

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

ALINE DE CÁSSIA RAQUEL MELO VIANA

**DESCARRILAMENTOS NA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS:
ANÁLISE DE CAUSAS**

São Luís

2024

ALINE DE CÁSSIA RAQUEL MELO VIANA

**DESCARRILAMENTOS NA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS:
ANÁLISE DE CAUSAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Civil da
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA,
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. **Witson Andrade da Silva**

São Luís

2024

Viana, Aline de Cássia Raquel Melo

Descarrilamentos na estrada de ferro carajás: análise de causas / Aline de Cássia Raquel Melo Viana. – São Luis, MA, 2024.

43 f

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Maranhão, 2024.

Orientador: Prof. Witson Andrade da Silva.

1.Descarrilamentos. 2.Estrada de Ferro Carajás. 3.Manutenção ferroviária. 4.Segurança operacional. I.Titulo.

CDU:658.58:656.2

ALINE DE CÁSSIA RAQUEL MELO VIANA

**DESCARRILAMENTOS NA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS:
ANÁLISE DE CAUSAS**

Artigo Científico apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil
da Universidade Estadual do Maranhão –
UEMA, como requisito para obtenção do
título de Bacharela em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Professor Witson Andrade da Silva
Orientador – Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Professor Eduardo Aurelio Barros Aguiar (2º Examinador)
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Professor Jorge Creso Cutrim Demétrio (3º Examinador)
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

SÃO LUÍS – MA

2024

DESCARRILAMENTOS NA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS: ANÁLISE DE CAUSAS

Aline de Cássia Raquel Melo Viana

Witson Andrade da Silva

RESUMO

Este artigo investiga os descarrilamentos na Estrada de Ferro Carajás (EFC) ocorridos entre 2018 e 2023, visando identificar suas causas e propor soluções para aumentar a segurança e a eficiência operacional. A pesquisa adota uma abordagem metodológica que combina revisão bibliográfica e análise de estudos de caso. Os resultados destacam que defeitos na geometria da via, falhas nos componentes e falhas humanas como os principais fatores que contribuem para os descarrilamentos. A aplicação da Matriz GUT permitiu priorizar ações de manutenção, alocando recursos de forma eficaz para problemas mais críticos. Conclui-se que uma manutenção rigorosa e contínua, aliada à experiência prática dos profissionais, é essencial para mitigar riscos e assegurar a operação segura da EFC, que desempenha um papel crucial no escoamento de minerais e no desenvolvimento econômico do Brasil.

Palavras-chave: Descarrilamentos. Estrada de Ferro Carajás. Manutenção ferroviária. Segurança operacional.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de transporte ferroviário destaca-se como uma opção com menor impacto ambiental e representa um importante impulsionador do progresso econômico e sustentável. Com a capacidade de movimentar grandes volumes de carga de forma eficiente, as ferrovias são fundamentais para iniciativas que promovem o desenvolvimento. Em síntese, o transporte ferroviário, também conhecido como ferrovia, estrada de ferro ou via férrea, é um sistema baseado em trens que transitam sobre trilhos, essencial para o transporte eficiente e sustentável de mercadorias em larga escala (Rosa, 2016).

Nos últimos anos, a relevância econômica das ferrovias no Brasil tem aumentado significativamente. Sua importância reside na atuação crucial para a logística nacional, facilitando o transporte de produtos agrícolas, minerais e industriais. A eficiência e capacidade das ferrovias desempenham um papel fundamental na competitividade das exportações brasileiras no cenário global. O setor ferroviário tem atraído investimentos consideráveis, tanto públicos quanto privados, com o intuito de expandir e modernizar a infraestrutura ferroviária, um elemento vital para o desenvolvimento econômico e a redução dos custos logísticos (Carvalho, 2019).

Em 2022, o Brasil registrou exportações de US\$ 335 bilhões, o maior valor da série histórica, com um superávit de US\$ 62,3 bilhões e um crescimento de 19,3% em relação ao ano anterior, conforme dados do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços.

Em 2022, o Maranhão, com seu porto internacional do Itaqui, teve um papel significativo nas exportações nacionais, totalizando US\$ 5,7 bilhões, um aumento de US\$ 1,4 bilhão em relação a 2021, conforme o boletim do comércio exterior divulgado pelo IMESC e pela SEPLAN. Os principais itens exportados foram soja, alumínio, celulose e minério de ferro.

Este estudo analisa os descarrilamentos na Estrada de Ferro Carajás (EFC), em operação desde 1985 e com 1.843,73 km de extensão, ligando as minas da Serra de Carajás ao Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, vital para o transporte de cargas a granel, como minério de ferro, carvão e grãos. Entre 2018 e 2023, a maior parte dos acidentes na Estrada de Ferro Carajás envolveu descarrilamentos resultantes de defeitos da geometria da via. Esta pesquisa pretende analisar esses acidentes, buscando identificar padrões que possam melhorar a segurança e a eficiência dessa importante via ferroviária.

A aplicação da Matriz GUT é fundamental para priorizar problemas com base em Gravidade, Urgência e Tendência, ajudando a identificar as causas mais críticas e manter a segurança e eficiência operacional da EFC.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. História da Ferrovia no Brasil

A formação da ferrovia brasileira pode ser resumida nos interesses de permitir a entrada de grandes investimentos estrangeiros no país e gerar o crescimento da sua economia de exportação (Rodriguez, 2004). Sua história se inicia no século XIX, em 1835 no Brasil Império, onde com o objetivo de impulsionar a integralização dos estados do Sul, Sudeste e Nordeste o governo promulga a lei que concedia àqueles com interesse de construir estradas de ferro no país a concessão de exploração por 40 anos (DNIT, 2007). Contudo os benefícios não se mostravam suficientes no cenário de risco tão alto para o baixo volume de material transportado, sendo oferecido em 1852 isenção de impostos, garantia de juros de 5% ao ano e doação de terras com distância de até 5 léguas do traçado da ferrovia que possuísse COELI (2004 apud REIS, 2008). Tais benefícios vieram a se tornar o real interesse dos investidores, ao representarem grande retorno financeiro garantido.

Em 30 de abril de 1854, quando D. Pedro II inaugurou a primeira Estrada de Ferro do Brasil, conectando Porto Mauá a Fragoso, no Rio de Janeiro. Levando o nome de Petrópolis só foi chegar de fato à cidade mais de 30 anos depois, em 1886 (Souza, 2019). Na busca por investimentos para a implantação das estradas de ferro, o governo adotou o sistema de concessões para atrair investidores. Entre o final do século XIX e o início do século XX, os investimentos britânicos foram responsáveis por impulsionar a construção das linhas férreas (IPHAN, 2010).

As primeiras linhas férreas faziam a conexão de áreas agrícolas e de mineração aos portos. Foram elaborados diversos planos de aviação para a integração da malha ferroviária e ordenar a implantação de novos trechos, porém por conta das políticas de concessões nenhum deles obteve sucesso. Após a Proclamação da República, essa situação mudou com a criação de uma comissão encarregada da elaboração de diretrizes para dar continuidade à implantação e manutenção da malha ferroviária brasileira, possibilitando que cada empresa apresentasse propostas para os locais de seu interesse. Várias linhas estratégicas foram implantadas, como aquelas destinadas à defesa das fronteiras e as que completaram as ligações entre as regiões Sudeste, Sul e Nordeste. (IPHAN, 2010)

A segunda guerra mundial influenciou nas relações de produção e consumo, que levaram setores da área agrícola à decadência e as linhas férreas que faziam o transporte de carga desses produtos a enfrentarem prejuízos, além de apresentar poucos pontos de integração nacional, formando ilhas isoladas. Assim, o governo federal empreendeu esforços para

modernizar, ampliar e recuperar as estradas que ligam as diferentes regiões do país, como resultado dos vários planos de desenvolvimento viário implementados. A situação financeira precária das 6 estradas de ferro controladas pelo governo levou à proposta de criação da Rede Ferroviária Federal Sociedade Anônima (RFFSA) em 1952 pelo Ministro Álvaro de Souza Lima. Em 16 de março 1957, o presidente Juscelino Kubitschek assinou a Lei Nº 3.115, estabelecendo a RFFSA como uma sociedade de economia mista vinculada ao Ministério dos Transportes, nacionalizando as ferrovias e visando uma exploração mais econômica, diminuindo os déficits operacionais (Gov, 2007).

Tabela 1: Crescimento da Rede Ferroviária Brasileira.

Décadas	Quilômetros
1854 a 1873	498
1874 a 1893	10.356
1894 a 1913	13.129
1914 a 1933	8.459
1934 a 1953	3.946
Total até 1953	36.388

Fonte: Adaptado de Brina (1979)

A extensão da malha ferroviária brasileira esteve estagnada em cerca de 37.200 km por um longo período, chegando a ter aproximadamente 30.000 km na década de 80. Atualmente, ela é composta por aproximadamente 28.000 km, colocando o Brasil como o décimo país no ranking mundial. Esse número, que já parece pequeno em comparação com o vasto território brasileiro, fica ainda mais discrepante quando comparado com os impressionantes 360.000 km da malha ferroviária norte-americana. A qualidade e a velocidade média das ferrovias nos Estados Unidos são superiores às do Brasil, evidenciando um gap significativo no desenvolvimento e na infraestrutura ferroviária entre os dois países. (Rosa, 2016)

2.2. Modal Ferroviário no Brasil

Ruiz-Padillo et al. (2020) define transporte como "um sistema tecnológico e organizacional que visa transferir pessoas e mercadorias entre diferentes locais para equalizar diferenças espaciais e econômicas entre oferta e demanda", enquanto sistema é descrito como "um conjunto de partes que interagem para alcançar um objetivo específico, seguindo um plano ou princípio."

Pode ser caracterizado como um sistema de transporte no qual os veículos (motores ou rebocados) se movem com rodas metálicas sobre trilhos metálicos contínuos longitudinais, denominados de trilhos. Ao contrário de outros sistemas, os veículos não têm mobilidade na escolha da direção, tornando a ferrovia um sistema autoguiado. A ferrovia pode ser dividida em

quatro elementos: via permanente, material rodante, sinalização/comunicação e Operação (Rosa, 2016).

- Via Permanente; Infraestrutura e superestrutura;
- Material Rodante: Material de tração e material rebocado;
- Sinalização/comunicação: Eletroeletrônica e CCO: Centro de controle operacional;
- Operação: Circulação, pátios e terminais.

Até o início dos anos 90, o modal rodoviário predominava no sistema de transporte brasileiro devido às condições precárias das ferrovias (Brina, 1979). Apesar dos investimentos recentes, a malha ferroviária do Brasil ainda apresenta índices de acidentes e produtividade piores aos das principais ferrovias do mundo, enfrentando diversos obstáculos para sua expansão. Entre os desafios estão a necessidade de pedágios em rodovias, traçados desatualizados e a falta de políticas de incentivo para a modernização da infraestrutura e da indústria ferroviária nacional (Rosa, 2016).

