



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

CARLOS CÍCERO REIS ANDRADE

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, MECÂNICAS E  
METALGRÁFICAS DO DEFEITO DE CANOAMENTO EM SOLDA POR  
CENTELHAMENTO DE TRILHOS FERROVIÁRIOS**

Ananindeua  
2021

CARLOS CÍCERO REIS ANDRADE

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, MECÂNICAS E  
METALOGRÁFICAS DO DEFEITO DE CANOAMENTO EM SOLDA POR  
CENTELHAMENTO DE TRILHOS FERROVIÁRIOS**

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 Bacharel em Engenharia de Materiais.

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

Ananindeua  
2021

**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)**

---

A553a Andrade, Carlos Cícero Reis.  
Avaliação das características químicas, mecânicas e metalográficas do defeito de canoamento em solda por centelhamento de trilhos ferroviários / Carlos Cícero Reis Andrade. — 2021.  
74 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
Coorientador(a): Ma. Brenda Thayssa Figueira Daniel  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -  
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2021.

1. Propriedades. 2. Transporte. 3. Trilhos ferroviários. 4. Soldagem. I. Título.

---

CDD 625.1

CARLOS CÍCERO REIS ANDRADE

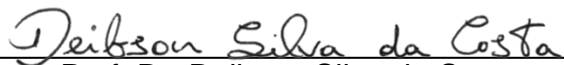
**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, MECÂNICAS E METALOGRAFICAS DO DEFEITO DE CANOAMENTO EM SOLDA POR CENTELHAMENTO DE TRILHOS FERROVIÁRIOS**

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 Bacharel em Engenharia de Materiais.

Data da Avaliação: 28 / 09 / 2021.

Conceito: Excelente.

**BANCA EXAMINADORA:**



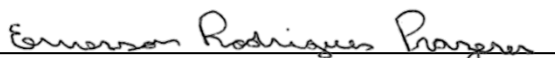
Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
(FEMat - CAMPANIN - UFPA - Orientador)



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



Prof. Me. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro  
(FEMat - CAMPANIN - UFPA - Examinador Interno)



Me. Emerson Rodrigues Prazeres  
(PRODERNA - ITEC - UFPA - Examinador Externo)

Dedico este trabalho a minha mãe.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pelo dom da vida e a toda espiritualidade que me guia. Agradeço por todas as bênçãos, conselhos e confiança de todos os meus guias espirituais.

Agradeço a toda minha família, em especial a minha mãe Carmem Reis que sempre me apoiou e me incentivou a progredir nos estudos, participando de cada etapa desse sonho. Ao meu pai Antônio Andrade pelos ensinamentos e incentivos e ao meu irmão Antônio Neto por toda ajuda e apoio necessários na minha formação acadêmica.

Agradeço à Faculdade de Engenharia de Materiais - FEMat, por todo conhecimento e dedicação para a formação de todos os seus discentes.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Deibson Costa, que sempre me auxiliou, incentivou e acreditou no meu potencial. Obrigado por todo apoio na minha formação acadêmica e por auxiliar e ajudar a todos os discentes da FEMat.

Agradeço à minha coorientadora, Brenda Daniel, por todo conhecimento, conselhos, parceria e por ter sempre me auxiliado, muito obrigado por todo carinho e esforço que teve conosco.

Agradeço à Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM e ao Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais – GPEMAT, onde realizei meu estágio e minhas pesquisas, em especial ao Me. Emerson Prazeres e ao Eng. Gregory Miranda e a todo o time que faz parte do laboratório.

“Eu andarei vestido e armado com vossas armas. ”  
(Oração de São Jorge)

## RESUMO

O modal ferroviário desempenha um papel importante na economia, contribuindo principalmente para o transporte de cargas. Os trilhos ferroviários estão sujeitos a defeitos desde a fabricação até os defeitos originados em serviço. A prevenção de falhas nos trilhos é um dos principais objetivos para manter a segurança da via permanente. Neste trabalho, foi analisado um trilho ferroviário que apresentou o defeito de canoamento na região do boleto, localizado em uma junta soldada por centelhamento. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o defeito do tipo canoamento decorrente da solda por centelhamento identificado nos trilhos ferroviários. O trilho classificado como TR-68 foi submetido a caracterizações químicas, mecânicas e metalográficas. A análise de composição química foi realizada por meio de espectrômetro de emissão óptica, realizou-se a avaliação macro e microestrutural do trilho ferroviário por meio de microscópio estereoscópio e microscópio óptico, respectivamente. Além disso, foram realizados os ensaios de dureza Rockwell e microdureza Vickers. A junta soldada apresentou alterações pouco significativas na dispersão dos elementos de liga, a composição química apresentou-se de acordo com as literaturas. A análise macroestrutural constatou um defeito (trinca) no boleto e a descarbonetação da linha central do cordão de solda, onde ocorreu o defeito de canoamento. Na análise microestrutural constatou-se a morfologia perlítica do material, encontrou-se também cementita proeutetóide na linha central do cordão de solda. Os ensaios de dureza e microdureza revelaram a diminuição acentuada de dureza na zona termicamente afetada (ZTA) e na linha central (LC), onde ocorreu o defeito. O trilho caracterizado não apresentou deformações na microestrutura da superfície do boleto, tratando-se de um trilho novo que possivelmente falhou e foi reprovado na etapa de soldagem em estaleiro e rejeitado para aplicação em serviço.

**Palavras-chave:** Propriedades. Transporte. Trilhos ferroviários. Soldagem.

## ABSTRACT

The rail modal plays an important role in the economy, mainly contributing to freight transport. Rail tracks are subject to defects from manufacturing to defects originating in service. The prevention of rail failures is one of the main objectives to keep the railway safe. In this work, a railroad track that presented the canoeing defect in the rail head region, located in a spark-welded joint. Therefore, the objective of this work was to evaluate the canoeing defect resulting from the spark welding identified in the railway tracks. The rail classified as TR-68 was subjected to chemical, mechanical and metallographic characterizations. The chemical composition analysis was performed using an optical emission spectrometer, macro and microstructural evaluation of the rail track was carried out using a stereoscope and optical microscope, respectively. In addition, Rockwell hardness and Vickers microhardness tests were performed. The welded joint showed little significant changes in the dispersion of alloy elements, the chemical composition was in agreement with the literature. The macrostructural analysis found a defect (crack) in the rail head and decarburization of the central line of the weld bead, where the canoeing defect occurred. In the microstructural analysis, the pearlitic morphology of the material was found, as well as proeutectoid cementite in the central line of the weld bead. Hardness and microhardness tests revealed a sharp drop in hardness in the heat-affected zone (HAZ) and in the central line (LC), where the defect occurred. The rail characterized did not present deformations in the microstructure of the billet surface, being a new rail that possibly failed and failed the stage of welding in shipyard and rejected for application in service.

**Keywords:** Properties; Transport; Railway tracks; Welding.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Emprego da tração animal em ferrovias. ....	18
<b>Figura 2</b> - Locomotiva Baroneza.....	19
<b>Figura 3</b> - Comparação de matrizes de transporte de carga.....	21
<b>Figura 4</b> - Mapa ferroviário brasileiro.....	22
<b>Figura 5</b> - Ferrovias da Vale.....	23
<b>Figura 6</b> - Vagões carregados.....	23
<b>Figura 7</b> - Plataforma ferroviária.....	24
<b>Figura 8</b> - Representação do perfil de trilho Vignole e nomenclatura das regiões. ..	25
<b>Figura 9</b> - Elementos básicos da via permanente.....	26
<b>Figura 10</b> - Trilho TR-68 com dimensões em mm.....	26
<b>Figura 11</b> - Processo de fabricação de trilhos.....	28
<b>Figura 12</b> - Princípio da soldagem por aluminotermia.....	32
<b>Figura 13</b> - Ponto de contato nas superfícies a unir na soldagem por centelhamento. .....	34
<b>Figura 14</b> - Estágios do processo de soldagem por centelhamento.....	35
<b>Figura 15</b> - Orientação modificada do material.....	36
<b>Figura 16</b> - Perfil de dureza por posição.....	37
<b>Figura 17</b> - Zona termicamente afetada da região do boleto.....	37
<b>Figura 18</b> - Desalinhamento em trilhos.....	41
<b>Figura 19</b> - <i>Flat spots</i> penetradores na superfície da trinca na linha de solda de uma junta soldada por centelhamento.....	42
<b>Figura 20</b> - Demonstração do defeito de canoamento em trilhos ferroviários.....	43
<b>Figura 21</b> - Danos em ambas as zonas termicamente afetadas pelo calor de uma solda aluminotérmica.....	44
<b>Figura 22</b> - Irregularidade na inclinação do trilho.....	45
<b>Figura 23</b> - Fluxograma com as atividades experimentais.....	46
<b>Figura 24</b> - Trilho fornecido pela companhia Vale S/ A.....	47
<b>Figura 25</b> - Destaque do defeito do tipo canoamento.....	47
<b>Figura 26</b> - Região do corte e retirada da amostra.....	48
<b>Figura 27</b> - Amostra retirada do boleto.....	48
<b>Figura 28</b> - Espectrômetro de emissão óptica.....	49
<b>Figura 29</b> - Amostra para análise química.....	49

<b>Figura 30</b> - Amostras selecionadas. ....	50
<b>Figura 31</b> - Cuba ultrassônica. ....	50
<b>Figura 32</b> - Politriz. ....	51
<b>Figura 33</b> - Pasta de diamante. ....	51
<b>Figura 34</b> - Nital 3%.....	52
<b>Figura 35</b> - Microscópio estereoscópio. ....	53
<b>Figura 36</b> - Microscópio óptico. ....	53
<b>Figura 37</b> - Durômetro Rockwell. ....	54
<b>Figura 38</b> - Amostra para o ensaio de dureza.....	55
<b>Figura 39</b> - Microdurômetro. ....	55
<b>Figura 40</b> - Amostra da região da linha central do cordão de solda. ....	56
<b>Figura 41</b> - Distribuição da composição química da junta soldada. ....	57
<b>Figura 42</b> - Análise da superfície da junta soldada. ....	58
<b>Figura 43</b> - Microscopia da superfície do boleto, em (a) o trilho analisado e em (b) o trilho usado em serviço. ....	59
<b>Figura 44</b> - Micrografia da junta soldada de trilho atacado com Nital 3%. (a) metal de base esquerdo; (b) metal de base direito; (c) ZTA esquerda; (d) ZTA direita. Aumento de 100x. ....	60
<b>Figura 45</b> - Microestrutura da linha central (LC) com aumento de 100x em (a) e aumento de 200x em (b) com presença de cementita proeutetóide. ....	61
<b>Figura 46</b> - Microestrutura das regiões da junta soldada. ....	61
<b>Figura 47</b> - Trinca com aumento de 200x. ....	62
<b>Figura 48</b> - Perfil de dureza (HRC). ....	63
<b>Figura 49</b> - Marcações do ensaio de microdureza na LC. ....	63
<b>Figura 50</b> - Perfil de microdureza Vickers (HV).....	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Ranking global de extensão ferroviária. ....	20
<b>Tabela 2</b> - Faixas de composição para trilhos segundo a norma ASTM A1-00. ....	29
<b>Tabela 3</b> - Composição química. ....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANTF** – Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
- AREMA** – American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association
- ASTM** – American Society for Testing and Materials
- BNDES** – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
- EFC** – Estrada de Ferro Carajás
- EFVM** – Estrada de Ferro Vitória-Minas
- FCA** – Ferrovia Centro Atlântica
- FIOL** – Ferrovia de Integração Logística
- FNSTN** – Ferrovia Norte Sul Tramo Norte
- FTC** – Ferrovia Teresa Cristina
- FTL** – Ferrovia Transnordestina Logística
- GPEMAT** – Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais
- LC** – Linha Central
- LCAM** – Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos
- MB** – Metal de Base
- RMC** – Rumo Malha Central
- RMN** – Rumo Malha Norte
- RMO** – Rumo Malha Oeste
- RMP** – Rumo Malha Paulista
- RMS** – Rumo Malha Sul
- TLSA** – Transnordestina Logística
- UFPA** – Universidade Federal do Pará
- ZTA** – Zona Termicamente Afetada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	Justificativa .....	16
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	Objetivo Geral .....	16
1.2.2	Objetivos Específicos.....	16
1.3	Estrutura do trabalho.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	Histórico ferroviário .....	18
2.2	Sistema ferroviário no Brasil e no mundo.....	19
2.3	A via permanente ferroviária .....	24
2.4	Trilhos ferroviários.....	25
2.4.1	Trilho TR-68.....	26
2.4.2	Processo de fabricação dos trilhos .....	27
2.4.3	Composição química e metalurgia dos trilhos .....	29
2.4.4	Trilhos bainíticos.....	30
2.4.5	Trilhos perlíticos.....	30
2.4.6	Instalação ou substituição dos trilhos na via permanente .....	31
2.5	<b>Soldagem em trilhos .....</b>	<b>32</b>
2.5.1	Soldagem aluminotérmica.....	32
2.5.2	Soldagem por resistência.....	33
2.5.2.1	Princípios de soldagem por centelhamento .....	34
2.5.2.2	Características metalúrgicas da solda por centelhamento .....	35
2.5.2.2.1	Zona afetada pelo calor .....	36
2.5.2.3	Etapas do processo de soldagem por centelhamento .....	38
2.5.2.3.1	Pré-aquecimento .....	38
2.5.2.3.2	Centelhamento .....	38
2.5.2.3.3	Recalque .....	39
2.5.2.3.4	Revenimento .....	39
2.6	<b>Defeitos em trilhos .....</b>	<b>40</b>
2.6.1	Descontinuidades em juntas soldadas por centelhamento.....	40
2.6.1.1	Descontinuidades mecânicas .....	41
2.6.1.2	Descontinuidades metalúrgicas .....	41

2.6.1.2.1	Óxidos .....	42
2.6.1.2.2	<i>Flat spots</i> / Penetradores.....	42
2.6.1.3	Canoamento.....	43
2.6.1.3.1	A consequência do canoamento.....	44
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1</b>	<b>Trilho TR-68 .....</b>	<b>46</b>
<b>3.2</b>	<b>Seleção da amostra.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3</b>	<b>Análise química .....</b>	<b>49</b>
<b>3.4</b>	<b>Metalografia .....</b>	<b>50</b>
<b>3.5</b>	<b>Análise macroestrutural .....</b>	<b>52</b>
<b>3.6</b>	<b>Análise microestrutural .....</b>	<b>53</b>
<b>3.7</b>	<b>Ensaio mecânicos .....</b>	<b>54</b>
3.7.1	Ensaio de dureza.....	54
3.7.2	Ensaio de microdureza .....	55
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise química .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise macroestrutural .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise microestrutural .....</b>	<b>59</b>
<b>4.4</b>	<b>Ensaio de dureza Rockwell.....</b>	<b>62</b>
<b>4.5</b>	<b>Ensaio de microdureza Vickers.....</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões de trabalhos futuros.....</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O principal objetivo dos modais de transporte é promover o desenvolvimento econômico do país através do fluxo de pessoas e bens. O transporte ferroviário desempenha um papel importante na economia, intervindo principalmente no transporte de cargas. O modal ferroviário oferece benefícios para o transporte de cargas, em comparação com outros modais (FALCÃO, 2013).

Ainda há muito espaço para o crescimento do transporte ferroviário, e o investimento realizado neste modal contribuirá para o desenvolvimento da economia e competitividade do Brasil no mercado internacional (BELLINI; LUCAS, 2016).

Os trilhos estão sujeitos a defeitos que afetam a sua integridade e aumentam o risco de falhas em serviço, podendo resultar em acidentes, causando prejuízos econômicos, ambientais e até perdas humanas. Os trilhos estão sujeitos a defeitos desde a fabricação até os defeitos originados em serviço, a partir da ação repetida do carregamento exercido pelas rodas no trilho pela passagem do trem, podendo ocasionar defeitos e propagação de trincas (SCHNEIDER, 2005).

Os principais métodos utilizados para a união de trilhos ferroviários são a soldagem por centelhamento e a soldagem aluminotérmica. Destes, a soldagem por centelhamento possui a maior eficiência, com um tempo de soldagem de aproximadamente 1,5 – 4 minutos, e é um excelente método do ponto de vista de estabilidade e do controle da qualidade (FUJII; NAKANOWATARI; NARIAI, 2015).

A prevenção de falhas nos trilhos é um objetivo principal para manter a segurança da via permanente. O desgaste ocorre de maneira natural no seu uso em serviço e está associada à tonelagem bruta trafegada, a frequência, a velocidade dos trens, além da influência de condições ambientais, condições térmicas do traçado da via, do estado de conservação e da qualidade do trilho (SCHNEIDER, 2005; ZERBST; SCHÖDEL; HEYDER, 2009).

Em 2017, a Companhia Vale S.A. desenvolveu em parceria com a Universidade Federal do Pará (UFPA), estudos sobre defeitos em trilhos ferroviários, esses estudos fazem parte do projeto Cátedra Roda-Trilho, que tem o objetivo de analisar e caracterizar trilhos ferroviários que falharam em serviço, este estudo é desenvolvido em conjunto com o grupo de pesquisa em engenharia de materiais (GPEMAT).

## 1.1 Justificativa

As principais características exigidas para os trilhos a fim de suportar os vagões ferroviários são rigidez, resistência e soldabilidade. Em ferrovias de carga pesada (*heavy haul*) que manuseiam recursos como minério de ferro, carvão e grãos, as cargas das rodas são grandes e a pressão de contato no boleto do trilho é alta. Devido a essas grandes cargas, pode ocorrer desgaste e danos à superfície do trilho. Os desgastes e os danos desse tipo são os principais fatores que determinam o serviço e vida útil dos trilhos (UEDA et al., 2013).

A compreensão da macro e microestrutura da junta soldada, dureza e propriedades mecânicas, principalmente no que diz respeito à zona termicamente afetada (ZTA) é de fundamental importância para avaliação das propriedades mecânicas do trilho ferroviário.

