



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

SILMARA DA CONCEIÇÃO MORAIS

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, MACRO E MICROESTRUTURAL DE TRILHOS
FERROVIÁRIOS DO TIPO TR-68 EM CONDIÇÕES DE NOVO E USADO**

Ananindeua,
2022

SILMARA DA CONCEIÇÃO MORAIS

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, MACRO E MICROESTRUTURAL DE TRILHOS
FERROVIÁRIOS DO TIPO TR-68 EM CONDIÇÕES DE NOVO E USADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, como requisito para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientadora: Ma. Brenda Thayssa Figueira Daniel

Ananindeua,
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

D111c da Conceição Moraes, Silmara.
CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, MACRO E
MICROESTRUTURAL DE TRILHOS FERROVIÁRIOS DO
TIPO TR-68 EM CONDIÇÕES DE NOVO E USADO /
Silmara da Conceição Moraes. — 2022.
62 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador(a): Prof^ª. MSc. Brenda Thayssa Figueira
Daniel
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de
Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais,
Ananindeua, 2022.

1. Trilhos ferroviários. 2. Caracterização. 3.
Tribologia. 4. Boletim. I. Título.

CDD 620.11

SILMARA DA CONCEIÇÃO MORAIS


CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, MACRO E MICROESTRUTURAL DE TRILHOS FERROVIÁRIOS DO TIPO TR-68 EM CONDIÇÕES DE NOVO E USADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, como requisito para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Materiais.

Data da Avaliação: 27/10/2022.

Conceito: Excelente.

BANCA EXAMINADORA:




Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
(FEMat - CAMPANIN - UFPA – Orientador)



Ma. Brenda Thayssa Figueira Daniel
(PPGEM - ITEC - UFPA – Coorientadora)



Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
(FEMat – CAMPANIN – UFPA – Examinador interno)



Prof. Me. Emerson Rodrigues Prazeres
(FEM – ITEC – UFPA – Examinador Externo)

Ananindeua,
2022

Dedico este trabalho ao Senhor meu Deus, meus pais, meu irmão, meu marido e meu filho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde, força e vigor para desenvolver este trabalho, aos familiares por me incentivarem e sempre torcerem por mim, aos amigos que fiz na Universidade Federal do Pará, pelo incentivo e parceria em estudos.

Aos meus pais, Otávio Lopes de Moraes, Maria de Nazaré Santos da Conceição e meu irmão Gleison da Conceição Moraes pela dedicação, esforço, apoio e compreensão em todos os momentos.

À meu marido Diogo Flor Carvalho dos Santos e meu filho Igor Felipe Moraes Flor, pela paciência, compreensão, apoio irrestrito, carinho e amor a mim concedido.

Aos meus avós, tios, tias, primos e primas por toda força que me deram durante toda essa jornada, em especial aos meus avós Claudomir da Conceição e Benedita Mercedes Libório dos Santos por todo o apoio a mim dispensado e sempre me cobrindo em braços de orações.

Tenho que agradecer também ao Prof. Dr. Deibson Costa, ao qual devo muito do que aprendi, pois seus ensinamentos foram muito importantes.

À equipe do Laboratório de pesquisa do GPEMAT: Me. Emerson Prazeres, Ma. Brenda Daniel e Gregory Miranda, onde os tive como companheiros de pesquisas.

E jamais esquecerei dos amigos que obtive durante a jornada acadêmica, em especial Dayse, Hanathanya, Sthefanny e Cícero, além de todas as dificuldades, no final nos acolhemos na amizade.

A todos da Engenharia de Materiais (colegas de turma: funcionários, professores, coordenadores) que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação profissional.

RESUMO

As indústrias que necessitam transportar cargas pesadas, utilizam os trilhos ferroviários como meio de transportes mais adequados para o abastecimento e locomoção amplamente expandido em todo o mundo. Para garantir a qualidade de transportes dessas cargas, a manutenção ferroviária é fundamental. Já que, a carga quando excedida influencia negativamente, danificando a estrutura e atingindo a vida útil do material. Com isso, é necessário prevenir o desgaste natural dos trilhos, manter a capacidade de escoamento de cargas e evitando perdas econômicas. No trabalho, foi realizado uma comparação de características mecânica, macro e microestrutural de trilhos ferroviários do tipo TR-68, sendo um trilho utilizado e outro sem uso. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar a variação da microestrutura dos dois trilhos, enfatizando os valores de dureza feita na superfície do boleto. Os trilhos foram submetidos a caracterizações químicas em que foi realizada por meio de espectrômetro de emissão óptica. A caracterização mecânica foi realizada através do ensaio de dureza Rockwell C e nas caracterizações metalográficas foram utilizados microscópio estereoscópio e microscópio óptico para análise de macro e microestrutura dos trilhos. Os resultados da composição química apresentaram que ambos os trilhos são aços hipereutetóides. Além disso, os teores dos elementos de liga estão de acordo com as literaturas pesquisadas. A análise de variação microestrutural no trilho usado devido à passagem sucessiva das rodas ferroviárias constatou deformação na superfície do trilho. Ademais, a comparação da resistência mecânica entre o trilho novo e usado mostrou que há um intenso efeito de encruamento no trilho usado, principalmente na região do canto da bitola. No trilho usado, a microestrutura e dureza no entorno da solda aluminotérmica, apresentou-se redução nos valores de dureza na região da Zona Termicamente Afetada (ZTA) justificada pela microestrutura presente nesta região. O trilho novo não apresentou deformações na microestrutura.

Palavras-chave: Trilhos ferroviários. Caracterização. Desgaste. Boleto.

ABSTRACT

The industries that need to transport heavy loads use railroad tracks as the most suitable means of transportation for their supply and locomotion, which is widely expanded all over the world. To ensure the quality of transportation of these loads, railway maintenance is essential. When the load is exceeded, it has a negative influence, damaging the structure and affecting the service life of the material. With this, it is necessary to prevent the natural wear of the rails, maintaining the capacity of cargo flow and avoiding economic losses. At work, a comparison of the mechanical macro and microstructural characteristics of TR-68 railroad tracks was performed, with one track used and another not used. Thus, the objective of this work was to analyze the microstructure variation of the two rails, emphasizing the hardness values made on the billet surface. The rails were submitted to chemical characterization, which was performed by means of an optical emission spectrometer. In the mechanical characterization was performed the Rockwell C hardness test and in the metallographic characterizations were used stereoscope and optical microscope to analyze the macro and microstructure of the rails. The results of the chemical composition showed that both rails are hyperetoid steels. Moreover, the alloying element contents are in agreement with the literatures. The analysis of microstructural variation in the used rail due to the successive passage of the rail wheels found deformation on the rail surface. Furthermore, the comparison of mechanical strength between new and used rail showed that there is an intense strain-hardening effect on the used rail, especially in the corner region of the gauge. In the rail used, the microstructure and hardness around the aluminothermal weld showed a reduction in hardness values in the region of the Thermally Affected Zone (ZTA) justified by the microstructure present in this region. The new rail did not present deformations in the microstructure.

Keywords: Railway rails. Characterization. Wear. Billet.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Partes integrantes do trilho Vignole.....	20
Figura 2 – Processo de fabricação dos trilhos ferroviários.....	21
Figura 3 – Microestrutura perlítica de trilhos ferroviários. Magnificação: 10.000x.	23
Figura 4 – Microestrutura de trilho bainítico. Magnificação 10.000x.....	23
Figura 5 – Regiões de contato da roda ferroviária com o trilho.	25
Figura 6 – Região do boleto onde surgem as tensões de contato.	26
Figura 7 – Presença do desgaste lateral no canto da bitola de trilho ferroviário.	26
Figura 8 – Esquemático de perfis transversais típicos de desgaste em trilhos.....	27
Figura 9 – Comparação das microestruturas da superfície (a, b, c) e da subsuperfície (d, e, f).....	28
Figura 10 – a) Trinca vertical do boleto e b) Trinca ao longo do boleto.....	29
Figura 11 – Trinca horizontal no boleto.	30
Figura 12 – a) Trinca de patinagem com fissuração interna e b) lascamentos do boleto.....	31
Figura 13 – Trinca transversal do boleto.	31
Figura 14 – Representação esquemática de processo de soldagem aluminotérmica de trilho.....	32
Figura 15 – Processo de soldagem aluminotérmica em trilho.	33
Figura 16 – Fluxograma esquemático da metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho.	34
Figura 17 – Trilhos utilizados neste trabalho. a) Trilho novo e b) Trilho usado.....	35
Figura 18 – Equipamentos utilizados nos cortes das amostras, a) Eletroerosão à fio e b) Cortadora <i>cut-off</i>	36
Figura 19 – Corte da seção transversal.....	36
Figura 20 – Corte na lateral externo e na lateral interno do boleto.	37
Figura 21 – Espectômetro de emissão óptica.	37
Figura 22 – a) Politriz, b) Cuba ultrassônica e c) Pastas de diamante.	38
Figura 23 – Microscópio estereoscópio.....	39
Figura 24 – Microscópio óptico.....	39
Figura 25 – Durômetro.	40
Figura 26 – Mapa de dureza transversal no boleto do trilho.....	41
Figura 27 – Representação gráfica do trilho com desgaste na região do boleto.....	41

Figura 28 – Faixa de composição química do carbono no diagrama de fases para o trilho usado (em verde) e para o trilho novo (em vermelho).....	43
Figura 29 – Esquema evidenciando o desgaste nos trilhos novo e usado.....	44
Figura 30 – Escoamento do canto externo do trilho.	44
Figura 31 – Escoamento do canto externo do trilho para as amostras a) e b) localizadas na ZTA esquerda e direita, respectivamente, c) localizada no metal de base do trilho e d) no centro da solda.	45
Figura 32 – Microestrutura da amostra do trilho usado na região da ZTA na Figura 28a.	47
Figura 33 – Microestrutura do trilho usado a) Evidenciou grãos maiores e b) Crescimento de grãos austeníticos. Identificação da Figura 28d localizada no centro da solda.....	47
Figura 34 – Microestrutura da região da amostra localizada na ZTA, a) Região de escoamento e b) Presença de ferrita - próeutetóide e propagação de trincas. Microscopia óptica dos trilhos c) Novo e d) Usado. Magnificação 50x.	48
Figura 35 – Perfil transversal de dureza rockwell C para os trilhos a) novo e b) usado.	49
Figura 36 – Consequência do uso do trilho a) novo e b) usado.	50
Figura 37 – Perfil longitudinal de dureza Rockwell C na região do escoamento, que abrange a solda aluminotérmica.	51
Figura 38 – Posição 0 mm corresponde ao centro da solda.....	51
Figura 39 – Perfil longitudinal de dureza Rockwell C e correlação com a microestrutura.	52
Figura 40 – Perfil longitudinal de dureza Rockwell C e correlação a macroestrutura.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Empresas nacionais e seus produtos transportados.	14
Tabela 2 – Composições químicas representativas de trilhos.....	22
Tabela 3 – Composição química (%) obtida para os trilhos usado e novo.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Associação Nacional dos Transportes Ferroviários (ANTF)

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT)

Estrada de Ferro Vitória e Minas (EFVM)

Ferrovias Tereza Cristina S/A (FTC)

Grupo de Pesquisa em Engenharia de materiais (GPEMAT)

Dureza Rockwell C (HRC)

Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM)

Malha Regional Sudeste Logística S/A (MRS)

Norma Técnica Brasileira (NBR)

Rolling Contact Fatigue (RCF)

Ferrovias Transnordestina Logística S/A (TLSA)

Valor da Logística Integrada Multimodal S/A (VLI)

Zona Térmica Afetada (ZTA)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	O Sistema ferroviário	17
2.2	Evolução dos trilhos ferroviários	19
2.3	Trilhos Ferroviários	19
2.3.1	Características.....	19
2.3.2	Fabricação e Composição química dos trilhos.....	20
2.3.3	Microestrutura dos trilhos.....	22
2.3.3.1	Microestrutura perlítica	22
2.3.3.2	Microestrutura bainítica.....	23
2.4	Tribologia	24
2.4.1	Atrito	24
2.4.2	Desgaste.....	25
2.4.3	Fadiga.....	27
2.5	Defeitos em trilhos ferroviários	28
2.5.1	Trinca vertical do boleto.....	29
2.5.2	Trinca horizontal do boleto.....	30
2.5.3	Trinca de patinagem	30
2.5.4	Trinca transversal	31
2.6	Solda aluminotérmica	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Seleção das amostras	35
3.2	Corte das amostras	35
3.3	Composição Química	37
3.4	Metalografia	38
3.5	Macroestrutura	38
3.6	Microestrutura	39

3.7	Ensaio de Dureza	40
3.7.1	Transversal.....	40
3.7.2	Longitudinal.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	Composição Química	42
4.2	Análise do desgaste	43
4.3	Macroscopia	45
4.4	Microscopia Óptica	46
4.5	Dureza	49
4.5.1	Comparação da dureza transversal para o trilho novo e usado.....	49
4.5.2	Dureza logitudinal na região da solda.....	50
5	CONCLUSÕES	54
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros modais de transporte ferroviários presentes no território brasileiro privilegiaram as ligações internas e com os estados vizinhos, de modo a atender as demandas locais e também criar uma movimentação de pessoas e mercadorias na escala regional. Uma exceção histórica foi o período de desenvolvimento das cidades por onde passavam. Com abastecimentos de produtos agrícolas, o transporte ferroviário obteve um crescimento para facilitar nas descargas de produtos agrícolas (NUNES, 2019).

Hoje em dia, os trilhos ferroviários são muito utilizados para transportes de cargas, principalmente minérios, viagens ou passeios turísticos. Este transporte é composto de locomotivas, trens, metrô e vagões para carga. Existem várias empresas associadas de malha ferroviária que transportam cargas no setor nacional, a Tabela 1 mostra algumas delas.

Tabela 1 – Empresas nacionais e seus produtos transportados.

Empresas	Principais produtos transportados
FTC S/A (Ferrovia Tereza Cristina)	Carvão mineral
MRS Logística S/A (Malha Regional Sudeste)	Contêineres, siderúrgicos, cimento, bauxita, agrícolas, coque, carvão e minério.
Rumo Logística	Diferentes insumos, com os produtos industrializados, combustíveis e commodities agrícolas.
TLSA (Ferrovia Transnordestina Logística S/A)	Grãos, óleo e derivados, gesso, fertilizantes, entre outros
VLI. Multimodal S.A	Grãos, açúcar, produtos siderúrgicos e industrializados.

Fonte: (FTC; MRS; RUMO logística; CSN/TLSA; VLI, 2021)

Ademais, segundo a Adnormas (2018), as malhas ferroviárias abrangem não somente o uso para transporte de cargas. Ainda são utilizadas para o transporte de pessoas, podendo ser para turismo ou viagem interestadual. Nas ferrovias da Estrada de Ferro Vitória e Minas (EFVM) e Estrada Ferro Carajás, a distância é de 1.500 quilômetros de trilhos para viagem longa. Juntas podem transportar cerca de 1,2 milhão de passageiros.

Além disso, o modal ferroviário sofre sobrecargas fazendo com que o contato

entre a roda e o trilho gera tensões nos materiais em que resultam naturalmente em tendência de deterioração do material. Essa deterioração depende das condições operacionais e em termos gerais se resume ao desgaste, aos defeitos principalmente na forma de fadiga de contato de rolamento - RCF (EKBERG *et al.*, 2014b).