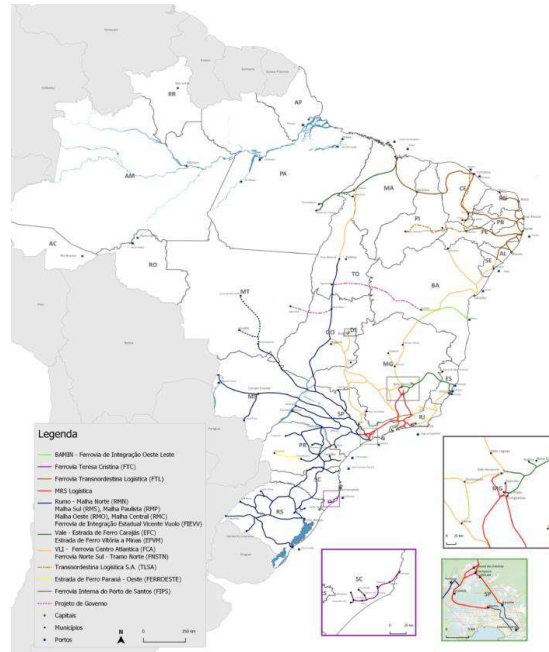
A construção de ferrovias é inicialmente cara, o custo de 1 quilômetro é estimado em US\$ 1 milhão a US\$ 4,5 milhões, mas os custos de manutenção são mais baixos em comparação com rodovias, de US\$ 7 mil a US\$ 15 mil por ano, mas requer investimentos em tecnologias de monitoramento e reparos especializados (Worsley, 2020). Por outro lado, os custos de construção e manutenção de rodovias são elevados devido à necessidade constante de reparos e manutenção frequente, resultando em gastos substanciais com pavimentação e infraestrutura de suporte devido ao desgaste do tráfego intenso e condições climáticas (Liljenström et al., 2022).

Segundo o Plano Nacional de Logística 2035, elaborado em 2017, a matriz de transporte ferroviária representa 21,46% do transporte de cargas no Brasil, enquanto as rodovias são responsáveis por 67,61%, as hidrovias por 1,48%, a cabotagem por 7,96% e outros modais por 1,48% (PNL, 2035). Marques (1996) ressalta que investimentos em políticas e infraestrutura podem posicionar as ferrovias como um dos modais mais importantes, especialmente pela capacidade de transportar grandes volumes de mercadorias e passageiros de forma eficiente.

No cenário atual a distribuição das ferrovias pelo território brasileiro é altamente desigual. A região Sudeste domina com quase metade (47%) da extensão total das ferrovias do país, enquanto as regiões Norte e Centro-Oeste, juntas, possuem apenas 8% dessa infraestrutura vital para o transporte nacional. Essa disparidade geográfica reflete desafios significativos na conectividade e no desenvolvimento econômico dessas regiões menos servidas pelo modal ferroviário. Junior (2013) aborda a relevância de um sistema ferroviário eficiente para a

economia e sociedade, enfatizando seu papel crucial como estímulo para a integração regional. Ele argumenta que as ferrovias não apenas induzem o crescimento e o desenvolvimento econômico, mas também contribuem significativamente para a criação de uma rede de transportes mais eficiente, reduzindo a dependência da exportação de matérias-primas.

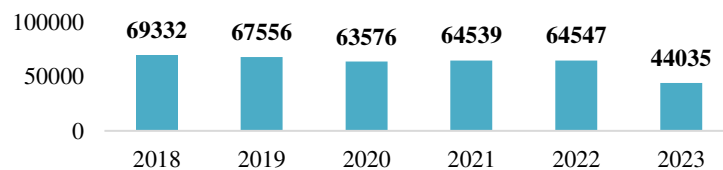
Figura 1: Mapa Ferroviário Brasileiro



Fonte: ANTF (2023)

As Ferrovias se mostram mais competitivas em distâncias superiores a 500 km, gerando menor impacto ambiental do que as rodovias em distâncias menores. Além disso, apresenta uma maior segurança em comparação com o modal rodoviário, com um menor índice de acidentes e uma incidência reduzida de furtos e roubos. (Rosa, 2016)

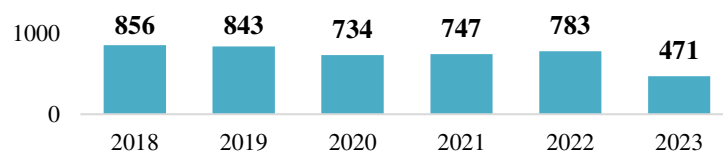
Gráfico 1: Quantidade de acidentes rodoviários de 2018 a 2023



2023: Considerando os acidentes até julho/23*.

Fonte: Adaptado ANTT (2023)

Gráfico 2: Quantidade de acidentes ferroviários de 2018 a 2023

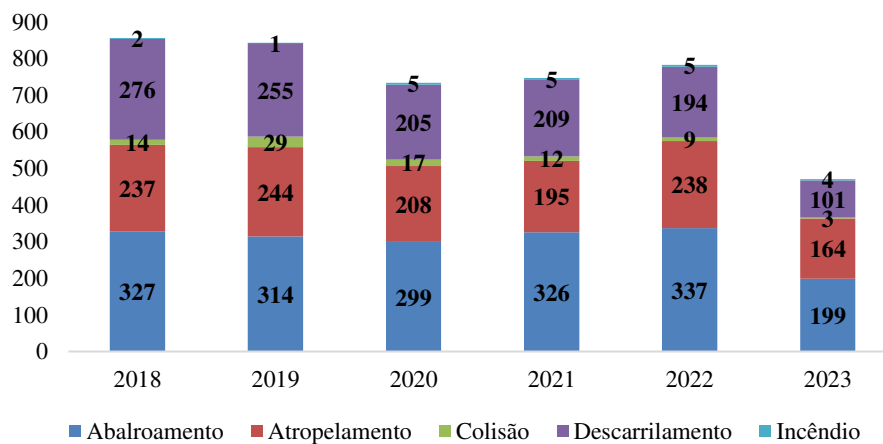


2023: Considerando os acidentes até julho/23*.

Fonte: Adaptado ANTT (2023)

Segundo a Resolução da Agência nacional de transporte terrestre (ANTT) nº 1.431/2006, os eventos ferroviários abrangem situações em que veículos ferroviários resultam em danos a indivíduos, veículos, estruturas, obras de arte, linhas permanentes ou meio ambiente, e a animais. Esses incidentes são categorizados por tipo, incluindo descarrilamento, atropelamento, colisão, abalroamento, explosão e incêndio, com causas possíveis que envolvem erro humano, falhas na via férrea, problemas nos equipamentos ferroviários, sistemas de comunicação, sinalização e fornecimento de energia, atos de vandalismo, além de circunstâncias acidentais ou de força maior.

Gráfico 3: Tipos de acidentes ferroviários no Brasil de 2018 a 2023



2023: Considerando os acidentes até julho/23*.

Fonte: Adaptado ANTT (2023)

Tabela 2: Tipos de acidentes ferroviários

Tipo	Descrição
Descarrilamento	Descarrilamento ocorre quando um veículo ferroviário perde a guia do trilho, resultando na queda do veículo. Pode preceder um tombamento ou ser consequência de um abalroamento
Tombamento	Tombamento ocorre quando o trem cai totalmente, deixando a guia dos trilhos, enquanto adernamento é o tombamento parcial.
Abalroamento	Abalroamento é a colisão entre um trem e qualquer elemento da ferrovia ou externo, exceto outros veículos ferroviários.
Atropelamento	Ocorre quando um trem colide com um ser vivo, seja um humano ou animal.
Colisão	Impacto entre dois veículos ferroviários.
Explosão	Acidente raro, mas catastrófico, que pode ocorrer devido ao transporte de materiais inflamáveis.
Incêndio	Incêndio é um acidente onde ocorre fogo em vagões ou locomotivas, frequentemente devido a falhas mecânicas ou elétricas.

Fonte: Brasil Ferroviário (2018)

2.3. VIA PERMANENTE

A via permanente é o sistema de sustentação e rolamento que suporta e guia os trens, garantindo direção e segurança durante o tráfego. Também conhecida como VP ou linha férrea, é composta por diversos elementos que formam sua estrutura, cada um com sua função específica, responsáveis por fornecer suporte e direcionamento ao movimento dos trens (Rosa, 2016)

A instalação da via permanente deve considerar requisitos previamente determinados, como volume de tráfego, velocidade operacional, material rodante circulante, raio mínimo, matriz de cargas, superelevação de equilíbrio e prática, condições técnicas e de tolerância para garantir a segurança da estrutura e atendimento às demandas específicas do transporte ferroviário (Wenceslau, 2024).

A VP está sujeita a diversas condições, como intempéries (condições climáticas adversas) que podem impactar na estabilidade e segurança da ferrovia. A exposição contínua a essas condições exige um monitoramento rigoroso e intervenções de manutenção frequentes para prevenir danos maiores. Além das intempéries, a VP é suscetível a atos de vandalismo e ao desgaste natural resultante do tráfego constante de trens, que torna indispensável as inspeções regulares e os reparos adequados. (Brina, 1979)

O deslocamento dos trilhos devido ao tráfego normal de trens e os desgastes que podem ultrapassar o limite de tolerância de segurança e conforto aceitáveis são outros desafios que afetam a integridade da ferrovia. A manutenção da via permanente é um aspecto crítico para garantir sua durabilidade e eficiência. Envolve a inspeção regular dos trilhos, a substituição de componentes desgastados e a correção de qualquer desvio que possa ocorrer devido ao uso contínuo. A manutenção preventiva é essencial para evitar acidentes e garantir a segurança do transporte ferroviária (Oliveira, 2018).

Os elementos que compõem a VP são distribuídos em duas categorias: infraestrutura e superestrutura:

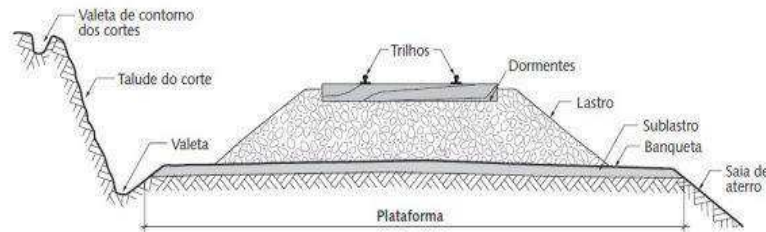
- Infraestrutura: Terraplanagem, drenagem e Obras de arte (Correntes e especiais);
- Superestrutura: Trilho, dormente, lastro, sublastro e aparelhos de mudança de via (AMV).

2.3.1. Infraestrutura

A infraestrutura ferroviária é composta por todas as obras abaixo da terraplanagem que formam a plataforma da ferrovia, também conhecida como terrapleno, sobre a qual será

instalada a superestrutura. Esta infraestrutura inclui aterros, cortes, sistemas de drenagem, obras de arte correntes (OAC) e obras de arte especiais (OAE).

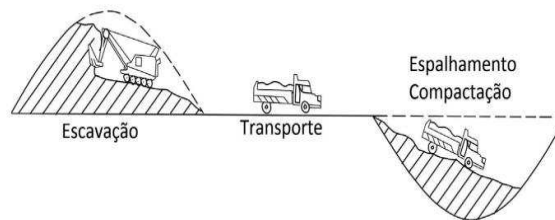
Figura 4: Seção transversal da plataforma ferroviária



Fonte: Nabais et al., (2014)

Terraplanagem é o conjunto de operações para movimentação de terra, visando nivelar terrenos naturais e garantir uma base estável para a construção, como estradas de ferro. Quando o terreno é baixo ou irregular, realiza-se um aterro; em terrenos elevados ou montanhosos, realiza-se um corte. Qualquer serviço que altera o estado natural do terreno é considerado terraplanagem (Nabais et al., 2014).

Figura 5: Desenho esquemático das atividades de terraplanagem



Fonte: Rosa (2016)

O sistema de drenagem é essencial para a durabilidade da ferrovia, eliminando a água das vias e prevenindo a deterioração da estrutura. Ele direciona águas pluviais e fluviais para locais seguros, atendendo a requisitos econômicos e técnicos. As estruturas de drenagem incluem a drenagem Superficial que é a captação e condução de águas superficiais com o sistema de drenagem, e a drenagem profunda que busca minimizar a presença de água nos maciços de terra.

