



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

CLARA FERREIRA MACIEL

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO METAL DE SOLDA DE
TRILHO FERROVIÁRIO SOLDADO POR CENTELHAMENTO

FORTALEZA

2023

CLARA FERREIRA MACIEL

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO METAL DE SOLDA DE TRILHO
FERROVIÁRIO SOLDADO POR CENTELHAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Cerra Florez.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M138c Maciel, Clara Ferreira.
Caracterização microestrutural do metal de solda de trilho ferroviário soldado por centelhamento / Clara Ferreira Maciel. – 2023.
46 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez.

1. Metal de solda. 2. Soldagem por centelhamento. 3. Trilho ferroviário. 4. Caracterização. 5. Microestrutura. I. Título.

CDD 669

CLARA FERREIRA MACIEL

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO METAL DE SOLDA DE TRILHO
FERROVIÁRIO SOLDADO POR CENTELHAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Metalúrgica do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção
do grau de bacharel em Engenharia
Metalúrgica.

Aprovada em: 06 de julho de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro Cerra Florez (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Pós-Doc Yosdan Martinez Camejo
Universidade Estadual do Ceará (IFCE)

Eng. Ursula Cid Pereira
Transnordestina

Dedico este trabalho aos meus pais e minha avó, exemplos de determinação, de afeto e por todo o apoio durante minha jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda proteção e fé que me motivou para chegar até aqui.

Aos meus pais, Francisca Rosania Ferreira Maciel e José Afrânio Maciel Lopes, obrigada por todo o apoio, amor, carinho e por serem meus maiores exemplos de vida. Vocês são meu porto seguro, amo vocês.

A minha avó Linete, uma mulher guerreira e, involuntariamente, sempre engraçada. Obrigada por todas as orações e pelo afeto de sempre.

Aos meus irmãos, Maria e Rodrigo, obrigada pelo apoio de sempre, amo vocês.

A minha prima Iara e ao meu tio Afranildo por serem grandes inspirações acadêmicas e por todo apoio durante minha vida.

Ao meu orientador, Dr. Mauro Cerra, pela compreensão e disponibilidade para tornar esse trabalho possível

Ao professor, Dr. José Marcos Sasaki, por toda generosidade para compartilhar seus conhecimentos, pela amizade e por todos os ensinamentos para vida profissional e pessoal. Um professor ímpar e um ser humano grandioso!

Ao meu companheiro, Italo Anderson, pela compreensão, carinho e por todo apoio mesmo nos momentos mais difíceis, amo você.

A minha amiga/irmã, Yara Sales, pela amizade, por todo o apoio em todos os momentos da minha vida e por ser uma das pessoas que ilumina meu caminho.

As minhas amigas Thaís Holanda e Jéssyka Tayanne, pela amizade, por topar qualquer loucura, e por sempre estarem presentes na minha vida, amo muito vocês.

Aos meus amigos Francisco Joamyson, Gustavo Dantas e Micaely que estiveram presentes na minha vida nesses últimos anos, obrigada por todo o apoio e por tornarem esse caminho mais alegre.

A Beatriz Sousa, a Beatriz Farias e ao Thomas por todo auxílio para desenvolver algumas atividades do meu projeto, muito obrigada!

Ao Laboratório de Raios-X (LRX), pela disponibilidade dos equipamentos e por todos os colegas incríveis que tive o prazer de conhecer, que me auxiliaram e me ajudaram, em especial ao Henrique, Matheus, Édipo e Yosdan. Obrigada por todo apoio, serei eternamente grata.

Ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) por fornecer os equipamentos e por todo o auxílio, em especial a Roberta e ao Caio. Aos laboratórios: de Máquinas Operacionais (LMO) do IFCE, de Caracterização de Materiais (LACAM) e por fim, ao Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM).

A Universidade Federal do Ceará pela oportunidade de crescer como profissional e aos professores, em especial ao professor Ricardo Emílio.

Ao CNPQ e a fundação Dot.Lib pela oportunidade de bolsa e pelo auxílio financeiro que foram fundamentais para seguir no curso e evoluir profissionalmente.

E, por fim, a todos de que certas formas contribuíram para o meu crescimento profissional.