Neste contexto, medidas devem ser estudadas para minimizar as consequências causadas pelo contato roda-trilho. Contudo, a comparação realizada neste trabalho avalia as características microestruturais e mecânicas dos trilhos TR68 em que a parte analisada é a região do boleto. Assim, pode-se estudar as modificações sofridas do trilho usado e compará-las com a do trilho novo.

1.1 Justificativa

Os aços utilizados no modal ferroviário, obtêm defeitos que são originados pela fadiga e pelo desgaste e que são as principais causas de falhas que reduzem a vida útil desses componentes. Evitando ou minimizando essas falhas, impedem de recorrer a manutenção frequente e substituição dos trilhos que são procedimentos que têm custos maiores, mas também de tempo de acesso à pista e atrasos que afetam os horários. Conseqüentemente, se os problemas não forem resolvidos em um contexto de tráfego mais pesado e uso de possíveis materiais que não atendam às especificações, podem ocorrer fraturas catastróficas com materiais e perdas humanas (GODEFROID *et al.*, 2020).

Estudos da comparação de um trilho novo e usado abrangem conhecimentos nas diferenças das propriedades mecânicas e microestrutura que são ocasionadas por defeitos de serviços ou defeitos de fábrica.

Este trabalho tem como base a necessidade de compreender o fenômeno de desgaste de trilhos ferroviários e produzir conteúdo intelectual para as pesquisas em âmbito nacional acerca das ferrovias.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Identificar a tempo a tribologia dos trilhos e poder agir na recuperação ou retirada. Assim, avaliar as características macro, microestruturais e mecânicas dos trilhos ferroviários, analisando as modificações que o trilho usado obteve durante o período que esteve em serviço e comparar com o trilho novo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Verificar a composição química, para identificar se os trilhos possuem a mesma composição e comparar se estão de acordo com a norma vigente;
- Caracterizar a macro e a microestrutura na região do boleto dos trilhos novo e usado, a fim de comparar as estruturas;
- Comparar entre o trilho novo e o usado a resistência mecânica por meio de ensaio de dureza Rockwell, para avaliar o perfil de dureza na região do boleto;
- Avaliar o desgaste e o escoamento na região da solda aluminotérmica do trilho usado, afim de analisar a deformação plástica do material.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em 5 seções. A seção 1 tem a finalidade de apresentação sobre o trabalho através da introdução, justificativa e objetivos. A seção 2 aborda a parte teórica dos conceitos e os termos que fundamentam o modal ferroviário, como: a evolução, características, fabricação, microestrutura, tribologia e defeitos causados em serviços. A seção 3 apresenta a metodologia, materiais e equipamentos utilizados para alcançar os objetivos deste trabalho. Para a comprovação, na seção 4, são realizados os resultados e discussão com ênfase na comparação das referências. A seção 5 traz as conclusões obtidas no trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Sistema ferroviário

A palavra ferrovia em inglês é *railway*, com uma junção que de ferro + via, ou uma estrada de ferro. Assim, o conceito básico de uma *railway* é uma estrada com trilhos para orientar os veículos. Para considerar o termo ferrovia podemos dizer que qualquer caminho guiado por veículos em trilhos pode ser de ferro ou de outro material. As primeiras ferrovias da história foram desenvolvidas com objetivo principal de transportar cargas pesadas (RIBEIRO, 2018).

Segundo o DNIT (2020), as primeiras ferrovias foram no governo imperial que incentivou as questões relacionadas à invenção da locomotiva e à construção de estradas de ferro, não demorando a serem conhecidas no Brasil. Em 1828, surgiu as primeiras iniciativas nacionais, relativas à construção de ferrovias, cabendo ao Governo Imperial autorizar por Carta de Lei a construção e exploração de estradas em geral. O objetivo era a interligar diversas regiões do País.

No Brasil a partir de 1835, várias tentativas foram feitas para a construção de uma estrada de ferro. Tentativas essas em que se tornariam frustrantes por faltas de interesses e investimentos. Porém, em 1854 a primeira ligação ferroviária foi inaugurada para ligar entre o Porto de Mauá (interior da Baía de Guanabara) e o Raiz da Serra (Petrópolis), com 14,5 km de extensão (em bitola de 1,63 m) (BRASIL FERROVIÁRIO, 2020).

Ainda de acordo com Brasil Ferroviário (2020), esta implantação foi realizada por Irineu Evangelista de Sousa, conhecido como Barão de Mauá. Após a inauguração da Estrada de Ferro de Mauá, outras ferrovias foram surgindo: Recife ao São Francisco, Bahia ao São Francisco, Santos ao Jundiaí, Companhia Paulista e D. Pedro II que era a obra mais importante da Engenharia Ferroviária. A importância dessa obra, foi por sua ultrapassagem dos 412 metros de altura da Serra do Mar, com a realização de aterros, perfurações de túneis e colossais cortes, entre os quais o Túnel Grande com 2.236 m de extensão, na época o maior do Brasil, aberto em 1864.

Até o século XIX, outras ferroviárias foram surgindo, destacando-se as seguintes: Companhia Sorocabana, Companhia Mogiana, Santo Amaro, Central da

Bahia, , Porto Alegre a Novo Hamburgo, Dona Tereza Cristina, Corcovado e Paranaguá a Curitiba, essas com exigências de bitola métrica. Além disso, com o surgimento de novas empresas industriais, a ferrovia passou a ser modernizada para suportar os tráfegos pesados dos trens que passaram a transportar minérios de ferro entre jazidas (BRASIL FERROVIÁRIO, 2020).

De acordo com Ignarra (2018), após 20 anos, começou a evolução das ferrovias privatizadas, cabendo aos consórcios iniciais a mudar suas composições e participações apropriando-se à globalização dos capitais e a sociedade das redes de negócios. Antigamente, as mineradoras eram clientes e passaram como sócias em grandes corporações que envolvem diversas atividades no setor produtivo como bancos e empresas de comunicações.

Esses grupos tinham interesses pela ferrovia setorial. A importância das ferrovias na visão de exportação requer atividades para transportar determinadas cargas, sendo elas, mineração e agronegócio. Os negócios que abrangem os setores ferroviários nunca deixaram de ser interessantes para o capital. Cabendo as operadoras ferroviárias perderem interesses por transportes turísticos e nem ajudam os grupos interessados em tais projetos, cedendo-lhes direito de passagem (IGNARRA, 2018).

No âmbito internacional, a Inglaterra, popularmente chamada como o berço das ferrovias, resulta na acumulação do capital em grande escala, gerando excedentes para investimentos no exterior. O setor ferroviário cresceu constantemente e representou para a economia moderna privilégios para o grande investidor, exportando bastante capital e tecnologia para o resto do mundo (BORGES, 2011).

De acordo com Borges (2011), ainda nos países exteriores, a implantação de vias férreas teve um crescimento lento nas regiões latino-americanas, como todo processo de modernização. Com a entrada dos trilhos no território trouxe a expansão e regionalização da economia primário-exportadora. O interesse da implantação das linhas de ferro era de grupos dominantes nacionais e estrangeiros. Resultando na implantação de redes ferroviárias, como: Argentina, Chile, México e Uruguai.

2.2 Evolução dos trilhos ferroviários

Brina (1984 apud Barbosa, 2017) define que o trilho é a parte importante da superfície de rolamento para as rodas dos veículos ferroviários. Esses são fixados sobre dormentes que estão embutidos no lastro que forma a via férrea. O material utilizado na fabricação dos trilhos vem sofrendo uma mudança gradativamente até os dias atuais, de acordo com a expansão da tecnologia do aço. A forma e o comprimento dos perfis modernos de grande seção vêm desenvolvendo conforme as exigências necessárias e também seu peso para permitir as pesadas cargas por eixo dos trens modernos.

Segundo Nunes (2019), os primeiros trilhos eram de madeiras por ser frágeis para transportar cargas pesadas e o custo inicial de construção era menor, esta linha ferroviária era utilizada por ser mais barata. Com passar dos anos, os trilhos foram substituídos pelos os trilhos de ferro fundido que eram flangeados, ou seja, que tinham uma forma de L. Esses tipos de materiais eram frágeis e quebravam com muita facilidade.

Conforme a melhoria das técnicas de laminação introduziu os ferros forjados em comprimentos maiores que substituiu o ferro fundido e contribuiu significativamente para o crescimento das ferrovias. Assim, foi fabricado trilhos do tipo T flangeados. Com o avanço da tecnologia, o aço passou a ser introduzido na fabricação de trilhos ferroviários, sendo esse um material mais forte, que substituiu constantemente o ferro, e permitiu que comprimentos de trilhos muito maiores fossem desenvolvidos (NUNES, 2019).

2.3 Trilhos Ferroviários

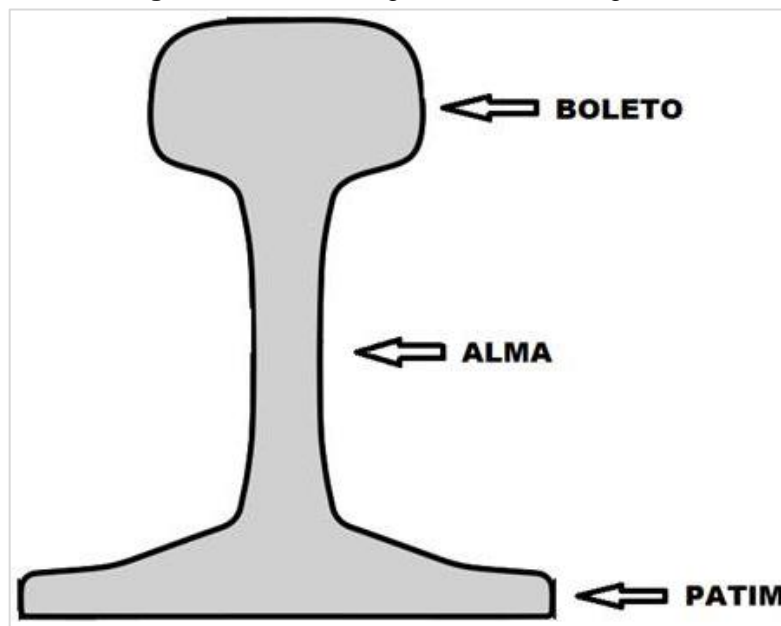
2.3.1 Características

De acordo com Ramos, Kulitz e Taffner (2019), o trilho é um dos mais importantes componentes das ferrovias. Ele serve diretamente como superfície de rolamento das rodas dos veículos ferroviários, sofrendo constante desgaste.

De suas características pode ser observado o perfil transversal convencional chamado tipo Vignole, que é formado por três partes: Boleto, Alma, Patim, que é

definido pela NBR (7590) e exibido na Figura 1.

Figura 1 – Partes integrantes do trilho Vignole.



Fonte: Manual técnico da Via Permanente, 2009.

De acordo com Sartori (2010), o trilho é dividido em três partes distintas:

- O **boleto** corresponde à parte superior do trilho (cabeça), onde destinada ao apoio e deslocamento da roda ferroviária. É onde se encontra grande parte de desgaste e atrito que o mesmo sofre no contato roda-trilho. Envolvendo resistência a flexão, pois há maior concentração de massa onde atuam mais tensões normais, permitindo reforçar o uso deste material;
- A segunda parte do trilho é chamada de **alma** (corpo) localizada entre o bolete e o patim. Onde apresenta resistência flexão que depende da espessura e da altura da alma, que deve ser uma espessura mínima para assegurar rigidez transversal;
- A terceira parte do trilho se chama **patim** (base) é a parte inferior, no qual o trilho é apoiado e fixado nos dormentes. Onde recebe os esforços produzidos pelas cargas ao lastro que são geralmente de pedra britada e cascalho.

2.3.2 Fabricação e Composição química dos trilhos

A fabricação dos trilhos de aço carbono depende de empresas para empresas

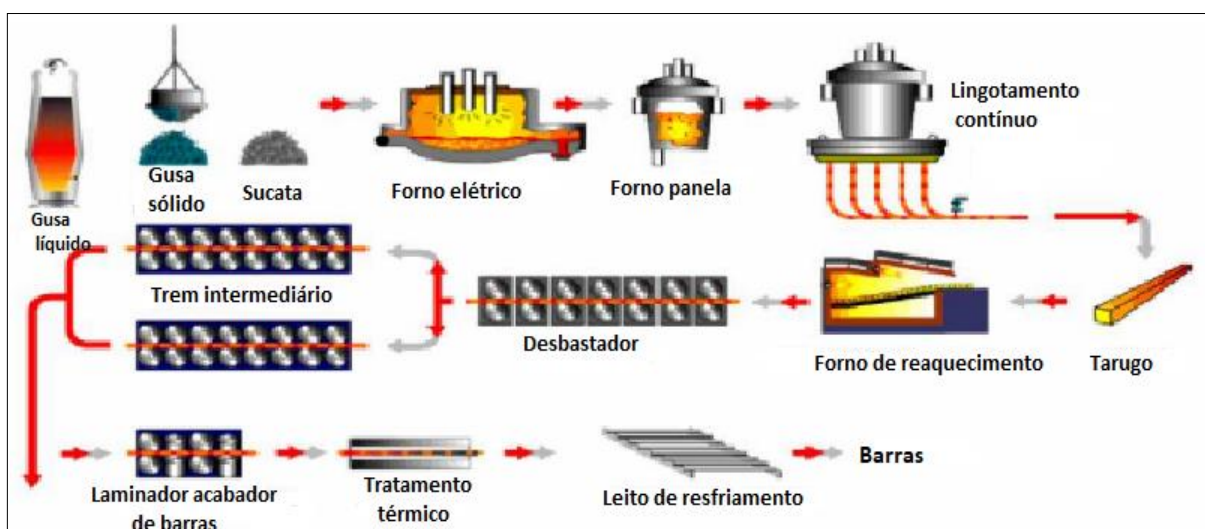
e passam por vários processos, obedecendo a seguinte norma (NBR 11710).

O processo de fabricação dos trilhos se inicia geralmente nas minas de minérios ou utilizando materiais recicláveis, onde passam por etapas de processo de fabricação. Para o reforço do aço o minério de ferro (matéria-prima) é transportados em lingotes de aço, com alguns componentes químicos necessários para a criação da resistência de um trilho. Normalmente, os lingotes são enviados para outras empresas responsáveis em fabricar os trilhos através de vários processos de laminação em diversos roletes de diferentes formatos, assim conformando os lingotes em trilhos (ALVES, 2019). As etapas da fabricação de trilhos são as seguintes:

1. Redução do teor de hidrogênio;
2. Corrida contínua do aço;
3. Forno de reaquecimento e laminador desbastador;
4. Banca de laminadores a quente;
5. Rolos-prensa alinhadores;
6. Resfriamento controlado dos trilhos.

Todo este processo pode ser mais bem visualizado na Figura 2, onde o processo de fabricação segue um fluxo contínuo.

Figura 2 – Processo de fabricação dos trilhos ferroviários.



Fonte: Arcelor Mital, 2008.

A Tabela 2 apresenta as composições químicas representativas de aços comuns para trilhos.

Tabela 2 – Composições químicas representativas de trilhos.

Constituintes	Peso nominal em lb/jd	
	90/120	121 e acima
Carbono	0,67-0,80 %	0,72-0,82 %
Manganês	0,70-1,00 %	0,75-1,05 %
Fosforo	0,035 %	0,035 %
Enxofre	0,040 %	0,035 %
Silício	0,10-0,35 %	0,10-0,35 %

Fonte: Chiaverini, 2008.