Obras de Arte Correntes (OAC) são pequenas estruturas que auxiliam a funcionalidade da via férrea, como bueiros e valetas, projetadas para permitir o fluxo de água e estabilizar o terreno. Obras de Arte Especiais (OAE) são estruturas de grande porte que permitem a travessia de obstáculos naturais ou artificiais, como pontes, viadutos e túneis (Rosa, 2016).

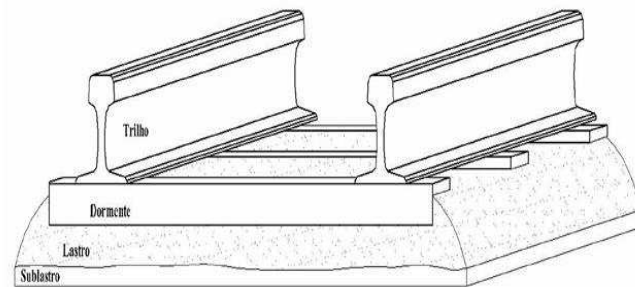
2.3.2. Superestrutura

A superestrutura é a parte da VP que recebe diretamente os impactos das composições ferroviárias. Esta estrutura inclui trilhos, dormentes, lastro, sublastro e aparelhos de mudança

de Via (AMV) esses componentes são diretamente responsáveis por suportar as cargas dos trens e direcionar o movimento ao longo da via férrea e se mostram como os elementos principais. (Wenceslau, 2024).

A qualidade e a manutenção desses componentes são fundamentais para a operação segura e eficiente dos trens. As dimensões do leito da estrada são determinadas por padrões normativos, que variam conforme a bitola adotada, assegurando a estabilidade e segurança da via férrea (Brina, 1979).

Figura 6: Desenho esquemático da superestrutura de uma ferrovia



Fonte: Rosa (2016)

De acordo com Rosa (2016), os trilhos são suportados e fixados em dormentes, que são regularmente espaçados para garantir a estabilidade da via férrea. Esses dormentes, na maioria das vezes, são instalados sobre um lastro, cuja função essencial é absorver os esforços dos dormentes e transmitir ao solo as pressões correspondentes às cargas suportadas pelos trilhos.

A patologia na via permanente refere-se aos defeitos ou deteriorações que ocorrem nos componentes afetando a segurança e a eficiência das operações ferroviárias. Esses problemas podem resultar de desgaste natural, falhas de manutenção ou impactos ambientais, exigindo inspeções e intervenções regulares para garantir a estabilidade da via (Rosa, 2016).

2.3.3. Sublastro

Brina (1979) define o sublastro como uma camada granular fina situada abaixo do lastro, separando-o do subleito. Entre suas funções estão Atuar como filtro e selante para impedir que a água proveniente do lastro penetre no subleito; aumentar a capacidade de suportar da plataforma, para assim ter uma maior taxa de trabalho no terreno ao transmitir as cargas através do lastro e possibilitar uma menor altura do lastro; aumentar a resistência do leito à erosão e à penetração da água, promovendo uma boa drenagem da via; proporcionar elasticidade ao apoio do lastro, evitando que a via permanente se torne rígida. Devido à sua estreita relação com a infraestrutura, alguns autores consideram o sublastro como parte integrante dela.

Segundo Nabais et al. (2014), o sublastro apresenta uma construção mais econômica e pode ser encontrado nas proximidades do local de instalação da linha férrea. Essa alternativa

não apenas reduz os custos de manutenção, mas também melhora o padrão técnico da VP, se enquadrando nos requisitos de índice de grupo (IG) igual a zero; limite de liquidez (LL) máximo de 35, índice de plasticidade (IP) máximo de 36, classificação pela tabela da Highway Research Board (HRB), grupo A, expansão máxima de 1% e índice de suporte Califórnia (CBR) mínimo de 30.

2.3.4. Lastro

O lastro é um componente essencial da via férrea, atuando como suporte elástico que distribui as cargas transmitidas pelos dormentes. Constituído por materiais granulares como pedra britada, seixo rolado ou laterita, ele se posiciona entre os dormentes e o sublastro, absorvendo esforços e transmitindo pressões ao solo (Wenceslau, 2024). Brina (1979) destaca que o lastro deve ter resistência adequada, elasticidade limitada, dimensões apropriadas e ser permeável para garantir boa drenagem. Ele também deve ser resistente a agentes atmosféricos e não produzir pó, evitando desconforto e desgaste do material rodante.

Rosa (2016) observa que a durabilidade do lastro ferroviário é determinada pelo grau de degradação de suas características funcionais. É crucial que tanto o lastro quanto o sublastro sejam instalados sobre uma plataforma que esteja devidamente regularizada, nivelada, compactada e com condições adequadas de drenagem para garantir a eficiência e longevidade do sistema. Segundo as especificações da ABNT NBR 5564/1991, os materiais que compõem o lastro devem atender a diversos critérios técnicos. Esses critérios incluem a exigência de partículas com formato cúbico, uma resistência ao choque com índice de tenacidade Treton máximo de 20%, porosidade aparente máxima de 1%, absorção de água máxima de 1%, resistência ao desgaste com abrasão de Los Angeles máxima de 40%, e uma massa específica aparente mínima de 2,4 g/cm³.

Tabela 2: Brita especificada para a Estrada de Ferro Carajás (EFC)

Ensaio Laboratorial	Limite
Forma dos grãos - Partículas lamelares e/ou alongadas	5,0%
Porcentagem passante na peneira nº 200 (75mm)	1,0%
Resistência ao desgaste - Abrasão Los Angeles	30,0%
Massa específica aparente	mínimo 2.500 kg/m ³
Porosidade aparente	máximo 1,0%
Absorção de água	máximo 1,0%
Resistência à intempérie / Sanidade	máximo 5,0%
Teor de fragmentos macios e friáveis	máximo 5,0%
Torrões de argila	máximo 5,0%
Massa unitária no estado solto	mínimo 1,25 g/cm ³

Fonte: Adaptado Wenceslau (2024).

De acordo com Wenceslau (2024), a deterioração do lastro, causada por compactação inadequada, contaminação por finos e falta de manutenção, pode reduzir sua eficácia, resultando em instabilidade da via e aumento do risco de descarrilamento.

2.3.5. Dormentes

Conforme Brina (1979), o dormente recebe e transmite ao lastro os esforços aplicados pelos trilhos, além de permitir a fixação segura dos trilhos e manter invariável a distância entre eles, conhecida como bitola, garantindo a estabilidade e a segurança da via férrea. Inspeções regulares são necessárias para identificar dormentes danificados ou desgastados, que devem ser substituídos para evitar falhas na infraestrutura. Rosa (2016) descreve os diversos tipos de dormentes utilizados nas ferrovias, cada um com suas características específicas, materiais e aplicações distintas:

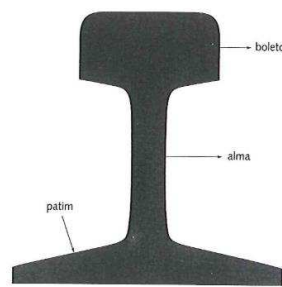
- Dormentes de Madeira: Leves, fáceis de instalar, mas com vida útil limitada e vulneráveis a intempéries e pragas.
- Dormentes de Concreto: Duráveis, suportam cargas pesadas, oferecem maior estabilidade e requerem menos manutenção.
- Dormentes de Aço: Usados em curvas acentuadas e áreas com altas cargas dinâmicas, duráveis, mas caros e difíceis de socar e nivelar.
- Dormentes de Plástico Reciclado: Alternativa sustentável, resistentes à degradação e com vida útil prolongada.

Rosa (2016) acrescenta que a introdução de dormentes de aço e concreto se deve à escassez de madeira, ao reflorestamento deficiente e ao uso de madeiras de boa qualidade para fins mais nobres e mais caros. Além disso, Rosa enfatiza que a questão ambiental é o fator mais impactante, a ponto de inviabilizar o uso de madeira em dormentes. Brina (1979) observa que dormentes de madeira podem apodrecer, enquanto dormentes de concreto ou aço podem apresentar falhas estruturais. Esses defeitos comprometem a estabilidade da via, podendo levar ao descarrilamento

2.3.6. Trilhos

Nabais Et. Al (2014) descreve os trilhos como um elemento da superestrutura que serve de superfície de rolamento para as rodas dos veículos ferroviários. Eles atuam como dispositivo de apoio e guia para as rodas, além de conduzir correntes elétricas em ferrovias com sinalização eletrificada. Os trilhos mais comuns são do tipo vignole, compostos por boleto, alma e patim.

Figura 7: Perfil Vignole



Fonte: Brina (1979)

Rosa (2016) descreve que o boieto dos trilhos deve ter a maior massa, pois é a seção que sofre mais desgaste devido ao contato direto com as rodas do material rodante. A alma, que liga o boieto ao patim, precisa ter altura suficiente para permitir a passagem das rodas, mas não deve ser excessivamente alta para não comprometer o equilíbrio do trilho. O patim, a parte mais larga do trilho, é fixado diretamente nos dormentes e deve ter largura suficiente para transmitir os esforços do trilho para os dormentes e proporcionar estabilidade.

Os trilhos podem ser classificados de acordo com dois critérios principais: comprimento e peso por metro. Em termos de comprimento, existem duas categorias. A primeira é o Trilho Padrão, que possui comprimentos específicos de 24,0 m, 18,0 m ou 12,0 m. A segunda é o Trilho Longo Soldado (TLS), que é o trilho padrão após passar por soldagem em estaleiros, podendo atingir comprimentos que ultrapassam 200,0 m (Rosa, 2016).

A classificação quanto ao peso por metro considera o peso em quilogramas por metro linear. Os tipos mais comuns incluem TR25, TR32, TR37, TR40, TR45, TR50, TR57 e TR68. Neste sistema, o número corresponde ao peso em quilos por metro linear (ROSA, 2016). No Brasil, os tipos mais comuns são o TR57 e o TR68, pois suportam altas cargas, que são frequentemente necessárias para o transporte de grãos e minérios (Castelo Branco, 2022).