“Every new beginning comes from some other beginning's end” (Semisonic).

RESUMO

O transporte ferroviário tem enfrentado uma demanda crescente, de modo que exige o desenvolvimento e aprimoramento dos componentes da malha ferroviária. Nesse sentido, a utilização da soldagem nos trilhos está se tornando cada vez mais crucial para as ferrovias. Com base nisso, para melhorar as propriedades e, conseqüentemente, a qualidade da solda, é de grande importância estudar sua microestrutura. As regiões do bolete, alma e patim do metal de solda de um trilho ferroviário de perfil UIC60, soldado pelo processo de centelhamento, passaram por uma caracterização detalhada de sua microestrutura. Este estudo envolveu técnicas de análise de composição química, a qual mostrou uma composição hipereutetóide, com teor de carbono entre 0,9% e 1,0%. Através da simulação computacional, por meio do uso do software Thermo-Calc®, pode-se observar as possíveis fases e/ou microconstituintes que se formarão na microestrutura do metal de solda, a partir da composição química e temperatura, por meio do diagrama de fração em massa. A partir da técnica metalográfica, pode-se verificar, com auxílio de um microscópio óptico, a formação de perlita como microconstituente da microestrutura do metal de solda. A análise de fases cristalinas por difração de raios-x aliada a um método de refinamento estrutural, determinou a presença de fases $Fe_{19}Mn$, Fe_3C e $Cr_2Fe_{14}C$ nas regiões do bolete, alma e patim, bem como pode-se concluir a ausência de fase indesejada, como a martensita. Ademais, foi determinado a dureza de cada região, de modo que ao realizar uma comparação dos resultados do teor de carbono, observado na composição química, e da fase cementita, identificada pela técnica de difração de raios-x, pode-se compreender a influência do carbono sobre o menor resultado de dureza apresentado pelo bolete em comparação com a alma e o patim.

Palavras-chave: metal de solda; soldagem por centelhamento; trilho ferroviário; caracterização; microestrutura; composição hipereutetóide.

ABSTRACT

Rail transport has been facing a growing demand, so it requires the development and improvement of rail network components. In this sense, the use of welding on rails is becoming increasingly crucial for railways. Based on this, to improve the properties and, consequently, the quality of the weld, it is of great importance to study its microstructure. The head, web, and base regions of the weld metal of a UIC60 railway rail, welded by flash-butt welding, underwent a detailed microstructural characterization. The characterization involved techniques for chemical composition analysis, which revealed a hypereutectoid composition with a carbon content between 0.9% and 1.0%. Through computer simulation using Thermo-Calc® software, the possible phases and/or microconstituents that would form in the weld metal microstructure were observed based on the chemical composition and temperature, utilizing the mass fraction diagram. Metallographic technique, aided by an optical microscope, confirmed the presence of pearlite as a microconstituent in the weld metal microstructure. The analysis of crystalline phases by X-ray diffraction combined with a structural refinement method, determined the presence of Fe_{19}Mn , Fe_3C and $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ phases in the head, web, and base regions. In addition, the absence of an undesired phase, such as martensite, can be verified. Furthermore, the hardness of each region was determined, so that when comparing the results of the carbon content, observed in the chemical composition, and the cementite phase, identified by the x-ray diffraction technique, one can understand the influence of carbon on the lower hardness result presented by the head compared to the web and the base.