E a constituição estrutural à temperatura ambiente das ligas ferro-carbono de 0 % até 2,11 % de carbono, sendo resfriadas lentamente a partir de temperaturas acima da zona crítica, podem ser classificadas como (CHIAVERINI, 2007):

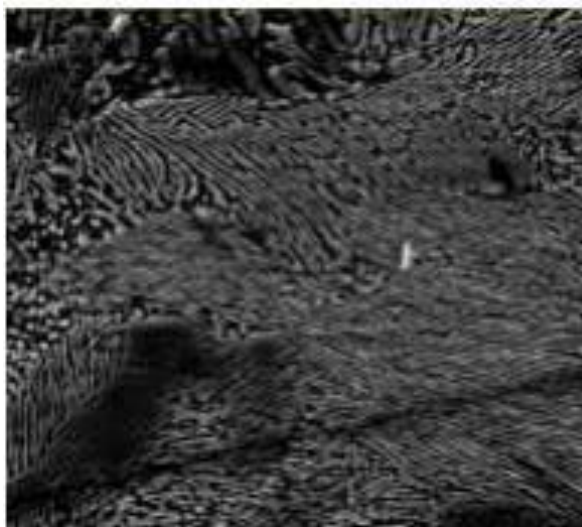
- Ferro comercialmente puro - ferrita;
- Aços hipoeutetóides (até 0,77 % de C) - abaixo da composição eutetóide: ferrita nos contornos de grãos (ferrita proeutetóide) e perlita;
- Aços eutetóides (0,77 % de C) - na composição eutetóide: perlita;
- Aços hipereutetóides (0,77 a 2,11 % C) - acima da composição eutetóide: perlita e cementita nos contornos de grãos (cementita proeutetóide).

2.3.3 Microestrutura dos trilhos

2.3.3.1 Microestrutura perlítica

As microestruturas de trilhos ferroviários estão sendo estudado com o intuito de reforçar o material. Estudos revelam que as microestruturas perlíticas e bainíticas têm aços que melhoram nas propriedades mecânicas, focando principalmente nos defeitos de desgaste e fadiga. Porém, entre elas, tem a matriz perlítica, como mostra na Figura 3, está sendo bastante utilizada em trilhos e rodas com o objetivo de reduzir o espaçamento interlamelar, além de, reduzir também as colônias de perlita, adequando meios de tratamento térmico e termomecânico e completando com os elementos de microliga para a formação carbonetos, como nióbio, vanádio e titânio (REZENDE *et al.*, 2020, p. 01).

Figura 3 – Microestrutura perlítica de trilhos ferroviários. Magnificação: 10.000x.

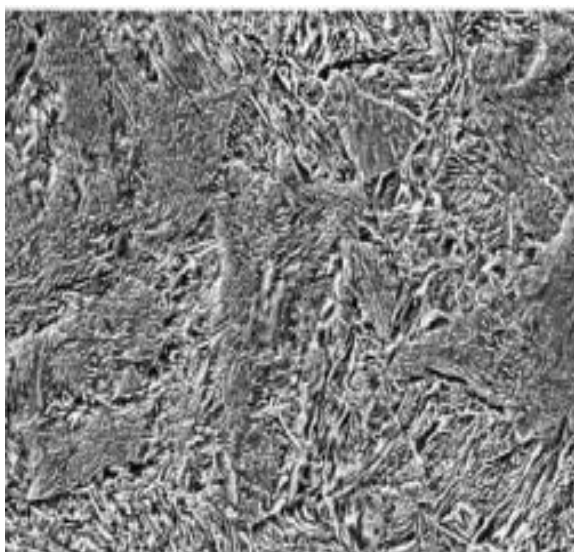


Fonte: Miranda *et al.*, 2020.

2.3.3.2 Microestrutura bainítica

Já as microestruturas bainíticas, Figura 4, apresentaram baixa resistência ao desgaste do que a perlita. Assim, ao comparar a perlita e a bainita é difícil concluir de fato o desempenho de cada uma, isso devido a composição química do aço que são diferentes para cada estrutura (LIU *et al.*, 2019).

Figura 4 – Microestrutura de trilho bainítico. Magnificação 10.000x.



Fonte: Finamon *et al.*, 2017.

Essas microestruturas apresentam a presença de fases que são negativas para um bom resultado, como ferrita alotriomórfica, carbonetos, austenita retida ou

martensita que mostra a ser atribuído à fraca resistência ao desgaste do aço bainítico. Podendo ter baixa resistência ao desgaste do aço bainítico que será atribuída como insuficiente no endurecimento por deformação (LIU *et al.*, 2019).

2.4 Tribologia

De acordo com Hutchings (2017), tribologia é a área da ciência envolvida com a interação entre superfícies em movimento relativo. Além disso, fenômenos como atrito, desgaste e fadiga estão diretamente relacionados com a tribologia.

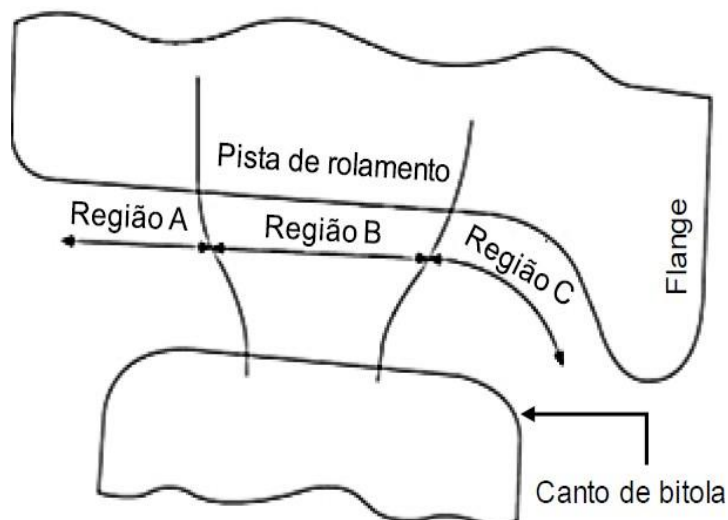
2.4.1 Atrito

Roney (2009 apud Dutra, 2014, p. 24) afirma que o movimento requer resistência durante o deslizamento de um corpo sobre outro. O contato roda-trilho requer uma significativa perda de energia, causando a resistência ao movimento e um esforço adicional de tração. Com a repetição do contato das rodas nos trilhos, este está sujeito a carregamento cíclico de modo misto, multiaxial, não proporcional em conformidade com o tempo. De acordo com as condições de carregamento, as trincas por fadiga podem surgir na superfície ou subsuperfície dos trilhos.

Segundo Bauri (2020), no contato roda-trilho ocorrem dois tipos de movimento de interação entre as partes: o rolamento, o deslizamento e a interação entre ambos. As regiões de contato podem ser divididas em três, como mostra a Figura 5:

- Região A - Contato da região adjacente ao aro externo da roda e o trilho. Possui menor contato entre as regiões e ocorre elevadas tensões, causando desgaste heterogêneo;
- Região B - Contato entre a pista de rolamento da roda e do trilho ferroviário. Geralmente em trajetória retilínea ou curvas com raios elevados;
- Região C - A flange da roda entra em contato com essa região do canto da bitola frequentemente em trechos de curvas, aumentando as tensões de contato e a taxa de desgaste.

Figura 5 – Regiões de contato da roda ferroviária com o trilho.



Fonte: Adaptado de Lewis e Olofsson, 2009.

2.4.2 Desgaste

O trilho é o elemento requer atenção principalmente por está submetido a diversas ações em contato com o material rodante. Os movimentos repetitivos causam desgaste quando há uma justaposição na roda-trilho, surgindo defeitos que afetam sua estrutura (RIVES; PITA; PUENTE, 1977).

Do mesmo modo, o desgaste é causado por tensões de contato, que são causados por pressão sobre área limitada e resultam em falhas de fadiga, que inicia com uma fratura localizada (trinca) (VIDON *et al.*, 2022). Na Figura 6, mostra o comportamento dos 3 tipos de tensões. Existem 3 tipos de contato que são responsáveis por diferentes tensões:

- 1 Contato por um ponto:** o formato da roda é um tronco-cônico. O rodeiro entra em contato diretamente com o canto da bitola. A consequência é mais agressiva para trilho, entrando em colapso (SILVA, 2016; VIDON *et al.*, 2022);
- 2 Contato em conformidade:** o rodeiro se aproxima da extremidade da folga lateral e o friso encosta no flanco lateral do trilho (SILVA, 2016; VIDON *et al.*, 2022). De modo que, gera menores tensões, assim gerando uma distribuição de pressão sobre o boleto;
- 3 Contato por dois pontos:** é ocasionado por um deslizamento e desgaste no

canto da bitola, caso em que acontece em curvas.

Figura 6 – Região do boleto onde surgem as tensões de contato.



Fonte: Adaptado de Vidon *et al.*, 2022.

Na Figura 7, mostra um desgaste lateral que é um dos defeitos causados por movimentos repetitivos.

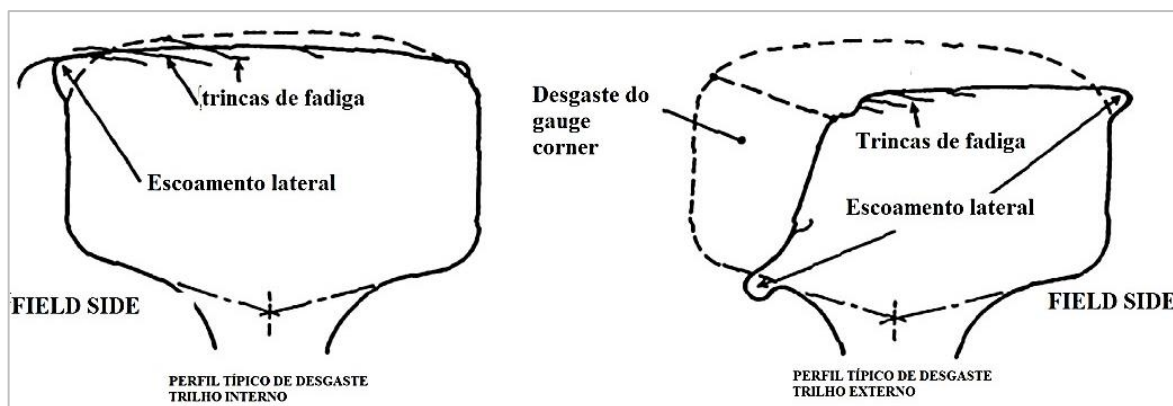
Figura 7 – Presença do desgaste lateral no canto da bitola de trilho ferroviário.



Fonte: Adaptado de Sinchold, 2017.

A Figura 8 mostra o desgaste em trilhos, de forma interna e externa, ocorrente em trechos de curvas.

Figura 8 – Esquemático de perfis transversais típicos de desgaste em trilhos.



Fonte: Adaptado de Magel, 2016.

2.4.3 Fadiga

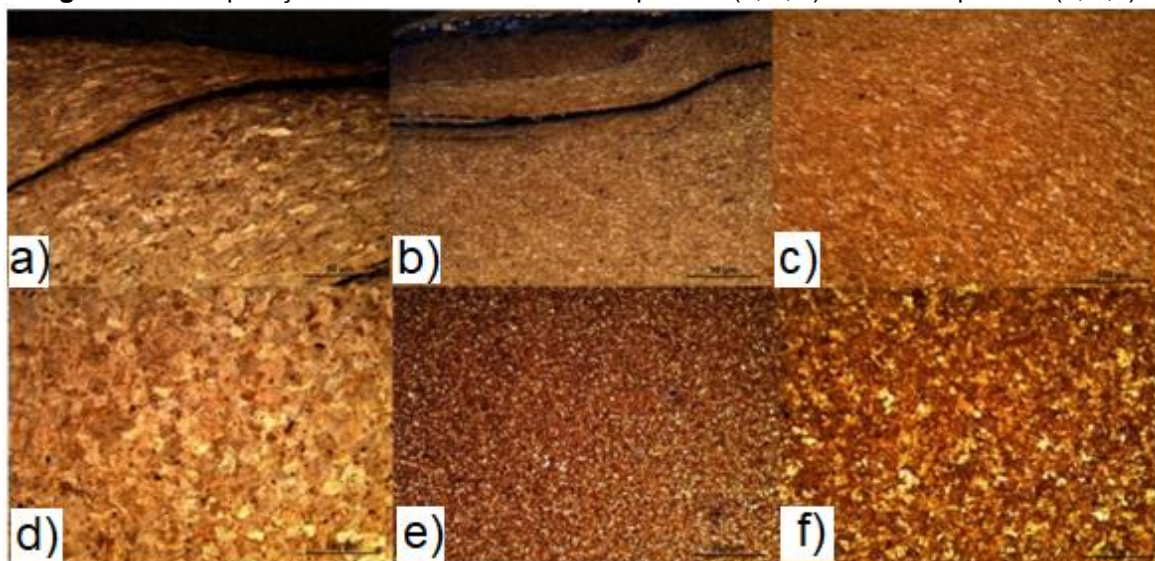
A falha por fadiga de acordo com Fonseca (2015 apud Chaves, 2017), consiste em várias formas podendo ser divididos nas seguintes maneiras:

- **Fadiga mecânica:** cargas cíclicas aplicadas no componente ou sistema;
- **Fadiga por fluência:** cargas cíclicas aplicadas em conjunto, sendo em temperaturas elevadas;
- **Fadiga termomecânica:** é a combinação da fadiga mecânica e a fluência, em conjunto da flutuação da carga aplicada com a flutuação de temperatura;
- **Fadiga por corrosão:** carga cíclica aplicada em conjunto com componentes química agressivos;
- **Fadiga por contato:** carga cíclica de dois materiais em contato, ocasionando atrito entre as partes.

Para Masoumi, Sinatora e Goldenstein (2019), a utilização do trilho pode originar severas cargas de rolamento-deslizamento cíclico devido ao transporte pesado.

De acordo com Miranda (2020), a passagem das rodas ferroviárias altera a microestrutura superficial dos trilhos, em comparação com a microestrutura mais interna do mesmo. Na superfície, a microestrutura apresenta-se mais deformada, com a orientação das lamelas de perlita na direção das tensões de cisalhamento, Figura 9.

Figura 9 – Comparação das microestruturas da superfície (a, b, c) e da subsuperfície (d, e, f).



Fonte: Miranda, 2020.

Portanto, danos por fadiga de contato de rolamento ocorrem na superfície do trilho devido à carga cíclica pesada Fonseca (2015 apud CHAVES, 2017). Além disso, as trincas surgirão a partir da ferrita proeutetóide formada no contorno anterior do grão de austenita.

2.5 Defeitos em trilhos ferroviários

Os defeitos em trilhos ferroviários são transformações que acontecem na etapa de fabricação nas camadas superficiais ou internas, geralmente à carga física durante sua operação, também podendo ser causados por influências químicas. Além disso, podem surgir em diferentes formas e locais nos trilhos. O uso excessivo do material resulta em tensão de contato e faz com que há mudança na superfície (FERDOKO *et al.*, 2020, p. 02).

Visando a segurança e a economia, os defeitos são outros problemas que afetam a estrutura dos trilhos. Na economia, gera custos para realizar reparos, principalmente quando está no meio do serviço diário, ocasionando o atraso de entrega das cargas. Já na segurança, acidentes graves poderão comprometer a vida de trabalhadores e perdas de produtos (MACÊDO, 2009).

