pesquisa é identificar e avaliar os defeitos geométricos em vias permanentes, realizando um mapeamento dos defeitos identificados de acordo com a norma NBR 16387:2020 da ABNT.

Dessa forma, para validar os dados coletados, serão analisados relatórios técnicos de inspeção da empresa de tecnologia ferroviária Nomadlog, que opera no Brasil.

A metodologia abrange as etapas de coleta de dados, processamento das informações, seleção de trechos para a análise, avaliação dos defeitos coletados segundo a ABNT norma NBR 16387 e por fim análise dos resultados, conforme descrito no fluxograma da Figura 17.



Fonte: elaborado pelo autor

Todos os dados utilizados neste trabalho foram adquiridos do banco de dados da Nomadlog pertencente ao Grupo Brastan. Os dados são resultados de inspeções feitas por carro controle nas ferrovias de todas as regiões do Brasil (exceto região sul), avaliando a via de diferentes operadoras ferroviárias. Foi permitido a utilização dos dados por parte da Nomadlog e por parte das operadoras ferroviárias com a condição de descaracterizar qualquer informação que vincule a um local, empresa (operadora) ou região devido ao sigilo empresarial.

3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Os dados foram coletados a partir de inspeções de carro controle. A operação do carro controle necessita de dois operadores para o trabalho. Um deles é responsável em conduzir e licenciar o veículo de acordo com o Regulamento de Operação Ferroviária (ROF) da operadora e fazer a comunicação com o Centro de Controle Operacional (CCO) (Nomadlog, 2024).

O outro funcionário é responsável por operar o sistema de inspeção, realizando a calibração do equipamento, monitorando o progresso da inspeção e verificando a veracidade dos defeitos críticos. Assim, sempre que um defeito crítico é identificado durante a inspeção, é realizada uma nova verificação. Caso seja constatado um falso defeito, ele é excluído do relatório de inspeção. Dessa forma, o relatório de inspeção permanece livre de falsos defeitos.

O carro controle tem capacidade de identificar todos os 16 tipos de defeitos mencionados na ABNT NBR 16387:2020. Porém o relatório de inspeção é composto apenas pelos registros dos defeitos encontrados durante a inspeção e informações relacionadas ao defeito, como posição e a dimensão dos defeitos entre outras variáveis relacionadas, conforme será detalhado no próximo capítulo. O relatório de inspeção será utilizado como banco de dados deste trabalho.

3.2 BANCO DE DADOS

Como citado no capítulo anterior, o relatório de inspeção é gerado a partir do momento em que o carro controle identifica um defeito de geometria na via. Ou seja, o relatório contém apenas as informações relacionadas ao defeito encontrado. Ele registra os seguintes parâmetros:

- Trecho – nome do trecho avaliado;
- Passagem – número da inspeção;
- Posição - a posição inicial da falha/defeitos em quilômetros (translada para um marco zero);
- Descrição - tipo de defeito registrado;
- Max - o valor máximo de falha/defeito em milímetros;

- Comprimento - extensão da falha/defeito (por quantos milímetros a falha/defeito ocorreu);
- Criticidade - criticidade adotada de acordo as regras internas das empresas e da norma ABNT NBR 16387:2020;
- Data da inspeção;
- Velocidade - velocidade permitida no trecho.

O banco de dados empregado nesta pesquisa é composto pelos relatórios de inspeções realizadas pela empresa Nomadlog em diferentes regiões do Brasil, com exceção da região Sul.

3.3 TRECHOS SELECIONADOS

Neste capítulo, serão apresentados os trechos analisados na pesquisa. Para a seleção dos trechos, procurou-se evitar aqueles que fossem muito pequenos, com poucas inspeções, com grandes variações de velocidade e que correspondessem a pátios.

Após a aplicação desses filtros, foram selecionados 7 trechos de forma aleatória, nomeados de A até G, conforme mostra o Quadro 3. Vale destacar que devido ao sigilo entre as empresas envolvidas, não será apresentado o nome do trecho e nem sua localização.

No Quadro 3, é apresentado o tamanho do trecho em quilômetros, o raio de curva médio, o número de inspeções realizadas e a classe. O raio médio de curva é a média dos raios de todas as curvas presentes no trecho e a classe diz respeito à classificação do trecho segundo a ABNT de acordo com os limites de velocidade

Quadro 3 - Informações sobre os trechos escolhido

Trecho	Bitola	Classe	Dormentes	Raio curva médio [m]	Tamanho [km]	Número de inspeções
A	Métrica	3	Aço	357,142	23,7	5 em 3 anos
B	Métrica	2	Madeira	892,857	22,5	3 em 2 anos
C	Métrica	2	Madeira	127,551	7,8	4 em 3 anos
D	Métrica	2	Madeira	-	10,24	4 em 3 anos
E	Métrica	2	Madeira	130,208	7,5	4 em 3 anos
F	Larga	3	Concreto	833,333	16,6	3 em 2 anos
G	Larga	2	Madeira	166,667	5,1	3 em 2 anos

Fonte: elaborado pelo autor

A seguir é apresentado uma breve descrição de todos os trechos selecionados, contendo informações já apresentadas no Quadro 3 mostrado anteriormente, bem como a finalidade e os defeitos encontrados durante todas as inspeções avaliadas entre 2022 e 2024.

3.3.1 Trecho A

O Trecho A possui uma extensão de 23,7 quilômetros com VMA de 60km/h. Possui dormentação de aço de bitola métrica, tem raio de curva médio de 357 metros e serve para o transporte de carga. Possui 5 inspeções ao longo de 3 anos. Ao longo de todas as inspeções, foram registrados defeitos de bitola aberta, bitola fechada, variação rápida de bitola, desalinhamento, torção base curta e torção base longa.

3.3.2 Trecho B

O Trecho B possui uma extensão de 22,5 quilômetros com VMA de 33km/h. Possui dormentação de madeira de bitola métrica, tem raio de curva médio de 892 metros sendo o maior entre os trechos analisados e serve para o transporte de carga. Possui 3 inspeções ao longo de 2 anos.

Ao longo de todas as inspeções, foram registrados defeitos de bitola aberta, bitola fechada, variação rápida de bitola, desalinhamento, torção base curta, torção base longa e excesso de superelevação.

3.3.3 Trecho C

O Trecho C possui uma extensão de 7,8 quilômetros com VMA de 35km/h. Possui dormentação de madeira de bitola métrica, tem raio de curva médio de 127 metros sendo o menor entre os trechos analisados e serve para o transporte de carga. Possui 4 inspeções ao longo de 3 anos.

Ao longo de todas as inspeções, foram registrados defeitos de bitola aberta, bitola fechada, variação rápida de bitola, desalinhamento, torção base curta, torção base longa e excesso de superelevação.

3.3.4 Trecho D

O trecho D possui uma extensão de 10,24 quilômetros com VMA de 50km/h. Possui dormentação de madeira de bitola métrica para transporte de carga. O trecho possui 4 inspeções ao longo de 3 anos.

Ao longo de todas as inspeções, foram registrados defeitos de bitola aberta, bitola fechada, variação rápida de bitola, desalinhamento, torção base curta, torção base longa, empeno e excesso de superelevação.

3.3.5 Trecho E

O trecho E possui uma extensão de 7,5 quilômetros com VMA de 30km/h. Possui dormentação de madeira de bitola métrica, tem raio de curva médio de 130 metros e serve para o transporte de carga. Possui 4 inspeções ao longo de 2 anos.

Ao longo de todas as inspeções, foram registrados defeitos de bitola aberta, bitola fechada, variação rápida de bitola, desalinhamento, torção base curta e torção base longa.

3.3.6 Trecho F

O trecho F possui uma extensão de 16,6 quilômetros com VMA de 62km/h. Possui dormentação de concreto de bitola larga, tem raio de curva médio de 833 metros e serve para o transporte de carga. Possui 3 inspeções ao longo de 2 anos.