Figura 8: Dimensões dos trilhos em função da ABNT

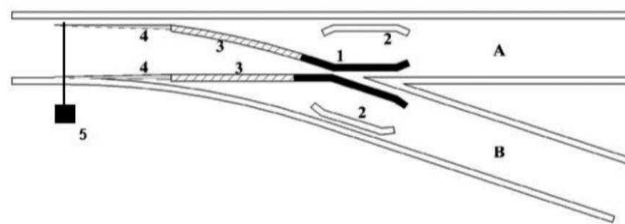
		Trilhos							
TIPO NOMINAL BRASILEIRO – TR		25	32	37	45	50	57	68	
<i>Tipo correspondente americano</i>		5040 ASCE	6540 ASCE	7540 ASCE	9020 ARA-A	10025 AREA	11525 AREA	13637 AREA	
Peso calculado, em kg/m		24,654	32,045	37,105	44,645	50,349	56,897	67,560	
Peso calculado, em lb/jardas		49,7	64,6	74,8	90,0	101,5	114,7	136,2	
Área calculada da seção (cm ²)	Boieto	área	13,23	17,16	19,87	20,58	24,51	25,22	
		% do total	42	42	42	36,2	38,2	34,8	
	Alma	área	6,58	8,58	9,94	13,68	14,52	19,68	
		% do total	21	21	21	24	22,6	27,1	
	Patim	área	11,61	15,10	17,48	22,64	25,16	27,68	
		% do total	37	37	37	39,8	39,2	38,1	
	ÁREA TOTAL		31,42	40,84	47,29	56,90	64,19	72,58	
Momento de inércia (cm ⁴)		413,7	703,4	951,5	1 610,8	2 039,5	2 730,5	3 950,0	
Módulo de resistência (cm ³)	Boieto	81,6	120,8	149,1	205,6	247,4	295,0	391,6	
	Patim	86,7	129,5	162,9	249,7	291,7	360,7	463,8	
Raio de giração (cm)		3,63	4,15	4,49	5,32	5,63	6,13	7,11	

Fonte: Rosa (2016)

2.3.7. Aparelhos de mudança de via (AMV)

Os aparelhos de mudança de via (AMV) são estruturas metálicas essenciais para a operação ferroviária, permitindo o desvio dos veículos de uma via para outra ou a união de duas vias. Esses aparelhos são compostos por diversos componentes padronizados pela ABNT NBR 7636/1990. Entre os componentes de um AMV temos as agulhas, os trilhos de ligação, os contratrilhos e o jacaré. A máquina de chave é responsável pela movimentação das agulhas, que são trilhos móveis que definem se terá desvio ou não, direcionando as rodas dos trens para a via desejada. Os trilhos de ligação conectam os diferentes componentes do AMV, enquanto os contratrilhos garantem a estabilidade dos veículos durante a mudança de via. O jacaré, por sua vez, é uma peça de reforço crucial para a segurança e funcionalidade do sistema (Rosa, 2016).

Figura 9: Desenho esquemático de um AMV



Fonte: Rosa (2016)

1. Jacaré;
2. Contratrilhos;
3. Trilhos de ligação;
4. Agulhas;
5. Máquina de chave.

Nos aparelhos de mudança de via (AMV), Mendes (2019) aponta que os desgastes excessivos e desalinhamentos são comuns devido ao uso constante e às condições ambientais adversas. Esses mecanismos complexos necessitam de manutenção regular para garantir seu funcionamento adequado.

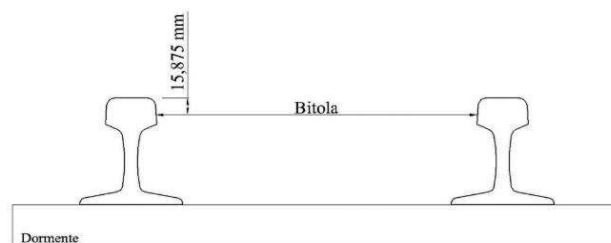
2.4. GEOMETRIA DA VIA PERMANENTE

Segundo Oliveira (2018), a ferrovia, composta pela superestrutura e infraestrutura, exige uma atenção meticulosa às suas geometrias para garantir um desempenho eficiente e seguro. É fundamental manter o traçado em planta, assim como os perfis longitudinal e transversal dentro das especificações projetadas. A manutenção da Via Permanente visa assegurar que a geometria da via atenda aos padrões de conforto e segurança, corrigindo as alterações e deformações causadas pelo tráfego.

2.4.1. Bitola

Rosa (2016) define bitola como a distância entre os trilhos, distância entre as faces internas dos trilhos, medida a 15,875 mm abaixo da face superior do boleto dos trilhos. Na EFC é utilizado a de medida de 16,0 mm, o valor padrão arredondado. Um dos pontos mais decisivos quando se trata de projeto ferroviário é a medida da bitola, crucial estabelecer parâmetros como velocidade, capacidade de transporte e tipo de material rodante. A falta de padronização de bitola é extremamente prejudicial, ocasionado em diversos atrasos na operação ferroviária.

Figura 10: - Desenho esquemático da bitola



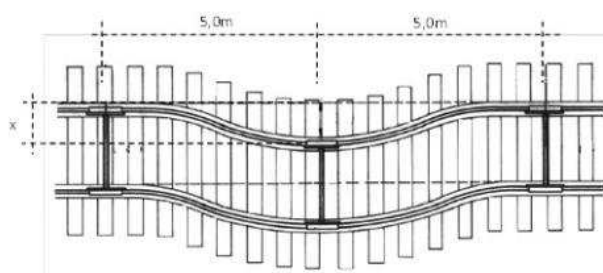
Fonte: Rosa (2016)

Tem-se quatro tipos principais de bitolas são eles: larga (1,60 m), Standart/normal (1,435 m), métrica (1,0 m) e estreita (1,0 m). Após 1960, todas as ferrovias brasileiras devem ser projetadas e construídas com bitola larga.

2.4.2. Alinhamento

Bilheri (2021) explica que o alinhamento dos trilhos é crucial para assegurar a continuidade dos elementos geométricos da via, evitando variações bruscas que podem causar descarrilamentos e desgaste prematuro. A medição do alinhamento é feita por meio das flechas, que devem obedecer a diferentes relações dependendo do tipo de curva: nas tangentes, a flecha deve ser zero; nas curvas de transição, a variação deve ser constante; e nas curvas circulares, a flecha deve ter um valor constante e diferente de zero. A discrepância entre as flechas medidas e as de projeto é conhecida como desalinhamento, e este deve ser comparado com os valores limite estabelecidos para a classe da via.

Figura 11: Desenho esquemático representando o desalinhamento



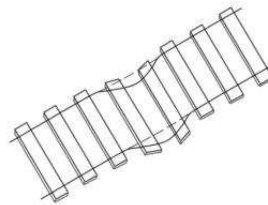
Fonte: Rosa (2016)

Na Figura 11 é o desenho esquemático de como ocorre a medição de alinhamento em uma tangente, sendo utilizado uma corda de 10,0 m de comprimento, o X será a flecha medida. A Vale adota em suas linhas férreas o limite de desalinhamento de cerca de 10,0 mm para início de manutenção e 11,0 mm para interrupção de linha para que seja realizado manutenção corretiva (Rosa, 2016).

2.4.3. Nivelamento Longitudinal e Transversal

O Nivelamento longitudinal refere-se à disposição das cotas dos trilhos ao longo da linha, e seu desnivelamento ocorre quando há pontos altos ou baixos simultâneos nos dois trilhos, formando uma bacia. Embora menos crítico que o empeno, esse desnivelamento pode causar desconforto e, se severo, levar a problemas graves como o desgaste de veículos e fracionamento de trens (Vale, 2009).

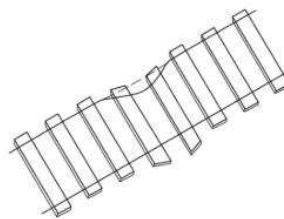
Figura 12: Desenho esquemático do desnivelamento longitudinal



Fonte: Rosa (2016)

O Nivelamento transversal diz respeito às cotas dos trilhos paralelos, medido perpendicularmente ao eixo da via. O desnivelamento transversal ocorre quando um trilho se desloca verticalmente em relação ao outro em um trecho reto, podendo surgir mesmo em vias aparentemente normais durante a operação de veículos (Vale, 2009).

Figura 13: Desenho esquemático do desnivelamento transversal



Fonte: Rosa (2016)

2.4.4. Curvas e Rampas

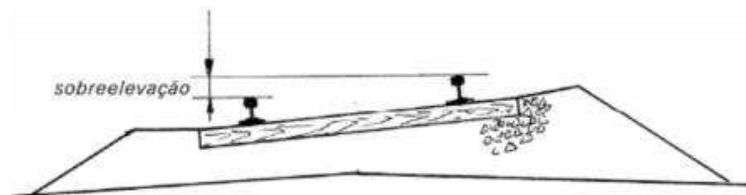
As curvas em ferrovias aumentam a resistência à tração e o desgaste dos trilhos e do material rodante, necessitando de redução de velocidade para evitar descarrilamentos e tombamentos. A superelevação, que inclina o trilho externo da curva em até 10% da bitola, ajuda a mitigar esses efeitos. Projetar curvas com raios maiores é crucial para reduzir o atrito e permitir a adequada inscrição dos truques dos veículos. (Rosa, 2016).

Rampas na via férrea, medidas em percentuais como 1,5%, são inevitáveis, embora o ideal seja uma via plana. Podem ser de simples aderência, usando areia ou locomotivas auxiliares, ou com cremalheira, que requer trilhos dentados e locomotivas com rodas dentadas. A construção de ferrovias planas e com mínimas curvas envolve cortes, aterros e obras especiais, aumentando os custos e a necessidade de investimentos em drenagem, o que impacta o custo total do projeto (Rosa, 2016).

2.4.5. Superelevação

Em vias férreas, a presença de curvas pode causar problemas na circulação dos trens, exigindo um estudo cuidadoso para garantir segurança e conforto. A força centrífuga gerada em trajetórias curvas pode deslocar o veículo em direção ao trilho externo, aumentando o atrito e, em casos extremos, levando ao tombamento. Para compensar essa força, a via é inclinada, elevando o trilho externo da curva. A maior altura do trilho externo em relação ao interno é o que se denomina superelevação do trilho ou superelevação da via. (Rossito, 2010).

Figura 14: Superelevação



Fonte: Fernave (2003)

Os critérios racionais para o cálculo de superelevação máxima são: Segurança contra tombamento ou estabilidade do veículo, e critério de conforto. Se tratando de limites de superelevação nas linhas férreas Brasileiras temos a recomendação da Vale (2009), *apud* Oliveira (2018):

Para as linhas de bitola métrica, a superelevação máxima não deve ultrapassar o valor de 100 mm, devido ao risco de desequilíbrio dos vagões caso haja necessidade de sua parada. Se por algum motivo isso venha a ocorrer o trecho deverá ser bloqueado até que seja feita a correção. Para linhas de bitola larga a superelevação não deve ultrapassar o valor de 160 mm. Caso isso ocorra o trecho deverá ser bloqueado até que seja feita a correção (VALE, 2009).

Para o cálculo de superelevação pode ser considerado dois tipos de critérios descritos da seguinte forma:

- Critério empírico: Um dos critérios utilizados é $V = \frac{2}{3} V_{máx}$, conforme adotado pelas ferrovias da Vale. Este critério visa garantir que a superelevação seja adequada tanto para trens pesados e carregados, quanto para trens leves e passageiros (Rosa, 2016).

- Critérios racionais: Critério de segurança contra tombamento que considera dois momentos em função da altura H do centro de gravidade do vagão em relação aos trilhos ($Mr = (F_c \cos(\alpha) - P \operatorname{sen}(\alpha)) H$) (Rosa, 2016).

2.5. MATERIAL RODANTE

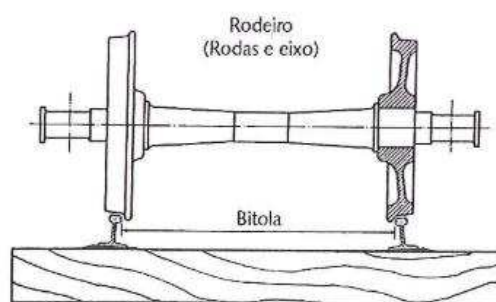
O material rodante, ou veículos ferroviários, é o conjunto de todos os equipamentos que se locomovem sobre a via permanente. Sendo classificados pela sua capacidade de tração podendo ser Material de tração: locomotivas, equipamentos de via e demais veículos motorizados; e Material rebocado: vagões passageiros e vagões de carga (Rosa, 2016).