Há vários casos de defeitos que podem gerar consequências, sendo elas:

- Defeitos originados na fabricação;

- Defeitos ocasionados em serviços.

Os defeitos de fabricação são também chamados de defeitos internos, em que são detectados somente depois que ficam expostos nas partes estruturais do trilho. O aumento desses defeitos agrava conforme há um número maior de toneladas transportadas. Sendo difícil a identificação a olho nu, quando estão no interior da estrutura e geralmente, é detectado através de ultrassom (MANUAL TÉCNICO DA VIA PERMANENTE, 2009).

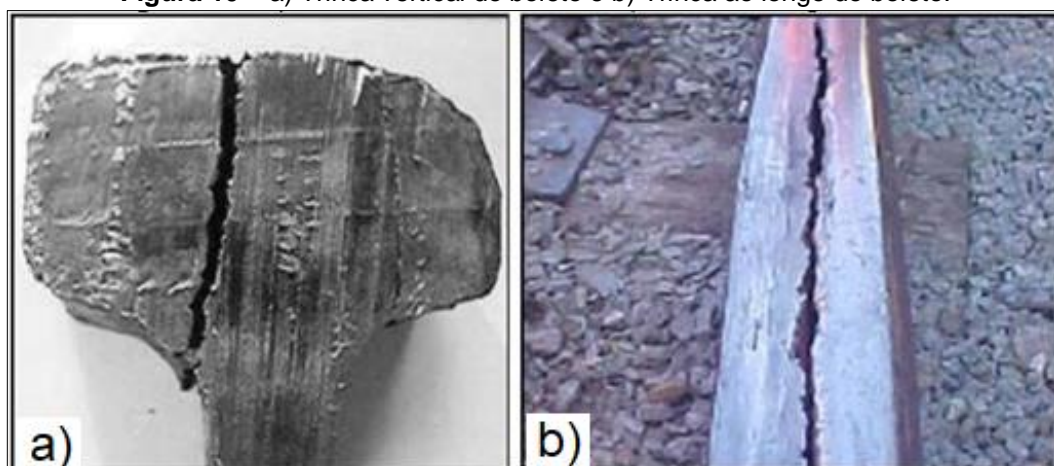
Já os defeitos ocasionados em serviços são comumente de acordo com os defeitos externos, sendo facilmente detectáveis, geralmente é uma consequência de um defeito interno (SCHNEIDER, 2005).

De acordo com Manual Técnico da Via Permanente (2009), as causas comuns de defeitos em trilhos, principalmente na parte superior, o boleto, são: trinca vertical do boleto, trinca horizontal no boleto, trinca de patinagem de roda, trincas transversais, inclusão, trinca de fragmentação.

2.5.1 Trinca vertical do boleto

A trinca vertical do boleto acontece através de um tipo de descontinuidade provocada por porosidades no material, relativa a um defeito de fabricação. Suas características é a formação de um dente na superfície de rolamento. Como mostra a Figura 10a, causando uma rachadura ao meio do boleto e Figura 10b, no comprimento do boleto.

Figura 10 – a) Trinca vertical do boleto e b) Trinca ao longo do boleto.



Fonte: Manual técnico da via permanente, 2009.

2.5.2 Trinca horizontal do boleto

A trinca horizontal no boleto é facilmente encontrada em certas vistorias de manutenção. Podendo causar o deslocamento completo do boleto, atingindo grandes comprimentos. A Figura 11 a seguir, mostra trinca que está no plano horizontal.

Figura 11 – Trinca horizontal no boleto.

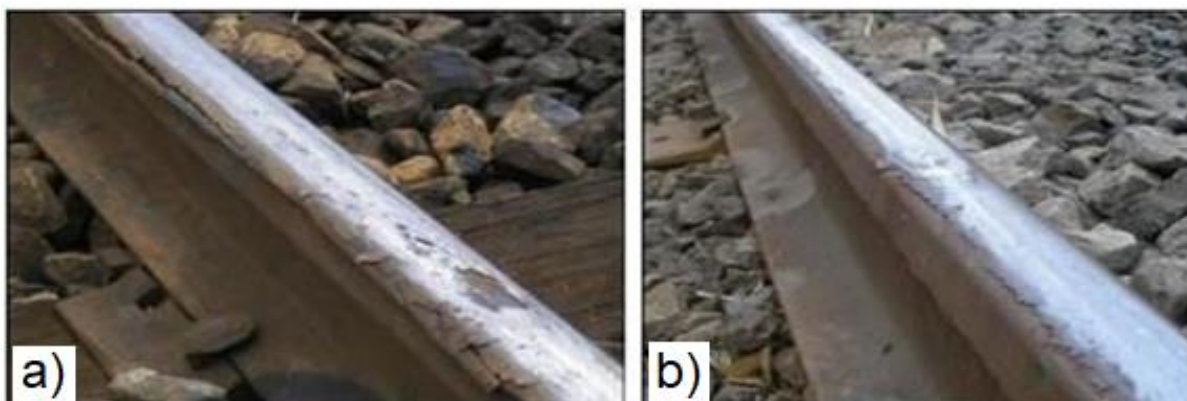


Fonte: MRS Logística, 2008.

2.5.3 Trinca de patinação

Trinca de patinação de roda é originada através de uma fissuração interna, localizada abaixo da superfície superior do boleto, como mostra a Figura 12a e lascamentos do boleto na Figura 12b. Gerando a troca imediata do trilho. Sendo causadas pelas elevadas tensões que resultam do contato roda-trilho.

Figura 12 – a) Trinca de patinagem com fissuração interna e b) lascamentos do boleto

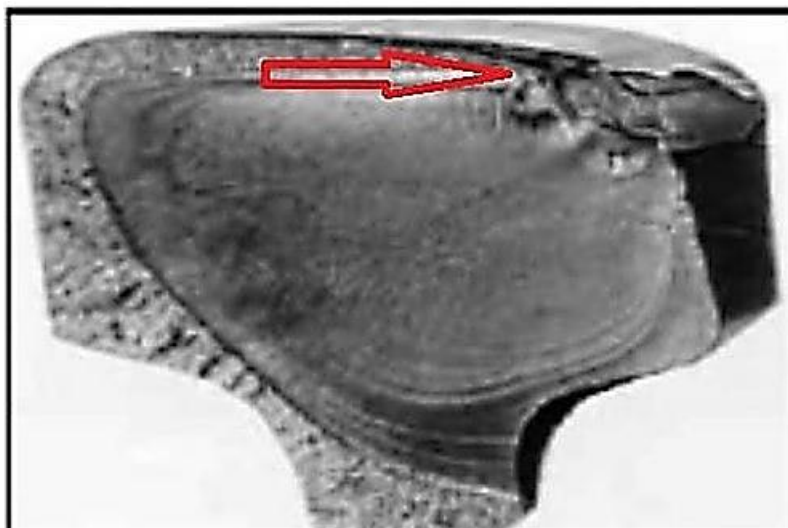


Fonte: Manual Técnico da Via Permanente, 2009.

2.5.4 Trinca transversal

A Trinca transversal na Figura 13 compreende de um rompimento da seção transversal em forma de junta. Com características do qual cresce para fora como uma superfície lisa, brilhante ou não, de forma oval ou circular (LORENS, 2019). Mas que usando o entalhamento, pode ser solucionado.

Figura 13 – Trinca transversal do boleto.



Fonte: Manual técnico da via permanente, 2009.

2.6 Solda aluminotérmica

A solda aluminotérmica é um processo diferente de outros tipos de soldagem, pois envolve reações químicas que relacionam-se entre materiais ferrosos e não ferrosos. É definida como uma reação exotérmica e ligada como uma fusão de uma liga. O objetivo é a união de linhas contínuas ou trilhos longos (REIS, 2021).

A Figura 14, mostra os componentes usado no processo de soldagem aluminotérmica.

Figura 14 – Representação esquemática de processo de soldagem aluminotérmica de trilho.



Fonte: Real; Sampaio; Morais, 2017.

Os equipamentos utilizados para o processo de soldagem aluminotérmica são: cadinhos, moldes, mistura aluminotérmica, pasta de vedação e sistema de pré-aquecimento (OLIVEIRA, 2019). Ainda segundo o autor, a pré-etapa do processo de soldagem são: preparação, montagem e aquecimento. A Figura 15 mostra o posicionado sobre o trilho. Posteriormente, as etapas do processo de soldagem são distribuídos nas seguintes ordens:

1. Preparação dos trilhos e via permanente;
2. Alinhamento e grampeamento dos trilhos;
3. Fixação do molde;
4. Calafetagem de frestas e aplicação de pasta refratária;
5. Pré-aquecimento da junta a ser soldada;
6. Posicionamento do cadinho e execução de reação aluminotérmica;

7. Resfriamento e retirada da conta e molde metálicas;
8. Acamento de junta soldada.

Figura 15 – Processo de soldagem aluminotérmica em trilho.



Fonte: CMK Global Service, 2022.

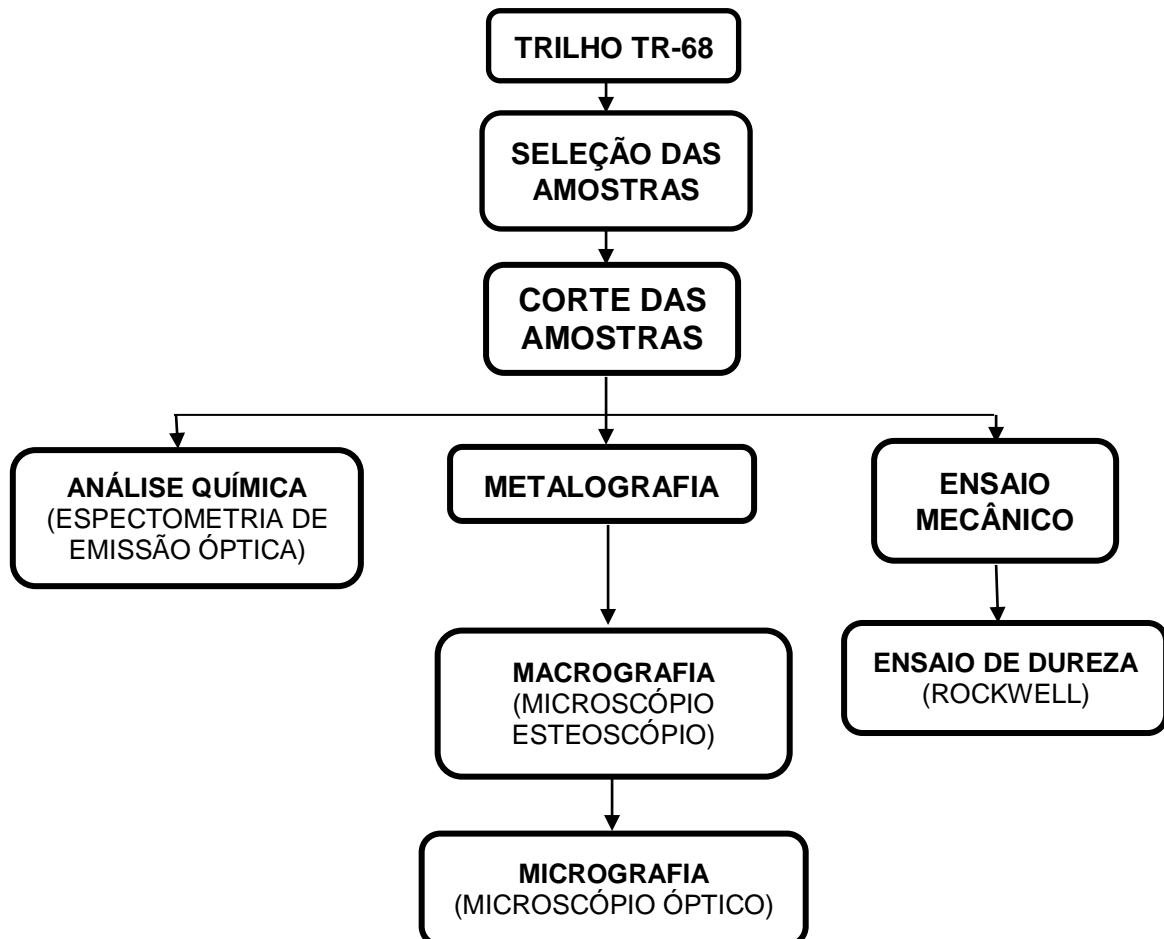
De acordo com Reis (2021), esse processo é bastante utilizado em aplicação específica, em que apresenta flexibilidade em ambiente adequado e seguro para a realização no local em serviço.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram selecionados dois trilhos ferroviários, que foram cedidos pela empresa Vale S. A., sendo um em estado novo e o outro, fora retirado de serviço.

As etapas deste trabalho foram realizadas no Laboratório de Metalografia e Tratamento Térmico pertencente ao Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais - GPEMAT/UFPA. A metodologia utilizada, pode ser melhor apresentada na Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma esquemático da metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho.

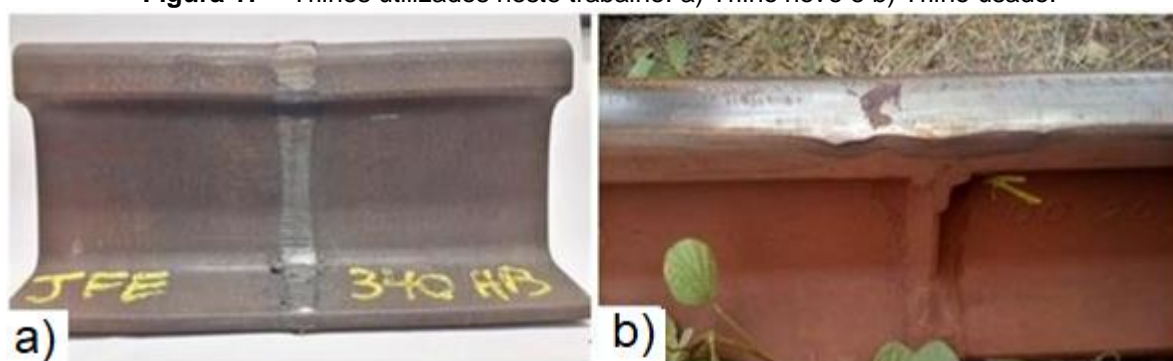


Fonte: Autora, 2022.

3.1 Seleção das amostras

Os trilhos utilizados neste trabalho são apresentados na Figura 17, onde estes são oriundos do projeto Cátedra Roda-Trilho em parceria da Universidade Federal do Pará - UFPA e a companhia Vale S.A., por meio do grupo de pesquisa GPEMAT. O trilho analisado é do tipo Vignole e corresponde a classificação TR-68. A região de interesse corresponde ao boleto, tendo em vista que é onde ocorre o maior contato por parte das rodas ferroviárias.

Figura 17 – Trilhos utilizados neste trabalho. a) Trilho novo e b) Trilho usado.

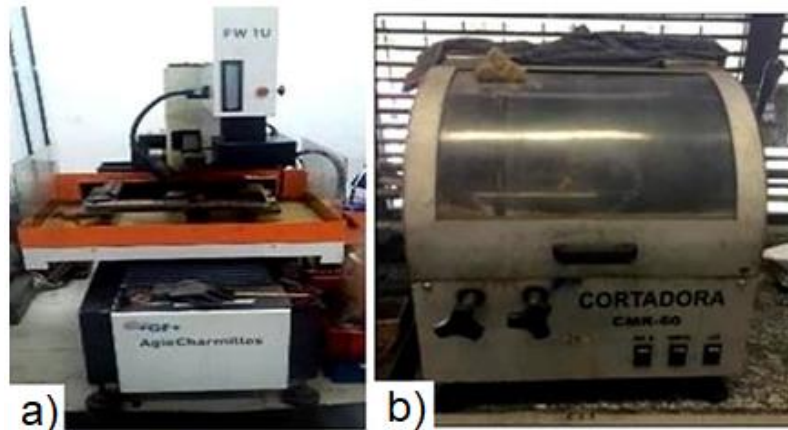


Fonte: Autora, 2022.