Keywords: weld metal; flash-butt welding; railway rail; characterization; microstructure; hypereutectoid composition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação frontal do perfil do trilho Vignole indicando a nomenclatura de suas regiões.....	19
Figura 2 – Observação de perlita, representada pelas lamelas, e Cementita (grãos alongados claros).	20
Figura 3 – Etapas da soldagem de topo com centelhamento	25
Figura 4 – Fenômeno da difração para os planos cristalinos.....	26
Figura 5 – Fluxograma dos procedimentos realizados.	28
Figura 6 – Área mais escura, circundada em vermelho, referente ao cordão de solda do trilho ferroviário.	29
Figura 7 – Serra fita mecânica horizontal CLARK modelo SF250 do IFCE.	29
Figura 8 – Perfil do Metal de solda após o corte com a serra fita, indicando em vermelho as regiões de remoção das amostras para análises.....	30
Figura 9 – Cut-off modelo AROCOR-250, disponível no LPC	30
Figura 10 – Difratômetro PANalytical X’Pert PRO MPD, disponível no LRX.....	31
Figura 11 – Equipamento de FRX ZSXMini II, disponível no LRX	32
Figura 12 – Durômetro Rockwell (HR), disponível no LEM.....	33
Figura 13 – Diagrama de fração em massa do boleto.....	37
Figura 14 – Diagrama de fração em massa da alma	37
Figura 15 – Diagrama de fração em massa do patim.....	38
Figura 16 – Microestrutura perlítica, representada pelas lamelas, presente nas regiões do metal de solda [(a) - boleto, (b) - alma, (c) - patim] - 10 μ m.	38
Figura 17 – Difratograma do boleto.	40
Figura 18 – Difratograma da alma.....	41
Figura 19 – Difratograma do patim.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos trilhos em relação às composições químicas, de acordo com a AREMA.	21
Tabela 2 – Composição química obtida do metal de solda nas regiões do boleto, alma e patim através da técnica de Espectroscopia de Emissão Óptica.....	32
Tabela 3 – Resultados da composição química das regiões por meio da técnica de Fluorescência de Raios-X.	35
Tabela 4 – Características das amostras do obtidas pelo refinamento.....	42
Tabela 5 – Resultados de dureza obtidos para cada amostra.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TL	Trilhos Longos Soldados
AREMA	American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association
COD	Crystallography Open Database
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
DRX	Difração de Raios-X
ICSD	Inorganic Crystal Structure Database
IHHA	International Heavy Haul Association
LPC	Laboratório de Pesquisa em Corrosão
LRX	Laboratório de Raios -X
CCC	Cúbica de Corpo Centrado

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Ângulo de incidência
λ	Comprimento de onda
d	Distância interplanar
α	Ferrita
Fe ₃ C	Cementita
Y(obs) _i	Intensidade observada
Y(calc) _i	Intensidade calculada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Ferrovias	17
2.2	Trilhos.....	18
2.3	Microestrutura e Metalurgia de Aços para Trilhos Ferroviários.....	19
2.4	Soldagem de Trilhos Ferroviários	23
2.4.1	Soldagem por Centelhamento.....	23
2.5	Difração de Raio-X.....	25
2.5.1	Método de Rietveld.....	26
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	Material	28
3.2	Cortes metalográficos.....	28
3.3	Técnica de Difração de Raio-X	30
3.3.1	Identificação de Fases Cristalinas	31
3.3.2	Refinamento de Rietveld	31
3.4	Composição Química.....	32
3.4.1	Espectroscopia de Emissão Óptica.....	32
3.4.2	Fluorescência de Raio-X.....	32
3.5	Simulação Termodinâmica.	33
3.6	Dureza.....	33
3.7	Metalografia.	34
4	RESULTADOS.....	35
4.1	Análise da Composição Química.....	35
4.2	Análise dos diagramas de fração em massa	36
4.3	Identificação da microestrutura	38
4.4	Identificação de fases aliada ao método de Rietveld	39
4.5	Resultados de Dureza	43
5	CONCLUSÃO.....	44
5.1	Sugestões de trabalhos futuros.	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

Devido a grande extensão territorial do Brasil, o modal ferroviário desempenha uma função importante na economia brasileira. Isso pode ser destacado sobretudo pelo transporte de um grande volume de mercadorias com custos relativamente baixos para longas distâncias e com maior segurança ao compararmos com o modal rodoviário. Contudo, devido a carência de investimentos, o modelo não apresenta plena eficiência e utilização no país. Apesar disso, há uma crescente demanda por esse modal em razão do aumento das exportações brasileiras e, por conseguinte, ao produto interno bruto nacional (PIB) (FALCÃO, 2013).

A crescente demanda pelo transporte ferroviário tem imposto condições mais rigorosas às ferrovias, de modo a construir e melhorar as propriedades dos componentes da malha ferroviária. A necessidade de aumentar o tráfego de composições, a velocidade e a carga por eixo, impulsiona o desenvolvimento de tecnologias específicas para a construção das linhas férreas (PORCARO, 2019).