Este trabalho justifica-se pelo entendimento das propriedades mecânicas, físicas e químicas dos trilhos ferroviários, em específico a caracterização de defeitos na união soldada, em face de pouca literatura existente sobre juntas soldadas de trilhos à nível nacional e a forte importância desta região no desempenho operacional da ferrovia.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o defeito do tipo canoamento decorrente da solda por centelhamento identificado nos trilhos ferroviários e investigar as suas características químicas, mecânicas e metalográficas, a fim de entender o comportamento do defeito.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a composição química, para identificar se os trilhos unidos possuem a mesma composição e comparar se estão de acordo com a norma vigente;

- Caracterizar a macro e a microestrutura da região da união soldada por centelhamento do trilho ferroviário, para localizar possíveis descontinuidades;
- Realizar ensaios de dureza Rockwell e microdureza Vickers, para avaliar o perfil de dureza da junta soldada e o perfil de microdureza da linha central do cordão de solda;
- Avaliar o defeito do tipo canoamento e correlacionar o mesmo com a união soldada.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

As motivações, o assunto proposto, os objetivos e a justificativa são abordados na Seção 1.

Na Seção 2, realizou-se o levantamento bibliográfico e os termos que fundamentam o estudo sobre a soldagem por centelhamento. Também apresenta o cenário ferroviário do Brasil, trilhos e análise de falhas.

O conteúdo da Seção 3 apresenta a metodologia utilizada para realizar os ensaios e a comparação metalúrgica com a literatura. Esta seção também descreve os equipamentos utilizados e os procedimentos adotados.

Em seguida, na Seção 4, os resultados obtidos, a discussão e os comentários sobre a importância das análises dos trilhos são consolidados.

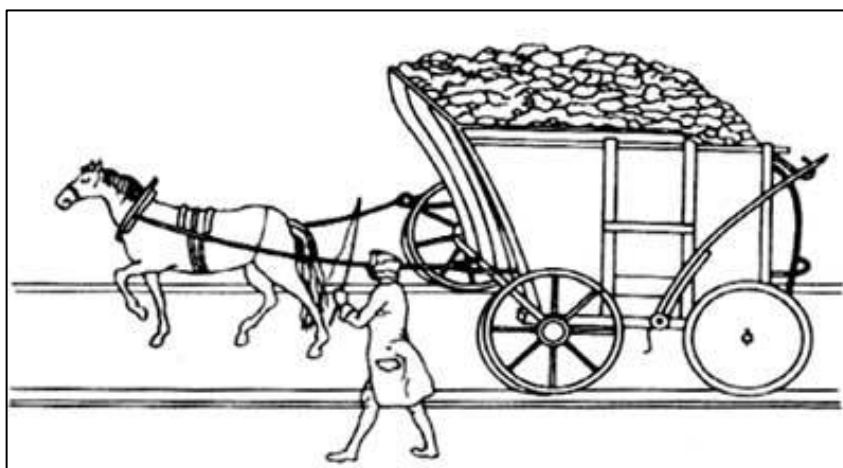
Por fim, na Seção 5, conclui-se sobre o presente trabalho comparando os resultados alcançados com os esperados na literatura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Histórico ferroviário

No início do século XVI, os países europeus utilizavam o transporte sobre trilhos para atender o setor de mineração, os trilhos destinavam-se ao transporte de carvão e minérios. Os trilhos de madeira usavam tração animal, conforme a Figura 1, para transportar as carroças, onde se moviam com maior facilidade do que sobre a terra cheia de sulcos ou sobre o chão das minas. No início do século XVIII, os trilhos de madeira passaram a ser revestidos com tiras metálicas. Posteriormente, os ingleses começaram a fabricar trilhos de ferro fundido (MARSH, 2009; SANTOS, 2011).

**Figura 1** - Emprego da tração animal em ferrovias.



**Fonte:** ANTF, 2018.

Em 1804, o inglês Richard Trevithick construiu uma máquina a vapor que atingia uma velocidade máxima de 8 km/ h. No entanto, o fator decisivo para a evolução das ferrovias foi o trabalho do inglês George Stephenson, que em 1814 apresentou sua primeira locomotiva a vapor “*Blücher*”, que era capaz de transportar 30 toneladas a uma velocidade de 6 km/ h. Stephenson foi encarregado de construir a ferrovia Liverpool-Manchester, inaugurada em 1825, sendo a primeira ferrovia a conduzir trens de passageiros em horários regulares, atingiu a velocidade de 32 km/ h com sua locomotiva “*The Rocket*” (PEDRONI, 2008; SANTOS, 2011).

No Brasil, em 1835, houve o incentivo para a implantação de uma estrada de ferro, que possibilitaria ligações entre o Rio de Janeiro, sede do governo imperial, às províncias de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia. Naquela época, a produção agrícola no Brasil precisava de um meio de transporte eficiente. Em 1852, Irineu Evangelista de Souza, Barão de Mauá, iniciou a construção da ferrovia que ligaria o porto de Mauá à raiz da Serra (Petrópolis), com 14,5 km de extensão. No dia 30 de abril de 1854 foi inaugurada por D. Pedro II a primeira ferrovia do país. O trem foi tracionado pela locomotiva “Baroneza”, conforme a Figura 2 (PEDRONI, 2008; CUNHA, 2011).

**Figura 2 - Locomotiva Baroneza.**



Fonte: RIO, 2016.

## **2.2 Sistema ferroviário no Brasil e no mundo**

O Brasil está atualmente em nono lugar no ranking de extensão da rede ferroviária global, possuindo aproximadamente 30,750 mil km de malha ferroviária (MASSA, 2020; ONTL, 2021). A partir do ranking mostrado na Tabela 1 nota-se que as principais economias do mundo possuem grandes redes ferroviárias.

**Tabela 1** - Ranking global de extensão ferroviária.

<b>Classificação</b>	<b>País</b>	<b>km</b>
1	Estados Unidos	293,56
2	China	124,00
3	Rússia	87,16
4	Canadá	77,93
5	Índia	68,53
6	Alemanha	43,46
7	Austrália	36,97
8	Argentina	36,92
9	Brasil	30,75
10	França	29,64

**Fonte:** Adaptado de MASSA, 2020; ONTL, 2021.

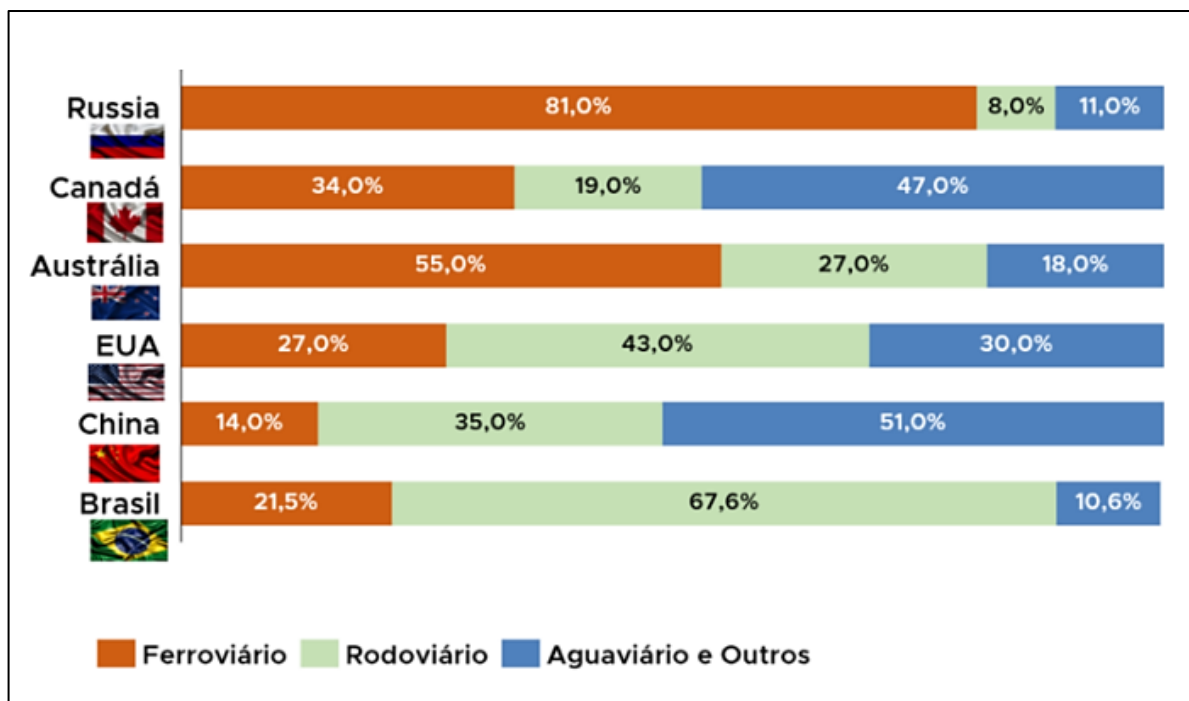
Nos dias atuais os Estados Unidos são a primeira potência na economia mundial influenciando vários países industrializados do mundo. O modal ferroviário norte-americano facilitou o fluxo de cargas e pessoas. As ferrovias estimularam o desenvolvimento econômico, participando do mercado interno e inserindo os Estados Unidos no mercado internacional. Atualmente, muitas empresas norte-americanas fabricam material ferroviário, com uma importante participação na economia do país e no mercado mundial (FICI, 2017).

O setor ferroviário europeu é de importância estrutural, pois alimenta um setor de transportes com grande participação na economia dos países, que dispõe de uma infraestrutura eficiente de trens, bondes e metrô, além de ferrovias de alta velocidade. Possuindo uma grande representação no mercado mundial, com exportações para vários países e fabricação de equipamentos fora da Europa. A França, Espanha e Alemanha são os países que possuem uma grande indústria ferroviária (HOZ, 2013).

As ferrovias desempenham um importante papel econômico na China, facilitando as conexões com as grandes cidades e sendo uma estratégia de segurança nacional em relação às regiões mais distantes do oeste do país. Nas últimas décadas, a China foi o país que mais investiu em ferrovias no mundo, com grande crescimento industrial e participação ativa no mercado mundial de equipamentos (FICI, 2017).

No Brasil, as ferrovias aumentaram sua participação na matriz nacional de transporte e atualmente representam cerca de 21,5 %, possuindo porte territorial favorável ao crescimento, mas em relação aos outros países, ainda pode desenvolver mais esse modal. A Figura 3 mostra a comparação de matrizes de transporte de carga em países de mesmo porte territorial (ANTF, 2021).

**Figura 3 - Comparação de matrizes de transporte de carga.**

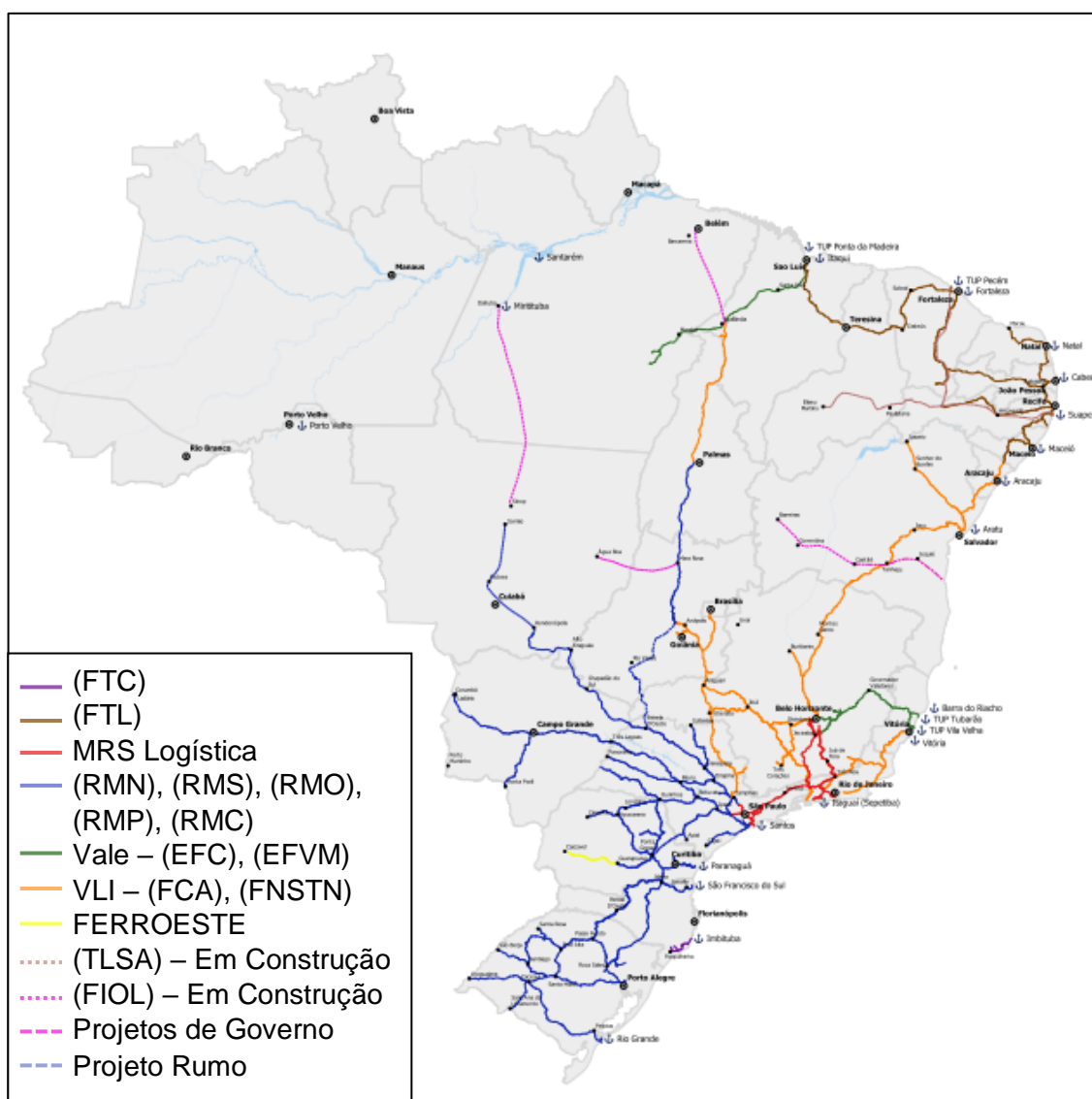


**Fonte:** Adaptado de ANTF, 2021.

No Brasil, as ferrovias transportam cargas com alta concentração, produtos siderúrgicos, granéis, derivados do petróleo, madeira, adubos, cimento, álcool, e cargas unitizadas (contêineres), esses são exemplos de produtos transportados pelo modal ferroviário brasileiro (BORGES NETO, 2012).

O modal ferroviário brasileiro é responsável pelo transporte de mais de 40% das commodities agrícolas, as ferrovias de carga desempenham um papel essencial no comércio exterior brasileiro e têm uma participação crescente no volume transportado anualmente. Embora a rede ferroviária do país tenha cerca de 30.000 km, uma densidade baixa em comparação com outros países com dimensões continentais, as ferrovias expandiram fortemente seus índices de produtividade (ANTF, 2019). A Figura 4 apresenta o mapa ferroviário brasileiro.

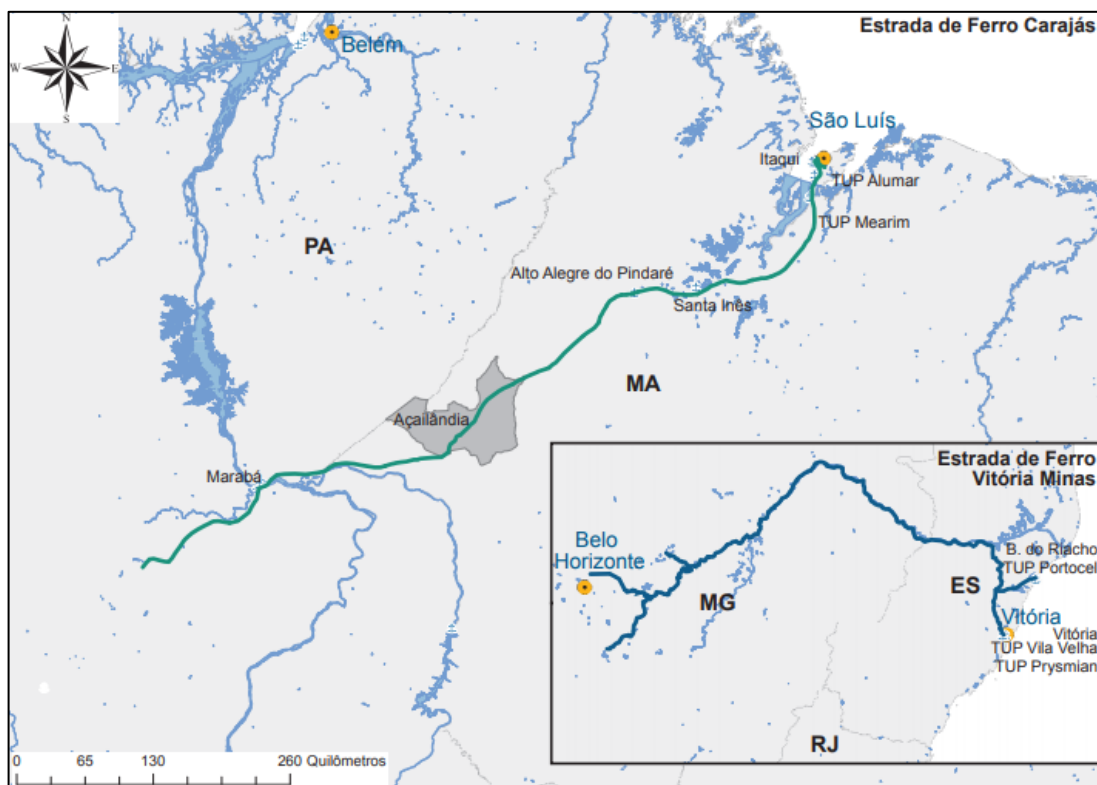
**Figura 4 -** Mapa ferroviário brasileiro.