Ao longo de todas as inspeções, foram registrados defeitos de bitola aberta, variação rápida de bitola, torção base longa, empeno e excesso de superelevação.

3.3.7 Trecho G

O trecho G possui uma extensão de 5,1 quilômetros com VMA de 40km/h. Possui dormentação de madeira de bitola larga, tem raio de curva médio de 166 metros e serve para o transporte de carga. Possui 3 inspeções ao longo de 3 anos.

Ao longo de todas as inspeções, foram registrados defeitos de bitola aberta, bitola fechada, variação rápida de bitola, torção base longa e excesso de superelevação.

3.4 BANCO DE DADOS E ABNT

Por se tratar de inspeções em trechos operados por diferentes empresas e que operam com diferentes velocidades, o plano de regras de cada uma é diferente. O plano de regras é o regulamento interno de cada empresa que define os limites para determinar a existência de falha/defeito no trecho. Cabe reforçar que a mesma empresa possui diferentes planos de regras para diferentes trechos, dependendo do tipo de carga, região, velocidade, volume de carros baseando-se na norma.

Em relação ao parâmetro criticidade, cada operadora estabelece outros níveis de criticidade para classificar a gravidade dos defeitos. A classificação permite o acompanhamento contínuo da condição dos trechos, facilitando o planejamento de manutenções e a tomada de decisões para evitar o agravamento dos defeitos e minimizar impactos na operação ferroviária.

O sistema da Nomadlog possibilita até quatro níveis de alerta: interdição, restrição, alerta 1 e alerta 2. Os quais indicam:

- Interdição: o valor medido no defeito ultrapassou do limite máximo aceito pelo regulamento da empresa, neste caso, nenhum veículo é autorizado a passar pelo trecho até que ocorra a manutenção;
- Restrição: o valor medido no defeito não ultrapassou do limite máximo, no entanto é preciso reduzir a velocidade de tráfego;
- Alerta 1: o valor medido no defeito não ultrapassou do limite máximo e nem requer limitações de velocidade, porém possui um distanciamento significativo do valor nominal ou de projeto para o trecho;

- Alerta 2: o valor medido está fora do valor nominal ou de projeto. Cabe iniciar o acompanhamento sem a necessidade de realizar quaisquer intervenções de manutenção.

Cabe destacar que para as duas criticidades mais altas, o inspetor deve avaliar a condição dos defeitos no local de acordo com a amplitude do defeito e a avaliação do local. O Quadro 4 apresenta os alertas e a respectiva nomenclatura de criticidade.

Quadro 4 - Variáveis de criticidade

Alerta	Criticidade
Interdição	P0
Restrição	P1
Alerta 1	P2
Alerta 2	P3

Fonte: elaborado pelo autor

Entretanto, como o objetivo é realizar a comparação entre os trechos, devemos usar uma mesma métrica para avaliar. Em razão disso, utilizou-se das métricas sugeridas e descritas na NBR 16387 elaborado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Esta norma sugere valores limites para os parâmetros de defeitos em diferentes classes de via.

3.4.1 Adequação do nível de criticidade para a ABNT

Como explicado anteriormente, a ABNT sugere apenas os valores limites máximos para cada classe de via que neste trabalho serão considerados como P0. Neste caso, será feito uma relação para definir os valores de P1, P2 e P3 para a métrica de comparação.

Conforme a classe, a velocidade permitida no trecho aumenta e os valores limites para o parâmetro ficam menores e mais rigorosos. Neste caso, os valores de P1, P2 e P3 serão adotados neste trabalho e definidos de acordo com o parâmetro limite da classe maior.

O Quadro 5 mostra os valores limites para cada classe para os defeitos de bitola métrica e o Quadro 6 mostra os valores limites para cada classe para os defeitos de bitola larga.

Quadro 5 - Classes para bitola métrica segundo a ABNT

Descrição do parâmetro	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Velocidade [km/h]	0-15	16-40	41-64	65-95	96-128
Bitola aberta [mm]	1035	1032	1032	1025	1013
Bitola Fechada [mm]	987	987	987	987	987
Varição rápida de bitola [mm]	34	31	23	18	13
Torção Base Curta[mm]	18	14	11	5	3
Torção Base Longa[mm]	53	37	33	31	30
Desalinhamento em curva excedido	31	24	18	13	8
SE máxima excedida	100	100	100	100	100

Fonte: adaptada ABNT NBR 16387

Quadro 6 - Classes para via para bitola larga segundo a ABNT

Descrição do parâmetro	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Velocidade [km/h]	0-15	16-40	41-64	65-95	96-128
Bitola aberta [mm]	1035	1032	1032	1025	1013
Bitola Fechada [mm]	987	987	987	987	987
Varição rápida de bitola [mm]	34	31	23	18	13
Torção 10m [mm]	51	44	32	25	19
Empeno 20m [mm]	76	51	44	32	25
SE Máxima Excedida [mm] (X valor da SE projetada)	X+76	X+51	X+45	X+32	X+25

Fonte: adaptada ABNT NBR 16387

Nota-se que para um suposto trecho de bitola métrica de classe 3, para os parâmetros adotados neste trabalho, ele seria interdito somente se o valor de Bitola Aberta for superior a 1032mm. Isso significa que os valores de 1025 e 1013 continuaram operando, com um possível alerta para o aumento da falha. Ou seja, ele passaria a ter um P1 e um P2.

Além disso, observa-se que existe a possibilidade de não ocorrer variação do valor limite entre as classes, como no caso de Bitola Fechada. No entanto, nunca ocorrerá a diminuição do limite conforme o aumento da classe. Sempre o trecho com menos velocidade possuirá uma tolerância maior para o valor medido.

3.4.2 Níveis de criticidade para ABNT

Os trechos selecionados para este estudo, conforme mostrado no capítulo 3.3 possuíam velocidade máximas nas faixas entre 30 e 62 quilômetros por hora. Neste caso, todos eles irão pertencer as Classes 2 ou Classe 3.

Além disso, todos os sete trechos analisados registraram apenas nove tipos de defeitos, sendo eles:

- Bitola aberta e bitola fechada - defeitos detalhados no capítulo 2.3.1;
- Variação rápida de bitola - defeitos detalhados no capítulo 2.3.2;
- Torção base curta, torção base longa e empeno 20m – defeitos detalhados no capítulo 2.3.3;
- Superelevação (SE) máxima excedida – defeito descrito no capítulo 2.3.4;
- Desalinhamento em curva excedido – defeito detalhado no capítulo 2.3.5;

Vale destacar que o defeito de empeno ocorre apenas em bitola larga e torção de base curta apenas em bitola métrica. Portanto, os valores da criticidade adotados neste trabalho, para cada defeito dos trechos de acordo com a bitola e a classe são apresentados nos quadros a seguir.