Nesse sentido, a aplicação do processo de soldagem nos trilhos está se tornando cada vez mais importante para ferrovias, uma vez que as técnicas de soldagem apresentam procedimentos avançados e econômicos, de modo a garantir juntas ferroviárias mais seguras e confiáveis, bem como propicia a redução de custos na manutenção e o prolongamento da vida útil dos trilhos (NISHIKAWA, 2018).

Desenvolver materiais que propiciem alta resistência mecânica, tenacidade e trabalhabilidade, de modo que sejam viáveis econômica e tecnologicamente, requer o conhecimento de sua microestrutura. Com base nisso, tendo em vista a necessidade de melhorar as propriedades e, dessa forma, a qualidade da solda, o estudo da microestrutura é de substancial importância para o desempenho do processo de soldagem (ARAÚJO, 2006).

Com base nisso, o objetivo do trabalho consistiu em caracterizar a microestrutura do metal de solda elétrica, referentes às regiões do boleto, da alma e do patim do trilho ferroviário, o qual foi soldado por centelhamento. No estudo, foi obtido a composição química presente no metal de solda, nas regiões do boleto, alma e patim, por meio das técnicas de espectroscopia de

emissão óptica e fluorescência de raios-x. Foi elaborado computacionalmente os diagramas de fração em massa das regiões, por meio do uso do software Thermo-Calc®, a fim de prever a formação de fases na microestrutura das regiões do metal de solda, com base na composição química e temperatura. Além disso, buscou-se identificar o microconstituente presente na superfície das regiões do metal de solda do trilho, por meio da caracterização metalográfica com auxílio de microscópio óptico. A partir da técnica de difração de raios-x aliada ao método de refinamento Rietveld, caracterizou-se as fases cristalinas presentes nas amostras, referentes ao boleto, alma e patim. Por fim, determinou-se a dureza nas regiões do boleto, alma e patim, bem como analisou-se a influência da composição química e das fases sobre os resultados de dureza obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ferrovias

As ferrovias foram uma das principais invenções que surgiram no século XIX, de modo que sua fabricação envolvia grandes quantidades de ferro, aço e carvão mineral. Devido a rápida expansão da produção de carvão na Inglaterra, não só a industrialização como também os investimentos nas ferrovias tiveram um grande crescimento. A expansão das ferrovias teve um papel substancial para a transformação da política mundial, uma vez que contribuiu para a Revolução Industrial em diversas partes do mundo. Além disso, devido a sua velocidade e grande capacidade de transporte, as linhas ferroviárias conseguiram aproximar efetivamente as regiões mais distantes aos portos e, dessa forma, aos grandes polos de produção industrial e agrícola (FICI, 2017).

No Brasil, a implantação da malha ferroviária iniciou-se em 1854 no Rio de Janeiro, e posteriormente em São Paulo, com o intuito de transportar as safras de café do interior para os portos no litoral (SILVEIRA,2002). Durante as duas primeiras décadas de investimentos ferroviários no Brasil, visava-se ocupar e desenvolver o território, com o intuito de beneficiar a agricultura de exportação. Isso foi realizado por meio de medidas como a garantia efetiva de juros e privilégios de zona, com ênfase nas regiões da Bahia, Pernambuco, Rio de Janeiro e São Paulo (LANNA, 2012).

Inúmeras estradas de ferro no Brasil, embora originalmente construídas para fins comerciais, acabaram enfrentando prejuízos significativos e entrando em falência. As causas desse déficit são variadas, uma vez que muitas dessas estradas foram inicialmente desenvolvidas para transportar mercadorias específicas, como café, mas com o tempo, a produção regional desses produtos desapareceu. Outras tiveram o objetivo de penetrar e desbravar novas regiões, porém, em decorrência da sua infraestrutura antiquada e ao equipamento obsoleto, não conseguiram competir com outros meios de transporte. Diante disso, surgiu a ideia de consolidar todas as Estradas de Ferro da União em uma única organização, com o propósito de regular a operação dessas ferrovias, padronizar seus equipamentos, serviços e métodos de trabalho, conferindo-lhes um caráter industrial em sua exploração (BRINA, 1979).