**Fonte:** Adaptado de ANTF, 2019.

A Vale S.A. é a maior empresa de mineração do país. Para exportar seu produto, utiliza suas concessões ferroviárias, a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) e a Estrada de Ferro Carajás (EFC), mostradas na Figura 5. A EFC é considerada a ferrovia de cargas mais eficiente do país e tem a maior velocidade média (cerca de 40 km/h), em comparação com as demais, o que está diretamente relacionado ao fato de, entre outros fatores, transportar principalmente minério de ferro. Outro aspecto relevante é que o trecho percorrido da mina até o porto é plano e com baixa densidade demográfica (FERREIRA et al., 2017).

**Figura 5 - Ferrovias da Vale.**



**Fonte:** FERREIRA et al., 2017.

Atualmente, o complexo de Carajás produz 150 milhões de toneladas por ano, graças à qualidade de seu minério. Em 2008, o maior trem de carga pesada do mundo começou a circular na EFC, com 330 vagões e 3,3 km de extensão (VALE, 2017). Na Figura 6 observa-se os vagões carregados com minério de ferro.

**Figura 6 - Vagões carregados.**

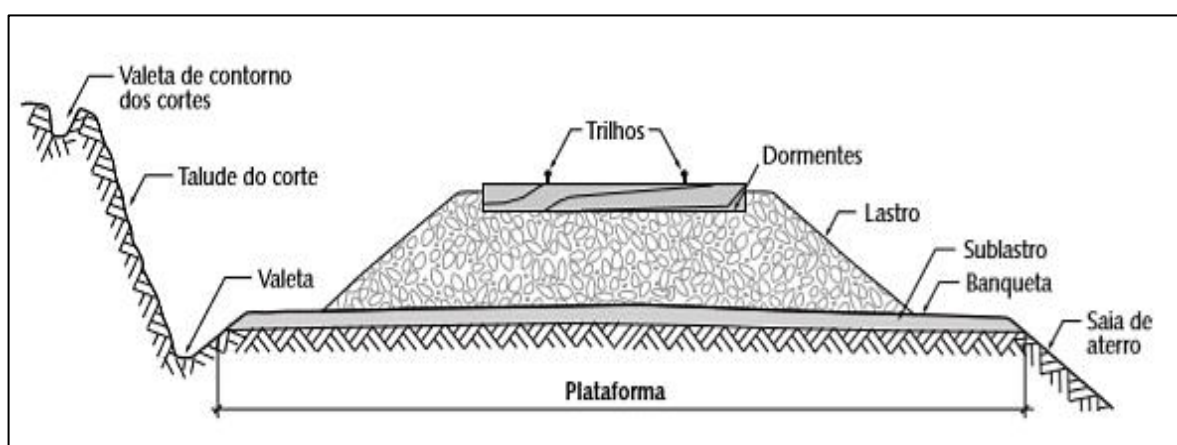


**Fonte:** MAIS, 2017.

### 2.3 A via permanente ferroviária

A via permanente, também chamada de “estrada de ferro” consiste no conjunto de camadas e elementos que permitem a passagem de trens, vagões, equipamentos de manutenção de via, dentre outros materiais rodantes. Sua estrutura e componentes, apresentados na Figura 7, são divididos em dois grupos: infraestrutura e superestrutura ferroviária (BOUZAN, 2016).

**Figura 7 - Plataforma ferroviária.**



**Fonte:** NABAIS, 2014.

A via férrea é composta pela infraestrutura e superestrutura ferroviária, onde a infraestrutura é formada por obras de terraplanagem, sistemas de drenagem, obras de arte correntes e obras de arte especiais, e a superestrutura é constituída pela plataforma ferroviária e pela via permanente, os principais elementos da superestrutura são: o lastro, os acessórios de fixação, os dormentes e os trilhos. Esses elementos recebem os impactos diretos da carga e apoiam-se sobre a plataforma ferroviária (BORGES NETO, 2012; NABAIS, 2014).

A via ferroviária é constituída por trilhos longos, soldados em estaleiro por processo de centelhamento, os trilhos são transportados até os locais onde serão empregados, são fixados e soldados por aluminotermia (MOREIRA, 2015).

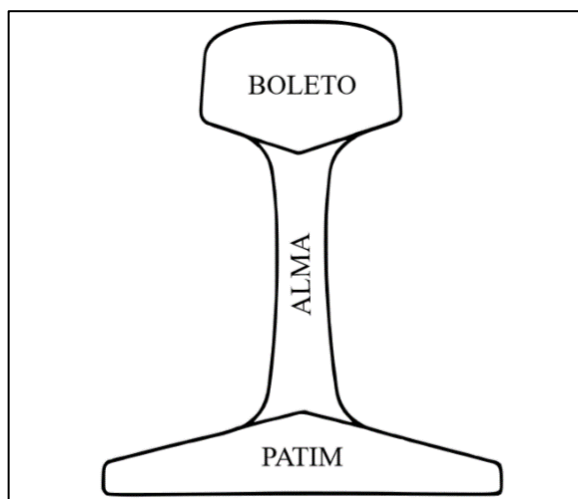
A estrutura de uma ferrovia necessita de uma sustentação dos trilhos que garanta a absorção de impactos resultantes do transporte ferroviário. Os dormentes fazem a sustentação da parte superior da estrutura de uma ferrovia, amortecem os esforços e os transfere para o lastro, dessa forma há maior segurança no transporte ferroviário (MACÊDO, 2009; DAMASCENO, 2017).

A bitola de uma via permanente é definida como a menor distância entre as faces internas dos trilhos da via. No Brasil, as principais bitolas utilizadas são: Métrica ou estreita com 1000 mm, larga com 1600 mm e mista que consiste na utilização de três trilhos contínuos com 1600/ 1000 mm (CONSOLI, 2007).

## 2.4 Trilhos ferroviários

Os trilhos fazem parte da via permanente, seu perfil atual é denominado como sendo do tipo “Vignole”, mostrado na Figura 8. Esse perfil de trilho favorece a resistência à flexão, sendo composto por boleto, alma e patim (SCHNEIDER, 2005).

**Figura 8** - Representação do perfil de trilho Vignole e nomenclatura das regiões.



Fonte: NISHIKAWA, 2018.

- O boleto é localizado na parte superior do trilho e é caracterizado por sua largura, altura e inclinação da face e do abaulamento da superfície de rolamento.
- A parte mais fina que se encontra no centro do trilho é a alma.
- A parte inferior do trilho é o patim, ele é assentado sobre os dormentes, que recebem e propagam os esforços produzidos pelas cargas ao lastro (SCHNEIDER, 2005).

Na Figura 9 nota-se os trilhos ferroviários assentados sobre os dormentes por meio de fixadores.



A estampa dos trilhos é padronizada na região da alma pela AREMA (*American Railway Engineering Association*) a cada 4,9 metros para que seja possível identificar o peso em libras por jardas, tipo da seção, fabricante, método de eliminação de hidrogênio, ano e mês de laminação (MACÊDO, 2009).

#### 2.4.2 Processo de fabricação dos trilhos

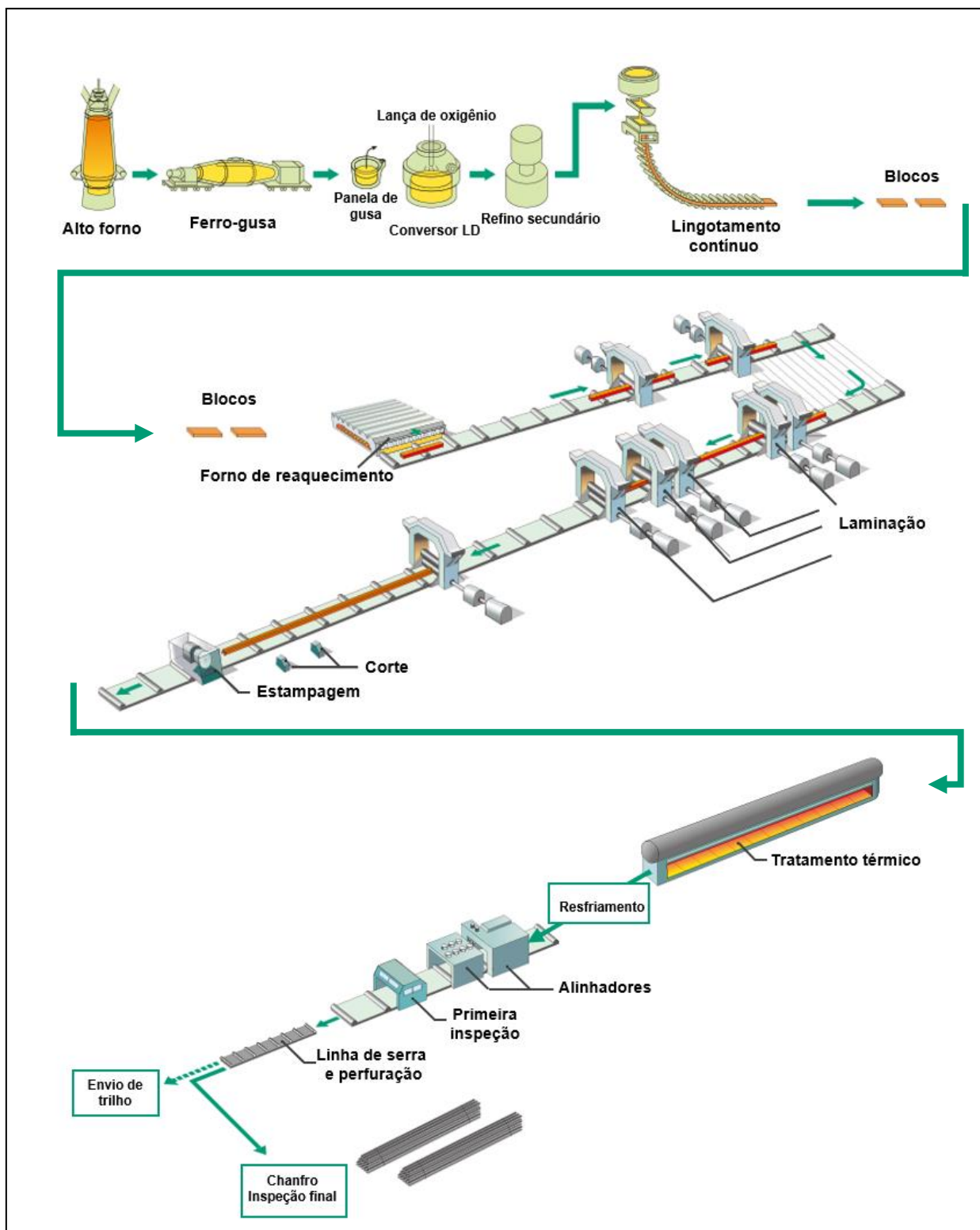
Os primeiros trilhos metálicos foram produzidos em ferro fundido, material de elevada dureza e fragilidade. A produção de trilhos ferroviários de aço tornou-se comum com a evolução do processo siderúrgico em meados do século XIX, apresentando um desempenho superior ao do ferro fundido e proporcionando rápida evolução das ferrovias em todo o mundo (MOREIRA, 2015).

Os trilhos são laminados à quente a partir dos blocos de lingotes. A seção do trilho é obtida pela passagem sucessiva do bloco aquecido, em uma série de cilindros, projetados de tal maneira que a forma retangular do bloco seja gradualmente desenvolvida. A fabricação dos trilhos consiste em processos que podem diferir de empresa para empresa (MACÊDO, 2009), geralmente seguem as seguintes etapas:

- 1 – Alto-forno e tratamento a vácuo;
- 2 – Lingotamento contínuo;
- 3 – Reaquecimento e moinho desbastador;
- 4 – Laminadores e corte a quente;
- 5 – Rolos, prensas e alinhadores;
- 6 – Resfriamento controlado.

O fluxograma apresentado na Figura 11 demonstra o processo de produção dos trilhos ferroviários, apresentando todas as etapas de fabricação e procedimentos a que o material é submetido.

Figura 11 - Processo de fabricação de trilhos.



Fonte: Adaptado de NIPPON STEEL, 2019.

O progresso na indústria metalúrgica tem proporcionado melhorias na produção de trilhos, cujas propriedades mecânicas variam de acordo com os

tratamentos térmicos empregados e a microestrutura resultante (ROSA, 2008).

Dentre os tratamentos térmicos utilizados, destacam-se:

- Boletão endurecido (*Head Hardened* – HH);
- Boletão profundamente endurecido (*Deep Head Hardened* – DHH);
- Trilho completamente tratado (*Full Heat Treated* – FHT).

### 2.4.3 Composição química e metalurgia dos trilhos

Para desempenhar a sua função como superfície de rolamento e suportar as cargas transportadas, é necessário que o trilho possua propriedades adequadas para esta aplicação. O aço oferece as melhores vantagens no emprego da fabricação de trilhos. A composição química do aço possui influência sobre as propriedades metalúrgicas e físicas, afetando o desempenho e vida útil dos trilhos (SARTORI, 2010).

De acordo com a norma ATSM A1-00 (ASTM, 2018), os trilhos devem ser fornecidos como laminados, com tratamento de endurecimento de boletão ou completamente tratados, a norma também delimita as faixas de composição química, como pode ser visto na Tabela 2.

**Tabela 2** - Faixas de composição para trilhos segundo a norma ASTM A1-00.

Elemento	Peso Nominal (kg/m)		
	29,8 a 41,7	42,2 a 56,6	Acima de 57
<b>Carbono</b>	0,55 a 0,68	0,70 a 0,80	0,74 a 0,84
<b>Manganês</b>	0,60 a 0,90	0,70 a 1,00	0,80 a 1,10*
<b>Fósforo (máx.)</b>	0,040	0,035	0,035
<b>Enxofre (máx.)</b>	0,050	0,040	0,040
<b>Silício</b>	0,10 a 0,50	0,10 a 0,50	0,10 a 0,50

Fonte: ASTM A1-00, 2018.

Os avanços na fabricação do aço e na produção dos trilhos, como degaseificação a vácuo e o lingotamento contínuo, têm proporcionado a obtenção de lingotes praticamente isentos de defeitos, com a composição química e pureza mais adequadas. Os procedimentos químicos e os tratamentos térmicos têm

proporcionado consideráveis melhorias nas características de resistência, dureza e fadiga (SCHNEIDER, 2005).

#### 2.4.4 Trilhos bainíticos

Elementos de liga como carbono (C), silício (Si), manganês (Mn), cromo (Cr), molibdênio (Mo), cobre (Cu), níquel (Ni), titânio (Ti), vanádio (V), nióbio (Nb) e boro (B) são usados para produzir aços ferroviários bainíticos. Esses elementos de liga são adicionados para retardar a formação de perlita, permitindo a formação de bainita durante o processo de tratamento térmico. Esses elementos também refinam o tamanho de grão da austenita, melhorando a resistência e a tenacidade do aço, através de uma microestrutura bainítica fina (KAPITO; STUMPF; PAPO, 2013).

Aços com uma estrutura bainítica que podem atingir resistência de até 1400 MPa e ductilidade entre 15 e 18 %, sem diminuir a tenacidade à fratura é um dos principais requisitos para o desenvolvimento de novos aços de alta resistência mecânica e de resistência ao desgaste na produção de trilhos ferroviários. O objetivo dos aços bainíticos em desenvolvimento é atender a várias solicitações, como soldabilidade, resistência ao desgaste, resistência à fadiga, boa usinabilidade e baixos custos de material e produção (HLAVATÝ et al., 2009).

#### 2.4.5 Trilhos perlíticos

O aço carbono é o material mais comum para a fabricação de trilhos, com uma microestrutura predominantemente perlítica. Perlita é uma microestrutura lamelar que consiste em lamelas alternadas de ferrita e cementita, sua morfologia apresenta camadas claras, mais grossas, que são a fase ferrita, enquanto a fase cementita aparece como lamelas finas com coloração escura. Os aços que possuem microestrutura perlítica apresentam uma boa combinação de propriedades de desgaste e resistência, adequadas para aplicações ferroviárias (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; NIKAS; ZHANG; AHLSTRÖM, 2018).

O material utilizado na fabricação de trilhos perlíticos é o aço com um teor de carbono entre 0,6 e 0,9 % com adições de Mn e Cr. Esses aços apresentam microestrutura perlítica, atingindo resistências entre 900 e 1200 MPa e dureza entre 260 e 290 HB (SILVA, 2017).

As adições de Nb, V e Mo formam uma nova classe de trilhos perlíticos, os microligados, com resistências entre 1100 a 1300 MPa e dureza de até 400 HB, no entanto, tratamentos térmicos com resfriamento acelerado resultam em maior refinamento da perlita, dando maior ductibilidade a esses aços (SCHNEIDER, 2005).

#### 2.4.6 Instalação ou substituição dos trilhos na via permanente

Em 1924, a primeira via formada por trilhos longos contínuos foi construída. Nesse tipo de estrutura os trilhos com comprimento entre 12 e 24 m são unidos por processo de soldagem. Em estaleiro de solda os trilhos recém-fabricados são soldados por centelhamento até atingirem o comprimento de 200 a 500 m. Esses trilhos são transportados por trem de carga para o local de instalação, e são acoplados aos dormentes para facilitar o seu alinhamento. Em seguida, os trilhos são soldados pelo processo aluminotérmico (BOUZAN, 2016).

Os acessórios de fixação utilizados nas ferrovias têm a função de manter os trilhos na posição correta e garantir que permaneça inalterada a bitola da via, para que as funções da ferrovia sejam desenvolvidas corretamente. Oferecem resistência ao deslocamento e variação da temperatura. As tensões geradas pelas solicitações nos trilhos devem ser transmitidas aos dormentes, sem prejuízo do sistema de fixação (FILHO, J., 2013; SILOTTI, 2015).

As fixações rígidas consideradas comuns são o prego de linha, um tipo de fixação simples, com seção retangular, e é fixado a golpes de marreta e o tirefond, que é um tipo de fixação superior ao prego de linha, pois é aparafusado, oferecendo maior resistência ao arrancamento. As fixações elásticas são utilizadas nos mais variados tipos de ferrovias e são mais eficientes em vários aspectos, principalmente em relação ao amortecimento das vibrações produzidas pelo tráfego na via permanente (RUSSO, 2012).