3.2 Corte das amostras

Para a etapa de corte das amostras para as caracterizações, estas foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos – LCAM, através do equipamento de eletroerosão à fio (Figura 18a). Outros cortes também foram realizados no laboratório do GPEMAT, mediante uma cortadora metalográfica *cut-off* (Figura 18b).

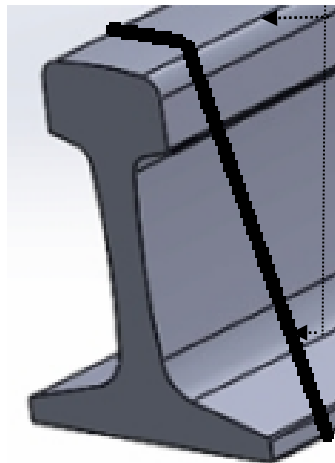
Figura 18 – Equipamentos utilizados, a) Eletroerosão à fio e b) Cortadora *cut-off*.



Fonte: Autora, 2022.

Através do corte por eletroerosão a fio, foram extraídas amostras transversais, conforme esquematizado na Figura 19. Esta amostra obtida é utilizada nos ensaios de dureza e na análise do desgaste no boleto. Para averiguar o desgaste sofrido pelo trilho usado, foram obtidas imagens da seção transversal do mesmo.

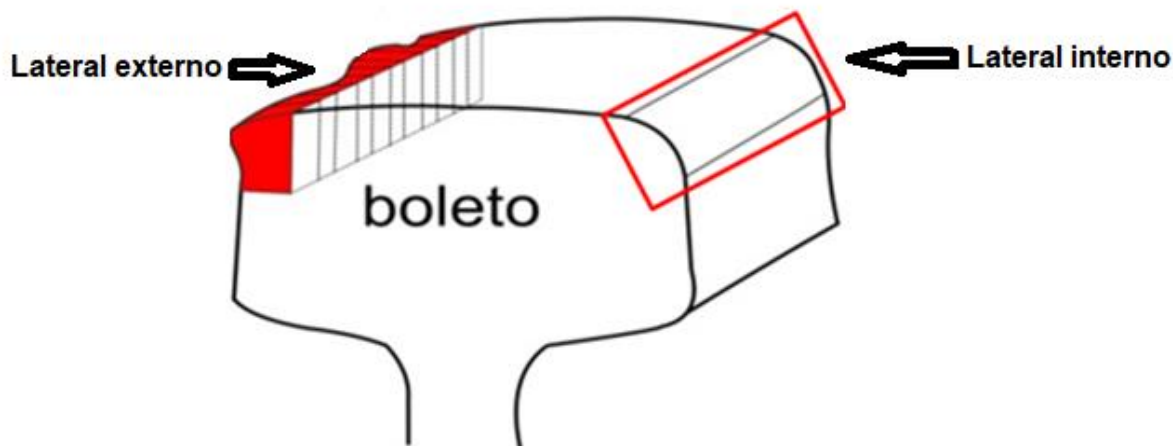
Figura 19 – Corte da seção transversal.



Fonte: Adaptado Porcaro et al., 2019.

Posteriormente, alguns cortes menores foram realizados na região do boleto do trilho desgastado. Na Figura 20, o corte foi realizado na lateral externo do boleto (esquerda) para a caracterização macro e microestrutural. Outro corte, foi na lateral interno (direita), para a caracterização de dureza longitudinal.

Figura 20 – Corte na lateral externo e na lateral interno do boleto.



Fonte: Adaptado Brasil Ferroviário, 2022.

3.3 Composição Química

A composição química dos trilhos ferroviários foi determinada através do espectrômetro de emissão óptica da marca BRUKER®, modelo Q4 TASMAN, como mostra a Figura 21, de propriedade do laboratório do GPEMAT. Como os trilhos correspondentes foram utilizados em trabalhos anteriores pelos autores Miranda, (2020) e Reis *et al.*, (2021), as composições químicas médias serão abordadas neste trabalho.

Figura 21 – Espectrometro de emissão óptica.



Fonte: Autora, 2022.

3.4 Metalografia

As amostras obtidas das seções do boleto para a realização dos ensaios de microdureza e verificação da microestrutura, foram submetidas ao embutimento e tratamento metalográfico, onde foram lixadas com lixas de carbeto de silício em politriz, nas granulometrias 220, 320, 400 e 600 *mesh*.

A seguir as amostras foram lavadas em banho de álcool dentro de uma cuba ultrassônica, a fim de remover quaisquer resquícios de lixa que pudessem influenciar negativamente o processo de polimento. Esta etapa corresponde a utilização da pasta de diamante e o pano de polimento adequado, com o objetivo de tornar a superfície da amostra espelhada e livre de riscos. As granulometrias utilizadas no polimento foram de 6, 3 e 1 μm . A Figura 22, mostra as etapas realizadas na metalografia.

Figura 22 – a) Politriz, b) Cuba ultrassônica e c) Pastas de diamante.



Fonte: Autora, 2022.

O ataque químico foi realizado nas amostras já polidas. Foi utilizado o reagente Nital 3 %, durante 5 segundos e este tempo foi capaz de revelar as microestruturas do material.

3.5 Macroestrutura

A análise macroestrutural foi realizada na região transversais do canto externo do boleto em ambos os trilhos. Para realização da análise, foi utilizado o microscópio estereoscópio da marca Leica Microsystems EZ4 HD, mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Microscópio estereoscópio.



Fonte: Autora, 2022.

3.6 Microestrutura

A microestrutura do trilho usado e do trilho novo foi avaliada utilizando o microscópio óptico da LEICA® modelo DM750-MC120HD, no Laboratório de Ensaio Mecânicos do GPEMAT. A Figura 24, exibe o equipamento utilizado.

Figura 24 – Microscópio óptico.



Fonte: Autora, 2022.

A avaliação da microestrutura objetiva verificar a variação sofrida por influência do uso. Foi realizada a comparação da microestrutura na superfície de contato com a roda ferroviária e em profundidade.

Além disso, para o trilho usado, foram verificadas as microestruturas de regiões que sofreram maior desgaste, as quais apresentaram escoamento lateral, conforma identificada na Figura 18, apresentada anteriormente.

3.7 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados em um equipamento, de modelo DIGITAL DISPLAY ROCKWELL HARDNESS TESTER MODEL 200HRS-150, na Figura 25, configurado na escala Rockwell C (HRC) e baseados na norma ABNT NBR ISO 6508-1 (2019). Esta etapa foi subdividida em duas partes: dureza transversal e longitudinal.

Figura 25 – Durômetro.

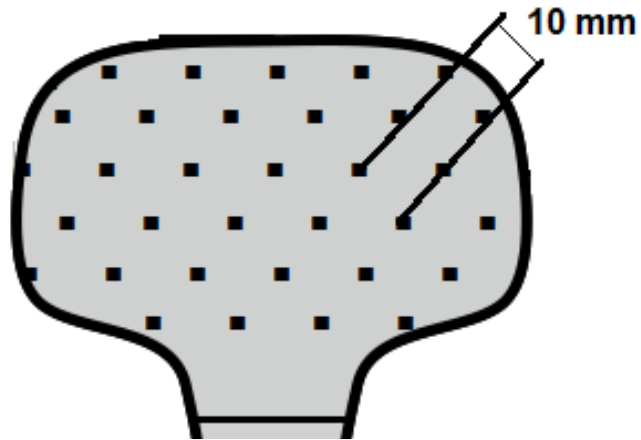


Fonte: Autora, 2022.

3.7.1 Transversal

A metodologia utilizada é baseada no trabalho de Nishikawa (2018) onde são feitas medições de 10 mm na seção transversal no boleto do trilho, obtida por eletroerosão a fio. Utilizou-se o penetrador cone de diamante com 120° de conicidade, com carga de 10 kgf e tempo de 8 segundos. Na Figura 26, mostra o mapa de dureza que foi obtido no trilho usado e no trilho novo, de modo a obter uma comparação dos resultados.

Figura 26 – Mapa de dureza transversal no boleto do trilho.

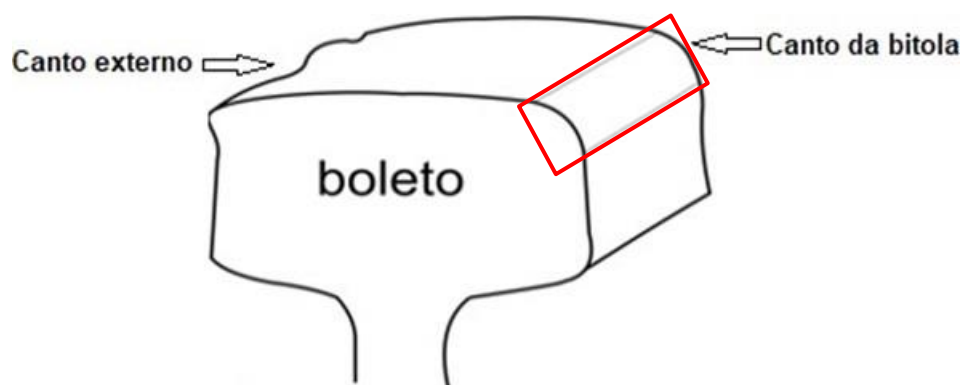


Fonte: Adaptado Nishikawa, 2018.

3.7.2 Longitudinal

Nesta etapa, exclusiva para o trilho usado, buscou-se correlacionar o escoamento e o desgaste lateral no canto da bitola na região do boleto com as propriedades mecânicas de uma região de solda. A Figura 27, mostra a representação gráfica que evidencia o desgaste lateral do boleto.

Figura 27 – Representação gráfica do trilho com desgaste na região do boleto



Fonte: Autora, 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Composição Química

A Tabela 3, apresenta os valores obtidos na análise da composição química da parte superior dos trilhos, o boleto. Obedecendo a norma ASTM A1-00 (2018), foi observado que ambos os trilhos são classificados como hipereutetóides. E de acordo com Pinedo, (2021), os aços hipereutetóides tem uma fração muito baixa de cementita proeutetoide e sempre elevada de perlita, principalmente próximo do teor mais utilizado nos aços de 1,0 % C. Visto que, para Colpaert, (2008), os trilhos ferroviários são utilizados os aços carbonos.

Na Tabela 3, observou-se que o trilho usado apresentou os elementos com maiores teores no aço (carbono, manganês, silício e cromo), visto que, sofreu um enrijecimento no material. Enquanto que o trilho novo, apresentou elementos com menores percentuais. Ambos estão de acordo com a norma.

Tabela 3 – Composição química (%) obtida para os trilhos usado e novo.

Composição Química das amostras de trilhos (%)							
	C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni
Trilho usado	0,877	1,139	0,438	0,252	0,016	0,006	0,026
Trilho novo	0,826	0,772	0,227	0,189	0,016	0,003	0,006

Fonte: Gpemat; Miranda, 2020; Reis, *et al.*, 2021.

Em relação a composição química do teor de carbono (C), que está na faixa dos 0,8 %, sendo de trilhos muito duros de composição hipereutetóides que são mais frágeis, devido ao alto teor de carbono, pois a presença e a quantidade de carbono são atribuídas às propriedades resistência mecânica, resistência ao desgaste, dureza e fragilidade e diminui a soldabilidade da liga (ASM, 1990; BAKKALOGLU 2001).

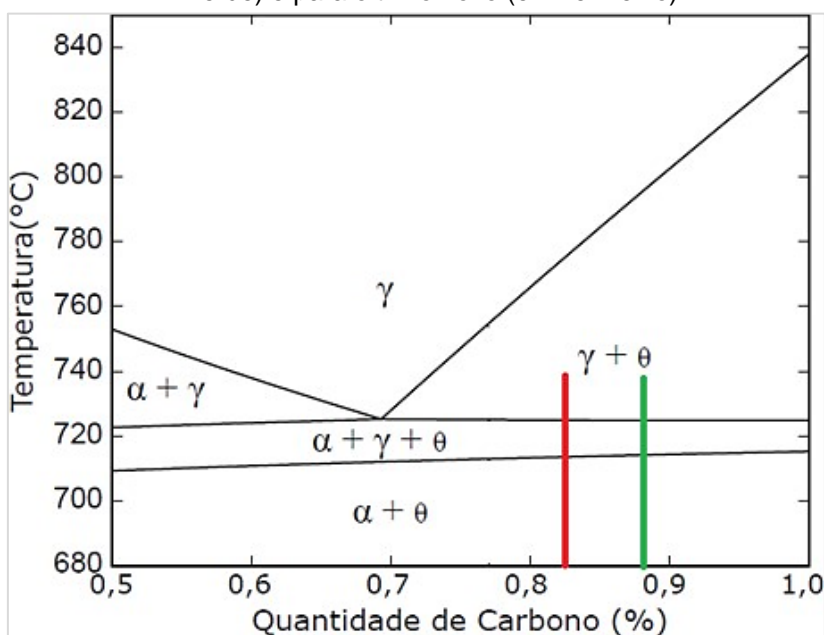
Os outros elementos, como o manganês (Mn), que é associado à alta temperabilidade e do limite elástico, se encontra dentro do limite estabelecido, assim como o silício (Si), que minimiza o efeito do desgaste e, indiretamente, é benéfico às outras propriedades mecânicas, como favorecer o endurecimento da ferrita devido à

solução sólida substitucional sem prejudicar a ductilidade da fase (CHIAVERINI, 2008; SALEH; PRIESTNES, 2001).

O fósforo (P) pode interferir na ductilidade e diminuição a tenacidade à fratura do material e o enxofre (S) permite enfraquecer a ductilidade, reduz a soldabilidade e diminui a tenacidade (BOTELHO, 2011), e o cromo (Cr) em teores maiores pode aumentar a dureza dos trilhos (NISHIKAWA, 2018). Diante disso, não foram encontrados valores fora do limite.

Na Figura 28, o gráfico plotado apresenta a composição de C no diagrama de fases, e notou-se que este situa-se na região hipereutetóide com regiões de equilíbrio entre ferrita (α), austenita (γ) e cementita (θ).

Figura 28 – Faixa de composição química do carbono no diagrama de fases para o trilho usado (em verde) e para o trilho novo (em vermelho).



Fonte: Adaptado de Nishikawa, 2018.

Entretanto, altos teores de carbono no aço é responsável pela elevada dureza, causando fragilidade no material (CHIAVERINI, 2007).