2.5.1. Contato Roda-Trilho

O deslocamento do material rodante ocorre devido à aderência entre as rodas dos veículos e os trilhos, o que é essencial para o movimento seguro e eficiente dos trens. Na Estrada de Ferro Carajás, esta aderência desempenha um papel vital no transporte de minérios. A roda dos veículos ferroviários é solidária ao eixo que as une, eliminando o movimento relativo entre eles. Isso resulta em escorregamento nas curvas, com maior escorregamento no trilho externo em curvas de raio menor. O friso das rodas mantém o trem sobre os trilhos, evitando que ocorra deslocamento lateral que resulte em descarrilamento (Nabais *et. Al*, 2016).

As rodas, montadas em uma estrutura denominada truque, são sempre paralelas entre si e aos trilhos. O truque garante estabilidade e distribuição uniforme do peso do trem, contribuindo para uma operação segura e eficiente (Rosa, 2016).

Figura 15: Roda de aço sobre trilhos



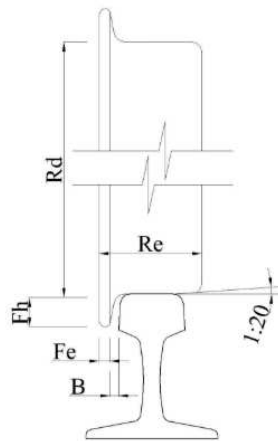
Fonte: Nabais *et. Al* (2014)

Os dois principais parâmetros para análise de manutenção das rodas das locomotivas são o friso e a bandagem. Segundo Rosa (2016), a roda possui um friso (F_e) com aproximadamente 2,93 cm de espessura e 2,54 cm de altura (F_h), localizado na parte interna do trilho. O contato efetivo entre roda e trilho ocorre na área do passeio da roda. Nas curvas, o friso toca o trilho externo, permitindo a curvatura, enquanto em trechos retos, mantém o trem

alinhado. O formato cônico da roda, com um ângulo de 1:20, é crucial para manter o trem nos trilhos através da gravidade e para permitir o movimento adequado nas curvas.

Rosa (2016) fala ainda que a folga B entre o friso da roda e o trilho, que varia de 1,0 cm a 2,0 cm, é necessária devido à impossibilidade de um alinhamento perfeito da via. Esta folga provoca o balanço dos trens durante a viagem, gerado pelos movimentos de "subida" e "descida" das rodas sobre os trilhos, e é conhecida como jogo da via. Nas ferrovias de alta velocidade, essa folga deve ser minimizada para garantir um alinhamento ótimo da via. O diâmetro da roda (Rd) varia entre 84,0 cm e 96,5 cm, dependendo da bitola e do peso dos veículos, enquanto a espessura da roda (Re) é de aproximadamente 14,0 cm.

Figura 16: Detalhe contato roda-trilho



Fonte: Rosa (2016)

A bandagem da roda, que é a espessura de aço que a compõe, define seu ciclo de vida útil (Rosa, 2016). Devido ao contato constante entre roda e trilho, a roda se desgasta progressivamente até atingir um limite aceitável de espessura. Ao atingir esse limite, a roda é descartada. No entanto, se a roda ainda puder ser utilizada, ela passa por um processo de usinagem e é reutilizada em novos ciclos de transporte/viagem.

Radniz et al. (2008) identifica as anomalias principais nas rodas ferroviárias. O friso fino, com uma medida mínima de 21 mm, raramente causa descarrilamento, mas é crucial para evitar quebras. O friso alto ou vertical, com altura acima de 32 mm, pode facilitar a subida da roda em trilhos desgastados. Calos surgem devido à deformação localizada na pista de rolamento quando a roda trava durante a frenagem, levando à transformação do aço em austenita. Cavas e rebarbas resultam da perda de conicidade do perfil da roda, indicando uma perda de qualidade de rolamento, com um limite de perda de 6,5 mm.

2.5.2. Rodeiro

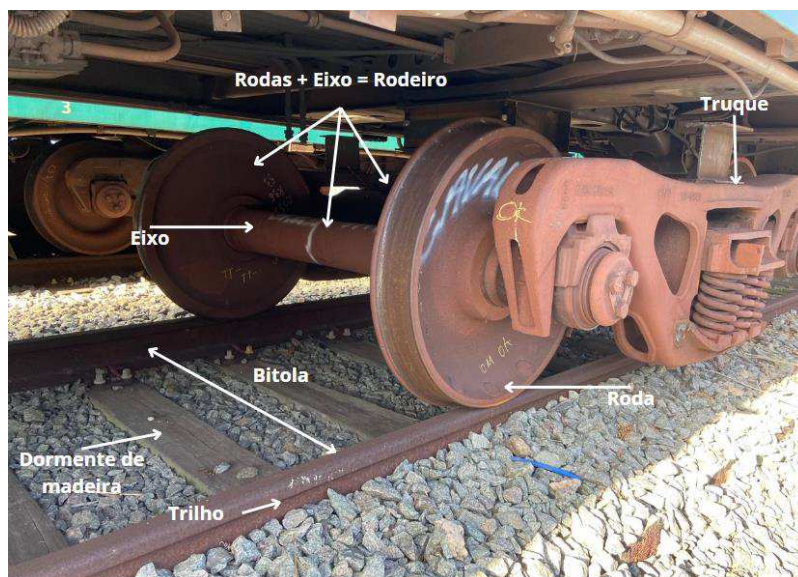
O rodeiro é um elemento mecânico que suporta a carga vertical dos veículos metroferroviários e tem a importante função de direcionar automaticamente o veículo nas curvas. É a união de um par de rodas, paralelas entre si, a um eixo. (LDSV, 2014)

2.5.3. Truque

O truque é uma estrutura rígida de aço que se apoia sobre no mínimo dois rodeiros. Embora diferentes projetos de truques sejam aplicados conforme os objetivos específicos, todos desempenham a mesma função fundamental: suportar a carroceria do veículo ferroviário, garantindo a estabilidade na pista e proporcionando conforto durante a viagem. Os conjuntos de rodas variam em arranjos e modelos dependendo da bitola ferroviária, do diâmetro da roda e da carga axial. (SKF, 2022)

Rosa (2016), "as locomotivas podem possuir dois, três e quatro rodeiros por truque. Usualmente, as locomotivas de bitola larga possuem três rodeiros por truque e, em alguns casos, na bitola métrica, usa-se quatro rodeiros por truque."

Figura 17: Componentes da Via permanente



Fonte: Adaptado Autor (2024)

3. MANUTENÇÃO FERROVIÁRIA

A manutenção é um conjunto de procedimentos técnicos e administrativos destinados a garantir o bom funcionamento de um item, ou a restaurar para um estado que permita o desempenho adequado das suas funções. (ABNT NBR 5462, 1994).

Tabela 3: Manutenção x operação

Característica	Manutenção	Operação
Objetivo principal	Manter ou restaurar a condição do equipamento	Utilizar o equipamento para gerar valor
Tempo	Pode ser programada ou emergencial	Contínua, enquanto o equipamento está em uso
Enfoque	Corrigir falhas e prevenir futuras falhas	Maximizar a eficiência e produtividade

Fonte: Adaptado ABNT, 1994

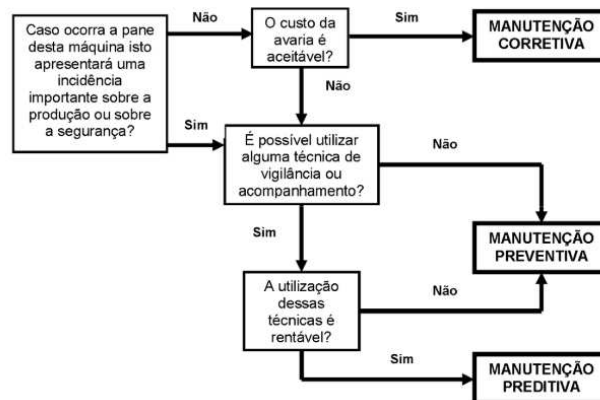
O processo da manutenção ferroviária envolve a inspeção, reparo e substituição de componentes desgastados ou danificados da infraestrutura ferroviária, que inclui trilhos, dormentes, lastro e sistemas de fixação. Sendo vital para evitar acidentes e interrupções no serviço. Quando a manutenção não é realizada adequadamente, a via férrea se desgasta mais rapidamente, resultando em falhas que podem causar descarrilamentos e outros incidentes graves. Além de ameaçar a segurança, essas falhas podem gerar custos elevados para as companhias ferroviárias devido aos danos em vagões e locomotivas, bem como prejuízos decorrentes de atrasos no transporte de mercadorias (Brina, 1979). A ABNT NBR 5462/1994 classifica a manutenção ferroviária em 5 tipos:

- **Manutenção corretiva:** Realizada após a ocorrência de uma falha, término da sua capacidade de desempenhar a função requerida, sendo a menos desejável devido ao seu caráter emergencial e aos altos custos associados;
- **Manutenção preventiva:** Planejada com antecedência para corrigir problemas antes que eles ocorram, aumentando a eficiência e reduzindo os custos a longo prazo;
- **Manutenção controlada/preditiva:** Utiliza monitoramento contínuo e dados de desempenho para prever e prevenir falhas antes mesmo que ocorram;
- **Manutenção programada:** Preditiva efetuada por meio de um plano preestabelecido;
- **Manutenção não programada:** Manutenção que é realizada com base em informações recebidas sobre o estado de um item, sem plano preestabelecido.

Oliveira (2018) afirma que a manutenção das ferrovias se assemelha à "Manutenção Preditiva", pois exige vistorias contínuas devido ao desgaste causado pela passagem frequente de trens, intempéries e crescimento de vegetação, tornando necessária a inspeção periódica do

sistema. Swanson (2001, apud Baria, 2015) explica que a manutenção preventiva é tradicionalmente baseada no tempo, enquanto a manutenção preditiva é usada para monitorar o estado do equipamento, permitindo a execução de manutenção somente quando necessário, o que resulta em intervalos de manutenção mais longos e custos reduzidos. Mirshawka (1991) sugere um organograma para determinar a abordagem mais adequada de manutenção para um sistema específico, fundamentado na relevância de cada questão que ele apresenta.

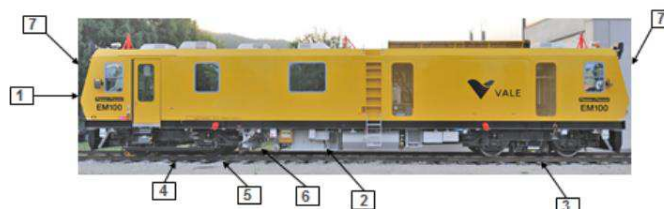
Figura 18: Método de escolha de manutenção



Fonte: Mirshawka (1991) apud Oliveira (2018)

O uso de tecnologias avançadas, como o carro controle, é crucial para a eficácia da manutenção ferroviária. Este veículo de avaliação da via (TEV) permite uma análise detalhada dos parâmetros geométricos e das condições da via, incluindo a medição de bitola, torção, empeno e desgaste dos trilhos. A coleta precisa desses dados possibilita a identificação precoce de problemas e a programação de intervenções de manutenção de forma mais eficaz, minimizando interrupções no serviço e prolongando a vida útil da infraestrutura ferroviária (Seraco, 2019).