Quadro 7 - Criticidade de defeitos bitola métrica classe 2

Descrição	P0	P1	P2	P3
Bitola Aberta	> 1032	> 1025	>1013	<1013
Bitola Fechada	< 987	-	-	> 987
Variação Rápida de Bitola	> 31	> 23	> 18	> 13
SE máxima excedida	>100	-	-	-
Torção Base Curta	> 14	>11	>5	>3
Torção Base Longa	> 37	>33	>31	>30
Desalinhamento Curva excedido	> 24	>18	>13	>8

Fonte: adaptada ABNT NBR 16387

Quadro 8 - Criticidade de defeitos bitola métrica classe 3

Descrição	P0	P1	P2	P3
Bitola Aberta	>1032	>1025	<1013	-
Bitola Fechada	< 987	-	-	>= 987
Varição Rápida de Bitola	> 23	>18	>13	-
SE máxima excedida	> 100	-	-	<100
Torção Base Curta	> 11	>5	>3	-
Torção Base Longa	> 33	>31	>30	-
Desalinhamento Curva excedido	> 18	>13	>8	-

Fonte: adaptada ABNT NBR 16387

Quadro 9 - Criticidade de defeitos bitola larga classe 2

Descrição	P0	P1	P2	P3
Bitola Aberta	>1632	>1625	>1613	<1613
Bitola Fechada	<1597	-	-	>=1587
Varição Rápida de Bitola	>31	>23	>18	>13
Empeno 20m	>51	>44	>32	>25
Torção 10m	>44	>32	>25	>19

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 10 - Criticidade de defeitos bitola larga classe 2

Descrição	P0	P1	P2	P3
Bitola Aberta	>1632	>1625	<1613	-
Bitola Fechada	<1597	-	-	>=1597
Varição Rápida de Bitola	>23	>18	>13	-
Empeno 20m	>44	>32	>25	-
Torção 10m	>32	>25	>19	-

Fonte: adaptada ABNT NBR 16387

Com base nos parâmetros apresentados anteriormente foi realizada a classificação da criticidade do defeito. A criticidade foi avaliada com base no maior valor medido do defeito. Alguns pontos que são importantes de serem explicados para aplicar essa classificação:

1. Os valores limites de bitola aberta, bitola fechada e variação de bitola são os mesmos para Bitola Métrica e Larga;
2. Valores de bitola fechada são os mesmos independentes da classe, criticidade e bitola. Portanto só existe P0 ou P3;
3. Todos as ocorrências de defeitos que forem menores que o valor de P2 serão P3;

4. Valores de superelevação do plano de regras da bitola larga foram desconsiderados: a ABNT sugere que os valores limites para a superelevação sejam calculados a partir do valor de projeto, entretanto, como não foi obtida autorização para acessar esses valores, ele será desconsiderado;
5. Valores de desalinhamento transversal para a bitola larga não foram necessários, pois não ocorreu nenhuma ocorrência deste defeito.

É importante enfatizar que a reclassificação da criticidade dos defeitos, seguindo os novos parâmetros, não gerou novos defeitos. Eles foram adaptados a nova classificação de criticidade.

3.5 ETAPAS DA ANÁLISE DE DADOS

Dados das inspeções foram baixados do Portal da Nomadlog. As inspeções foram salvas em planilhas separada por trecho e inspeção. Gerando ao todo 26 arquivos com centenas de linhas. Para analisar estas diferentes planilhas foi utilizado o Software Power BI por sua agilidade em combinar informações de diferentes arquivos.

Ao juntar estas informações foi necessário avaliar se todos os dados estavam íntegros e nenhuma informação foi distorcida ou perdida. Neste ponto foi verificado que o Trecho D estava com uma inconsistência nos valores devido a distribuição de distância dos defeitos, que apresentava repetições e por esse motivo o Trecho D foi retirado da análise, restando apenas 22 arquivos com aproximadamente 15,2 mil dados.

Com os dados restantes, os defeitos foram reprocessados de acordo com os critérios de criticidade mostrados nos Quadros 7, 8, 9 e 10. Para isso, foi utilizado a medida máxima (Max) registrada em cada defeito. Outro ponto observado é que o sistema de medição gera muitos defeitos de mesma criticidade repetidos em sequência como mostra a o Quadro 11.

Quadro 11 - Duplicidade de defeitos

Descrição	Max (mm)	Comprimento (mm)	Criticidade	Contador	Distancia defeitos [m]
Bitola Fechada	-13	250	P3	Repetição	1
Bitola Fechada	-13	2000	P3	Novo	14
Bitola Fechada	-13	2000	P3	Novo	16
Bitola Fechada	-13	250	P3	Novo	13
Bitola Fechada	-14	2000	P3	Novo	12
Bitola Fechada	-13	250	P3	Repetição	5
Bitola Fechada	-14	5250	P3	Repetição	8
Bitola Fechada	-13	500	P3	Repetição	3
Bitola Fechada	-13	750	P3	Repetição	5
Bitola Fechada	-13	2500	P3	Repetição	3
Bitola Fechada	-14	6750	P3	Repetição	11
Bitola Fechada	-13	1500	P3	Repetição	2
Bitola Fechada	-14	1500	P3	Repetição	3
Bitola Fechada	-14	2750	P3	Repetição	3
Bitola Fechada	-13	250	P3	Repetição	3
Bitola Fechada	-13	1000	P3	Repetição	2
Bitola Fechada	-16	12500	P3	Novo	17
Bitola Fechada	-13	750	P3	Repetição	2
Bitola Fechada	-13	2000	P3	Repetição	3

Fonte: elaborado pelo autor

Desta forma, foi necessário adicionar uma etapa de filtragem dos dados para agrupar a duplicidades de defeitos. As condições utilizadas para identificar se são defeitos repetidos foram:

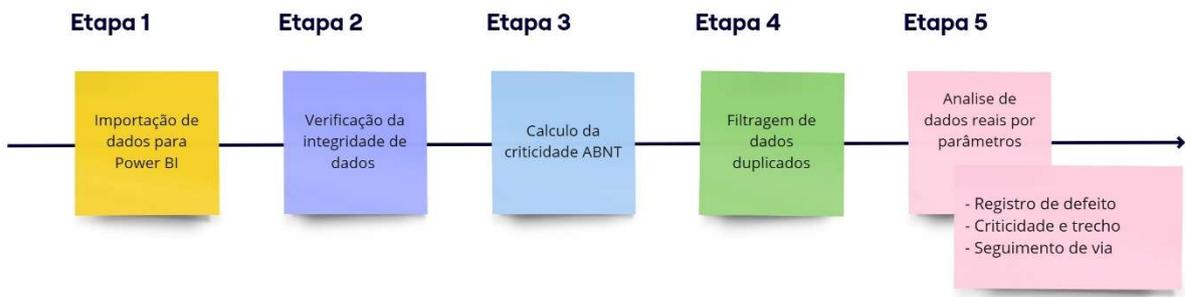
- Descrição do defeito ser a mesma;
- Mesmo trecho e número de inspeção (passagem);
- Os defeitos apresentarem a mesma criticidade;
- A distância entre o final do defeito anterior até o começo do defeito seguinte tem que ser menor que 10 metros;

Após o tratamento dos dados, foi realizada a análise dos defeitos com base nas criticidades. Para isso, empregou-se regra de Pareto, que permite identificar as causas mais significativas de um problema, destacando as ocorrências de defeitos mais frequentes.

Dando continuidade as análises dos resultados, este trabalho analisou cada um dos defeitos, levando em consideração a sua incidência e criticidade. A prioridade foi para os defeitos classificados como P0 e P1, já que ambos podem impactam na eficiência e segurança das operações ferroviárias.

Por fim, foram analisados os defeitos considerando os segmentos da via: identificar os defeitos e níveis de criticidade mais e menos recorrentes em cada segmento de via, permitindo a análise de padrões específicos por segmento. O fluxograma abaixo ilustra o processo geral de análise empregado no trabalho.

Figura 18 - Fluxograma de metodologia de análise de dados



Fonte: elaborado pelo autor

1. Importação dos dados para o software Power BI;
2. Verificação da integridade dos dados: Análise para garantir que os dados relativos aos trechos estavam completos e sem inconsistências;
3. Cálculo da criticidade segundo os parâmetros utilizados neste trabalho: De acordo com os Quadros 7, 8, 9 e 10 calculou-se a criticidade de cada defeito no trecho;
4. Filtragem de dados repetidos: Foi feita a remoção de dados duplicados;
5. Análise dos resultados com base em 3 parâmetros: 1) Defeito, 2) Trecho e criticidade e 3) Segmento de via.

Levando em consideração todos os trechos e inspeções realizadas, este trabalho analisou um total de 15,2 mil defeitos. Em razão dessa grande quantidade de dados, não foi possível apresentar todas as tabelas com os defeitos. Segue como exemplo, no *Anexo 1 – Tabela de Registro de defeitos F1*, a tabela de registro de defeitos da primeira inspeção do Trecho F com 9 defeitos registrados.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da análise dos dados sobre defeitos geométricos em vias permanentes, com base nas inspeções realizadas pelo sistema de carro controle. Os dados discutidos aqui abrangem tanto a parte de preparação do banco de dados quanto a análise dele.