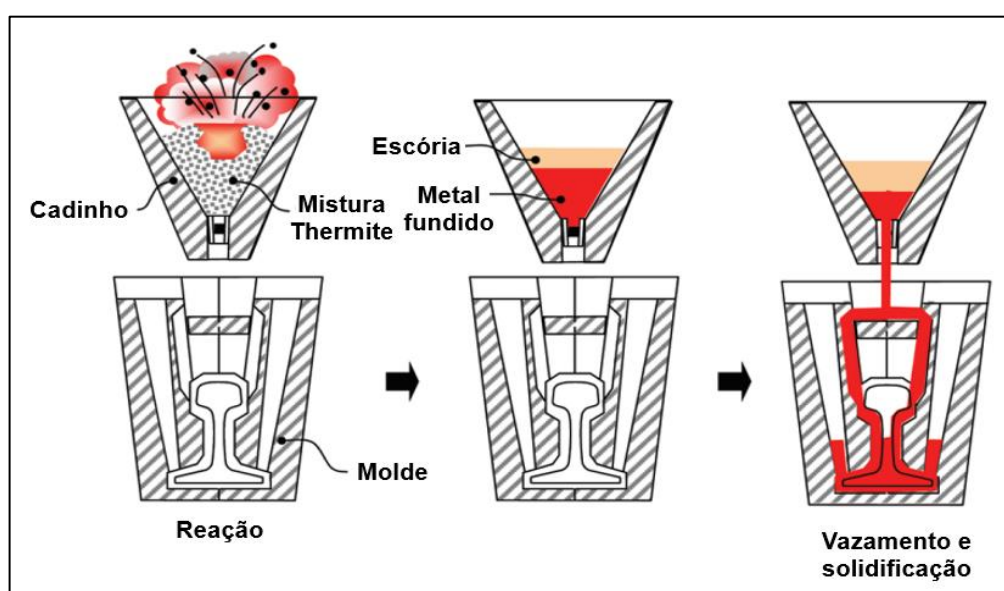
## 2.5 Soldagem em trilhos

Os tipos mais comuns de soldagem para trilhos ferroviários são a soldagem por centelhamento elétrico em máquina estacionária ou móvel (*flash butt-welding*) e a soldagem aluminotérmica (*thermite*). O primeiro é um processo semi-automatizado e geralmente é aplicado em estaleiros para a união de trilhos novos. O segundo é um processo predominantemente manual e geralmente é aplicado para soldagem e manutenção em campo (NISHIKAWA, 2018).

### 2.5.1 Soldagem aluminotérmica

A soldagem aluminotérmica (*Thermit Welding – TW*) é um método no qual a união das peças metálicas ocorre a partir do calor e do metal produzido numa reação química entre um óxido metálico e o alumínio. Este processo é bastante utilizado em aplicações específicas, apresentando flexibilidade e curto tempo de execução, dispensando o uso de energia elétrica, características adequadas para realização da solda no campo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Na Figura 12 percebe-se os equipamentos básicos do processo.

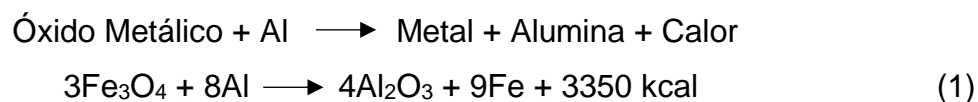
**Figura 12** - Princípio da soldagem por aluminotermia.



Fonte: SAITA et al., 2013.

Na soldagem aluminotérmica, o alumínio extrai oxigênio de óxidos de outros metais para formar óxido de alumínio e liberar uma grande quantidade de calor, que pode ser usado na soldagem de peças de aço (SARTORI, 2010).

A reação aluminotérmica tem a seguinte fórmula geral:



A reação é bastante vigorosa e dura aproximadamente 20 segundos, atingindo facilmente temperaturas acima de 3000 °C, no entanto, ocorrem perdas de calor no cadinho e por radiação, são adicionadas pelotas de ferro-liga para diminuir a temperatura da reação para temperaturas próximas a 2480 °C e produzir a composição química desejada na solda (ROSA, 2008).

Dessa forma, a soldagem aluminotérmica não é espontânea, pois requer uma ignição, é um processo governado por fusão em que os trilhos são unidos após serem aquecidos por metal fundido pelo calor da reação aluminotérmica. A mistura liquefeita atua como o metal de adição da junta (SARTORI, 2010).

## 2.5.2 Soldagem por resistência

A soldagem por resistência abrange processos em que ocorre a união de peças metálicas, sobrepostas ou em contato topo a topo, por meio de calor gerado através de resistência à passagem de uma corrente elétrica e aplicação de pressão, com a possibilidade de ocorrer fusão na interface (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Existem vários processos de soldagem por resistência, tais como:

- Soldagem por pontos (*Resistance Spot Welding* – RSW);
- Soldagem por projeção (*Projection Welding* – RPW);
- Soldagem por costura (*Resistance Seam Welding* – RSEW);
- Soldagem topo a topo:
  - Por resistência (*Upset Welding* – UW);
  - Por centelhamento (*Flash Welding* – FW);

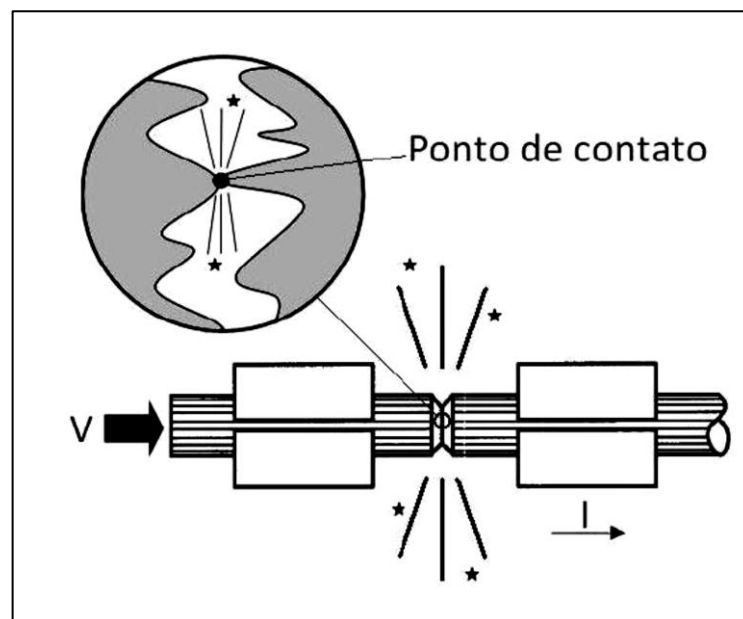
- Soldagem por resistência por alta frequência (*High Frequency Resistance Welding – HFRW*).

Este trabalho se concentra na soldagem topo-a-topo por centelhamento. Este tipo de processo é utilizado para soldagem de trilhos ferroviários, entre várias aplicações.

#### 2.5.2.1 Princípios de soldagem por centelhamento

Em geral, na soldagem por centelhamento, nenhuma preparação das superfícies de contato é necessária. As peças são posicionadas e fixadas nos eletrodos da máquina de soldagem conectados ao circuito secundário de um transformador. A tensão elétrica é aplicada entre as peças antes do contato, elas são aproximadas até que os primeiros contatos ocorram em pontos discretos em suas superfícies, conforme mostra a Figura 13 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; DOMINGUES, 2013).

**Figura 13** - Ponto de contato nas superfícies a unir na soldagem por centelhamento.



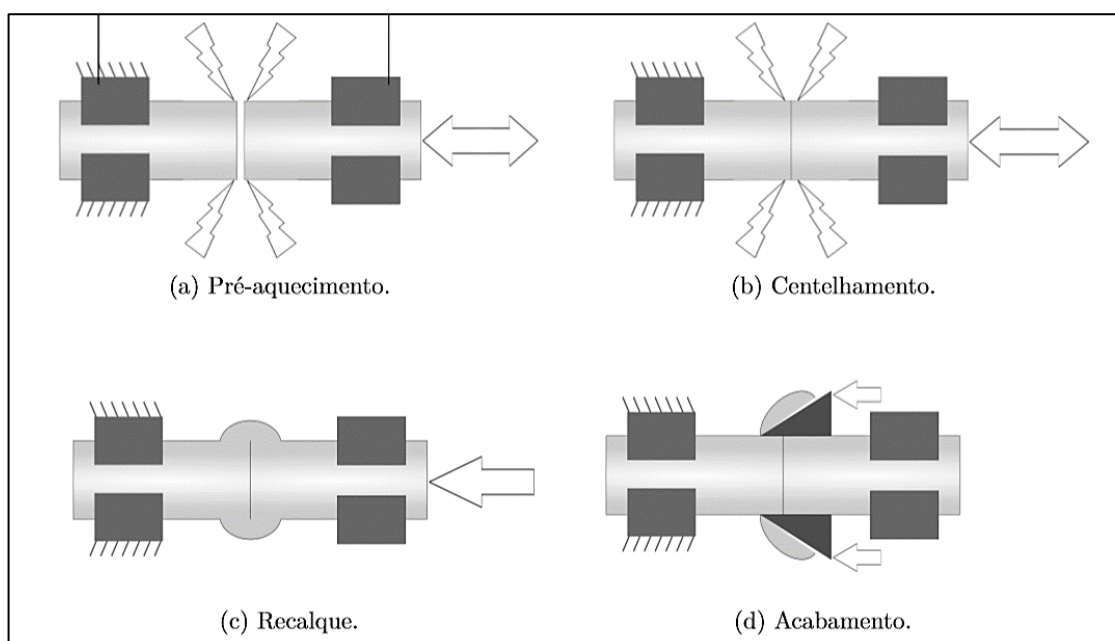
**Fonte:** MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009.

O processo de fusão se inicia pelos diversos arcs formados pelas irregularidades da superfície entre as peças, ocorrendo fusão localizada e ejeção do metal líquido formado. Em seguida, são geradas descargas elétricas que impactam as superfícies a serem unidas e continuam a fundir e ejetar metal incandescente na forma de fagulhas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; DOMINGUES, 2013).

Na soldagem por centelhamento, a aplicação de um meio de proteção contra a atmosfera não é usualmente utilizado, pois o recalque da região da solda deve expulsar os contaminantes da junta (DOMINGUES, 2013).

A Figura 14 representa de forma genérica as etapas do processo de soldagem por centelhamento.

**Figura 14** - Estágios do processo de soldagem por centelhamento.



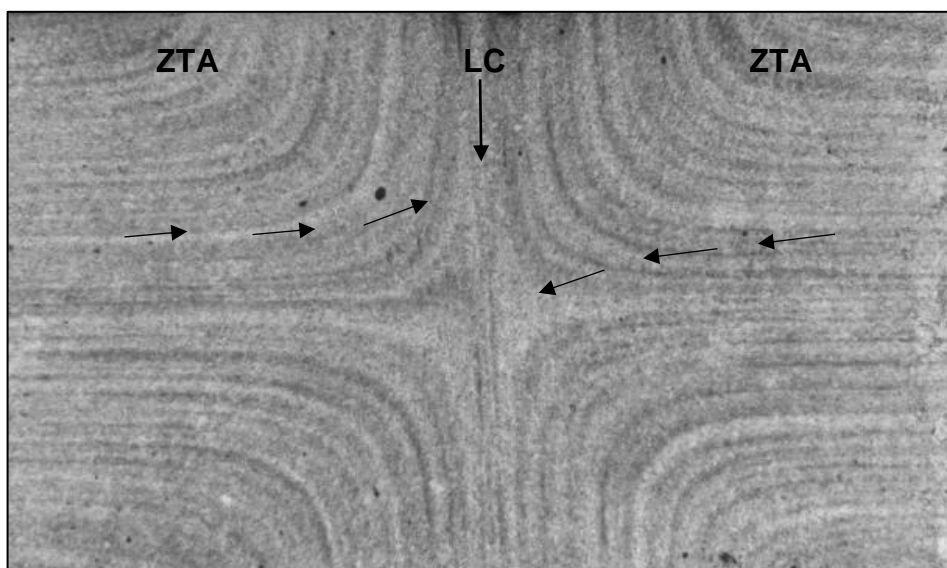
**Fonte:** SOTERO, 2017.

### 2.5.2.2 Características metalúrgicas da solda por centelhamento

As propriedades físicas e metalúrgicas do metal dependem da microestrutura do material. As soldas por centelhamento são realizadas sem metal de adição e devem ter as mesmas características do metal de base; no recalque, a orientação dos grãos é modificada, o que pode afetar sua resistência mecânica (VICENTE,

2017). A Figura 15 apresenta as linhas de fluxo das zonas termicamente afetadas (ZTA) em sentido a linha central (LC) resultante da etapa de recalque.

**Figura 15** - Orientação modificada do material.



**Fonte:** Adaptado de FILHO, O., 2007.

#### 2.5.2.2.1 Zona afetada pelo calor

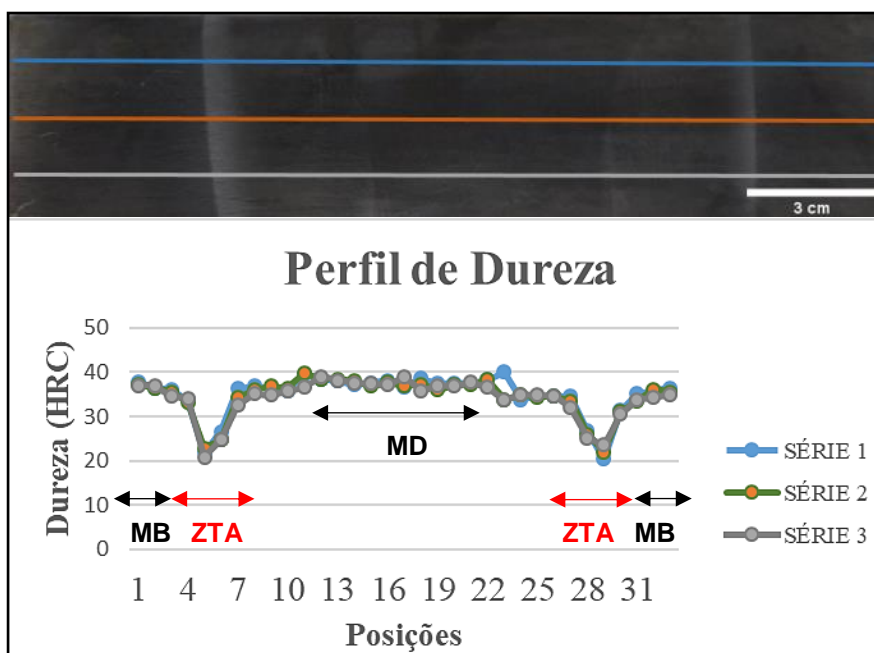
As soldas realizadas por centelhamento ou aluminotermia produzem zonas termicamente afetadas (ZTA) que podem resultar em menores valores de dureza em comparação com o metal de deposição e o metal de base (MICENKO et al., 2013).

A zona termicamente afetada (ZTA) é a região que teve sua microestrutura e propriedades alteradas pelo ciclo térmico do processo de soldagem. As temperaturas de pico nesta região foram inferiores a temperatura de fusão do material e superiores à temperatura crítica (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A entrada de calor durante o processo de soldagem altera as propriedades da microestrutura no aço; uma zona termicamente afetada (ZTA) se forma e há uma menor distribuição de dureza em relação ao metal de base. Nas soldas podem ocorrer descontinuidades devido a variações na microestrutura, propriedades mecânicas e níveis de tensão residual entre a solda e o metal de base (MICENKO et al., 2013).

No gráfico mostrado na Figura 16 identifica-se a diminuição acentuada de dureza na ZTA de um trilho ferroviário soldado por aluminotermia, em relação ao metal de deposição (MD) e o metal de base (MB), o gráfico apresenta o formato denominado “dente de vampiro”.

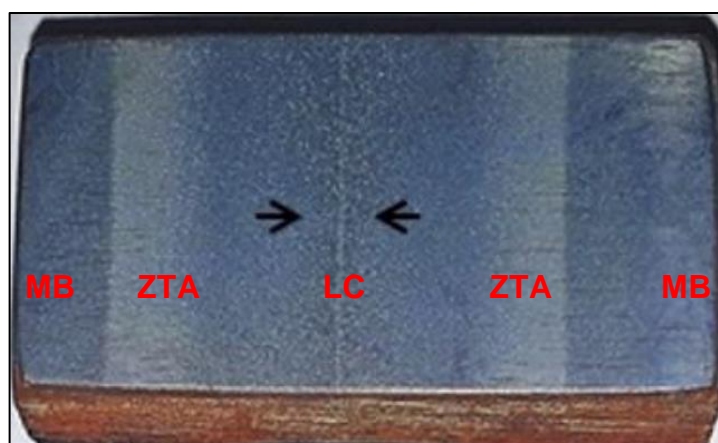
**Figura 16** - Perfil de dureza por posição.



Fonte: ANDRADE et al., 2019.

Na Figura 17 observa-se a zona termicamente afetada (ZTA) de um boleto, onde pode ser visto a linha central do cordão de solda (LC), a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de base (MB) de um trilho soldado por centelhamento.

**Figura 17** - Zona termicamente afetada da região do boleto.



Fonte: Adaptado de PORCARO et al., 2017.

### 2.5.2.3 Etapas do processo de soldagem por centelhamento

O método utilizado para realizar a soldagem por centelhamento ocorre basicamente em três estágios: pré-aquecimento, centelhamento e recalque, para garantir uma melhor qualidade estrutural da solda e da zona termicamente afetada pelo calor, se faz necessário o processo de revenimento ao final da soldagem (VICENTE, 2017).

#### 2.5.2.3.1 Pré-aquecimento

No pré-aquecimento, as superfícies do material são levemente pressionadas e, em seguida, são aquecidas por efeito Joule, facilitando o início e a sustentação do centelhamento, a tensão elétrica requerida para manter o centelhamento pode ser diminuída e o material consumido é menor e, além disso, amplia a capacidade da máquina de soldagem, pois, com o amaciamento prévio das peças, menor força pode ser necessária para realizar o recalque (DOMINGUES, 2013).