Figura 19: Carro controle da EFC e sistemas de medição



1. Tunellaser - Leitor de Gabarito da via
2. Acelerômetros - Leitor de aceleração vertical e horizontal
3. KLD - Leitor de perfil do trilho e bitola
4. OGMS - Leitor de bitola em 2 pontos
5. IMU - Unidade de medição inercial – leitor de geometria
6. RailCheck - Imagens dos trilhos, dormentes e fixações
7. RailScan – Imagens panorâmicas da via

Fonte: Amaral et. Al (2016)

Um outro exemplo de tecnologia utilizada é o carro ultrassom tem como função a inspeção para detectar descontinuidades no trilho. As informações coletadas são repassadas para a equipe de manutenção da via, permitindo programar com antecedência a retirada dos trilhos com defeitos, como trincas, porosidades, entre outros (Rosa, 2016).

Figura 20: Carro Ultrassom



Fonte: Máquinas equipamentos (2022)

O setor de Planejamento e Controle de Manutenção (PCM) é responsável por desenvolver planos de manutenção preventiva e corretiva, definir cronogramas para minimizar o impacto nas operações ferroviárias e garantir a disponibilidade dos ativos. Além disso, o PCM monitora indicadores-chave de desempenho (KPIs) para avaliar a eficácia das atividades de manutenção e identificar áreas de melhoria (Korp, 2024). Segundo Nabais et al. (2014), os indicadores que abrangem diversas áreas que necessitam de monitoramento incluem: desempenho de cada equipamento, cumprimento dos programas de manutenção, falhas de equipamentos, componentes e peças, e custos operacionais.

A manutenção ferroviária também desempenha um papel importante na sustentabilidade e na eficiência energética do transporte. Ferrovias bem mantidas proporcionam uma operação mais suave e eficiente, reduzindo o consumo de combustível e as emissões de gases poluentes. Além disso, a longevidade das vias férreas evita a necessidade de frequentes substituições de componentes, contribuindo para a conservação de recursos naturais e a redução de resíduos (Fernandes, 2005).

Segundo Vale (2009), a manutenção dos equipamentos ferroviários representa um valioso ativo econômico. Obras de arte são cruciais para a integridade da via e a continuidade do tráfego. Falhas nas estruturas podem causar grandes prejuízos econômicos para a empresa e altos custos com reforços ou substituição. Portanto, realizar inspeções periódicas nas estruturas é essencial para mantê-las em bom estado e minimizar riscos de avarias graves que possam restringir o tráfego.

As inspeções são atividades técnicas que precisam de um pessoal capacitado com experiência no labor, que abrange a coleta de elementos, de projeto e de construção, o exame minucioso, elaboração de relatórios, a avaliação do estado da obra e as recomendações, que pode ser nova vistoria, de obras de manutenção, de obras de recuperação, de reforço ou de reabilitação (VALE, 2009).

O Método de inspeção descrito pela vale (2009) segue da seguinte forma: cadastramento dos equipamentos de infraestrutura, registro de todas as suas características específicas conforme o PGS – 0011 – GEDFT; Inspeção visual-sensitiva, qualitativa e rápida, oferece uma visão preliminar dos equipamentos, ajudando a priorizar com base em um modelo de análise de risco; Inspeção detalhada, quantitativa, foca na contagem de anomalias para coletar dados necessários para intervenções e monitoramento, devem ser realizadas quando a inspeção visual identificar a existência de defeitos graves na estrutura, em pontes complexas ou em situações especiais como acidentes ferroviários.

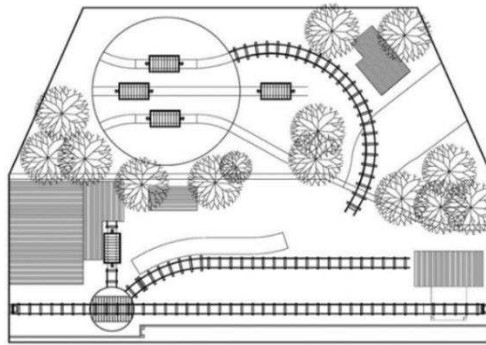
Em resumo, a manutenção ferroviária é essencial para garantir a segurança, a eficiência e a sustentabilidade do transporte ferroviário. Através de inspeções regulares, reparos preventivos e o uso de tecnologias avançadas, é possível manter a infraestrutura ferroviária em condições ideais, proporcionando um transporte confiável e economicamente viável. Investir na manutenção adequada das ferrovias é investir no desenvolvimento econômico e na qualidade do transporte, beneficiando a sociedade como um todo.

4. TERMINAIS

Terminais ferroviários são pontos de acessibilidade ao sistema ferroviário onde trens são compostos, manobrados, carregados, descarregados, revisados ou parados por razões operacionais, como cruzamentos entre trens de sentidos opostos. Eles podem ser dedicados tanto a cargas quanto a passageiros, embora a dupla utilização seja menos comum atualmente (Ruiz-Padilo et. Al, 2020).

Os pátios ferroviários são áreas amplas com trilhos usadas para estacionar, manobrar, abastecer trens e oficina para material rodante em geral. Pode ser definido como pátio de Manobra, pátio de manutenção, pátio de Interação, pátio de Triagem e terminais Ferroviário (MRC, 2024).

Figura 21: Pátio ferroviário



Fonte: Stephen Brown [s.d]

Estações ferroviárias são locais focados na administração e documentação da ferrovia, incluindo edifícios com administração, escritórios, salas de espera e pátios com trilhos e equipamentos necessários para o funcionamento da ferrovia (Brasil ferroviário, 2022).

Figura 22: Estação ferroviária de São Luís -MA



Fonte: Google Earth, 2024

5. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste estudo, tornou-se necessário delinear um percurso metodológico claro, que englobasse tanto uma análise quantitativa quanto qualitativa, utilizando estudos de caso específicos como base. De acordo com Minayo (2009), "é a pesquisa que alimenta a realidade dos estudos e a atualiza frente à realidade do mundo (...) nada pode ser intelectualmente um problema se não tiver sido, em primeiro lugar, um problema da vida prática".

Neste contexto, este trabalho analisou os descarrilamentos ocorridos na Estrada de Ferro Carajás (EFC) entre 2018 e 2023. A abordagem adotada foi dedutiva, fundamentada em uma revisão bibliográfica abrangente, orientada pela aplicação de conceitos teóricos extraídos de autores como Marconi e Lakatos (2010). A revisão bibliográfica incluiu livros, dissertações, artigos, manuais e outras fontes relevantes, consolidando um embasamento teórico robusto e multidisciplinar.

Conforme defendido por Triviños (1987), a escolha de uma metodologia que combina estudos de caso e revisão bibliográfica permite uma análise específica e profunda do fenômeno estudado. Para isso, a coleta de dados seguiu um roteiro preestabelecido que utilizou registros da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Estes documentos detalharam o quantitativo de eventos ferroviários ocorridos nos últimos cinco anos e foram analisados em conjunto com estudos acadêmicos sobre descarrilamentos ferroviários, conforme sugerido por Yin (2015) em sua obra sobre pesquisa de estudo de caso.

Além da análise quantitativa, que seguiu as diretrizes de técnicas estatísticas aplicadas por autores como Creswell (2010), foi aplicada uma análise qualitativa para contextualizar os achados quantitativos, fornecendo uma interpretação mais abrangente dos fatores contribuintes. Para uma priorização mais eficaz das causas dos descarrilamentos, foi utilizada a Matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência), ferramenta que permite classificar e ordenar problemas de acordo com sua criticidade. A Matriz GUT foi integrada ao processo de análise para hierarquizar os fatores de risco identificados, facilitando a formulação de estratégias de mitigação mais direcionadas e eficazes. Este método é amplamente recomendado por autores como Campos (1992), que destaca sua utilidade na gestão de problemas complexos. A Matriz GUT utiliza os seguintes critérios:

Tabela 4: Critérios GUT

Variável	Conceito
Gravidade - G	Mede o impacto de um problema ou demanda nos demais processos de negócio. Considera o quanto o problema afeta o funcionamento e os resultados da organização. Pontuação varia de 1 (baixo impacto) a 5 (alto impacto).
Urgência - U	Avalia a necessidade de resolução imediata do problema. Pergunta-se se o problema pode esperar ou se precisa de ação rápida. Pontuação varia de 1 (pode esperar) a 5 (precisa de ação imediata).
Tendência - T	Avalia a probabilidade e a velocidade com que o problema tende a piorar se não for resolvido prontamente. Considera se a piora será brusca ou gradual. Pontuação varia de 1 (tendência lenta) a 5 (tendência rápida).

Fonte: sydle (2024)

A pesquisa, portanto, buscou contribuir para um melhor entendimento das causas dos descarrilamentos na EFC e para a elaboração de estratégias eficazes de mitigação de riscos, oferecendo subsídios para a melhoria contínua da segurança ferroviária. A metodologia adotada, ao integrar referências de autores reconhecidos, métodos de análise rigorosos e a aplicação da Matriz GUT, garante a robustez e a relevância dos resultados obtidos, alinhando-se às melhores práticas de pesquisa na área de estudos ferroviários.

6. RESULTADOS

Na década de 1960, após extensas pesquisas geológicas em Carajás (PA), a Companhia Vale do Rio Doce (VALE) iniciou conversações com a U.S. Steel para estabelecer uma parceria. Isso resultou, em abril de 1970, na criação da Amazônia Mineração S.A. (AMZA), uma sociedade entre as duas empresas para operar o Projeto Ferro Carajás. Em 1974, os estudos de viabilidade foram concluídos e os projetos de engenharia começaram. Dois anos depois, o governo federal concedeu a autorização para a construção e operação da linha férrea entre a Serra de Carajás (PA) e a Ponta da Madeira (MA). Em 1981, a Vale adquiriu exclusividade na exploração do minério de ferro, ouro e manganês em Carajás (VALE, 2020).

Inaugurada em 1985 para atender à crescente demanda de transporte de minério de ferro na região de Carajás, no Pará, a Estrada de Ferro Carajás (EFC) tinha uma capacidade inicial de 30 milhões de toneladas por ano (VALE, 2020). Construída em bitola larga, ela possui cerca de 970 km de extensão, com a maior parte duplicada, conectando o Porto do Itaqui, no Maranhão, às províncias minerais da Serra dos Carajás. Além de transportar minério de ferro, combustível e soja, a EFC também atende mais de 320 mil passageiros por ano, com três trens semanais na rota entre São Luís (MA) e Parauapebas (PA) (VALE, 2020).

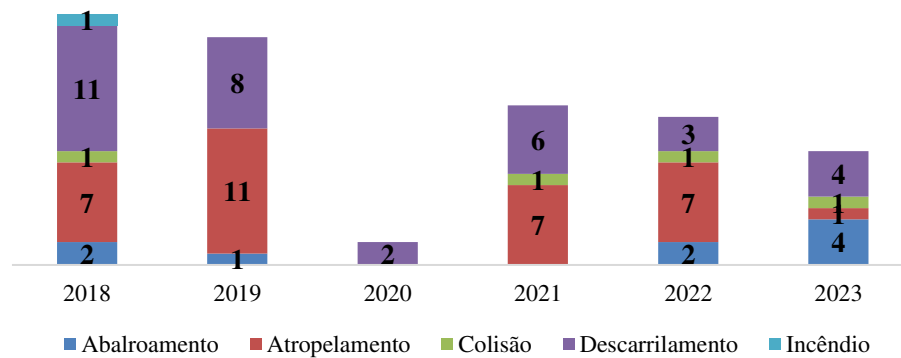
Figura 23: Extensão da Estrada Ferro Carajás



Fonte: CIM (2022)

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) categorizou, em 2021, a EFC como a segunda ferrovia mais segura do Brasil, com o índice de 1,59. Segunda a ANTT, quanto menor o índice, maior é a segurança da ferrovia. Em 2020 quando recebeu o título de Ferrovia de maior segurança do Brasil, com o índice de 1,73, o gerente-executivo da época, João Falcão, afirmou que o resultado positivo obtido é resultado dos investimentos contínuos em tecnologia, manutenção preventiva e engajamento com as comunidades, beneficiando diretamente os usuários do trem de passageiros da EFC (VALE, 2020).