Em 1941, surgiu a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), marcando o início da era da industrialização intensiva e do crescimento econômico do Brasil. Em 1944, foi fundada a

Companhia Brasileira de Material Ferroviário, que impulsionou o crescimento da indústria ferroviária nacional. Posteriormente, surgiram outras indústrias importantes, como MAFERSA, COBRASMA e VILLARES. No entanto, na década de 1950, a política da época optou por abrir o mercado para as montadoras de automóveis, de modo que resultaria em um direcionamento maior de recursos públicos para a construção e expansão das rodovias. Como consequência, as ferrovias foram gradualmente perdendo espaço e relevância econômica. A partir dessa situação, um dos poucos investimentos governamentais foi direcionado para a Estrada de Ferro Carajás (EFC), que tinha como objetivo escoar minério de ferro até os portos. Em decorrência da precariedade das rodovias aliada ao processo de concessão das ferrovias ao setor privado, iniciado no início dos anos 90, resultou em um crescimento gradual da produtividade do setor ferroviário, bem como em maior inovação e aumento na quantidade de material rodante em circulação (FICI, 2017).

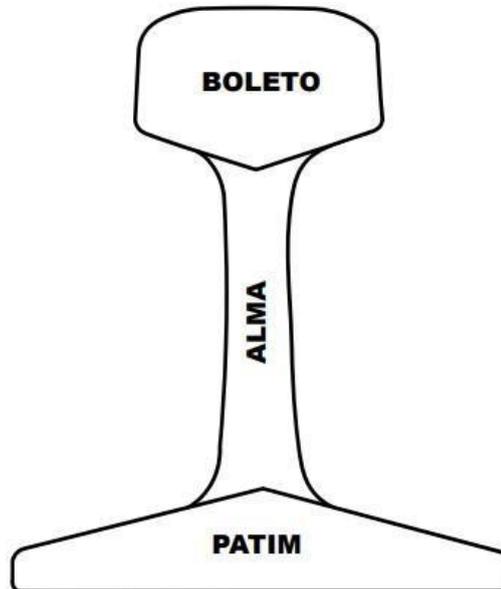
2.2 Trilhos

O trilho é um importante elemento da superestrutura ferroviária, o qual exerce função de suporte das cargas transportadas e de superfície de rolamento das locomotivas (BRINA, 1988).

O trilho é produzido por meio da laminação sucessiva de tarugos cortados de lingotes. Com base nisso, o avanço da tecnologia do aço implicou em benefícios na fabricação de trilhos, propiciando características necessárias para que seja possível empregá-lo nas ferrovias. Esse componente deve possuir propriedades tais como: alto limite de escoamento e resistência, resistência à flexão e à corrosão; alta tenacidade à fratura e resistência à propagação de trincas pré-existentes; soldabilidade adequada e baixa suscetibilidade à fragilização causada pelo hidrogênio (SCHNEIDER, 2005; BRINA, 1988).

Inicialmente houve considerações em produzir o trilho com formato de duplo T, pois acreditava-se que essa geometria seria a mais econômica e resistente à flexão. No entanto, devido às dificuldades de fixação desse tipo de trilho aos dormentes, sua utilização foi gradualmente abandonada e substituída pelo trilho conhecido como Vignole, em homenagem ao engenheiro inglês Charles Vignoles (BRINA, 1988). O trilho Vignole é dividido em três partes: boleto, alma e patim (ABNT, 2012), como exemplificado na Figura 1.

Figura 1 – Representação frontal do perfil do trilho Vignole indicando a nomenclatura de suas regiões.



Fonte: Adaptado pela autora a partir da ABNT. NBR 7590, 2012.

O boleto, localizado na parte superior do trilho, é caracterizado pela sua largura, altura e inclinação da face e do abaulamento da superfície de rolamento. Essa geometria é importante não apenas para o contato entre a roda e o trilho, mas também para a estabilidade do rolamento. A alma, região intermediária do trilho, tem a função de transmitir os esforços do boleto ao patim, sendo assim deve possuir elevada resistência mecânica. O patim, por sua vez, é a base inferior do trilho e tem uma largura ampla o suficiente para proporcionar estabilidade ao conjunto. Ele está sujeito a forças laterais e de torção, geradas pela tração do trem, de forma que é por meio do patim que o trilho é fixado nos dormentes, os quais recebem e transmitem os esforços produzidos pelas cargas ao lastro (SCHNEIDER, 2005; BONNETT, 2005).