A necessidade do pré-aquecimento depende de certos fatores, como o teor de carbono e outros elementos de liga presentes no metal a ser soldado. Este procedimento é recomendado se as peças tiverem baixa ductilidade ou dureza muito alta (VICENTE, 2017). A necessidade de pré-aquecimento pode aumentar devido aos os seguintes fatores:

- Teor de carbono no metal de base;
- Teor de ligas do metal de base;
- Temperatura inicial;
- Tamanho da peça;
- Velocidade de soldagem.

#### 2.5.2.3.2 Centelhamento

O objetivo desta etapa é elevar a temperatura dos metais a serem unidos até próximo do seu ponto de fusão, distribuindo o calor gerado em torno da junta de

maneira mais uniforme, além de remover as impurezas que possam existir nas juntas (PEREIRA, 2017).

O processo de centelhamento ocorre com a aproximação das peças até que as saliências entrem em contato e as pontes sejam formadas, ocorrendo o fechamento do circuito, fusão localizada, ejeção do metal fundido e a geração de descargas elétricas. A passagem da corrente elétrica, através dos contatos formados pelas irregularidades das peças, gera forças eletromagnéticas que atuam sobre a junta soldada e ejetam as partículas de metal fundido (VICENTE, 2017).

#### 2.5.2.3.3 Recalque

O recalque ocorre após as superfícies terem sido satisfatoriamente aquecidas. Nesta etapa, ocorre uma força de compressão das partes, uma contra a outra, com o objetivo de eliminar o material excedente e possíveis impurezas da soldagem, realizando, após solidificação, a fixação das extremidades a serem soldadas, as propriedades mecânicas se moldam de acordo com o material de base (VICENTE, 2017; RIBEIRO, 2018).

Nesta etapa do processo pode-se citar como variáveis:

- Corrente elétrica de recalque;
- Força de recalque;
- Distância de recalque;
- Velocidade de Recalque.

#### 2.5.2.3.4 Revenimento

O processo de revenimento consiste em aplicar uma corrente elétrica através da junta soldada por um curto tempo após a soldagem, a fim de restaurar sua microestrutura e propriedades mecânicas em relação ao metal de base. O tratamento térmico de revenimento não é considerado parte do processo de soldagem a topo por centelhamento. Porém, devido à sua importância e vasta aplicação como tratamento térmico pós-soldagem, é interessante ter uma melhor

compreensão do mesmo, bem como as relações de causa e efeito resultantes desse tratamento térmico (FILHO, O., 2007; VICENTE, 2017).

## 2.6 Defeitos em trilhos

Descontinuidades podem ocorrer interna ou externamente. Defeitos internos podem ser descobertos por ensaios não destrutivos, podem causar nucleação de trincas, propagar e promover fratura catastrófica. Os defeitos internos se vinculam ao processo de fabricação ou aos processos de soldagem (SCHNEIDER, 2005). Dentre os defeitos, incluem-se:

- Trinca horizontal;
- Trinca vertical;
- Bolha ou vazio;
- Descontinuidades nas soldas.

Os defeitos externos são facilmente detectáveis, permitindo que seu processo de propagação seja acompanhado durante sua formação. Considerando que na iminência de uma fratura os defeitos internos podem se tornar externos, esses dois tipos foram agrupados em outros quatro grupos (SCHNEIDER, 2005). São eles:

- Descontinuidades longitudinais;
- Descontinuidades superficiais;
- Descontinuidades transversais;
- Desgastes.

### 2.6.1 Descontinuidades em juntas soldadas por centelhamento

As descontinuidades em juntas soldadas por centelhamento são classificadas em dois tipos: mecânica e metalúrgica. Os defeitos que ocorrem em juntas soldadas comprometem a estrutura e funcionamento da via permanente (GONÇALVES, 2017).

### 2.6.1.1 Descontinuidades mecânicas

As descontinuidades mecânicas são geralmente causadas por desalinhamento entre as peças a serem soldadas, conforme a Figura 18, e de irregularidades no acabamento da solda. Podem ser detectadas visualmente pela inspeção da solda. O desalinhamento pode ser vertical, lateral ou angular (DOMINGUES, 2013).

**Figura 18** - Desalinhamento em trilhos.



**Fonte:** LMI TECHNOLOGIES, 2015.

Descontinuidades mecânicas podem ser detectadas com inspeção visual, pois geralmente são causadas por força de aperto ou desalinhamento das peças, esses defeitos podem ser eliminados com manutenção regular e controle de processo (RÄSÄNEN; MARTIKAINEN, 2011).

### 2.6.1.2 Descontinuidades metalúrgicas

As descontinuidades metalúrgicas geralmente são difíceis de detectar e comumente precisam de testes destrutivos para serem reveladas (RÄSÄNEN; MARTIKAINEN, 2011). Dentre os defeitos mais comuns destacam-se: óxidos, *flats spots* e penetradores.

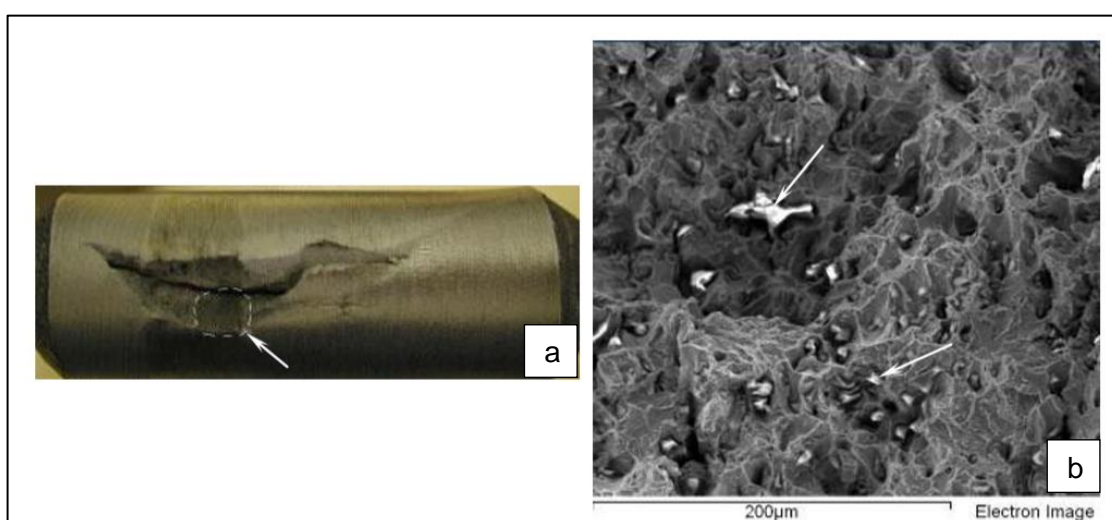
### 2.6.1.2.1 Óxidos

Os óxidos são formados nas superfícies de contato das peças devido à reação do metal aquecido com o oxigênio atmosférico. Essa reação deve ser evitada, a ocorrência de óxidos presos na linha de solda facilita a nucleação de trincas. Se não for possível controlar a reação com o oxigênio, os óxidos devem ser completamente removidos durante o recalque (DOMINGUES, 2013).

### 2.6.1.2.2 *Flat spots*/ Penetradores

A superfície de fratura frágil no *flat spot* é identificada como uma região de cor escura em relação à superfície de fratura dúctil do metal de base, mostrada na Figura 19a, essa cor se deve a presença de ondulações e sólidos segregados. Uma vista mais detalhada sobre a superfície de fratura de um *flat spot* em um aço é mostrada na Figura 19b, os *flat spots* consistem em pequenas escórias sólidas, contendo elevada quantidade de oxigênio, manganês, silício, flúor e titânio (RÄSÄNEN; MARTIKAINEN, 2011).

**Figura 19** - *Flat spots* penetradores na superfície da trinca na linha de solda de uma junta soldada por centelhamento.



**Fonte:** Adaptado de RÄSÄNEN; MARTIKAINEN, 2011.

A diferença entre *flat spots* e penetradores deve-se à sua posição na peça. *Flat spots* são inteiramente localizados na seção em que a solda ocorreu, ou seja, a

modificação química resultante do procedimento está inteiramente localizada na seção da solda. Os penetradores, por sua vez, são caracterizados quando essa modificação química ocorrida durante a soldagem se estende para uma superfície livre da peça, não apenas em sua seção (VICENTE, 2017).

### 2.6.1.3 Canoamento

O canoamento (*weld biter*) é um defeito de grande preocupação nas ferrovias de carga pesada, ocorrendo a formação de uma depressão junto as soldas. O defeito surge devido as diferenças de dureza entre o metal de base e a zona afetada pelo calor. A pressão de contato da roda causa deformação (afundamento) na região do metal de base ou da zona afetada pelo calor, que possuir menor dureza, criando o formato de uma canoa (ROSA, 2008). Como mostra a Figura 20.

**Figura 20** - Demonstração do defeito de canoamento em trilhos ferroviários.



**Fonte:** Adaptado de DUVEL; MUTTON, 2005.

O defeito do tipo canoamento apresenta depressões entre 50 e 100 mm de comprimento, que se manifestam nas soldas dos trilhos ferroviários sob a ação do tráfego, nas zonas afetadas pelo calor de fusão desenvolvido na etapa de soldagem (COIMBRA, 2008). A Figura 21 mostra os danos em ambas as zonas afetadas pelo calor, destacadas em vermelho, que fazem fronteira com a zona de fusão de uma solda aluminotérmica.

**Figura 21** - Danos em ambas as zonas termicamente afetadas pelo calor de uma solda aluminotérmica.



**Fonte:** Adaptado de STEENBERGEN, 2021.

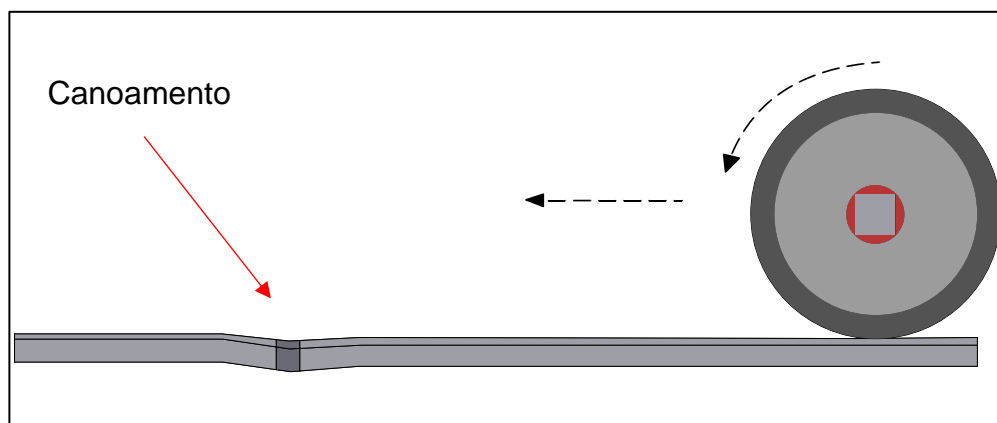
#### 2.6.1.3.1 A consequência do canoamento

As ferrovias brasileiras aumentam cada vez mais o volume de carga transportada, fazendo com que se aplique maiores esforços com maior frequência sobre os trilhos. Essa demanda sobre a via tem exigido estudos mais aprofundados sobre o contato roda-trilho, principalmente nos pontos de maior criticidade, como as juntas soldadas, onde são pontos suscetíveis à nucleação e propagação de trincas por fadiga. A zona termicamente afetada (ZTA) geralmente apresenta diminuição de dureza, reconhecida nos gráficos como “dente de vampiro” (SILVA, 2017).

As áreas de nucleação de trincas estão localizadas em regiões de concentração de tensões: juntas soldadas, arestas vivas e estrias de retificação associadas à presença de rebarbas devido a soldagem. Essas evidências, associadas a um carregamento cíclico de uma ferrovia, podem levar a um diagnóstico final de falha por fadiga (TAWFIK; MUTTON; CHIU, 2008).

As zonas de danos comuns a serem consideradas são a base do trilho dentro de 750 mm de qualquer junta; e as bases de travessias em zonas de transferência (estendendo-se 750 mm em ambos os lados do ponto de captação); e outros componentes nas proximidades de travessias (KAEWUNRUEN, 2014). A Figura 22 demonstra uma irregularidade na inclinação do trilho, localizada no cordão de solda.

**Figura 22** - Irregularidade na inclinação do trilho.

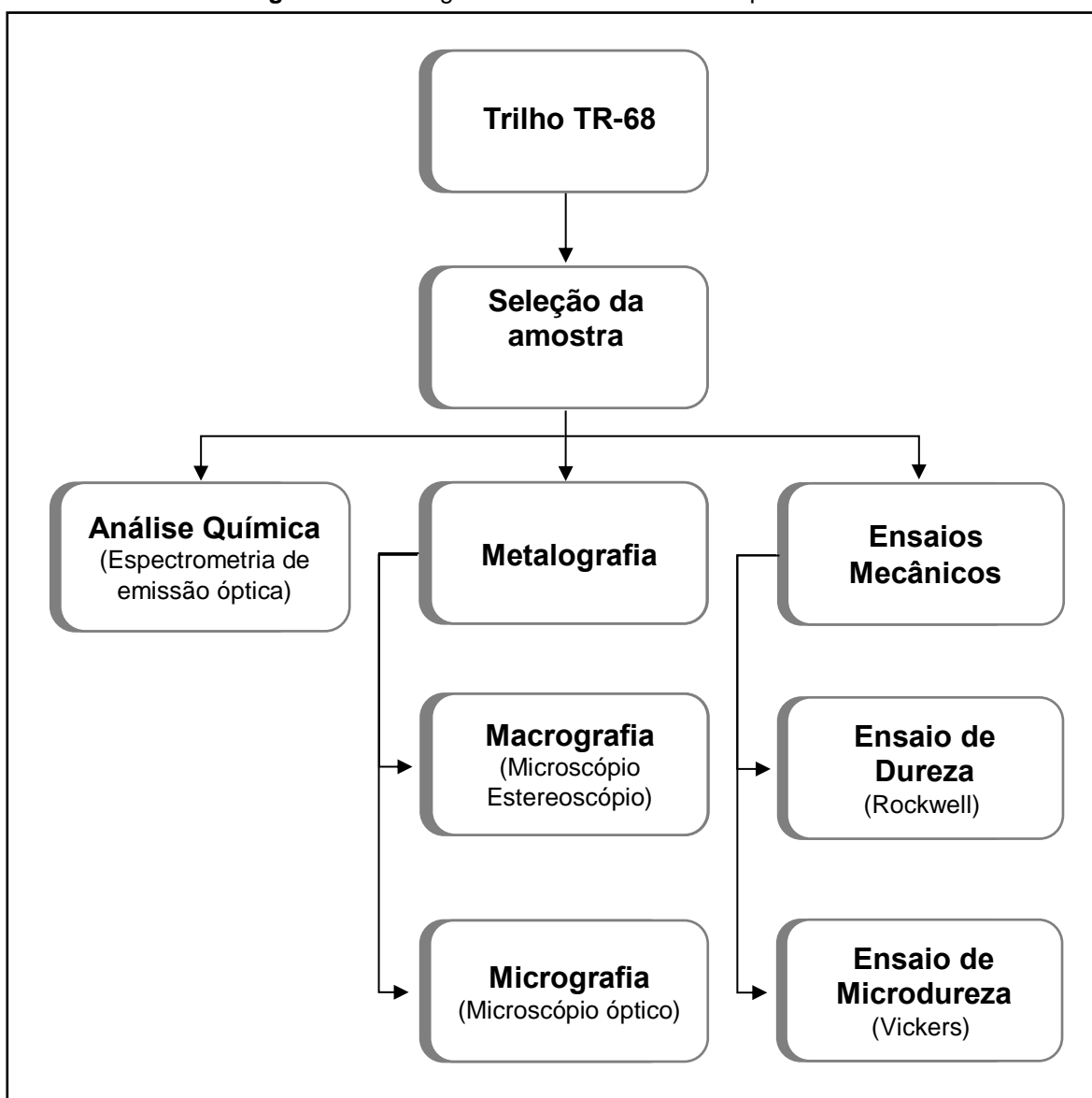


**Fonte:** Adaptado de KAEWUNRUEN, 2014.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma mostrado na Figura 23 apresenta o planejamento experimental utilizado neste trabalho.

Figura 23 - Fluxograma com as atividades experimentais.



Fonte: Autor, 2021.

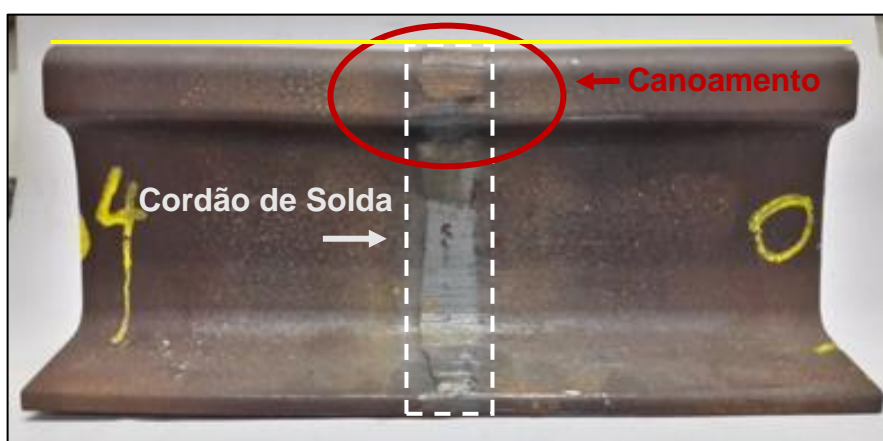
#### 3.1 Trilho TR-68

O trilho analisado neste trabalho é proveniente do projeto Cátedra Roda-Trilho, de parceria da Universidade Federal do Pará e a companhia Vale S.A., por

meio do grupo de pesquisa em engenharia de materiais (GPEMAT). O trilho analisado é do tipo Vignole e corresponde a classificação TR-68. E este é procedente de uma ferrovia de elevado carregamento, o trecho de sua localização corresponde a uma seção que foi unida via técnica de soldagem por centelhamento.