Gráfico 4: Categoria de acidentes na EFC de 2018 a 2023



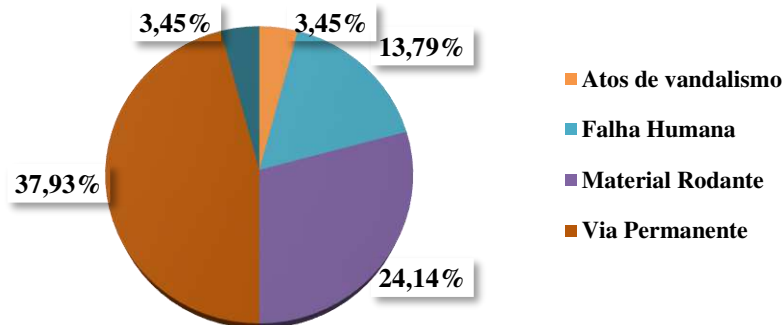
2023: Considerando os acidentes até julho/23*.

Fonte: Adaptado ANTT (2023)

Apesar dos avanços tecnológicos e das medidas de segurança implementadas, os descarrilamentos emergem como uma preocupação séria no setor ferroviário, um desafio significativo para garantir a segurança dos passageiros e a integridade do transporte de cargas. Segundo Simon Iwnicky (apud HONG, 2011) descarrilamento é o incidente em que a roda perde a sustentação fornecida pelo trilho. Esse fenômeno pode ser dividido em dois tipos: internos, quando a roda se move para dentro da região determinada pelos trilhos, e externos, quando a roda se move para fora dessa região. Além disso, o descarrilamento pode ser classificado de acordo com o impacto, podendo ocorrer em apenas um rodéiro, truque ou atingir o vagão inteiro.

De acordo com Almeida et al. (2022), ao compreender as características geométricas da via e as condições do material rodante, é possível analisar como cada um desses fatores pode ter contribuído para o descarrilamento, identificar o ponto de origem do descarrilamento (POD) e entender o mecanismo por trás do acidente. Essa análise permite identificar as condições que favoreceram o incidente e ajuda a esclarecer como o acidente ocorreu.

Gráfico 5: Causas de descarrilamento na EFC



2023: Considerando os acidentes até julho/23*.

Fonte: Adaptado ANTT (2023)

Para a análise dos tipos de acidentes ferroviários ocorridos entre 2018 e 2023 e suas causas, será utilizada a base de dados da ANTT. O uso de bancos de dados requer cautela, pois os registros podem ser imprecisos ou feitos por pessoas inexperientes. Além disso, os componentes causadores de descarrilamentos podem ser destruídos durante o acidente (Hong, 2011).

Com base na análise das causas dos descarrilamentos, que incluem principalmente defeitos na geometria da via, descumprimento de normas operacionais, defeitos nas rodas, defeitos nos eixos e mancais, e inspeções inadequadas, é possível classificar essas manifestações patológicas por ordem de prioridade. Essa classificação foi realizada utilizando a ferramenta Matriz GUT, que auxiliou na construção da tabela de priorização.

Tabela 5: Pontuações da Matriz GUT

Pontuação	Gravidade (G)	Urgência (U)	Tendência (T)
1	Sem gravidade	Pode esperar	Não irá mudar
2	Pouco grave	Pouco urgente	Piora a longo prazo
3	Grave	Urgente a curto prazo	Piora a médio prazo
4	Muito grave	Muito urgente	Piora a curto prazo
5	Extremamente grave	Necessária a ação imediata	Piora imediatamente

Fonte: Autor, 2024

Tabela 6: Identificação da prioridade das manifestações patológicas encontradas

Causa	Gravidade (G)	Urgência (U)	Tendência (T)	G x U x T	Prioridade
Via permanente	5	5	4	100	1
Falha Humana	4	5	3	60	3
Material Rodante	5	5	4	100	1
Atos de Vandalismo	3	4	3	36	4
Sinalização, telecomunicação e eletrotécnica	4	5	4	80	2

Fonte: Autor, 2024

Após a realização da análise com a matriz GUT, o próximo passo é abordar essas causas apontadas como mais relevantes. A partir dessa análise aprofundada, será possível desenvolver uma compreensão mais clara dos mecanismos que levam aos descarrilamentos e, conseqüentemente, propor soluções eficazes para mitigá-los.

A importância dessa análise detalhada reside em sua capacidade de fornecer informações valiosas sobre as áreas críticas que precisam de intervenção. Ao entender melhor as causas subjacentes dos descarrilamentos, será possível priorizar ações de manutenção, direcionando recursos e atenção para áreas de maior risco, assegurando intervenções eficientes; desenvolver soluções específicas criando estratégias personalizadas para cada problema, aumentando a eficácia das correções; e melhorar a segurança operacional, reduzir

descarrilamentos e incidentes, proporcionando um ambiente mais seguro, buscando garantir a saúde dos contribuidores e dos componentes ferroviários.

6.1. Causas críticas de descarrilamentos

Contudo, mesmo que esse trabalho não vá se aprofundar nas falhas humanas, conforme Amaral (2016), o sucesso da manutenção ferroviária não depende apenas de máquinas modernas e equipamentos de inspeção, mas principalmente da experiência dos profissionais da companhia e da aplicação desse conhecimento. A compreensão do comportamento da via ferroviária vem da experiência prática, pois modelos matemáticos muitas vezes não conseguem prever adequadamente a resposta da via. Na EFC, a estratégia adotada pela Vale foi transformar o conhecimento dos profissionais experientes em informações para a tomada de decisão, utilizando os dados coletados com o Carro Controle e o Carro Ultrassom, que só se tornam úteis quando combinados com a experiência prática.

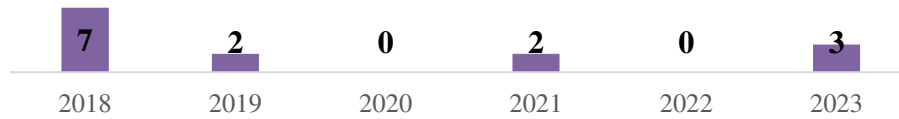
Nesse contexto, é válida a revisão e reforço das normas operacionais, juntamente com programas de treinamento contínuo para os operadores. É essencial a implementação de planos de treinamento periódicos, onde os empregados devem refazer os treinamentos a cada alguns meses e atualizar-se imediatamente em caso de mudanças nas normas. Esses planos de treinamento devem ser estruturados de forma a não afetar as demandas de trabalho dos empregados, garantindo que a capacitação contínua não comprometa a eficiência operacional.

Além disso, é essencial o aprimoramento dos procedimentos de inspeção, aumentando a frequência das inspeções e otimizando os métodos já existentes de detecção precoce de defeitos. Essas ações combinam a experiência prática com o uso avançado das tecnologias de monitoramento, potencializando a eficácia das manutenções e aumentando a segurança da operação ferroviária.

6.1.1. Defeitos de Via permanente

A integridade e a segurança das operações ferroviárias dependem da manutenção rigorosa da geometria da via férrea, que inclui a bitola, o nivelamento, a inclinação e o alinhamento dos trilhos. Defeitos nesses parâmetros representam sérias ameaças à estabilidade e segurança das operações. A detecção precoce e a correção eficiente são cruciais para manter a via dentro dos limites projetados (Brina, 1979). O gráfico a seguir apresenta a quantidade de defeitos de geometria de via causadores de descarrilamento registrados na Estrada de Ferro Carajás entre 2018 e 2023.

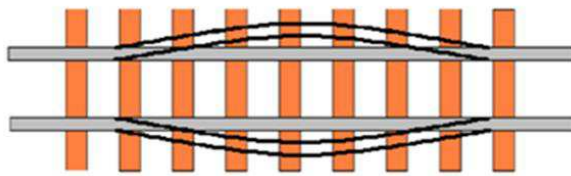
Gráfico 6: Quantidade de defeitos geometria de via de 2018 a 2023 na EFC



Fonte: Adaptado ANTT (2024)

Conforme Lima (1998), a variação de bitola ocorre quando as medidas ultrapassam os valores permitidos, comprometendo o alinhamento e a segurança da via. O alargamento de bitola, causado por dormentes de baixa qualidade, placas de apoio desgastadas, laterais dos trilhos desgastadas ou juntas quebradas, excede o limite máximo admissível.

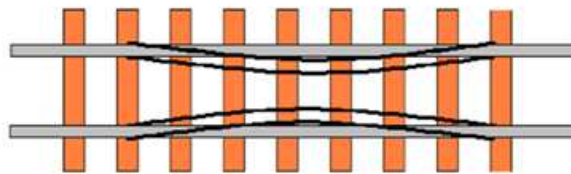
Figura 24: Alargamento, bitola aberta



Fonte: Ildefonso, 2013

Já o estreitamento de bitola, causado por deformações nos trilhos, dormentes defeituosos ou placas de apoio quebradas, fica abaixo do limite mínimo admissível.

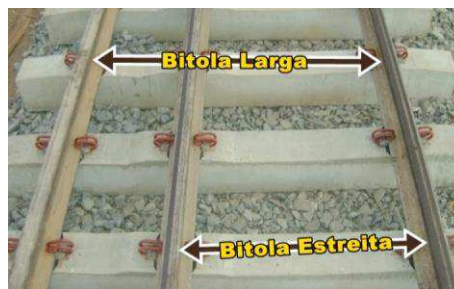
Figura 25: Estreitamento, bitola fechada



Fonte: Ildefonso, 2013

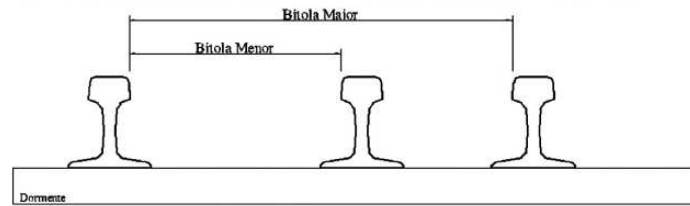
A Adoção de vias com bitolas mistas entra como uma forma de minimizar o problema, por possuir três linhas onde um deles é comum às duas bitolas, e os outros que definem o valor da bitola.

Figura 26: Estreitamento, bitola mista



Fonte: Planeta Ferrovia, [s.d].

Figura 27: Desenho esquemático de uma ferrovia com bitola mista



Fonte: Rosa, 2016.

De acordo com Khouy (2013), a operação ferroviária constante expõe a via permanente a uma série de esforços e impactos ambientais que podem causar alterações nos parâmetros geométricos originais. Para manter a integridade da via, é necessário que a administração desenvolva estratégias para garantir que esses defeitos não ultrapassem limites críticos de tolerância.

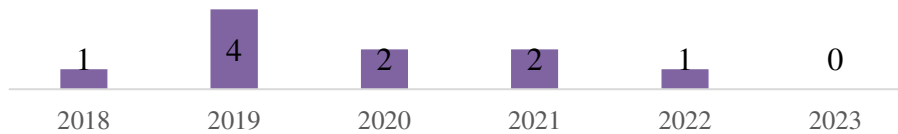
O Erro de nivelamento transversal, por sua vez, ocorre quando há uma inclinação inadequada dos trilhos, o que pode causar um aumento no ângulo de ataque da roda contra o trilho externo. O nivelamento transversal inadequado pode causar uma distribuição desigual das cargas, resultando em desgaste acelerado dos componentes da via e potencialmente levando a acidentes graves como o descarrilamento (Rosa, 2016).