4.1 IMPORTAÇÃO DOS DADOS E VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE

Durante a etapa de importação de dados para o Power BI e a verificação da integridade dos dados, foi observado que o Trecho D apresentou certa inconsistência de valores e por esse motivo foi excluído do banco de dados. Após isso sobraram apenas 6 trechos, A, B, C, E, F, e G. Os dados adquiridos das inspeções de todos os trechos geraram um banco de dados com aproximadamente 15,2 mil defeitos, classificados em nove defeitos (bitola aberta, bitola fechada, variação rápida de bitola, desalinhamento em curva excedido, torção base curta, torção base longa, empeno 20m, torção 10m e SE máxima excedida).

4.2 REAVALIAÇÃO DOS DEFEITOS DE ACORDO COM A ABNT

A etapa de reavaliação das criticidades dos defeitos, seguindo a ABNT, e conforme explicado no capítulo 3.4.2, gerou a exclusão de 186 dados de defeitos de superelevação para as inspeções de bitola larga, conforme mostra a Tabela a seguir. Esses dados foram excluídos pois a ABNT sugere que os valores limites para a superelevação sejam calculados a partir do valor de projeto, entretanto, como não foi obtida autorização para acessar esses valores.

Tabela 2 – Número de registros Nomadlog e ABNT

Trecho	Nº Registros
Trecho A	312
Trecho B	8974
Trecho C	2306
Trecho E	3037
Trecho F	20
Trecho G	409
Total	15058

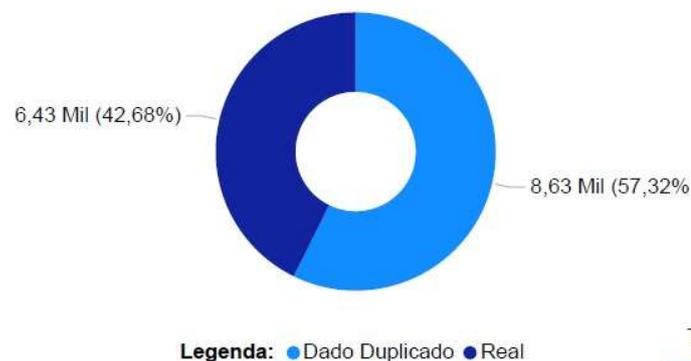
Fonte: elaborado pelo autor

No entanto, note que a exclusão desses valores de superelevação reduziu o número de dados apenas nos Trecho F e Trecho G.

4.3 FILTRAGEM DE DADOS DUPLICADOS

Após o tratamento de dados descritos na metodologia deste trabalho, com o intuito de agrupar os defeitos duplicados, foi observado uma redução significativa de dados. Originalmente tinha-se um total de 15,2 mil defeitos, após a filtragem desses dados, o número reduziu para 6427, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 - Duplicidade de registros



Fonte: elaborado pelo autor

Foi possível constatar que o Trecho B e os defeitos de torção de base curta foram os que apresentaram a maior quantidade de registros duplicados, conforme

apresentado na Tabela 4. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que o Trecho B é o segmento com a maior quilometragem de inspeção (67,5 km).

Tabela 3 – Dados duplicados

Descrição	Trecho A	Trecho B	Trecho C	Trecho E	Trecho F	Trecho G	Total
Torção Base Curta	63	5761	663	1321			7808
Bitola Aberta		51	178	123		72	424
Bitola Fechada	53	9	15	121		2	200
Varição Rápida de Bitola	3	9	35	32	3	22	104
Torção_10m						32	32
Torção Base Longa		21	8	2			31
Desalinhamento em Curva Excedido		27	1				28
SE Máxima Excedida		4					4
Total	119	5882	900	1599	3	128	8631

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4 - Total de quilômetros inspecionados por inspeção

Trecho	1	2	3	4	5	Total
Trecho A	23,70	6,50	6,20	16,00	6,90	59,30
Trecho B	22,50	22,50	22,50			67,50
Trecho C	7,70	6,10	7,80	6,20		27,80
Trecho E	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	37,50
Trecho F	16,00	15,80	16,60			48,40
Trecho G	4,80	5,10	5,00			14,90

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 5 apresenta o total de quilômetros inspecionados por inspeção e trecho totalizando mais de 293 quilômetros inspecionados.

Outro fator que pode ter contribuído para a duplicação dos dados é o fato de que durante a inspeção do Trecho B com o carro controle, uma medida de 3 milímetros de torção de base curta não gera defeito, uma medida de 4 a 5 milímetros gera um defeito P3 e uma medida de 6 milímetros gera um defeito P2.

Além disso, o carro controle possui incerteza de medição de 2 milímetros devido a vibração e dinâmica de operação. Nessa situação, qualquer oscilação muito pequena irá transitar entre estes diferentes níveis de criticidade gerando um novo defeito a cada transição.

Estes dois fatores somados podem causar a identificação de centenas de defeitos em sequência. Como ilustrado na Tabela 6, mais de 5 mil defeitos de torção de base curta foram classificados desta maneira no trecho B.

Tabela 5 – Defeitos duplicados de torção de base curta.

Trecho	P0	P1	P2	P3	Total
Trecho A	1	23	39		63
Trecho B	142	482	4016	1121	5761
Trecho C	209	239	215		663
Trecho E	23	70	929	299	1321
Total	375	814	5199	1420	7808

Fonte: elaborado pelo autor

Este tratamento de dados é importante para não termos uma avaliação quantitativa errada. Assim, podemos afirmar agora por exemplo, que ao invés de termos 30 defeitos de bitola fechada ao longo de 100 metros de trilho, existe, na verdade, um defeito de bitola predominantemente fechada em uma região de 100 metros.

Após o tratamento de dados, permaneceram 6427 defeitos distribuídos entre as criticidades utilizadas neste trabalho conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 6 – Distribuição dos defeitos em relação a criticidade

Nova Criticade	N° Registros	% Registros
P0	602	9,37%
P1	912	14,19%
P2	3684	57,32%
P3	1229	19,12%
Total	6427	100,00%

Fonte: elaborado pelo autor

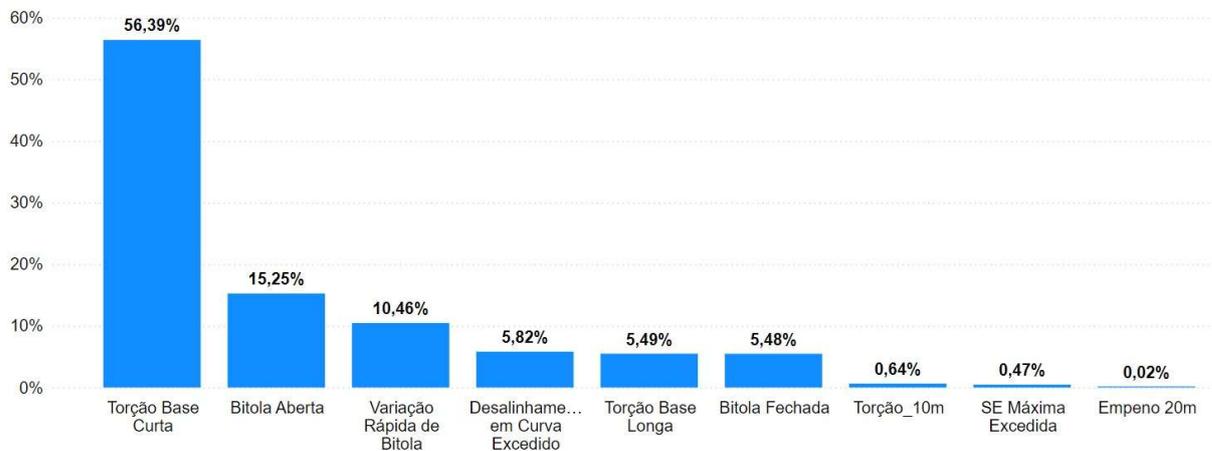
4.4 ANÁLISE DA DESCRIÇÃO DE DEFEITOS

Para realizar a análise de todos os defeitos, conforme os parâmetros aplicados neste trabalho, tais como descrição do defeito, criticidade, trecho e segmento de via, foi elaborado um gráfico de Pareto. Dos dezesseis tipos de defeitos descritos na ABNT apenas nove deles foram registrados nos trechos analisados.