O trilho selecionado é mostrado na Figura 24 onde há destaque para a região da solda. Na análise visual observou-se o esmagamento presente na superfície do trilho, onde ocorreu em uma região ligeiramente anterior e posterior a solda. Não foram cedidas características técnicas referentes a operação e produção do trilho.

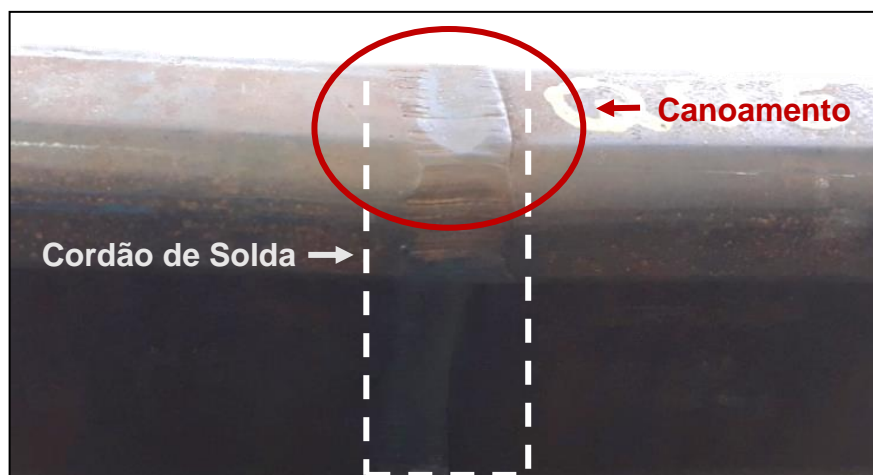
**Figura 24** - Trilho fornecido pela companhia Vale S/ A.



**Fonte:** Adaptado de MELO et al., 2019.

Na Figura 25 identifica-se o defeito do tipo canoamento destacado em vermelho na região do boleto.

**Figura 25** - Destaque do defeito do tipo canoamento.

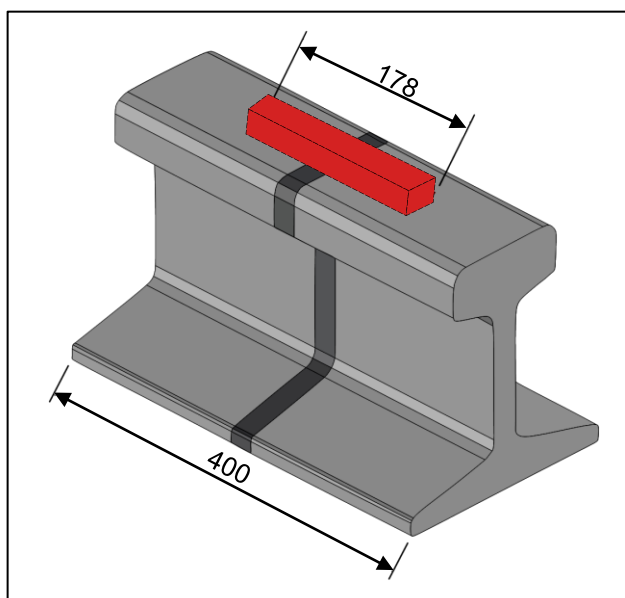


**Fonte:** Autor, 2021.

### 3.2 Seleção da amostra

Para realizar a caracterização do trilho, retirou-se uma amostra longitudinal da região do boleto (destacado em vermelho), conforme as dimensões em mm mostradas na Figura 26. O corte foi realizado no laboratório de caracterização de materiais metálicos (LCAM/ UFPA) utilizou-se a máquina de eletroerosão a fio.

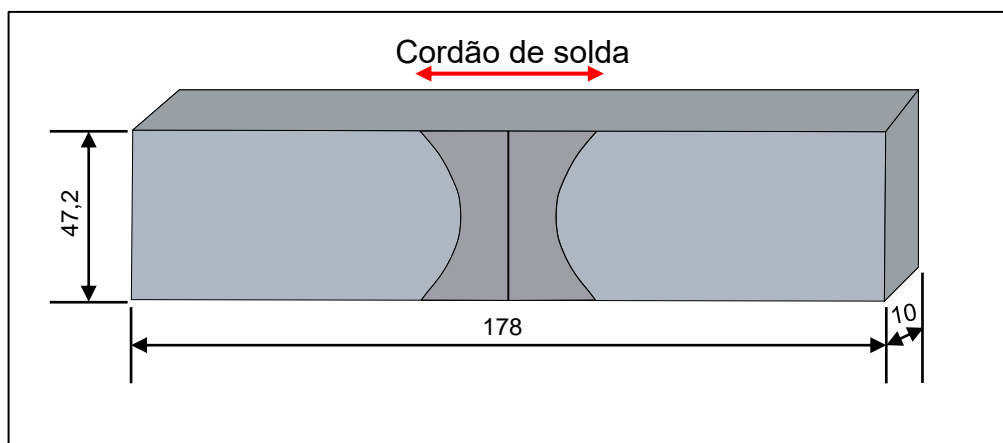
**Figura 26** - Região do corte e retirada da amostra.



**Fonte:** Autor, 2021.

A amostra retirada da região do boleto possui 178 mm de comprimento, 47,2 mm de altura e 10 mm de espessura, conforme mostra a Figura 27.

**Figura 27** - Amostra retirada do boleto.



**Fonte:** Autor, 2021.

### 3.3 Análise química

A análise química foi efetuada via espectrômetro de emissão óptica da marca *Bruker* e do modelo *Q4 Tasman*, conforme mostra a Figura 28. Efetuou-se as análises na amostra da região do boleto, obteve-se um perfil longitudinal nas regiões do metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e linha central (LC).

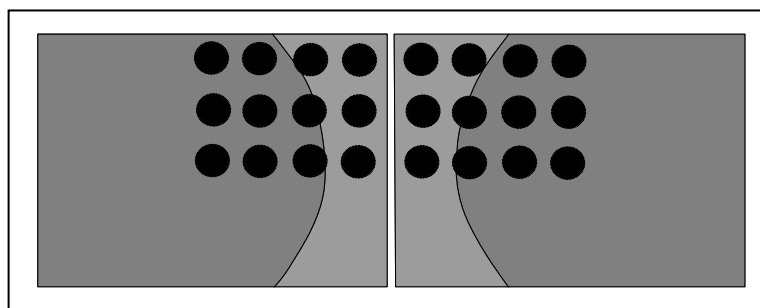
**Figura 28** - Espectrômetro de emissão óptica.



Fonte: Autor, 2021.

Foram realizadas 24 medições com espaçamento de 10 mm, a fim de verificar se há variações na composição química das regiões do trilho, conforme a Figura 29.

**Figura 29** - Amostra para análise química.



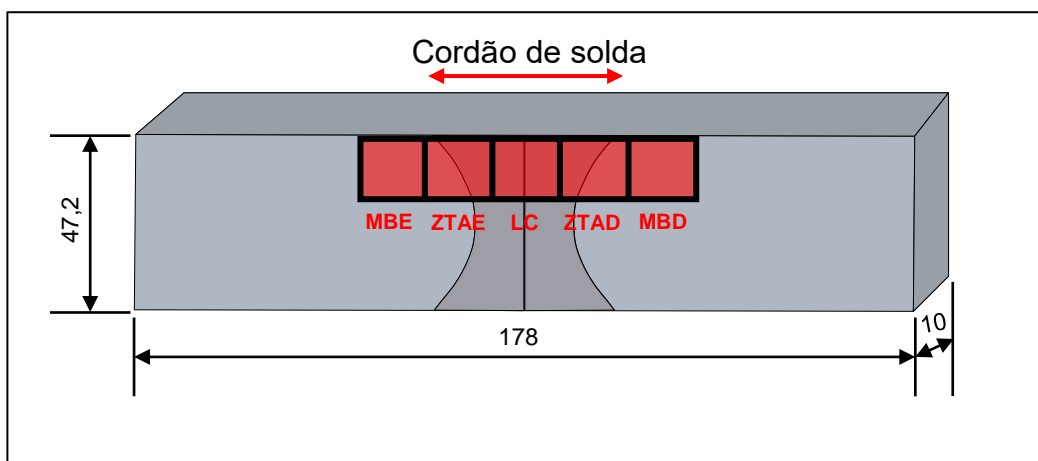
Fonte: Autor, 2021.

A caracterização de análise química foi efetuada pelo grupo de pesquisa em engenharia de materiais (GPEMAT, 2021) e está devidamente referenciada na etapa de resultados.

### 3.4 Metalografia

A partir do corte longitudinal obtido do boleto, fez-se secções nas regiões da junta soldada, conforme as dimensões em mm mostradas na Figura 30. Diante disso, teve-se as amostras do metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e linha central (LC), as letras E e D são amostras do trilho esquerdo e direito.

**Figura 30** - Amostras selecionadas.



**Fonte:** Autor, 2021.

Para as análises metalográficas, as amostras foram lixadas em uma sequência de lixas de carbetto de silício nas granulometrias de 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*. Após esta etapa, as amostras foram submetidas à limpeza através da cuba ultrassônica, mostrada na Figura 31.

**Figura 31** - Cuba ultrassônica.



**Fonte:** Autor, 2021.

Em seguida as amostras foram polidas em politriz metalográfica equipada com inversor de frequência da marca WEG e do modelo CFW10, mostrada na Figura 32.

**Figura 32 - Politriz.**



**Fonte:** Autor, 2021.

As amostras foram polidas com pasta de diamante nas granulometrias de 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$ , mostradas na Figura 33. As amostras foram limpas por meio de solução de etanol e secas por jato quente.

**Figura 33 - Pasta de diamante.**



**Fonte:** Autor, 2021.

Posteriormente realizou-se o ataque químico com o reativo Nital 3 %, conforme mostra a Figura 34 para diferenciar os constituintes e revelar a microestrutura das amostras.

**Figura 34 - Nital 3%.**



**Fonte:** Autor, 2021.

Realizou-se o ensaio metalográfico para as diferentes regiões do trilho, no metal de base (MB), na zona termicamente afetada (ZTA) e na linha central do cordão de solda (LC).

### **3.5 Análise macroestrutural**

Realizou-se a análise macroestrutural na linha central do cordão de solda para detectar heterogeneidades como segregações ou trincas que não tenham sido adequadamente atenuados ou eliminados por tratamentos mecânicos e térmicos a que o material foi submetido após solidificação. Para a análise macroestrutural foi utilizado o microscópio estereoscópio da marca Leica Microsystems EZ4 HD, mostrado na Figura 35.

**Figura 35** - Microscópio estereoscópio.



**Fonte:** Autor, 2021.

### **3.6 Análise microestrutural**

Na análise micrográfica realizou-se uma avaliação na microestrutura da seção longitudinal da amostra, conforme mostra as regiões destacadas em vermelho na Figura 30, para detectar variações microestruturais causadas pelo processo de soldagem, para a técnica de microscopia óptica, utilizou-se o microscópio óptico da marca Leica Microsystems DM750 M e um computador com software de captação para obtenção da imagem de microestrutura, conforme mostra a Figura 36.

**Figura 36** - Microscópio óptico.



**Fonte:** Autor, 2021.

### 3.7 Ensaios mecânicos

#### 3.7.1 Ensaio de dureza

Seguindo a norma ABNT NBR ISO 6508-1 (2019) o ensaio de dureza Rockwell foi realizado para aferição de dureza por região, utilizou-se o durômetro Rockwell, modelo 200HRS-150, mostrado na Figura 37.

**Figura 37** - Durômetro Rockwell.



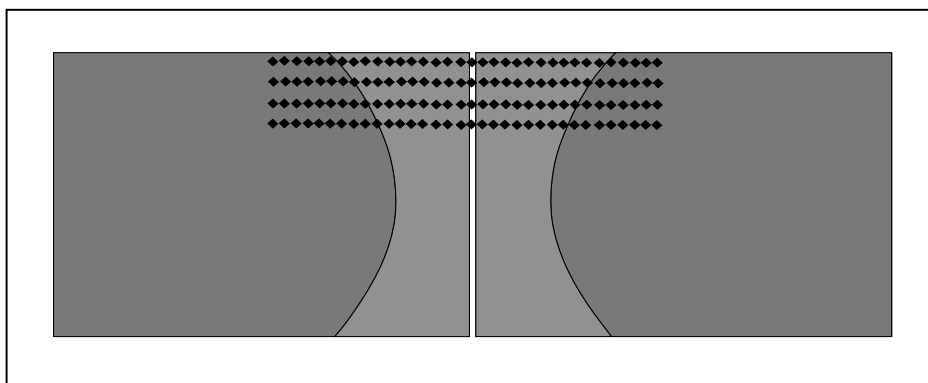
**Fonte:** Autor, 2021.

A Figura 38 apresenta o esquema das indentações realizadas. A caracterização foi realizada na junta soldada, abrangendo o metal de base (MB), a zona termicamente afeta (ZTA) e a linha central (LC).

Adotou-se uma sequência de indentações que corresponde a 4 (quatro) linhas contínuas, a distância entre as indentações foi de 5 mm na direção y (profundidade) e com 2,5 mm de espaçamento no eixo x, utilizou-se a escala HRC.

Utilizou-se o penetrador cone de diamante com  $120^\circ$  de conicidade, a carga utilizada no ensaio foi de 10 kgf em seguida aplicou-se a força de ensaio de 140 kgf, resultando em uma força de ensaio total de 150 kgf pelo tempo de 8 segundos.

**Figura 38** - Amostra para o ensaio de dureza.

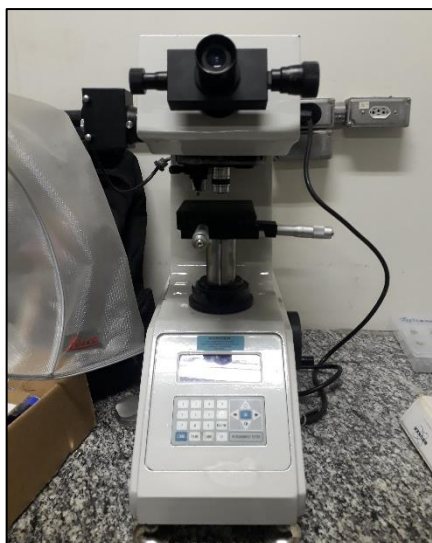


**Fonte:** Autor, 2021.

### 3.7.2 Ensaio de microdureza

Para obter o perfil de microdureza da solda foi utilizado um microdurômetro da marca Microtest de dureza Vickers com penetrador de diamante, mostrado na Figura 39, utilizou-se a carga de 200 gf por um tempo de 13 s, o espaçamento entre as indentações foi de 3,5 mm.

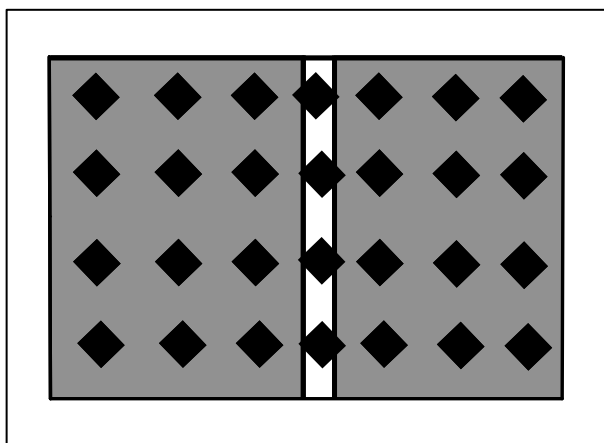
**Figura 39** - Microdurômetro.



**Fonte:** Autor, 2021.

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado na região da linha central (LC) do cordão de solda, conforme a Figura 40, com base na norma ASTM E92 (2017).

**Figura 40** - Amostra da região da linha central do cordão de solda.



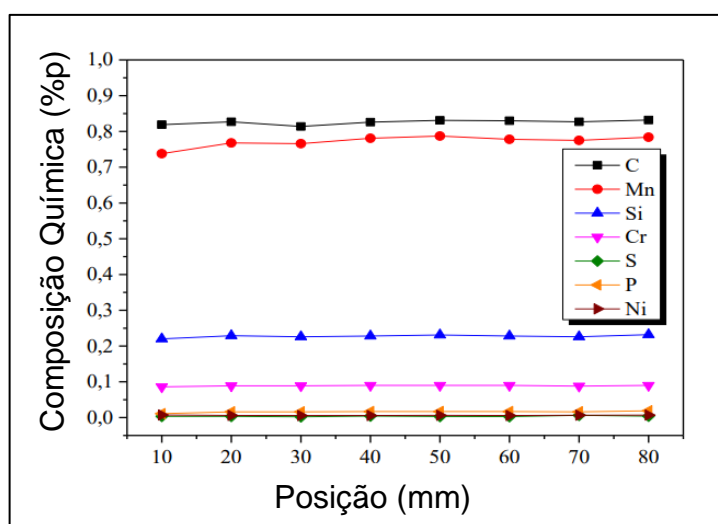
**Fonte:** Autor, 2021.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise química

O gráfico mostrado na Figura 41 apresenta a composição química da junta soldada por centelhamento, observou-se que não houve dispersão de elementos analisados ao longo das posições, mantiveram-se em perfil constante.

**Figura 41** - Distribuição da composição química da junta soldada.



Fonte: GPEMAT, 2021.

A Tabela 3 mostra a composição química geral da secção da junta soldada e o desvio padrão, onde nota-se que a variação foi pouco significativa.

**Tabela 3** - Composição química.

Elementos (p%)	Média	Desvio padrão
<b>C</b>	0,82575	0,006228
<b>Mn</b>	0,772125	0,015597
<b>Si</b>	0,2275	0,003703
<b>Cr</b>	0,089	0,001414
<b>S</b>	0,003663	0,001243
<b>P</b>	0,016125	0,002295
<b>Ni</b>	0,006238	0,000614

Fonte: GPEMAT, 2021.