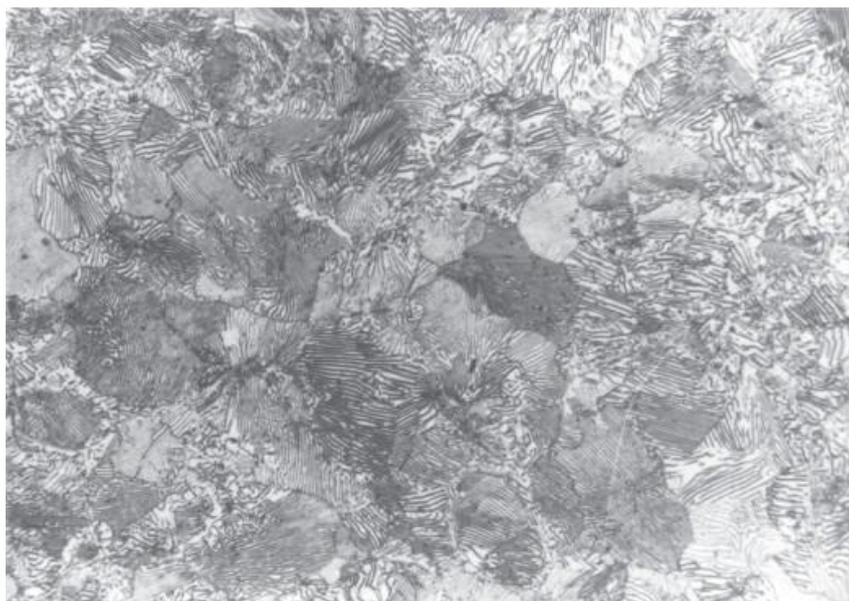
2.3 Microestrutura e Metalurgia de Aços para Trilhos Ferroviários

Na fabricação de aços para trilhos, há uma elevada variação de composições químicas com o propósito de desenvolver aços com microestruturas que apresentem propriedades adequadas para atender às necessidades econômicas, tais como aumentar o volume e o peso das cargas transportadas e a formação de trens unitários mais longos. A microestrutura mais importante é a perlita (composta por lamelas alternadas de $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$, como pode ser observada

na figura 2), apresentando composição química eutetóide ou hipereutetóide (PORCARO, 2019; BAURI, 2020).

Para um aço com 0,77% C, tem-se a formação de perlita. Um aço com 0,77% C é denominado eutetóide. Aços com menos de 0,77% C são hipoeutetóides e, com mais de 0,77% C, são hipereutetóides. Embora a perlita não seja uma fase, e sim um constituinte, é possível interpretar o diagrama de fase ferro-cementita de modo a prever sua ocorrência e quantidade relativa na microestrutura. Assim, aços com menos de 0,77% C trazem ferrita e perlita em sua microestrutura; com 0,77% C, só perlita; e acima de 0,77% C, perlita e cementita. Além disso, na produção industrial do aço, a solidificação e o resfriamento são muito rápidos para que o equilíbrio termodinâmico seja alcançado, ocorre, então, a formação de uma fase metaestável, a cementita, no lugar da grafita (MEI, P.R., SILVA, A.L.C., 2021).

Figura 2 – Observação de perlita, representada pelas lamelas, e Cementita (grãos alongados claros).



Fonte: MEI, P.R., SILVA, A.L.C., 2021.

As classificações dos trilhos são de acordo com a sua fabricação, seja pelo peso nominal, composição química, propriedades mecânicas ou tipo de tratamento térmico realizado, bem como são formalizadas por meio de normas regulamentadoras. O modo de produção varia de acordo com a necessidade, embora as composições químicas sejam similares as outras normas. O Brasil segue a norma American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) (BAURI, 2020).