A partir da Figura 20 é possível observar que os defeitos de torção de base curta, bitola aberta e variação rápida de bitola somam aproximadamente 81% do registro de defeito. Sendo que mais de 50% dos registros são apenas de torção de base curta. Vale lembrar que esses dados já foram tratados, e este defeito também foi o que apresentou o maior número de dados considerados duplicados.

Os defeitos de desalinhamento em curva, torção base longa e bitola fechada são responsáveis, cada um, por aproximadamente 6% dos defeitos. E por último, torção 10m, SE máxima excedida e empeno são responsáveis, juntos, por aproximadamente 1% das falhas.

Figura 20 – Pareto: número de registros por tipo de defeito

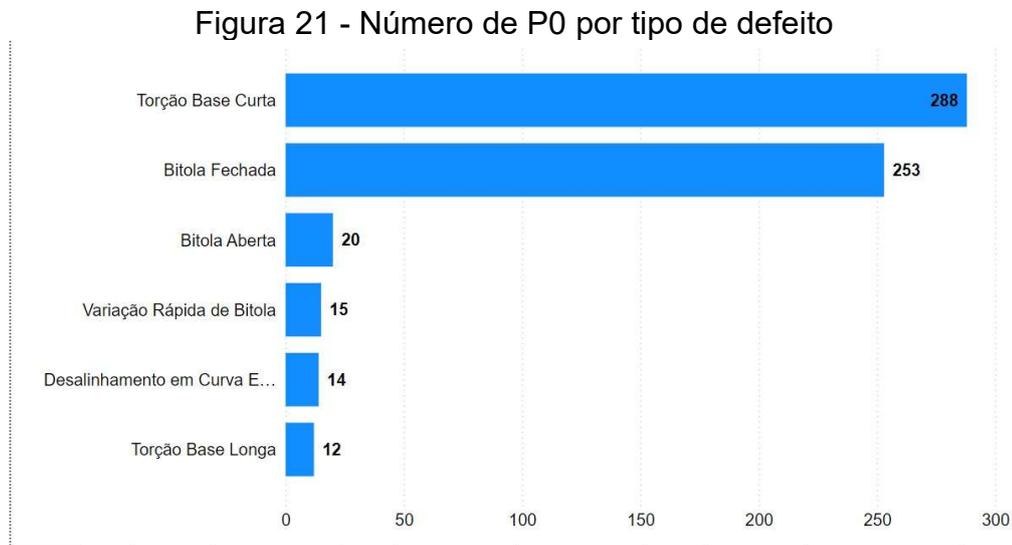


Fonte: elaborado pelo autor

Embora a distribuição de Pareto mostre qual o defeito mais existente, avaliar as criticidades é essencial para compreender a relevância do defeito e entender as reais condições de defeitos de geometria de via permanente no Brasil.

Por isso, as próximas análises focaram em defeitos de maior criticidade, P0 e P1, que podem gerar em interdições e restrições de velocidade no trecho. Estes P0

têm como principais defeitos torção de base curta e bitola fechada como mostra a Figura 21.



Fonte: elaborado pelo autor

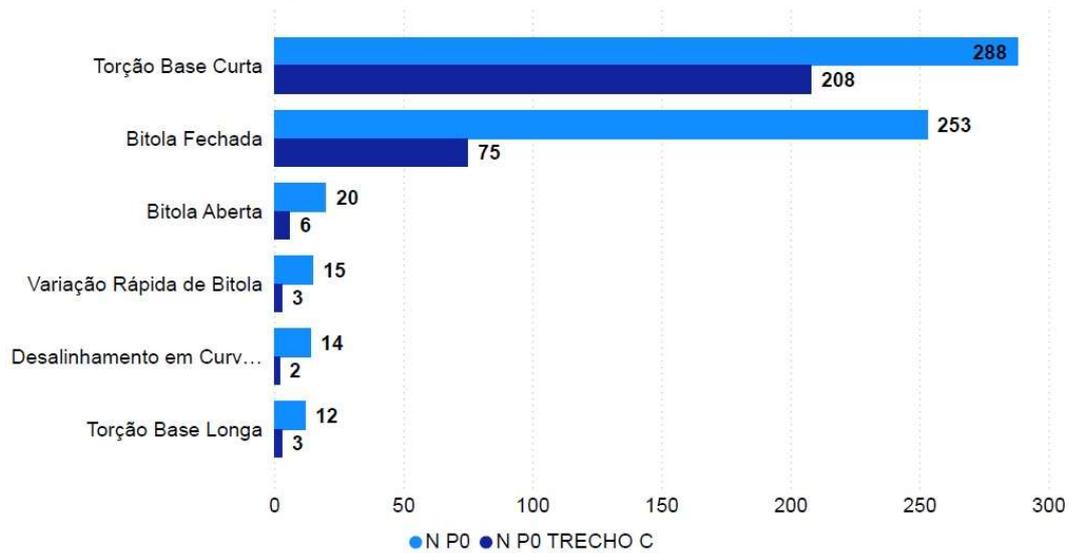
Cabe aqui um adendo a respeito dos valores para bitola fechada. Embora seja o segundo que mais gera P0, os defeitos de bitola fechada são apenas 5,48% de todos os defeitos registrados. O alto índice de P0, próximo do 50%, é devido ao plano de regras deste trabalho só possuir duas classificações: P0 ou P3.

Além disso, acredita-se que a bitola fechada pode ser um defeito com tendência a se atenuar ao longo do tempo, possivelmente em função do desgaste natural das fixações, que poderia ocasionar uma leve abertura da bitola. No entanto, essa característica não será objeto de análise detalhada neste trabalho, considerando sua baixa ocorrência e que sua resolução pode ocorrer de forma espontânea em determinados contextos operacionais.

4.4.1 Análise do defeito de torção de base curta

Os defeitos de torção de base curta são mais de 56% dos defeitos registrados. Dos 297 P0 de torção de base curta registradas, 70% delas ocorreram apenas no Trecho C, totalizando 208 ocorrências como mostra a Figura 22. Ou seja, por mais que ele seja responsável pela maioria dos P0, o seu alto número deve-se principalmente ao trecho C.

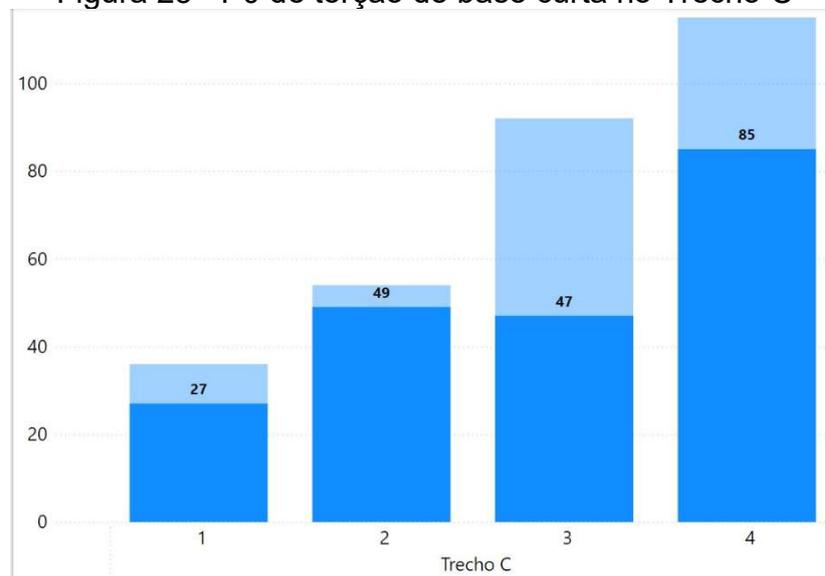
Figura 22 - Número de P0 no Trecho C



Fonte: elaborado pelo autor

Olhando para os P0 do Trecho C (ver figura seguinte) é possível observar um aumento constante ao longo do tempo, com uma pequena redução entre a inspeção 2 e 3.