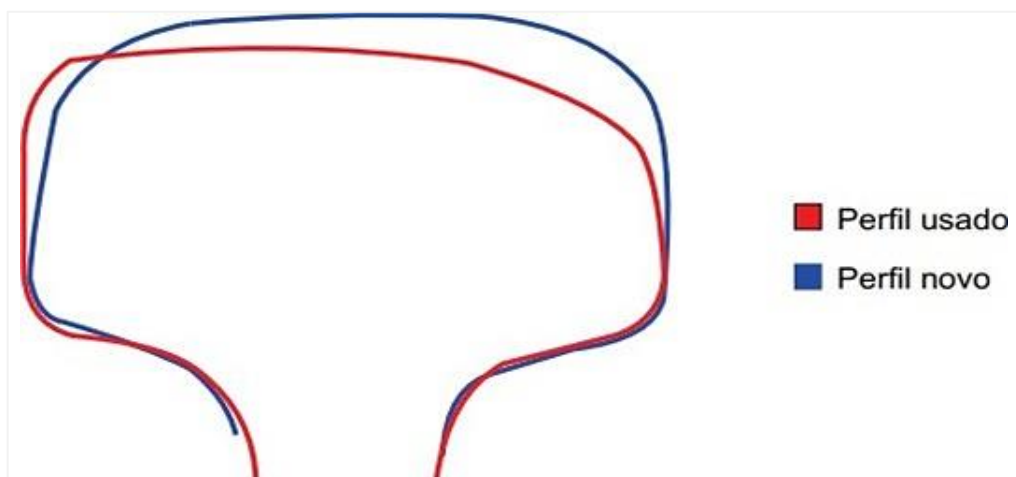
4.2 Análise do desgaste

A Figura 29 e Figura 30, foram amoldadas em folhas milimetrada para evidenciar a diferença dos perfis. Na Figura 29, são exibidas as seções transversais

do trilho novo e usado, uma vez que, o trilho usado, (em vermelho) apresentou mais desgaste no boleto devido ao contato direto das rodas ferroviárias.

A região do canto direito da bitola apresenta um maior desgaste, causando uma assimetria no perfil. Percebeu-se que na comparação do esquema em azul e em vermelho, há evidências que comprovam esta diferença.

Figura 29 – Esquema evidenciando o desgaste nos trilhos novo e usado



Fonte: Autora, 2022.

Em relação ao trilho usado, a sua seção transversal difere da seção do trilho novo, no que diz respeito ao desgaste e ao escoamento de material, formando uma espécie de “língua” na região do canto externo, conforme exhibe a Figura 30.

Figura 30 – Escoamento do canto externo do trilho.

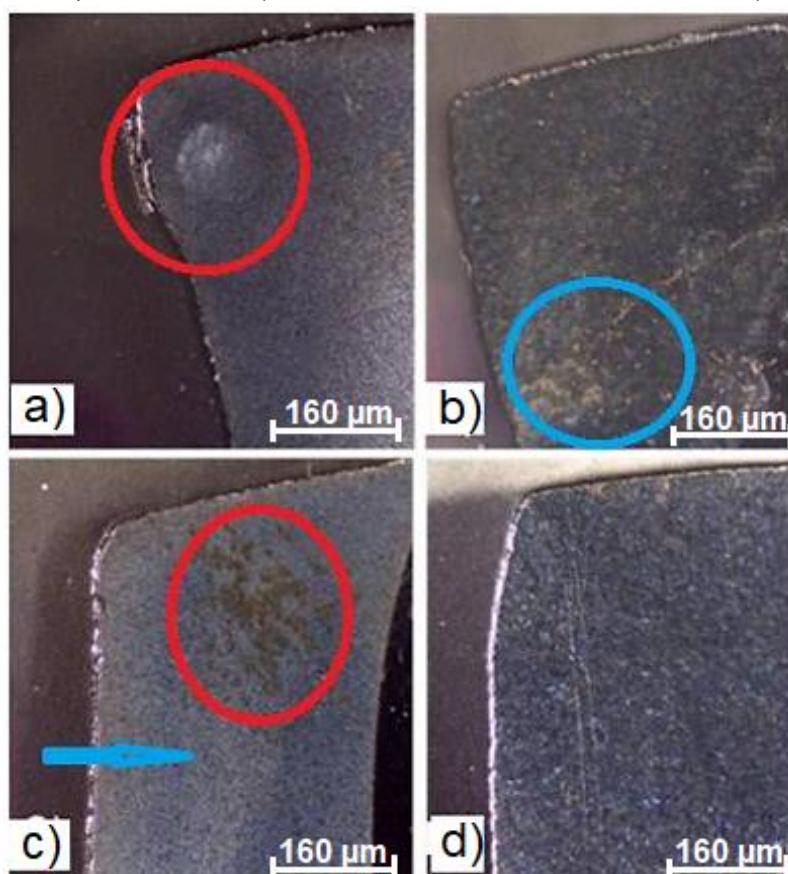


Fonte: Autora, 2022.

4.3 Macroscopia

Através das macrografias das amostras transversais do canto externo do boleto do trilho usado, foram analisadas as imagens obtidas com aumento original de 16x, Figura 31, e foi possível observar um maior escoamento das amostra a) e b), localizadas na região da Zona Termicamente Afetada. A amostra c) pertence à região do metal de base do trilho e a amostra d) corresponde ao centro da solda aluminotérmica.

Figura 31 – Escoamento do canto externo do trilho para as amostras a) e b) localizadas na ZTA esquerda e direita, respectivamente, c) localizada no metal de base do trilho e d) no centro da solda.



Fonte: Autora, 2022.

Nas regiões próximas da solda, geralmente apresentam-se alterações microestruturais claras (NISHIKAWA, 2018). Na Figura 31a, por ser próxima da região da ZTA, houve uma mudança de coloração na área, devido ao aquecimento das áreas de proximidades com a solda e isso provocou o surgimento de uma região com descontinuidades microestruturais. Além disso, pode-se destacar indicado em vermelho, pequenos lascamentos de ataque térmico de oxidação, no canto externo

do boleto do trilho usado, em virtude da exposição as intempéries.

Na Figura 31b, percebeu-se uma mancha amarelada, devido aos indícios de corrosão e a presença de grãos maiores, devido estar próximo do cordão da solda. Já na Figura 31c, observou-se também indícios de corrosão. Na indicação em azul, quando comparado com a literatura de Mansori; Monshi (2004 apud PORCARO, 2017), mostrou-se os grãos mais refinados por está longe da solda, devido a diminuição no gradiente de temperatura e com o decair da temperatura de pico, ocasionou a diminuição de crescimento de grãos.

A Figura 31d, em comparação com (MANSOURI; MONSHI, 2004), apresentou evidências que está próximo do cordão da solda, pois em virtude do aumento da energia térmica, houve o crescimento total da microestrutura (grãos maiores) quando esta passou pela austenitização durante o processo de transformação.

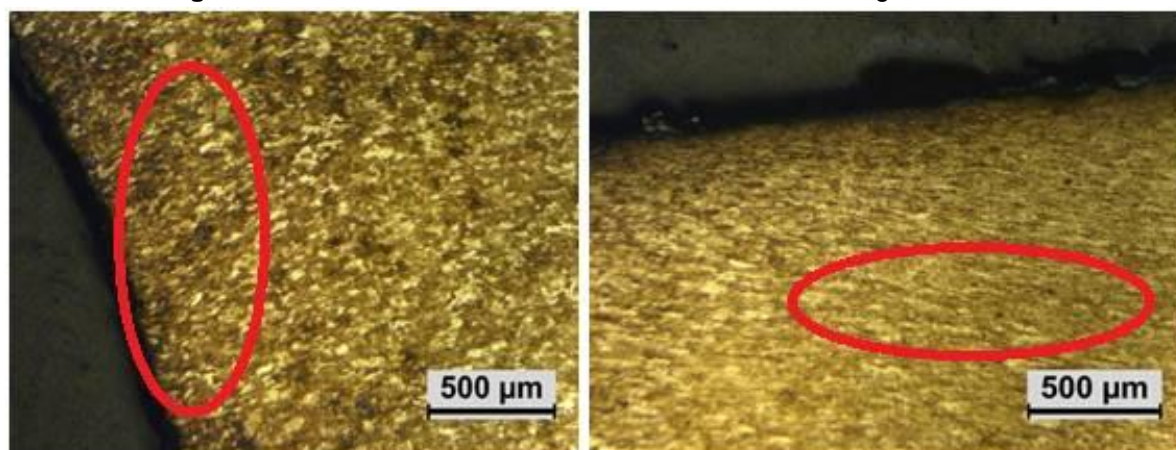
A partir da comparação dos resultados dos trilhos, na análise do trilho novo, observou que não houve modificações estruturais nas amostras transversais no canto externo do boleto, ou seja, não sofreu influência significativas nas dimensões do corpo de prova. Além disso, por se tratar de um trilho que não foi exposto em serviço, a superfície do boleto não apresentou nenhuma evidência de alteração.

4.4 Microscopia Óptica

A microestrutura predominante dos trilhos ferroviários é perlítica, como foi confirmada pelas literaturas de Miranda et al, (2020) e Rezende *et al.*, (2020, p. 01, grifo do autor) e pela composição química obtida.

Mediante a análise da microestrutura da lateral esquerda do boleto no trilho usado, Figuras 32, nas indicações em vermelho, observou-se que a ZTA apresenta um maior refino na microestrutura, provavelmente devido o aporte térmico sofrido nesta região e nisso ocorre a recristalização do grão para uma perlita mais refinada.

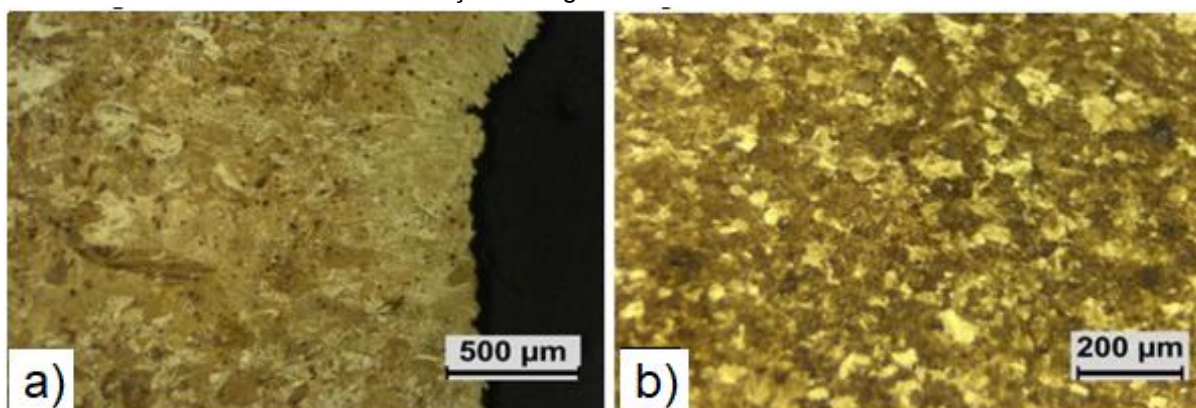
Figura 32 – Microestrutura da amostra do trilho usado na região da ZTA.



Fonte: Autora, 2022.

Quando comparado com as literatura (MANSOURI; MONSHI, 2004). Nas Figuras 33, a microestrutura obtida está mais evidente os tamanhos de grãos como mostra na Figura 33a, devido esta região ter sido submetida aos maiores picos de temperatura e isso promoveu o crescimento de grão austenítico, Figura 33b.

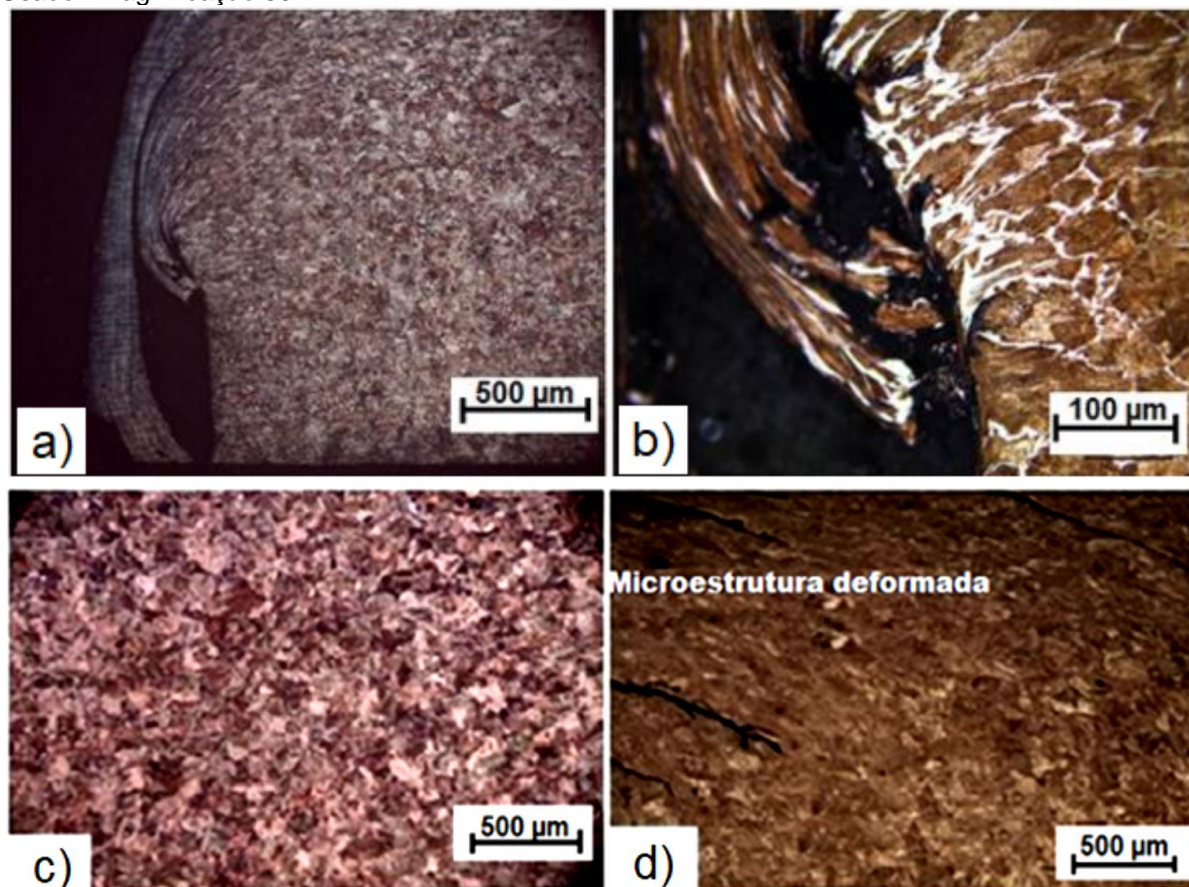
Figura 33 – Microestrutura do trilho usado a) Evidenciou grãos maiores e b) Crescimento de grãos austeníticos. Identificação da Figura 28d localizada no centro da solda.



Fonte: Autora, 2022.

Além disso, a Figura 34 mostra uma análise mais detalhada da região de escoamento, esta exibe a formação de trincas provenientes do desgaste sofrido nesta região, Figura 34a. A microestrutura, Figura 34b, é composta pela perlita e traços de ferrita próeutetóide. A Figura 34c e 34d, mostra a microestrutura do trilho novo em comparação com o trilho usado, respectivamente.

Figura 34 – Microestrutura da região da amostra localizada na ZTA, a) Região de escoamento e b) Presença de ferrita - próeutetóide e propagação de trincas. Microscopia óptica dos trilhos c) Novo e d) Usado. Magnificação 50x.



Fonte: Autora, 2022.

Na Figura 34a e Figura 34b, notou-se que as trincas que crescem nesta região, apresentam uma preferência em se propagar por esta ferrita dos contornos de grãos, ou seja, contornos corroídos e abrindo revelam corrosão intergranular. Conforme a literatura de Giraldo, (2006), as causas dessa deformação, revela a teoria de empobrecimento no teor de cromo nas vizinhanças do carboneto e nitreto, precipitados nos contornos de grão.