Conforme observado por Oliveira (2018), a variação da bitola e os defeitos de nivelamento e alinhamento comprometem a estabilidade e segurança do transporte ferroviário. É essencial manter a bitola dentro dos limites seguros para evitar descarrilamentos, enquanto a compactação inadequada do sublastro e lastro pode resultar em uma superfície irregular dos trilhos.

6.1.2. Defeitos de Material rodante

Os defeitos de rodas em ferrovias, como desgaste de perfil e deslocamento de material, são exemplos de defeitos de material rodante que comprometem a segurança e a eficiência das operações. Causados por desgaste natural, manutenção inadequada e condições adversas, esses defeitos aumentam o risco de descarrilamentos e aceleram o desgaste da via (Rosa, 2016). O gráfico a seguir apresenta a quantidade de defeitos de rodas causadores de descarrilamento registrados na Estrada de Ferro Carajás entre 2018 e 2023.

Gráfico 7: Defeitos de material rodante de 2018 a 2023 na EFC



Fonte: Adaptado ANTT (2024)

Um exemplo é o defeito de rodas com medidas incorretas, que comprometem a interação adequada com os trilhos, levando a um aumento do risco de descarrilamento, especialmente em situações de manobra e baixas velocidades. Como comentado no item 2.5.1 (pág. 20) os dois principais parâmetros para análise de manutenção das rodas das locomotivas são o friso e a bandagem.

Figura 28 e 29: Detalhes da Roda



Fonte: Autor, 2023

Figura 30: Superfície de rolamento



Fonte: Autor, 2023

As rodas passam pelo processo de usinagem que é essencial para a manutenção e fabricação de material rodante. O processo inclui corte, moldagem e acabamento das rodas para restaurar ou criar o perfil adequado, assegurando uma interação perfeita com os trilhos. Vale (2023), os resultados esperados do processo são os rodeiros com o padrão de qualidade e especificações pré-determinadas, como:

- Ausência de ressaltos/defeitos no passeio;
- Espessura do friso de rodeiros entre 29 e 32 mm para rodeiros de classe E, F e G;
- Espessura de 27 mm para rodeiros de classe F e G = 230 (Rodeiros fim de vida);

- Espessura do friso de rodeiros de passageiros 32 (mm). (Friso 29 mm para salvar Roda);
- Medida de bandagem das rodas 6 ½ x 12"/7x12" \geq 22 [mm];
- Medida de bandagem das rodas 6 x 11" \geq 25 [mm];
- Medida de bandagem das rodas de passageiros \geq 25 [mm];
- Medida de bandagem das rodas de locomotiva \geq 25 (mm);
- Diferença de friso entre as rodas \leq 1 (mm);
- Testemunha \leq 1,2 [mm] de profundidade.

Outro exemplo de defeito de material rodante é a presença de fissuras ou trincas nas rodas. Essas fissuras podem se desenvolver devido a tensões repetidas e cargas excessivas, especialmente em ambientes com condições adversas. Se não forem detectadas e corrigidas a tempo, essas trincas podem levar a falhas catastróficas da roda, aumentando significativamente o risco de descarrilamentos e comprometendo a segurança e a eficiência das operações ferroviárias (Rosa, 2016).

Figura 31 e 32: Rodeiros



Fonte: Autor, 2024

A inspeção de rodeiros de trens por ultrassom é uma técnica não destrutiva crucial para detectar fissuras e trincas na superfície das rodas, sendo amplamente utilizada na manutenção ferroviária pela sua precisão em identificar defeitos internos invisíveis a olho nu. Esse método permite com o uso do transdutor ultrassônico a detecção precoce de falhas e o monitoramento do desgaste, garantindo a manutenção oportuna, antes que os componentes atinjam o fim de sua vida útil e possam causar falhas inesperadas (CBFA, [s.d]).

Figura 33: Rodeiro posicionado para Ultrassom



Fonte: Autor, 2024

Antes de realizar a inspeção por ultrassom, é fundamental preparar a superfície dos componentes, como eixos e rodas, removendo qualquer tipo de contaminante que possa interferir na transmissão das ondas sonoras. O transdutor ultrassônico, com auxílio de um gel acoplante, é então posicionado diretamente sobre o material, facilitando a propagação das ondas. Ao penetrar na estrutura, essas ondas refletem de volta ao encontrar defeitos internos, retornando ao transdutor para análise (Graham, 2017).

Os ecos gerados pelas ondas ultrassônicas são processados e transformados em sinais elétricos exibidos em um monitor, onde o técnico pode interpretar os dados e determinar a localização e a gravidade das falhas. O registro dos resultados permite o monitoramento contínuo das condições das rodas e eixos, promovendo uma manutenção preventiva mais eficiente. Esse processo contribui significativamente para a segurança e confiabilidade das operações ferroviárias, reduzindo o risco de falhas inesperadas e otimizando os recursos de manutenção (CBFA, [s.d]).

Defeitos como os citados exigem atenção e ações corretivas imediatas para evitar a ocorrência e recorrência de incidentes e o possível agravamento das condições dos materiais rodantes.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos descarrilamentos na Estrada de Ferro Carajás (EFC) revela a complexidade envolvida na manutenção e operação de uma via férrea que desempenha um papel crucial na economia nacional. Através de uma revisão bibliográfica abrangente e análise de dados, foi possível identificar as principais causas desses incidentes e sugerir práticas para mitigá-los. A geometria da via, a qualidade dos componentes e as práticas operacionais emergem como fatores críticos que, quando não adequadamente geridos, contribuem para a ocorrência de descarrilamentos.

Os estudos de caso analisados destacam a importância de um programa de manutenção rigoroso e contínuo. Eventos específicos, como variações na bitola e defeitos nos frisos das rodas, ilustram como falhas aparentemente pequenas podem levar a consequências graves. A experiência prática dos profissionais, combinada com dados técnicos precisos, tem sido crucial para a identificação e resolução desses problemas, reforçando a importância da capacitação contínua e do uso de tecnologias avançadas na manutenção ferroviária.

A aplicação da Matriz GUT permitiu priorizar as ações de manutenção de acordo com a gravidade, urgência e tendência dos problemas identificados. Esse método não apenas orienta a alocação eficiente de recursos, mas também assegura que os problemas mais críticos sejam tratados com a devida prioridade, minimizando o risco de descarrilamentos futuros.

Por fim, a importância estratégica da Estrada de Ferro Carajás para a economia nacional não pode ser subestimada. Garantir sua operação segura e eficiente é vital para o escoamento de minerais e outras commodities, impactando diretamente a competitividade das exportações brasileiras. Investir em manutenção e tecnologia não é apenas uma questão de segurança, mas também de assegurar o desenvolvimento econômico sustentável do país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTT (2020) **Histórico Das Ferrovias**. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/historico-das-ferrovias>>. Acessado em 20 de dezembro de 2023.
- ROSA, Rodrigo de Alvarenga; RIBEIRO, Rômulo Castello. **ESTRADAS DE FERRO: Projeto, Especificação e construção**. 1. ed. Brasil: EDUFES, 2016. 352 p. v. 1.
- RODRIGUEZ, Helio Suêvo. **A formação das estradas de ferro no Rio de Janeiro: O resgate da sua memória**. Rio de Janeiro: Memória do trem, 2004.
- SOUZA, Carolline Braga. **Ferrovias brasileiras: Conheça os fatos históricos mais curiosos**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://portogente.com.br/portopedia/109992-ferrovias-brasileiras-conheca-fatos-historicos-curiosos>. Acesso em: 12 jan. 2024.
- PREFEITURA DE PARAUEBAS. **Conhecendo nossa história, um século de muitas histórias e conquistas**. [S. l.], 20---. Disponível em: <https://parauapebas.pa.gov.br/turismo/historia-da-cidade/>. Acesso em: 20 dez. 2023.
- WILLIAM, HONG. **Aplicação do método de análise de risco ao estado de descarrilamento**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2011. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-20072011094405/publico/Dissertacao_William_Hong.pdf. Acesso em: 21 dez. 2023.
- AS FERROVIAS NA REPÚBLICA** República. [S. l.], 20---. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/610>. Acesso em: 8 jan. 2024.
- VALE. **Estrada de Ferro Carajás é classificada como ferrovia mais segura do Brasil**. 2020. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/estrada-de-ferro-caraj%C3%A1s-%C3%A9-classificada-como-ferrovia-mais-segura-do-brasil#:~:text=Saiba%20mais%20sobre%20a%20Estrada,575%20km%20de%20via%20dupli cada>. Acesso em: 19 dez. 2023.
- Carvalho, D. N. (2019). **O papel das ferrovias no crescimento econômico do Brasil**. Monografia (Curso de Ciências Econômicas). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Acesso em: 8 jan. 2024.
- HISTÓRIA DAS FERROVIAS NO BRASIL**. [S. l.], 20---. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/609>. Acesso em: 8 jan. 2024.

CRESWELL, J. W. Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MINAYO, M. C. S. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. 12. ed. São Paulo: Hucitec, 2009.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

OLIVEIRA, Júlio César. **ESTRUTURA DE VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA E SUAS PATOLOGIAS**. Monografia (Curso de Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUI, Ijuí/RS, 2018. Acesso em: 20 de Fev. 2024.

VALE. **Manual Técnico da Via Permanente**. Revisão 2009. Acesso em: 20 de Fev. 2024.

CASTELO BRANCO, Ítalo Roberto Marques. **Estudo de solos finos aplicados ao pavimento ferroviário utilizando o software systrain**. Monografia (Curso de Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís/MA, 2022. Acesso em: 20 de Fev. 2024.

BARIA, Igor. **Sistema De Gerência de Pavimentos Aplicado a Via Permanente Metroferroviária Auxiliado por um Sistema de Informações Geográficas**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015. Acesso em: 10 de Mar. 2024.

Seraco, I. P. (2019). **Procedimento para definição de políticas de manutenção de via permanente ferroviária**. Monografia (Curso de Engenharia de Transportes, COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Acesso em: 10 de Mar. 2024.

ALMEIDA, I. F.; SKWAROK, A. C. M.; LOPES, L. A. S.; MARTINS, C. A.. **Procedimento de análise para investigação e prevenção de descarrilamentos**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.13, n.7, p.212-229, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.007.0016>. Acesso em: 10 de Mar. 2024.

BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estradas de ferro**. Belo Horizonte. Editora UFMG. 1979. Acesso em: 10 de Mar. 2024.

TOM WORSLEY (2020). **Comparing Road and Rail Investment in Cost-Benefit Analysis**. International Transport Forum. Acesso em: 18 de abr. 2024.

Liljenström, C., Björklund, A., & Toller, S. (2022). **Comparing Road and Rail Investment in Cost-Benefit Analysis**. International Transport Forum. Acesso em: 18 de abr. 2024.

Bilheri, A., Luiz, O., Cremonezzi, L., & Reis, B. (2021). **Avaliação da qualidade da correção geométrica**. ANTF. Acesso em: 18 de abr. 2024.

NABAIS, Rui José da Silva. **Manual Básico de Engenharia Ferroviária**. Associação Brasileira de Pavimentação – ABPV. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. Acesso em: 18 de maio. 2024.

Radinz, G. A., & Gomes, R. A. (2008). **Desgaste em rodas de locomotivas: Estudo de caso**. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica). Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo. Acesso em: 18 de maio. 2024.