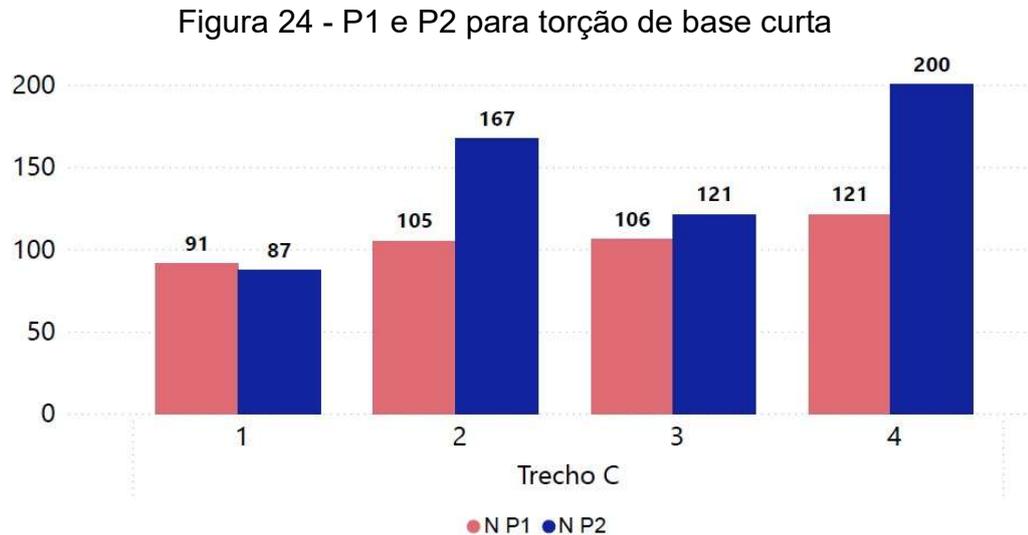
Figura 23 - P0 de torção de base curta no Trecho C



Fonte: elaborado pelo autor

Além disso, reproduzindo a análise do gráfico anterior é possível observar que o mesmo padrão de aumento de registros de defeitos de torções de base curta se

repete para os defeitos P1 e P2. Isto quer dizer que os defeitos não são pontos isolado e sim uma característica desta via. Ou seja, o número de falhas com o passar dos anos cresce. Isso pode indicar uma possível falta de manutenção da via permanente.



Fonte: elaborado pelo autor

Como mencionado na seção 2.2.3, o defeito de torção de base curta tem uma relação forte com juntas de trilhos mal fixadas e qualidade baixa de infraestrutura e superestrutura, o que reforça a ideia de que a presença desses defeitos é característica do trecho.

Outro ponto relevante é que o defeito de torção de base curta constatado na primeira inspeção, na maioria dos casos, continua na quilometragem exata ou deslocada alguns metros com o mesmo tamanho de defeito ou maior nas outras inspeções. Ou seja, ele não foi corrigido ou ocorreu uma manutenção não efetiva.

Segundo Lobato (2022), a grande maioria dos defeitos de torção ocorrem em juntas recorrentes. Além disso, segundo Steffler (2020), para defeitos de torções em juntas recorrentes, o topo do trilho se deforma agravando ainda mais o problema e é necessário uma manutenção específica para corrigir este defeito. Caso a manutenção seja feita de forma incorreta, Steffler diz que podemos estar consolidando o desnivelamento invés de retirar.

Por outro lado, ao analisar o Trecho E que corresponde as mesmas condições de operação do trecho C, como VMA, curva, bitola e dormentação, os defeitos de P0

mais presentes são de bitola fechada, defeitos de P1 são de bitolas abertas seguidas das variações de bitola.

O defeito de torção de base curta aparece como um número de registros maior somente na criticidade P2, conforme mostra a Tabela 8. Esses indicadores mostram que embora a torção é um dos problemas encontrados no Trecho E é possível que exista um controle mais eficaz por parte da equipe de manutenção.

Tabela 7 - Registro de defeitos por criticidade no Trecho E

Descrição	P0	P1	P2	P3	Total
Torção Base Curta	9	23	525	200	757
Bitola Aberta	13	71	241		325
Varição Rápida de Bitola	5	49	105		159
Bitola Fechada	114			32	146
Desalinhamento em Curva Excedido	2	6	11	8	27
Torção Base Longa	5	2		17	24
Total	148	151	882	257	1438

Fonte: elaborado pelo autor

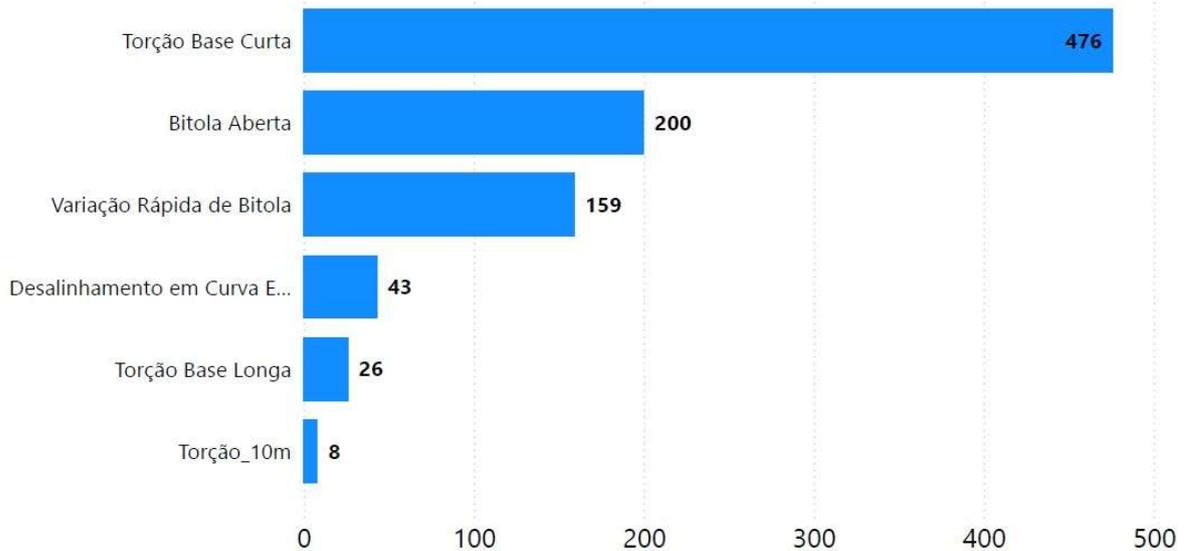
Vale ressaltar que apesar das características dos Trechos C e E serem muito semelhantes, os problemas de geometria são bem diferentes. Isso pode ter relação com outros fatores, tais como tonelada por eixo, quantidade de carga transportada, condições da infraestrutura e superestrutura, histórico de manutenção, qualidade e recursos das manutenções e capacitação da equipe de manutenção.

Se considerarmos a criticidade P1, os defeitos de bitola aberta, e variação rápida de bitola seguem sendo os segundo e terceiro defeito com mais registros. Esses defeitos serão tratados nos próximos itens.

4.4.2 Análise do defeito de bitola aberta e variação rápida de bitola

Os três defeitos mais recorrentes dentro da criticidade P1, são torção de base curta, bitola aberta e variação rápida de bitola, conforme mostra a Figura 25. Sendo que os defeitos de bitola aberta e variação rápida de bitola somados constituem em 25% dos registros de defeitos conforme ilustrado no gráfico de Pareto (ver Figura 20).