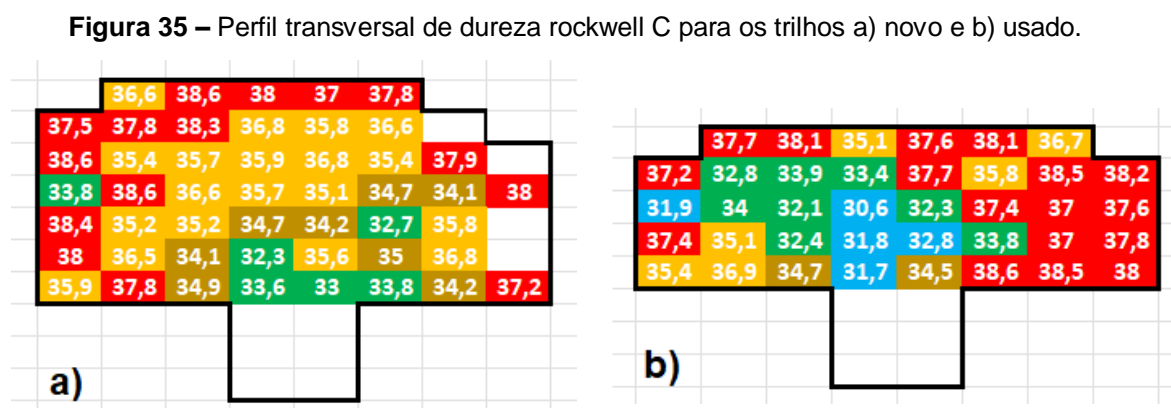
Na Figura 34c e Figura 34d, respectivamente, observou-se uma diferença por ser tratar de um trilho novo, ou seja, não foi encontrado evidências de desgaste e Figura 34d, foram encontradas tensões, apresentando trincas devido o contato roda-trilho com deformação na superfície da sua microestrutura, causadas por fadiga.

4.5 Dureza

4.5.1 Comparação da dureza transversal para o trilho novo e usado.

A Figura 35 apresenta os resultados obtidos do ensaio de dureza *Rockwell* da seção transversal do trilho novo (a) e do trilho usado (b). No trilho novo, a Figura 35a, a distribuição de dureza ficou em uma variação entre os limites de 33,8 HRC e 38,6 HRC para qualquer profundidade, o que demonstrou uma maior uniformidade e os maiores valores na superfície do boleto entre 37 e 38 HRC, que certamente é resultado de esforço mecânico, originado de ensaio de resistência e dureza na etapa de análise de qualidade, após fabricação.

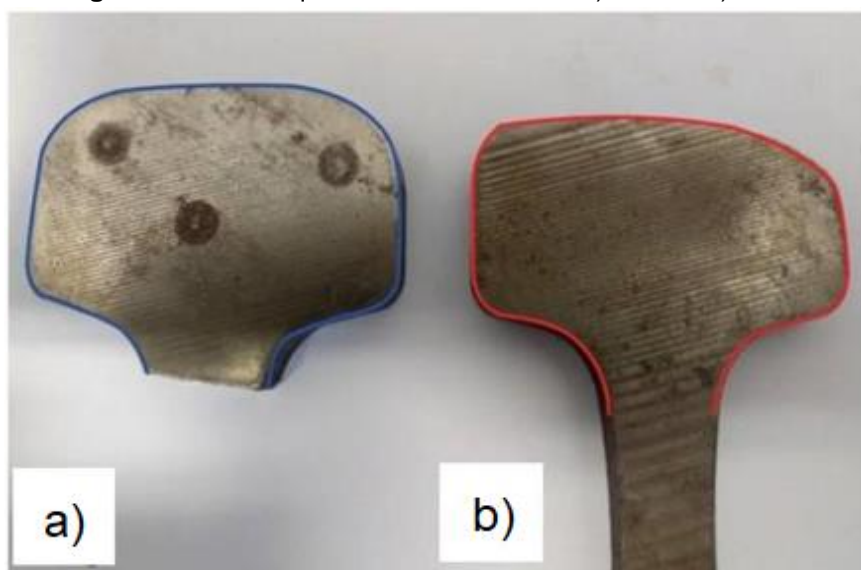
Em relação a Figura 35b, para o trilho usado, observou-se uma variação de dureza na superfície. Mas na superfície do boleto apresentou uma menor dureza em dois pontos, nas regiões da superfície de rolamento e o canto da bitola, na faixa de 35,1 e 36,7 HRC. Esta redução dos valores apresentou o mesmo comportamento, gradual em direção ao centro do boleto. Segundo (VIDON *et al.*, 2022), provavelmente, há uma existência de dois pontos de contato, consequência de um desgaste causado por um deslizamento em caso de curvas.



Fonte: Autora, 2022.

Na Figura 36, as consequências do uso são visíveis na região lateral do canto da bitola, como pode ser bem visualizado na Figura 35b, onde se concentrou uma região com dureza de 37,6 HRC e chegando em valores de 38,6 HRC.

Figura 36 – Consequência do uso do trilho a) novo e b) usado.



Fonte: Autora, 2022.

Esta concentração de valores maiores de dureza no canto da bitola comparando com a literatura de Marich (2005 apud BRIGUENTE, 2013) são um indicativo do encruamento sofrido devido as tensões induzidas pela passagem da roda ferroviária, as quais causam deformação mais acentuada nesta região de contato.

4.5.2 Dureza longitudinal na região da solda

A Figura 37 apresenta a superfície de um trilho utilizado em serviço, e que exibiu uma deformação no boleto conhecida como “dente de vampiro”, esta deformação apresenta duas regiões que possuem queda nos valores de dureza, simetricamente em relação ao centro da solda (posição 0 mm). Comparando com a literatura de (PORCARO, 2017).

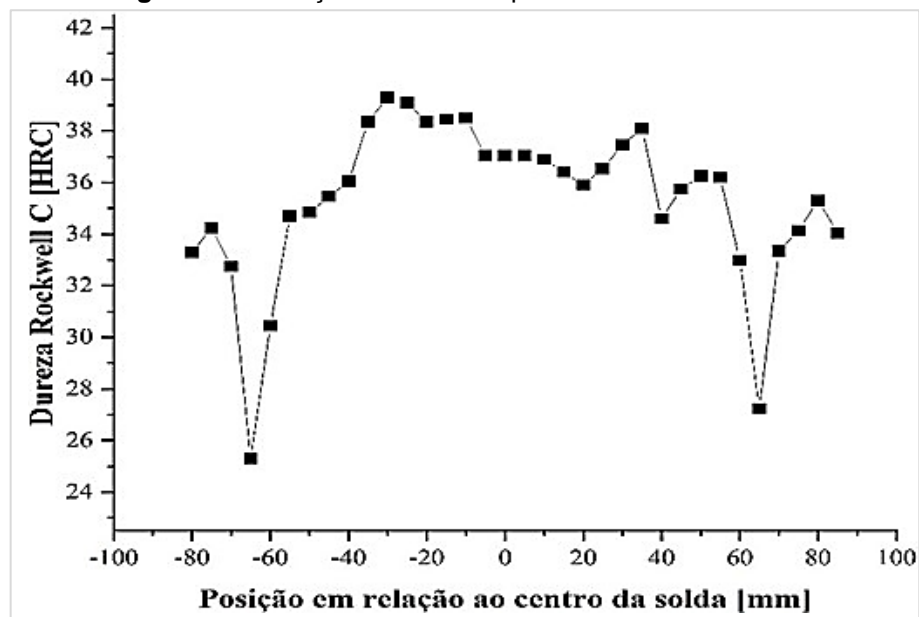
Figura 37 – Perfil longitudinal de dureza Rockwell C na região do escoamento, que abrange a solda aluminotérmica.



Fonte: Aatoria, 2022.

Através da Figura 38, é visível a presença de dois “vales” com menores durezas, que são bem comuns em soldas aluminotérmicas.

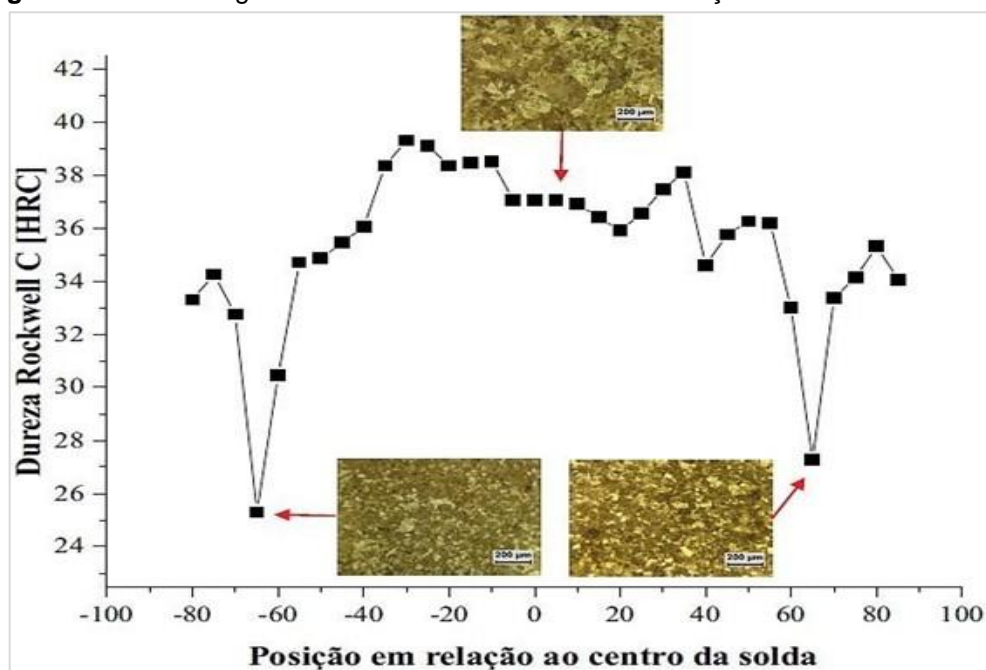
Figura 38 – Posição 0 mm corresponde ao centro da solda.



Fonte: Aatoria, 2022.

Para melhor entendimento, a justificativa relaciona-se com a ZTA a qual exhibe menores valores de resistência mecânica. A partir da correlação com a microestrutura observada, notou-se uma microestrutura perlítica menos grosseira na ZTA quando comparada com a perlita do centro da solda, conforme Figura 39.

Figura 39 – Perfil longitudinal de dureza Rockwell C e correlação com a microestrutura.

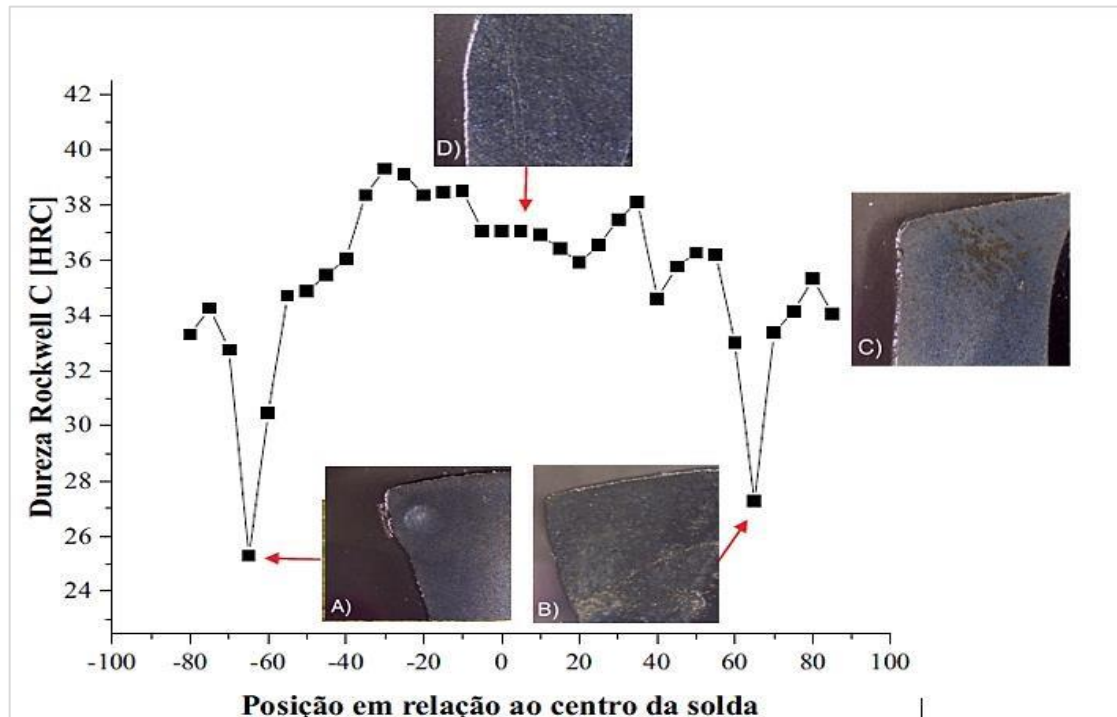


Fonte: Autora, 2022.

Estes resultados também foram observados por (MIRANDA, 2020) o qual justifica o fenômeno como sendo devido a faixa de temperatura sofrida na ZTA, que ocasiona a esferoidização da cementita, evidenciando a microestrutura mais refinada. Inclusive o autor cita que esta região é mais susceptível à defeitos no trilho ferroviário. De acordo com a literatura de Fegredo *et al.*, (1993), esse tipo de estrutura esferoidizada deve ser evitada, pois alcança na perda de resistência mecânica e possui resistência ao desgaste inferior a estrutura perlítica.

Desta forma, na Figura 40, pode-se correlacionar também a região de menor dureza com a região de maior escoamento no canto externo do trilho, uma vez que o material apresenta menor resistência mecânica, e é mais susceptível à deformação plástica.

Figura 40 – Perfil longitudinal de dureza Rockwell C e correlação a macroestrutura.



Fonte: Autora, 2022.

No item A e B, que estão localizadas nos vales, aproximadamente entre 26 e 28 HRC, apresentaram menor dureza devido as maiores alterações na região de escoamento.

No item C, aproximadamente 34 HRC, apresentou dureza mediana em comparação aos demais resultados, devido aos grãos mais refinados por está longe da solda.

No item D, aproximadamente 38 HRC, apresentou dureza elevada, devido está localizada no centro da solda aluminotérmica, ou seja, encontra-se em uma região de pico de temperatura, causando grãos maiores.

A dureza do trilho, sendo transversal ou longitudinal, pode variar de forma durante a vida útil em razão do encruamento ocasionado pela constante contato roda-trilho (SILVA, 2017).

5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho avaliou as características microestruturais e mecânicas dos trilhos ferroviários, analisando um trilho usado que obteve modificações durante o período que esteve em serviço e comparando com o trilho novo originado de fábrica.

Na composição química, os trilhos novo e usado não apresentaram modificações significativas em relação aos elementos de liga. O teor de carbono foi 0,8 %, os trilhos tratam-se de aço hipereutético. Dessa forma, concluí-se que são muito duros e frágeis.

Na análise macroestrutural do trilho usado, apresentaram-se alterações de colorações claras, por se tratar de uma região próxima da ZTA. Constatou-se, lascamentos de oxidação no canto externo do boleto e nas áreas amareladas indícios de corrosão. Além disso, apresentaram alterações nos tamanhos dos grãos.