A amostra com o defeito de canoamento não apresentou variação significativa dos elementos analisados, ambos os trilhos unidos estão nas mesmas faixas de composição química, o que pode ser evidência de serem do mesmo fabricante. A análise química apresentou-se de acordo com a norma ASTM A1-00 (2018).

Os elementos C, Mn e Si possuem características como ação desoxidante, aumento de resistência e aumento da dureza, o Cr proporciona aumento de resistência e de temperabilidade, o S e o P reduzem a ductilidade do material e o Ni aumenta a resistência ao impacto (CIMM, 2021).

## 4.2 Análise macroestrutural

Na Figura 42 é mostrada a superfície do boleto do trilho, na região da linha central (LC), pode-se identificar destacado em vermelho um defeito presente na superfície e também a linha central descarbonetada do cordão de solda com a aparência mais clara em relação as outras regiões do material.

**Figura 42** - Análise da superfície da junta soldada.



Fonte: Autor, 2021.

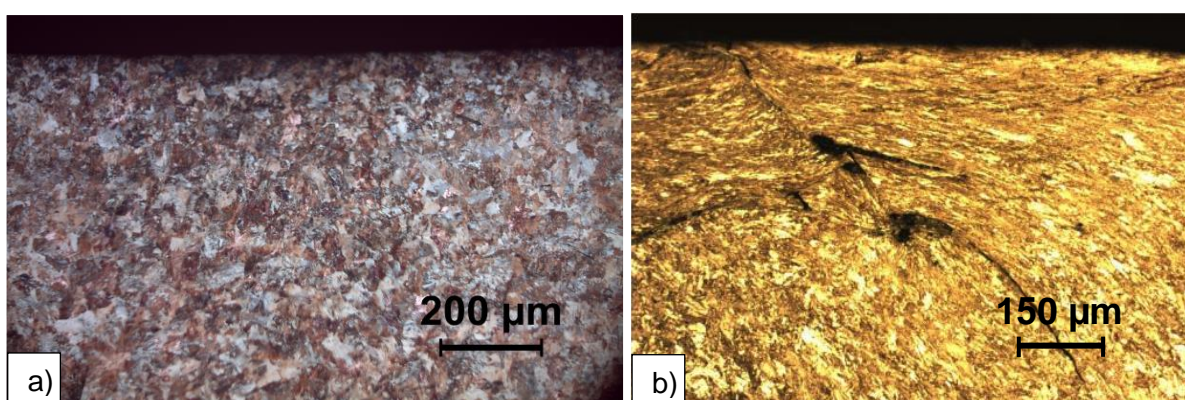
A descarbonetação é comum durante a soldagem por centelhamento, porém, a região descarbonetada é normalmente expulsa da junta durante o recalque. Se o calor concedido e/ou o tempo de exposição ao oxigênio atmosférico forem elevados, se o recalque for insuficiente ou se as crateras formadas forem muito profundas, a região descarbonetada pode ainda permanecer na linha central (LC) (DOMINGUES, 2013).

### 4.3 Análise microestrutural

A Figura 43 apresenta a superfície do trilho analisado onde localiza-se o canoamento (Figura 43a) e a superfície de um trilho utilizado em serviço (Figura 43b), onde identifica-se a deformação ocorrida no trilho usado, que levou a formação de trincas.

A superfície do trilho analisado, na região do defeito de canoamento, não apresentou evidências de que o trilho foi colocado em serviço, pois a microestrutura não apresenta deformação superficial visível, conforme mostra a literatura (NISHIKAWA, 2018).

**Figura 43** - Microscopia da superfície do boleto, em (a) o trilho analisado e em (b) o trilho usado em serviço.



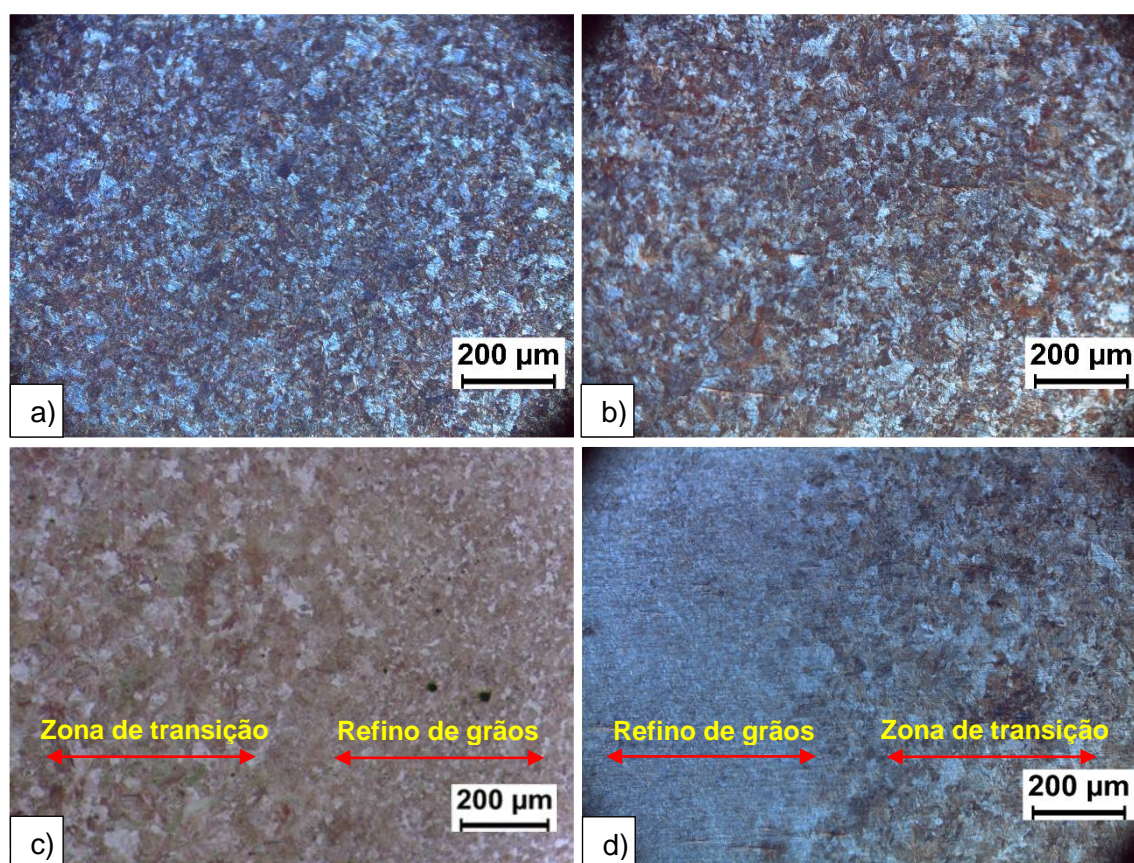
Fonte: NISHIKAWA, 2018; Autor, 2021.

A Figura 44 (a e b) apresenta as microestruturas do metal de base (MBD e MBE) onde mostra o material de base sem mudanças, na região do metal de base as temperaturas atingidas não são suficientes para provocar mudanças na microestrutura (BRIGUENTE et al., 2011).

A Figura 44 (c e d) mostra as microestruturas da zona termicamente afetada (ZTAE e ZTAD), onde nota-se o refino de grão justificado pelo processo de soldagem por centelhamento e o início da zona de transição.

Embora a zona fundida seja expulsa durante o recalque, diferenças microestruturais básicas podem ser observadas entre a zona termicamente afetada (ZTA) (BRIGUENTE et al., 2011).

**Figura 44** - Micrografia da junta soldada de trilho atacado com Nital 3%. (a) metal de base esquerdo; (b) metal de base direito; (c) ZTA esquerda; (d) ZTA direita. Aumento de 100x.



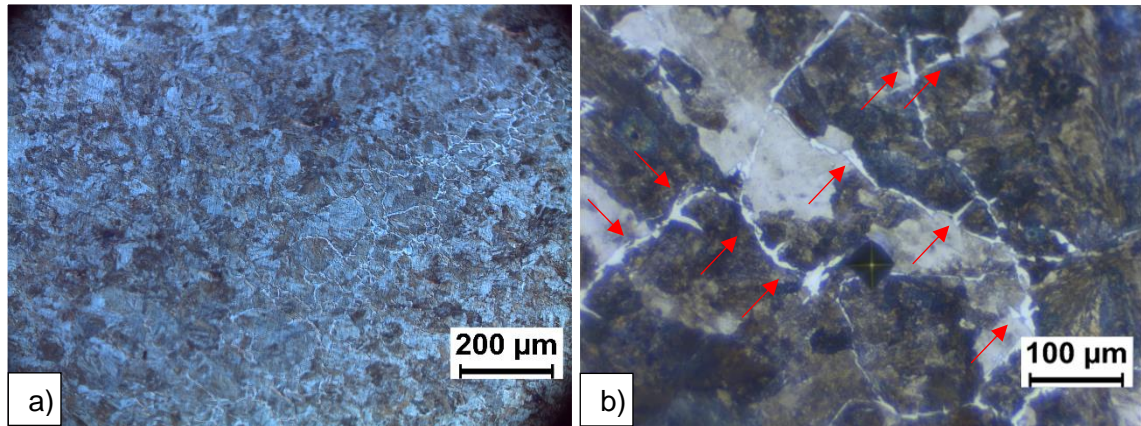
Fonte: Autor, 2021.

A Figura 45 apresenta a microestrutura da linha central (LC) com aumentos de 100 e 200x, onde observa-se a presença de cementita proeutetóide localizada nos contornos de grão da linha central descarbonetada (em setas vermelhas).

Essa cementita é denominada cementita proeutetóide (aquela que se forma antes da reação eutetóide). As ligas hipereutetóides contêm entre 0,76 e 2,14%p C, quando resfriadas a partir de temperaturas no campo da fase  $\gamma$  (Austenita), a microestrutura resultante consiste em perlita e cementita proeutetóide, como

microconstituintes, a cementita proeutetóide aparece clara na fotomicrografia (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

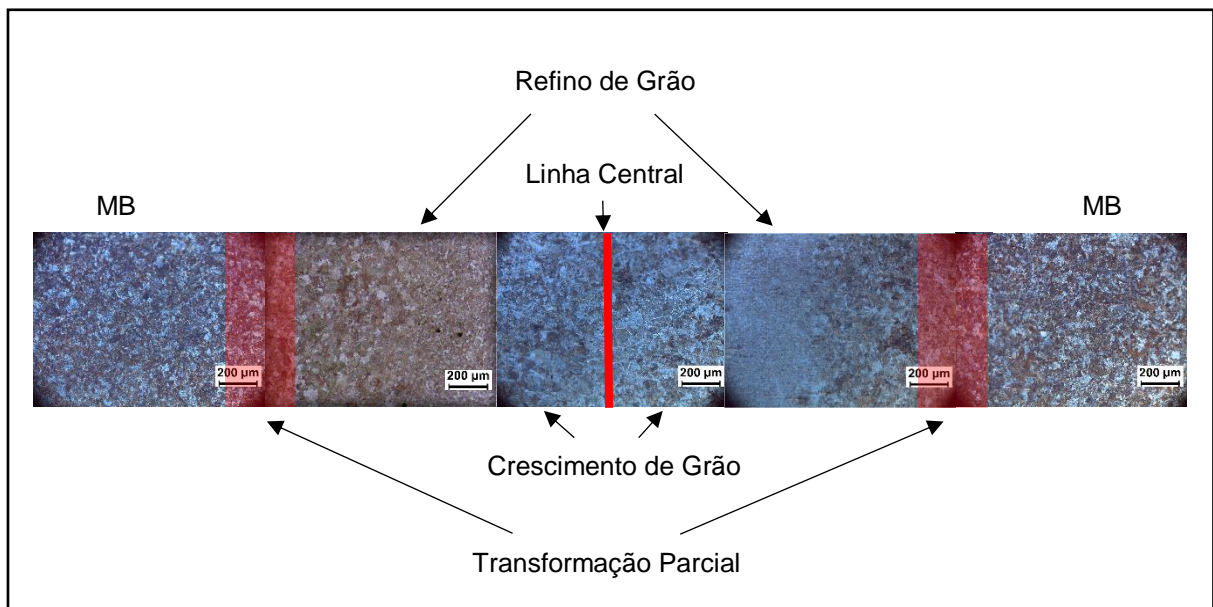
**Figura 45** - Microestrutura da linha central (LC) com aumento de 100x em (a) e aumento de 200x em (b) com presença de cementita proeutetóide.



Fonte: Autor, 2021.

Na Figura 46 apresenta-se um esquema da microestrutura de todas as regiões da junta soldada. As amostras de trilho apresentaram a microestrutura perlítica com a presença de cementita proeutetóide na linha central (LC) do cordão de solda por centelhamento.

**Figura 46** - Microestrutura das regiões da junta soldada.



Fonte: Autor, 2021.

Na Figura 47 observou-se com um aumento de 200x, a trinca aparente localizada no boleto, região da superfície do trilho e no cordão de solda por centelhamento.

O aparecimento de trincas em soldas de trilhos ocorre em função de diversas variáveis, entre elas, duas das mais importantes são: a dureza e as solicitações causadas pelas rodas dos equipamentos ferroviários (SOKEI et al., 2012).

**Figura 47** - Trinca com aumento de 200x.



**Fonte:** Autor, 2021.

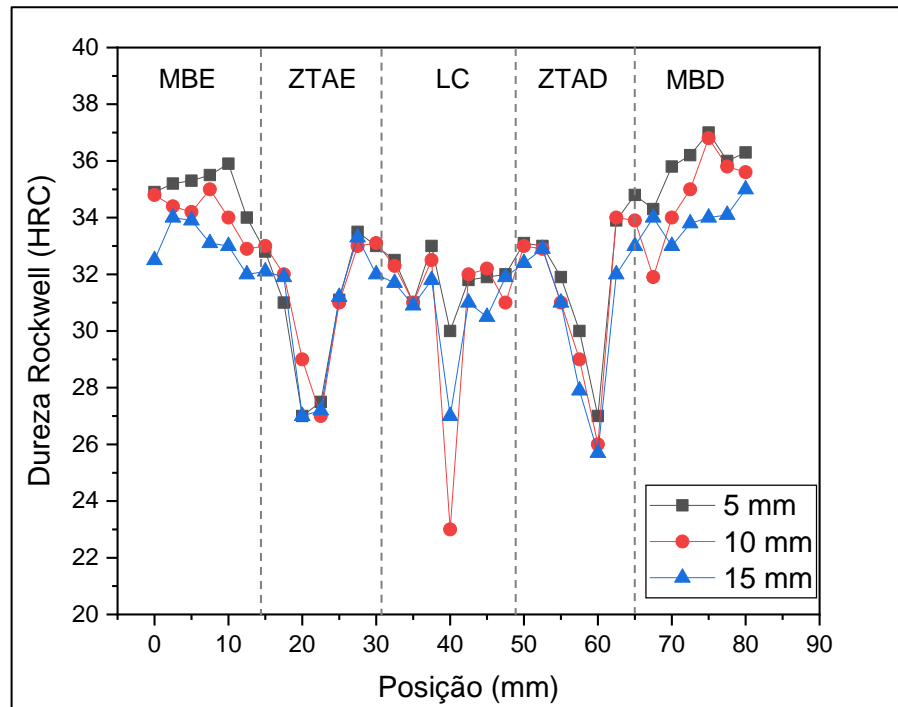
Os trilhos ferroviários estão sujeitos a defeitos desde a fabricação até os originados em serviço, pela ação repetida do carregamento realizado pelas rodas sobre o trilho pela passagem do trem, o que pode causar defeitos e propagação de trincas (SCHNEIDER, 2005).

#### **4.4 Ensaio de dureza Rockwell**

A Análise da dureza da junta soldada cortada longitudinalmente, apresentou notáveis modificações, tendo em vista as alterações térmicas no processo de soldagem, que afetam as estruturas do material de base unido.

Vários trabalhos (ROSA, 2008; SILVA, 2017; PORCARO, 2017; NISHIKAWA, 2018; MIRANDA, 2020) mostram que a dureza é reduzida na região da zona termicamente afetada pelo calor (ZTA), observa-se no gráfico apresentado na Figura 48 a diminuição acentuada de dureza, ocorrendo na ZTAD e ZTAE, onde esse formato de gráfico é denominado como “dente de vampiro”, na região da LC se notou o menor valor de dureza com destaque para a profundidade de 10 mm.

**Figura 48 - Perfil de dureza (HRC).**



Fonte: Autor, 2021.

#### 4.5 Ensaio de microdureza Vickers

A Figura 49 apresenta as linhas de indentações realizadas no ensaio de microdureza na região da linha central (LC), com a profundidade em relação a superfície do boleto de 5, 10 e 15 mm.