Figura 25 – Número de registros de P1 por falha



Fonte: elaborado pelo autor

Como descrito na seção 2.2.1, há uma relação entre os defeitos de bitola aberta e variação rápida de bitola e o tipo de dormentação da via. Dormentes de concreto são ótimos no controle deste tipo de defeito, seguido dos dormentes de aço. No entanto, trechos com dormentação de madeira possuem maior recorrência de defeitos relacionados a variação de bitola.

Essa característica é comprovada pela Tabela 9, onde o Trecho A e o Trecho F, produzidos com aço e concreto, respectivamente, apresentam o menor número de registro de defeitos. Todos os demais foram produzidos em madeira.

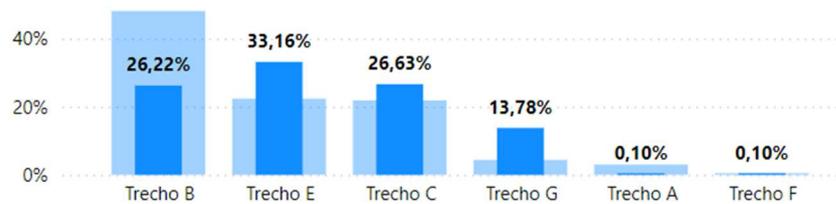
Tabela 8 - Registro por defeito e trecho

Descrição	Trecho A	Trecho B	Trecho C	Trecho E	Trecho F	Trecho G	Total
Bitola Aberta	1	257	261	325	1	135	980
Bitola Fechada	30	80	91	146		5	352
Desalinhamento em Curva Excedido	4	323	20	27			374
Empeno 20m					1		1
SE Máxima Excedida		23	7				30
Torção Base Curta	148	2012	707	757			3624
Torção Base Longa	1	222	106	24			353
Torção_10m					2	39	41
Variação Rápida de Bitola	9	175	214	159	13	102	672
Total	193	3092	1406	1438	17	281	6427

Fonte: elaborado pelo autor

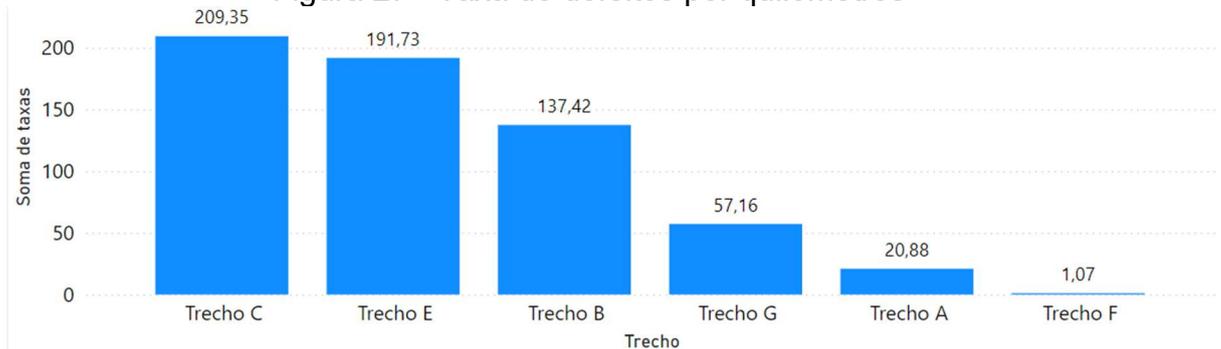
Outra forma de comprovar esta hipótese, é analisarmos o registro do número de defeitos de bitola aberta por trecho e o número de defeitos por quilometro de via. O Trecho A e Trecho F somam 0.2% dos registros de defeitos totais mensurados, ver Figura 26. Além disso, a taxa de defeitos por quilometro destes 2 trechos são as menores dentre os avaliados, conforme a Figura 27.

Figura 26 - Registro de bitola aberta por trecho



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 27 - Taxa de defeitos por quilômetros



Fonte: elaborado pelo autor

Segundo Steffler (2020), a causa mais comum de defeitos de bitola aberta e variação de bitola são dormentes perdendo a função de manter a fixação do trilho, isso ocorre com o apodrecimento dos dormentes de madeira. Ele também menciona que a correção de bitola é um dos defeitos mais demorados e caros para manutenção uma vez que o dormente esteja podre, deve ser realizado a troca por completo.

4.5 DEFEITOS POR SEGMENTO DE VIA

Na ferrovia, a ocorrência de defeitos varia de acordo com a geometria da via, sendo algumas falhas exclusivas de curva, espiral ou tangente, ver item 2.2 da revisão

bibliográfica. A Tabela 10 mostra todos os defeitos filtrados por segmento de via. Note que aproximadamente 50% dos defeitos ocorrem na espiral de entrada, que em teoria deveria ser próximo do valor de espiral de saída. Pois esta diferença está apenas relacionada com o sentido de inspeção do carro controle.

Tabela 9 - Criticidade por segmento de via

Segmento da via	P0	P1	P2	P3	Total
Espiral de Entrada	225	393	1903	700	3221
Espiral de Saída	119	217	882	340	1558
Curva Circular	121	273	809	134	1337
Tangente	137	29	90	55	311
Total	602	912	3684	1229	6427

Fonte: elaborado pelo autor

Apesar disso, é possível argumentar que para um determinado trecho o sentido preferencial de inspeção é no “sentido carregado” e que as composições, ao transitarem, atacam a espiral de entrada de forma diferente. Também é possível que o carro controle tenha dificuldade de avaliar em qual segmento de via ele está percorrendo devido aos desalinhamentos na via.

A análise dos dados sobre defeitos geométricos em vias permanentes trouxe informações importantes sobre as condições dos trechos estudados. Vale destacar três pontos principais.

O primeiro ponto diz respeito dos defeitos com maior ocorrência, embora o veículo tivesse capacidade para identificar dezesseis tipos de defeitos, apenas nove foram registrados em todos os trechos analisados. Além disso apenas três deles somaram 81 % de todos os defeitos, sendo eles, torção de base curta (56,4%), bitola aberta (15,25%) e variação rápida de bitola (10,46%).

O segundo ponto seria em relação ao defeito que mais causam P0 e P1 sendo o defeito de torção de base curta tanto no plano de regras deste trabalho quanto no plano de regras da Nomadlog. Este defeito é registrado em todos os trechos afetando a eficiência da operação e gerando custos de manutenção.

O terceiro ponto observado nas discussões refere-se à recorrência de três tipos principais de defeitos (torção de base curta, bitola aberta e variação rápida de bitola). Estes podem estar relacionados à ausência de manutenção adequada ou à

realização de intervenções ineficazes, como foi apresentado no item 4.4.1. Esse fato ressalta a necessidade de modernização das estruturas ferroviárias, especialmente considerando que a dormentação de madeira, amplamente utilizada, já não atende de forma eficiente às demandas atuais.

Esses aspectos indicam a relevância de aprimorar tanto os critérios normativos quanto as práticas de manutenção, buscando uma infraestrutura ferroviária mais segura, padronizada e resiliente.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho tinha como principal objetivo realizar uma análise dos defeitos de geometria em trechos das ferrovias brasileiras em relação a norma ABNT NBR 16387. Além disso, buscou apresentar os principais defeitos de geometria, bem como realizar um levantamento dos defeitos mais críticos nas ferrovias brasileiras.

Foi realizado um levantamento dos defeitos de geometria de via conforme definidos pela ABNT, bem como dos principais fatores que contribuem para o surgimento desses defeitos. Identificou-se, ainda, uma carência de pesquisas específicas voltadas à análise detalhada dos defeitos de geometria de via e à interpretação desses dados.