A análise macroestrutural do trilho novo, não apresentou modificações na superfície do boleto.

A análise microestrutural dos trilhos é perlítica. No trilho usado, localizadas na ZTA esquerda, apresentou maior refino na microestrutura devido o aporte térmico. Em vista que, constatou-se trincas nos contornos de grãos, revelando corrosão intergranular. Nas áreas esbranquiçadas, mostra traços de ferrita proeutetóide.

Na análise de dureza transversal do trilho novo, constatou valores maiores na superfície do boleto variando entre 37 e 38,6 HRC, originado por esforço mecânico como teste de resistência, impacto e dureza.

Na análise de dureza transversal do trilho usado, apresentou menor dureza na superfície do boleto com valor de 35,1 HRC. Na superfície em direção a região do canto direito da bitola, notou-se uma oscilação de valores entre 35,1 a 36,7 HRC. Essa variação de dureza acredita-se ser de uma existência de dois pontos de contato, causado por encruamento devido a caso de curvas.

Na análise de dureza longitudinal na região da solda do trilho usado, observou-se duas regiões de queda nos valores dureza originando um desgaste conhecido como “dente de vampiro”. Além disso, pode-se correlacionar uma menor dureza com região de maior escoamento que são capazes de deformar a região plástica do material.

O trilho novo não apresentou deformações na microestrutura da superfície do boleto. Mas foi reprovado por apresentar valores de dureza mais elevada.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos, tem-se o interesse em aprofundar os estudos deste trabalho e desenvolver novas pesquisas: que são sugeridas a seguir:

- Realizar a microdureza do aço em escala Vickers – HV, para realizar um grau de dureza precisa;
- Realizar o ensaio de tração nas regiões dos boletos, obedecendo a norma ASTM E8/E8M – 21, para analisar o limite de resistência;
- Realizar MEV nas regiões estudadas, a fim de comparar as microestruturas.

REFERÊNCIAS

ASM Handbook. **Properties and Selection: Irons, Steel, and High-Performance Alloys**. Vol. 1. EUA, 1990

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7590: Trilhos vignole – requisitos. Comitê: Metroferroviário**, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11710: Trilhos vignole. Comitê: metroferroviário**. Ano de publicação 1979. Cancelada com substituição 07/2012.

ANTF. **ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS** Disponível em: <https://www.antf.org.br/associadas>. Acesso em: 19 de dezembro de 2020.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6508-1:2019**. Materiais Metálicos – Ensaio de Dureza Rockwell Parte 1: Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

ALVES, C. A. E. L. **Avaliação do Ciclo de Vida do Produto: Com Foco em Trilhos Ferroviários**. Brazcubas Educação. São Paulo, 2019. 24 p.

BAKKALOGLU, A. **Effect of processing parameters on microstructure and properties of an Nb microalloyed**. Materials Letters. 56:200-209, 2001.

BARBOSA, S. A. **Análise de Confiabilidade dos Trilhos do Túnel MonteSeco L1**. Universidade federal do Paraná. Curitiba, 2017. 65 p.

BAURI, L. F. **Soldagem de topo com centelhamento de trilhos ferroviários: caracterização microestrutural, propriedades mecânicas e desgaste**. São Paulo, 2020.

BORGES, B. G. **Ferrovia e Modernidade**. Dossiê Ferroviários. Revista UFG. Góias, 2011. 10 p.

BOTELHO, V. **Influência dos elementos de liga nas propriedades do aço**. Literatura Mecânica, o seu guia de conhecimento sobre mecânica, 2011. Disponível em: <https://literaturamecanica.wordpress.com/2011/06/14/influencia-dos-elementos-de-liga-nas-propriedades-do-aco/>. Acessado em: 14 de setembro de 2021.

BRIGUENTE, C. A. **Caracterização microestrutural e mecânica de trilhos ferroviários soldados de topo por caldeamento**. Dissertação. São Paulo, 2013. 48 p.

BRASIL FERROVIÁRIO. **História da Ferrovia no Brasil**: Disponível em: www.brasilferroviario.com.br/historia-da-ferrovia-no-brasil, 2020.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo, 2007. 6 ed. 219 p.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

CMK Global Service. **Solda Aluminotérmica**. Disponível em: <https://cmk.com.br/solda-aluminotermica>. Acessado em: 29 de novembro de 2022.

COIMBRA, M. V. **Modos de falha dos componentes da via permanente ferroviária e seus efeitos no meio ambiente**. Rio de Janeiro. Instituto Militar de Engenharia, 2008.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Revisão técnica. 4^o Edição. São Paulo: Blucher, 2008.

CSN. **Companhia Siderúrgica Nacional**. Disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/29633c0023f747659594926012179477/8d29b3ef-957e-eeee-775f-40e16e0ca522?origin=1>. Acessado em: 14 de setembro de 2021.

COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. **Manual de Defeitos em Trilhos**. Estrada de Ferro Carajás. Engenharia da Via Permanente – GAVIN, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). Fonte: **Histórico: Incentivos do Governo Federal**: Disponível em: www.dnit.gov.br/modais-2/ferroviarias, 2020.

DUTRA, Q. F. D. S. **Avaliação do impacto do gerenciamento de atrito rodar-trilho**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014. 24 p.

EKBERG, A., AKESSON, B., & KABO, E. (2014b). **Wheel/rail rolling contact fatigue: Probe, predict, prevent**. *Wear*, 2-12.

FEDORKO G.; MOLNÁRB V.; BLAHOC P.; GAŠPARÍKD J.; ZITRICKÝ V. **Failure analysis of cyclic damage to a railway rail – A case study**. *Engineering Failure Analysis*. Eslováquia, 2020.

FEGREDO, D.; KALOUSEK, J.; SHEHATA, M. **The effect of progressive minor spheroidization on the dry-wear rates of a standard carbon and a Cr-Mo alloy rail steel**. *Wear*, Elsevier, v. 161, n. 1-2, p. 29 – 40, 1993.

FILHO, H. R. D. P. **Transporte ferroviário: há futuro para uma logística mais eficiente e com mais qualidade?** *Revista AdNormas*. Publicado em 4 de dezembro de 2018. Disponível: <<https://revistaadnormas.com.br/2018/12/04/transporte-ferroviario-ha-futuro-para-uma-logistica-mais-eficiente-e-com-mais-qualidade>>. Acesso em: 03 de janeiro de 2020.

FINAMON, F. P.; FONSECA, S. T.; MINICUCCI, D. J.; GOLDENSTEIN, H.; SINATORA, A.; MEI, P. R. **Influência da adição de nióbio e molibdênio na decomposição isotérmica da austenita em aço 0,7%**. 70^o Congresso Anual Abm

Week. Outubro, 2017.

FTC. **Ferrovias Tereza Cristina**. HISTÓRIA - The Donna Thereza Christina Railway Company Limited. Disponível em: <https://www.ftc.com.br/historia>. Acessado em: 14 de setembro de 2021.

GODEFROID, L. B., SOUZA, A. T., PINTO, M. A. **Fracture toughness, fatigue crack resistance and wear resistance of two railroad steels**. Journal of Materials Research and Technology, Volume 9, Issue 5, 2020.

GPEMAT; MIRANDA, G. **Influência da variação microestrutural induzida pela soldagem aluminotérmica nas características do defeito head check em trilhos ferroviários**. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará. 2020.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. (Butterworth-Heinemann, 2017).

IGNARRA, J. C. **Como a privatização corrompe a memória da rede ferroviária federal**. Biblio cultura informacional. Rio de Janeiro, 2018.xdfff

LEWIS, R.; OLOFSSON, U. **Wheel-rail Interface Handbook**. Elsevier, 2019.

LIU, J. P.; LI, Y. Q.; ZHOU, Q. Y.; ZHANG, Y. H.; HU, Y. SHI, L. B.; WANG, W. J.; LIU, F. S.; ZHOU, S. B.; TIAN, C. H. **New insight into the dry rolling-sliding wear mechanism of carbide-free bainitic and pearlitic steel**. Metals and Chemistry Research Institute, Beijing, China, 2019.

LORENZ, G. **Estudo das manutenções e desgastes decorrentes do tráfego dos veículos ferroviários nos trilhos da via permanente da TRENURB**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2018.

MACÊDO, F. B. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários**. Monografia. Universidade Federal de Juiz de Fora. Minas Gerais, 2009.

MAGEL, E.; MUTTON, P.; EKBERG, A.; KAPOOR, A. **Rolling contact fatigue, wear and broken rail derailments**. *Wear*, v. 366, p. 249-257, 2016.

MANSOURI, H.; MONSHI, A. **Microstructure and residual stress variations in weld zone fo flash-butt welded railroads**. Science and Technology of welding and Joining. 2004; 9(3); 237-246. <<http://dx.doi.org/10.1179/136217104225012201>>.

MANUAL TÉCNICO DA VIA PERMANENTE. **Resumo**, 2009. Vale.

MASOUMI, M.; SINATORA, A.; GOLDDENTEIN, H. **Role of microstructure and crystallographic orientation in fatigue crack failure analysis of a heavy haul railway rail**. Universidade Federal do ABC. São Paulo, 2019.

MRS. **Malha Regional Sudeste Logística S/A**. Guia de identificação de defeitos e

fraturas em trilhos, 2008.

MASSA. Pesagem e automação industrial: **Entenda sobre os desgastes dos trilhos ferroviários**. Publicado, 27 de julho de 2020. Disponível em: <<https://massa.ind.br/trilhos-ferroviarios/>>. Acesso em: 03 de novembro de 2020.

MRS. **Uma ferrovia de padrão internacional**. Disponível em: <<https://www.mrs.com.br/empresa/quem-somos/>>. Acessado em 14 de setembro de 2021.

NISHIKAWA, L. P. **Soldagem de Trilhos Ferroviários Perlíticos: Origem das Microestruturas**. 2018. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2018.

NUNES, I. **Do público ao privado: a transição do modelo de negócios ferroviários no Brasil 1930 - 2015**. Revista transporte y Território, São Paulo, 2019. 25 p.

OLIVEIRA, G. F. R. **Caracterização macro e microestrutural e levantamento do perfil de dureza da região da solda e afetada pela solda de trilhos com diferentes perfis de desgaste soldadas por aluminotermia**. Monografia. Universidade Federal de Juiz de Fora. Minas Gerais, 2019.

PINEDO, C. E. **Tratamento térmicos e superficiais dos aços**. Blucher; São Paulo, 2021.

PORCARO, R. R.; ARAÚJO, F. C.; GODEFROID, L. B.; FARIA, G. L.; SILVA, L. L.; **Simulação do processo de soldagem elétrica por centelhamento de um aço para trilhos ferroviários. Parte 1: análise de tensões residuais via elementos finitos**. Soldagem & Inspeção. 2019;24:e2412. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.12>.

PORCARO, R. R.; LIMA, D. A. P.; FARIA, G. L.; GODEFROID, L. B.; CÂNDIDO, L. C. Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço para Trilhos Ferroviários Soldado por Centelhamento. Soldagem e Inspeção. v. 270, p. 20-27, 2017.

RAMOS, G. S.; KÜLITZ, H. R.; TAFFNER, M. B. **Prototype of a rail wear measuring system using digital image processing**. IEEE Latin America Transactions, v. 17, n. 04, p. 582-589, 2019.

REAL, C. G. T.; SAMPAIO, G. G.; MORAIS, W. A. **Adequação do processo de fabricação de juntas aluminotérmicas para trilhos ferroviários – Avaliação***. Volume 70. 70º Congresso Anual da ABM. Rio de Janeiro, RJ, 2017.

REIS, R. C. **Aplicação de solda aluminotérmica em fratura de trilho para diminuição de descarrilamentos em vias férreas**. Projeto de pesquisa. Centro Universitário do Sul de Minas. Varginha, 2021.

REIS, V. S.; SANTOS, C. V. P.; MIRANDA, G. O.; MESQUITA, S. Q.; SANTOS, C. I. O.; QUARESMA, J.M.V. **Investigação dos mecanismos de defeitos de um trilho**

ferroviário soldado por centelhamento. Em 11º Congresso brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF. PR. Brasil. 2021.

REZENDE, A. B.; FONSECA, S. T.; FERNANDES, F. M.; MIRANDA, R. S.; GRIJALBA, F. A. F.; FARINA, P. F. S.; MEI P. R. **Wear behavior of bainitic and pearlitic microstructures from microalloyed railway wheel steel.** University of Campinas, School of Mechanical Engineering, 2020.

RIBEIRO, R. L. P. **Análise automática de Normas Aplicada em Projeto Geométrico de Superestrutura Ferroviária.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas, 2018. 5 p.

RIVES, F. O.; PITA, A. L.; PUENTE, M. J. M. **Tratado de ferrocarriles I via.** Madrid:Rueda, 1977.

RONEY, M. **Guidelines to best practices for heavy haul railway operations.** International Heavy Haul Association. Australia, 2009.

RUMO. **Transportes ferroviários. Commodities agrícolas.** Disponível em: <<https://rumolog.com/nossos-negocios/transporte-ferroviario/>>. Acessado em: 14 de setembro de 2021.

SALEH M. H.; PRIESTNER, R. **Retained Austenite in Dual-Phase Silicon Steels and its Effect on Mechanical Properties.** Journal of Materials Processing Technology, 113, p. 587-593, 2001

SARTORI, M. **Caracterização Mecânica e Metalúrgica de Soldas Aluminotérmicas em Trilhos Ferroviários.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010. 8 p.

SCHNEIDER, E. L. **Análise da vida remanescente de trilhos com defeitos transversais desgastados em serviços.** Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005.

SERNA-GIRALDO, C. A.; ALONSO-FALLEIROS, N. **Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico UNS S43000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensitização.** 2006. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SILVA, A. L. V. C; MEI, P. R., **Aços e ligas especiais.** 3º Edição, Edgard Blucher, São Paulo, 2010.

SILVA, C. M. **Perfil de dureza e composição química da solda e regiões afetadas pela solda aluminotérmica de trilhos empregados por uma empresa mineradora.** Monografia. Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora. Minas Gerais, 2017.

SINCHOLD ENGENHARIA PORTUÁRIA. **Como garantir a segurança de pista de trem e mantê-lo a ficar longe de desgaste do trilho de aço?** Julho 10, 2017. Disponível em: ><http://pt.sincholdrail.org/info/how-to-ensure-train-track-security-and->

keep-it-19978174.html

VIDON, F. O.; JÚNIOR, W. V.; SERPA, J. C. **Aumentando a vida útil dos trilhos através do Gerenciamento da Interface Roda-Trilho.** Coordenação de Equipamentos Especiais, MRS Logística S.A., Juiz de Fora – MG. Disponível em: <http://www.chvidon.com.br/downloads/public/Aumentando%20a%20vida%20util%20dos%20trilhos%20atraves%20do%20Gerenciamento%20da%20Interface%20Roda%20Trilho%20full.pdf>. Acessado em 27 de janeiro de 2022.

VLI. **Conexões que geram valores. Logística integrada agricultura.** Disponível em: <https://www.vli-logistica.com.br/conheca-a-vli/o-que-fazemos/>. Acessado em 14 de setembro de 2021.

ZHU, Y.; WANG, W.; LEWIS, R.; YAN W.; LEWIS, S.R. DING, H. **Uma revisão sobre o desgaste entre rodas e trilhos de ferrovia sob condições ambientais.** J. Tribol. Trans. ASME , 141 (de 2019) , pp. 120.801 – 120813.