**Figura 49 - Marcações do ensaio de microdureza na LC.**



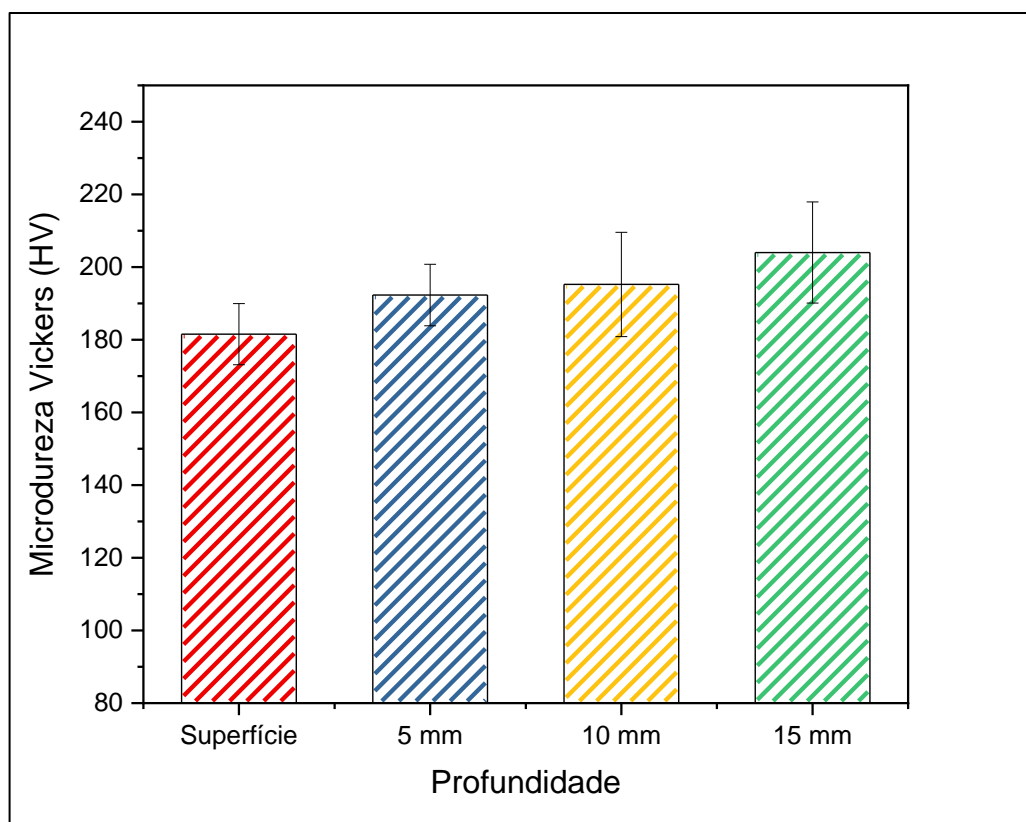
Fonte: Autor, 2021.

A Figura 50 mostra o perfil de microdureza Vickers da linha central (LC) do cordão de solda, o resultado apresentou uma diminuição acentuada da microdureza na região da linha central (LC), onde ocorreu o defeito de canoamento.

Percebe-se que os valores de microdureza Vickers aumentam conforme a profundidade da amostra, com aumento também do desvio padrão.

Quando comparado com a literatura (PORCARO et al., 2017; DANIEL, 2021). Os valores de microdureza obtidos na amostra analisada são insuficientes para a aplicação do trilho ferroviário em serviço, visto que a diminuição excessiva de microdureza e de resistência podem estar associadas a defeitos como o defeito de canoamento.

**Figura 50** - Perfil de microdureza Vickers (HV).



**Fonte:** Autor, 2021.

## 5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho avaliou-se o defeito do tipo canoamento identificado em processos de soldagem por centelhamento em trilhos ferroviários, através do estudo de suas características, buscou-se entender o seu comportamento e a sua influência através do método de soldagem utilizado.

A junta soldada por centelhamento apresentou alterações pouco significativas na dispersão dos elementos de liga do trilho, a composição química apresentou-se de acordo com as literaturas, a análise química com 0,82 %p C comprovou que se trata de um aço hipereutetóide.

A análise macroestrutural constatou um defeito (trinca) no boleto e a descarbonetação da linha central do cordão de solda, onde ocorreu o defeito de canoamento.

Na análise microestrutural constatou-se a morfologia perlítica do material, na microestrutura da linha central (LC) observou-se a presença de cementita proeutetóide, trata-se de uma região branca que coincide com a redução acentuada de dureza e microdureza na região do cordão de solda.

A análise da dureza da junta soldada cortada longitudinalmente, apresentou notáveis modificações, com destaque para a diminuição de dureza na zona termicamente afetada (ZTA) e na linha central (LC).

O perfil de microdureza Vickers da linha central (LC) do cordão de solda, apresentou uma diminuição excessiva de microdureza em relação a literatura.

O defeito presente no trilho ferroviário não corresponde a um defeito de canoamento típico, pois o esmagamento não é proveniente do trilho ter sido colocado em serviço.

O trilho caracterizado não apresentou deformações na microestrutura da superfície do boleto, tratando-se de um trilho novo que possivelmente falhou e foi reprovado na etapa de soldagem em estaleiro e rejeitado para aplicação em serviço.

## 5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Por meio deste estudo, algumas sugestões de novos trabalhos estão listadas a seguir:

- Realizar a medida de tamanho de grão da junta soldada, utilizando a norma ASTM E112 – 13;
- Realizar o ensaio de tração em outras regiões do trilho estudado, utilizando a norma ASTM E8/ E8M – 21;
- Realizar a microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando a técnica de elétrons secundários, para permitir uma melhor revelação dos contornos do constituinte presente na amostra.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- ANDRADE, C. C. R.; REIS, V. S.; COSTA, D. S.; SANTANA, C. I. O.; MIRANDA, G. O.; QUARESMA, J. M. V. Caracterização Química e Mecânica de uma Junta Soldada Por Aluminotermia. In: **Anais** do I Simpósio da Faculdade de Engenharia Mecânica – SIMPOMEC. Tucuruí/Pa: UFPA, 2019.
- ANTF. **Agência Nacional dos Transportadores Ferroviários**. Comunicação e Imprensa/ Releases. 2019. Disponível em: <https://www.antf.org.br/releases/>. Acesso em: 27 mar. 2020.
- ANTF. **Agência Nacional dos Transportadores Ferroviários**. Informações Gerais. 2021. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em: 12 set. 2021.
- ANTF. **Agência Nacional dos Transportadores Ferroviários**. O Setor Ferroviário de Carga Brasileiro. 2018. Disponível em: <http://www.antf.org.br/informacoes-gerais>. Acesso em: 24 jan. 2020.
- ASTM. American Society for Testing Materials. **A1-00**: Standard Specification for Carbon Steel Tee Rails. West Conshohocken, PA, USA. 2018.
- ASTM. American Society for Testing Materials. **E112**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocken, PA, USA, 2013.
- ASTM. American Society for Testing Materials. **E8/E8m – 16**: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, USA. 2021.
- ASTM. American Society for Testing Materials. **E92**: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, USA. 2017.
- BELLINI, L. P.; LUCAS, C. G. A Importância da Revitalização do Transporte Ferroviário de Carga para o Desenvolvimento da Economia Brasileira. In: **Anais** do 36º Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP. João Pessoa/PB: ABEPRO, 2016, p. 01-22.
- BORGES NETO, C. **Manual Didático de Ferrovias**. Universidade Federal do Paraná. Paraná. 2012. 202 p.
- BOUZAN, B. M. **Efeito das Variáveis de Processo na Qualidade de Soldas Aluminotérmicas em Trilhos Ferroviários**. 2016. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

BRIGUENTE, C. A.; NETO, V. G.; MANOEL, P. A. F.; SOKEI, C. R.; VENTELLA, V. A.; TOKIMATSU, R. C. Análise da Caracterização Estrutural de Trilhos Ferroviários Soldados por Caldeamento. In: **Anais** do 10º Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica – CIBEM10. Porto/Portugal: FEUP, 2011, p. 3765-3772.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. Livros Técnicos e Científicos – LTC. 9ª Edição. Rio de Janeiro: Editora S. A. 2016. 882 p.

CIMM. **Centro de Informação Metal Mecânica**. Elementos Químicos Presentes e sua Influência. 2021. Disponível em: [cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6362-elementos-quimicos-presentes-e-sua-influencia](http://cimm.com.br/portal/material_didatico/6362-elementos-quimicos-presentes-e-sua-influencia). Acesso em: 15 set. 2021.

COIMBRA, M. V. **Modos de Falha dos Componentes da Via Permanente Ferroviária e seus Efeitos no Meio Ambiente**. 2008. 165 p. Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

CONSOLI, L. R. P. **Análise do Comportamento Dinâmico Lateral de um Veículo Ferroviário**. 2007. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, 2007.

CUNHA, P. G. **Análise Dinâmica de Pontes Ferroviárias: Uma Metodologia simplificada**. 2011. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

DAMASCENO, F. G.; MATLABA, V. F.; SANTOS, J. F.; MOTA, J. A. Reaproveitamento de Dormentes de Madeira da Estrada de Ferro Carajás para a Cogeração de Energia Elétrica. **RBCIAMB**. n. 45, p. 1-18, 2017.

DANIEL, B. T. F. **Caracterização dos Trilhos Tipo TR-68 da Estrada de Ferro Carajás (EFC) para a Identificação de Defeitos por *Rolling Contact Fatigue* (RCF)**. 2021. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

DOMINGUES, N. **“Soldabilidade por Centelhamento do Aço Dual Phase 780”**. 2013. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

DUVEL, J.; MUTTON, P. Rail Requirements for 40 Tonne Axle Loads. 8th International Heavy Haul Conference, **Companhia Vale do Rio Doce**, Rio de Janeiro, p. 719-729, 2005.

FALCÃO, V. A. A Importância do Transporte Ferroviário de Carga para a Economia Brasileira e Suas Reais Perspectivas de Crescimento. **Revista de Engenharia Civil**. Azurém, n. 45, p. 51-63, 2013.

FERREIRA, M. A.; ASSIS, A. C. V.; SILVA, C. A.; MARCHETTI, D. S.; DALTO, E. J.; RIOS, E. Ferrovias de Carga Brasileiras: Uma Análise Setorial. **BNDES Setorial**. Rio de Janeiro, n. 46, p. 79-129, 2017.

FICI, R. P. **O Sistema Ferroviário Mundial: O Caso Brasileiro.** 2017. 220 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

FILHO, J. C. S. **Análise Numérica do Comportamento Mecânico de um Pavimento Ferroviário Para Diferentes Tipos de Veículos de via.** 2013.107 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

FILHO, O. G. **Influência da Corrente Elétrica, da Força de Recalque e do Tratamento Térmico de Revenimento na Soldagem Topo-a-Topo Por Centelhamento de Serras de Fita Bimetálica.** 2007. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2007.

FUJII, M.; NAKANOWATARI, H.; NARIAI, K. Rail Flash-Butt Welding Technology. **JFE Technical Report.** n. 20, p. 159-163, 2015.

GONÇALVES, D. C. **Planejamento e Procedimento Experimental de Soldagem de Trilho Ferroviário por Centelhamento.** 2017. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

GPEMAT; 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 Defeito de um Trilho Ferroviário Soldado por Centelhamento. In: **Anais do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF.** Curitiba/PR: ABCM, 2021.

HLAVATÝ, I.; SIGMUND, M.; KREJČÍ, L.; MOHYLA, P. The Bainitic Steels for Rails Applications. **Materials Engineering,** v. 16, n. 4, p. 44–50, 2009.

HOZ, F. **Informe Sobre La Industria del Ferrocarril e el Material Ferroviario.** Federación de indústria de comisiones obreras. Madrid. 2013. 62 p.

KAEWUNRUEN, S. Monitoring Structural Deterioration of Railway Turnout Systems Via Dynamic Wheel/Rail Interaction. **Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation,** v. 1, p. 19-24, 2014.

KAPITO, A.; STUMPF, W.; PAPO, M. J. The Role of Alloying Elements in Bainitic Rail Steels. **The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy,** v. 113, p. 67–72, 2013.

LMI TECHNOLOGIES. **LMI Technologies Inc.** Rail Profiling. 2015. Disponível em: <https://lmi3d.com/solutions/industries/road>. Acesso em: 31 mar. 2020.

MACÊDO, F. B. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários.** 2009. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.

MAIS. **Inovação Aberta Gera Avanços Para a Vale e a Sociedade**. Vale. Rio de Janeiro. v. 1. 2017. 42 p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ª Edição Atualizada. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 363 p.

MARSH. J. H. **The Canadian Encyclopedia**. Railway History. 2009. Disponível em: <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/railway-history>. Acesso em: 19 mar. 2020.

MASSA. **Pesagem e Automação Industrial**. Malha Ferroviária, Setor Ferroviário. 2020. Disponível em: <https://massa.ind.br/transporte-ferroviario-no-mundo/>. Acesso em: 14 set. 2021.

MELO, B. S.; REIS, V. S.; SANTANA, C. I. O.; SANTOS, C. V. P.; MIRANDA, G. O.; NEVES, A. C.; QUARESMA, J. M. V. Caracterização Química, Mecânica e da Fratura de Trilhos Perlíticos. **Atena Editora**, p. 122-134, 2019.

MICENKO, P.; MURUGANANT, A.; LI, H.; XU, X. **Double Dip Hardness Profiles in Rail Welded Heat Affected Zone – Literature and Research Review Report**. CRC for rail innovation. 2013. 49 p.

MIRANDA, G. O. **Influência da Variação Microestrutural Induzida Pela Soldagem Aluminotérmica nas Características do Defeito Head Check em Trilhos Ferroviários**. 2020. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

MOREIRA, L. P. **Efeito das Características Microestruturais na Tenacidade à Fratura e no Crescimento de Trinca por Fadiga de Aços Perlíticos de Aplicação Ferroviária**. 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

NABAIS, R. J. S. **Manual Básico de Engenharia Ferroviária**. Associação Brasileira de Pavimentação – ABPV. 1ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 360 p.

NIKAS, D.; ZHANG, X.; AHLSTRÖM. J. Evaluation of Local Strength via Microstructural Quantification in a Pearlitic Rail Steel Deformed by Simultaneous Compression and Torsion. **Materials Science and Engineering: A**, v. 737, p. 341-347, 2018.

NIPPON STEEL. **Nippon Steel Corporation**. Manufacturing Process. 2019. Disponível em: <https://www.nipponsteel.com/en/product/construction/process/>. Acesso em: 18 mar. 2020.

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.

ONTL. **Observatório Nacional de Transporte e Logística**. Boletins de Logística. 2021. Disponível em: <https://ontl.epl.gov.br/publicacoes/boletins-de-logistica/>. Acesso em: 13 set. 2021.

PEDRONI, P. G. **Análise de Falhas das Fraturas de Trilhos**: O caso da Ferrovia do Aço. 2008. 92 p. Monografia (Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Carga) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

PEREIRA, D. M. **Estudo de um Modelo Numérico de Soldagem de Trilho Ferroviário**: Análise Térmica. 2017. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

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.

RÄSÄNEN, A. N.; MARTIKAINEN, J. Experimental Review of Metallurgical Flash Weld Defects in Welded Joints: Essence of Flat Spots, Penetrators and Oxide Inclusions. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 16, n. 6, p. 471-476, 2011.

RIBEIRO, D. D. **Análise Macroestrutural e das Propriedades Mecânicas da Zona Termicamente Afetada de Trilhos Ferroviários Soldados por Centelhamento**. 2018. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

RIO. **Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro**. Museu do Trem. 2016. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/web/portaldoservidor/exibeconteudo?id=6267426>. Acesso em: 22 mar. 2020.

ROSA, J. C. S. **Avaliação de Solda Aluminotérmica em Ângulo**. 2008. 78 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

RUSSO, L. E. A. **Contribuição ao Processo de Avaliação Técnica e Seleção dos Componentes da Grade Ferroviária para a Implantação em Ferrovias de Transporte de Carga**. 2012. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2012.

SAITA, K.; UEDA, M.; YAMAMOTO, T.; KARIMINE, K.; IWANO, K.; HIROGUCHI, K. Trends in Rail Welding Technologies and Our Future Approach. **Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report**, n. 105, p. 84-92, 2013.

SANTOS, S. **Transporte Ferroviário**: História e Técnicas. 1ª Edição. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 264 p.

SARTORI, M. **Caracterização Mecânica e Metalúrgica de Soldas Aluminotérmicas em Trilhos Ferroviários**. 2010. 69 p. Trabalho de Conclusão de

Curso (Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SCHNEIDER, E. L. **Análise da Vida Remanescente de Trilhos com Defeitos Transversais Desgastados em Serviço**. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SILOTTI, T. O. **Caracterização Metalúrgica e Simulação Computacional do Parafuso Trefond Visando a Melhoria do Seu Desempenho nas Ferrovias Brasileiras**. 2015. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

SILVA, C. M. **Perfil de Dureza e Composição Química da Solda e Regiões Afetadas Pela Solda Aluminotérmica de Trilhos Empregados por uma Empresa Mineradora**. 2017. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

SOKEI, C. R.; NETO, V. G.; BRIGUENTE, C. A.; OROZCO, A. E. P.; MANOEL, P. A. F.; VENTRELLA, V. A.; TOKIMATSU. Avaliação da Integridade de Trilhos Ferroviários Soldados por Caldeamento. In: **Anais** do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT. Joinville/SC, 2012, p. 9048-9055.

SOTERO, L. P. **Implementação de um Modelo Numérico Computacional para Simulação do Processo de Soldagem por Centelhamento Aplicado a Trilhos Ferroviários: Análise termo-eletromagnética**. 2017. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

STEENBERGEN, M. On the Genesis of Squat-Type Defects on Rails – Towar a Unified Explanation. **Wear**, v. 478-479, Article. 203906. 2021.

TAWFIK, D.; MUTTON, P. J.; CHIU, W. K. Experimental and Numerical Investigations: Alleviating Tensile Residual Stresses in Flash-Butt Welds by Localised Rapid Post-Weld Heat Treatment. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 196, p. 279-291, 2008.

UEDA, M.; IWANO, K.; YAMAMOTO, T.; TAKAHASHI, J.; MATSUSHITA, K.; KOBAYASHI, A.; MIYAZAKI, T.; KOBAYASHI, Y. Development of Long-Life Rails for Overseas Freight Railways. **Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report**, n. 105, p. 63-71, 2013.

VALE. **Vale S/ A**. 50 Anos de Carajás: Uma Viagem Pelas Três Últimas Décadas do Projeto. 2017. Disponível em: <http://vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/50-anos-carajas-viagem-pelas-tres-ultimas-decadas-projeto.aspx>. Acesso em: 28 mar. 2020.

VICENTE, B. S. **Proposta de Especificação de Procedimento de Soldagem por Centelhamento de Trilhos Ferroviários**. 2017. 71 f. Trabalho de Conclusão de

Curso (Curso de Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

ZERBST, U.; SCHÖDEL, M.; HEYDER, R. Damage Tolerance Investigations on Rails. **Engineering Fracture Mechanics**. v. 76, p. 2637-3653, 2009.