Para atingir o objetivo principal deste trabalho utilizou-se o banco de dados pertencente a empresa Nomadlog, a partir de dados de inspeções realizadas com carros controle. Ao todo foram analisados seis trechos com aproximadamente 15 mil defeitos registrados. Todos os defeitos registrados foram classificados como P0, P1, P2 e P3 adaptando de acordo com os limites das classes propostas na norma ABNT NBR 16387, a fim de definir os mesmos parâmetros para avaliação dos trechos.

Devido ao grande volume de dados duplicados, foi necessário realizar o tratamento dos dados, reduzindo o banco de dados a 6,4 mil defeitos de 9 tipos diferentes. Em seguida, aplicação da Regra de Pareto identificou os defeitos com maior ocorrência, destacando torção de base curta, bitola aberta e variação de bitola, responsáveis por 81% das ocorrências.

O defeito de torção de base curta foi o defeito que mais registrou P0 e P1 tanto no plano de regras deste trabalho quanto no plano de regras da Nomadlog. Este defeito é registrado em todos os trechos podendo afetar a eficiência operacional e gerar custos de manutenção.

Além disso, é possível considerar que defeitos como bitola aberta, torção e variação rápida de bitola podem estar associados a possíveis falhas ou ausência de manutenção adequada, sugerindo a importância de avaliar melhorias nas estruturas ferroviárias.

Este trabalho contribui para a gestão ferroviária ao evidenciar a importância de tecnologias de monitoramento contínuo, que possibilitam diagnósticos mais

precisos e ações corretivas rápidas. Também ressalta a necessidade de capacitação técnica e adequação dos recursos à realidade operacional das ferrovias brasileiras, que enfrentam desafios específicos devido às suas condições de uso e deficiências dos sistemas de manutenção.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de um estudo sobre o impacto financeiro dos defeitos na via férrea, especialmente em relação a interdições e atrasos operacionais. Além disso, sugere-se analisar o desgaste da geometria da via em função da carga transportada e avaliar o custo-benefício a longo prazo de diferentes tipos de dormentes, visando à otimização da infraestrutura ferroviária.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Lucas Toledo de; **Inspeção de via permanente**: um fator determinante no processo de direcionamento da manutenção ferroviária. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia da Produção - Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.

ALMEIDA, Figueiredo; *et al.* **Procedimento de análise para investigação e prevenção de descarrilamentos**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais Jul 2022 - v.13 - n.7.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16387: Via Férrea: classificação de vias.2016.**

B2BRASIL. Dormente polimérico. Disponível em: <https://b2brazil.com.br/hotsite/wiseplasticossa/dormente-polimerico>. Acesso em: 18 out. 2024.

BILHERI, Arthur *et al.* **Avaliação da qualidade da correção geométrica**. Publicado VI Encontro ANTF das ferrovias, 2021.

BILHERI, Arthur. **Manutenção 4.0 da Via Permanente: avanços na utilização de big data**. Publicado VI Encontro ANTF das ferrovias, 2021.

BRINA, Helvécio Lapertosa; **Estradas de Ferro**. Vol. 1, 1979.

CAMARA, Guilherme Becker da; **Procedimento e software para identificar e analisar problemas na linha ferroviária de trens de carga**. Trabalho de Conclusão de curso - Graduação em Engenharia Ferroviária e Metroviária, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

CÉSAR, Flávio; JÚNIOR, Apolinário. **Análise do sistema de manutenção ferroviária da FCA/VI** Trabalho de Conclusão de Curso - (Graduação em Engenharia Civil), 2019.

EPAMINONDAS, Antônio Rezende; OLIVEIRA, Luiz; NASCIMENTO, Bruno; **Análise das características de atraso de trens nas estradas de vitória- minas**. Publicado XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2010.

EVARISTO, Lucas. BRASILFERROVIARIO. Dormentes. Disponível em: <https://www.brasilferroviario.com.br/dormente/>. Acesso em: 18 out. 2024.

FRANZÃO, Antônio; **Análise estatística das ocorrências de acidentes ferroviários na região Centro-sudeste paulista, causas e consequências**. Trabalho de Conclusão de Curso - (Graduação em Estática) 2018.

KUMAR, A; HARSHA, S; **A systematic literature review of defect detection in railways using machine vision-based inspection methods**, Publicado: International Journal of Transportation Science and Technology, 2024.

LI; J. *et al.*; **Detection and Maintenance for Railway Track Defects: A Review**. Publicado: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2023

LOBATO, Paulo. BRASILFERROVIARIO. Juntas ferroviárias: manutenção. Disponível em: <https://www.brferrovia.com.br/post/manuten%C3%A7%C3%A3o-de-juntas-ferrovi%C3%A1rias>. Acesso em: 24 out. 2024.

JUNQUEIRA, Ângelo Samuel; MOTTA, Rosângela dos Santos; OLIVEIRA, Luciano. **Análise dos métodos de avaliação geométrica de via permanente para monitoramento de via férrea no Brasil**. TRANSPORTES, v. 31, n. 1, p. e2824, 19 abr. 2023.

NOMADLOG. Manual interno da Nomadlog MAN-NL-240624-1005.00 [Nomadtan]

PASSOS, Washington Luis; **Geometria de via permanente**: um fator determinante para a velocidade de uma composição. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Civil - Universidade Cerrado Patrocinio, 2018.

SANTOS, Jean Carlos dos, *et al.*; **SISTEMP - Sistema de Monitoramento da Temperatura da Via Permanente**. Publicado VI Encontro ANTF das ferrovias, 2021.

SACHIN, Lodhi; *et al.* **Railway Track Defect Detection using Transfer Learning With EfficientNetB3**. International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI), 2022.

SERACO, Isaias Pereira. **Procedimento para definição de políticas de manutenção de via permanente**, Tese de Mestrado (Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

STEFFLER, Fábio **Via permanente aplicada: guia teórico e prático**. 2013.

SIST EN 13848-2:2021 - Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 2: Measuring systems - Track recording vehicles.

UFJF NOTÍCIAS. Projeto de dormentes ecológicos para linha férrea é premiado pela CBIC. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/noticias/2017/11/13/projeto-de-dormentes-ecologicos-para-linha-ferrea-e-premiado-pela-cbic/>. Acesso em: 19 out. 2024

WU, F; *et al.*; **Internal Defects Detection Method of the Railway Track Based on Generalization Features Cluster Under Ultrasonic Images**, Publicado: Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022.

ZANATTA, Pedro; CNN Brasil: Projeção de investimentos privados no setor ferroviário ultrapassa R\$ 170 bi, mostram dados da ANTT. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/financas/projecao-de-investimentos-privados-no-setor-ferroviario-ultrapassa-r-170-bi-mostram-dados-da-antt/>. Acesso em: 22 de outubro 2024.

WU, F; *et al.*; **Internal Defects Detection Method of the Railway Track Based on Generalization Features Cluster Under Ultrasonic Images**, Publicado: Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022.

ANEXO 1 - TABELA DE REGISTRO DE DEFEITOS TRECHO F1

Posição (km)	Descrição	Max (mm)	Comprimento (m)	Criticidade	Data	Velocidade	Segmento da via	Nova criticidade
1.852	Torção_10m	18	1.250	P3	31/10/2023	62	4	P2
1.900	Excesso de Superelevação na Tangente	30	5.500	P3	31/10/2023	62	1	P3
7.365	Empeno 20m	32	22.750	P3	31/10/2023	62	3	P3
11.297	Torção_10m	20	1.500	P3	31/10/2023	62	2	P3
14.362	Varição Rápida de Bitola	10	0.500	P3	31/10/2023	62	1	P3
14.642	Varição Rápida de Bitola	10	0.750	P3	31/10/2023	62	1	P3
14.671	Varição Rápida de Bitola	10	0.500	P3	31/10/2023	62	1	P3
14.715	Varição Rápida de Bitola	10	0.750	P3	31/10/2023	62	1	P3
14.716	Varição Rápida de Bitola	11	0.500	P3	31/10/2023	62	1	P2