A International Heavy Haul Association (IHHA) adota os seguintes critérios de classificação dos trilhos (NISHIKAWA, 2018; BAURI, 2020):

- Trilhos Standard: aço carbono não tratado termicamente. Dureza superficial: entre 300 e 340 HB; $R_c \geq 32$;
- Trilhos Premium: aço carbono e tratado termicamente. Possui dureza superficial: entre 341 e 388 HB; $R_c \geq 36,5$;
- Trilhos Super Premium: aço hipereutetóide microligado e tratado termicamente. O refino da perlita é feito para melhorar à resistência ao desgaste, quando comparado ao trilho da classe Premium. Dureza superficial: $HB \geq 388$; $R_c \geq 42$.

Bauri (2020) afirma que a AREMA descreve os trilhos hipereutetóides, com a composição química próxima a de 0,85% de C e 0,05% de V, alcançando uma dureza superficial próxima de 375 HB e os trilhos com 0,90% - 1,00 % de C, ligados com 0,25% de Cr, atingindo o valor de dureza próximo a 395 HB. A AREMA classifica trilhos usados em transportes de carga pesada baseada na composição química.

Tabela 1 – Classificação dos trilhos em relação às composições químicas, de acordo com AREMA.

Classificação/ Composição	% C	% Mn	% Si	% Cr	% V	% Mo	% Cu	% P e S
Standard	0,72 a 0,86	0,75 a 1,20	0,10 a 0,60	máx. de 0,40	-	-	-	< 0,02
Intermediário	0,74 a 0,86	0,70 a 1,25	0,10 a 0,60	-	-	máx. de 0,10	-	< 0,02
Alto carbono e microligado	0,65 a 0,82	0,70 a 1,20	0,10 a 0,60	0,40 a 0,70	máx. de 0,05	máx. de 0,05	máx. de 0,40	< 0,02
Premium (Alto carbono/tratado termicamente)	0,72 a 0,86	0,70 a 1,20	0,10 a 0,60	máx. 0,40	máx. de 0,01	máx. de 0,06	-	< 0,02
Super Premium (Hipereutetóide tratado termicamente)	0,85 a 1,0	0,80 a 1,30	0,10 a 0,25	0,20 a 0,30	-	-	-	< 0,02

Fonte: AREMA, 2010 apud BAURI, 2020.

Na composição de aço para trilhos, o ferro constitui o elemento básico, o qual representa aproximadamente 98% da composição. O carbono aumenta a dureza do metal e seu teor pode ser facilmente variado no processo de fabricação do aço, de modo que, nos aços perlíticos, o

aumento do teor de carbono traz diferentes efeitos à microestrutura, tais como o crescimento da fração volumétrica de perlita, a redução do espaçamento interlamelar e o aumento da espessura da lamela de cementita. Essas alterações promovem melhorias na resistência mecânica e na resistência ao desgaste. Entretanto, há uma diminuição na tenacidade à fratura e na resistência à propagação de trincas por fadiga (BRINA, 1979; MOREIRA, 2015).

O manganês (Mn) é introduzido no aço para reduzir óxidos, melhorar a temperabilidade e a ductilidade, ademais, sua inclusão tem efeitos semelhantes à adição de níquel, o qual aumenta a ductilidade e tenacidade do aço. Além disso, em razão da maior afinidade do enxofre pelo manganês em relação ao ferro, o Mn aumenta a forjabilidade do aço (MOREIRA, 2015; REGIS, 2010).

Os elementos, silício e manganês, influenciam na diminuição da composição eutetóide do carbono, mantendo não só uma estrutura com predominância perlítica mas também com valores mais adequados de tenacidade e resistência à propagação de trincas por fadiga. A adição de manganês e silício contribui para o endurecimento da ferrita da perlita por meio da solução sólida. O silício aumenta a resistência a ruptura, sem sacrificar a ductilidade ou tenacidade. Silício e vanádio atuam na redução da oxidação e funcionam como agentes de endurecimento. O tungstênio, por sua vez, refina o tamanho do grão e aumenta a resistência à corrosão. O fósforo e o enxofre são considerados elementos indesejáveis; contudo, a ação do fósforo diminui de intensidade à medida que decresce o teor de carbono (BRINA, 1979; MOREIRA, 2015).

A adição de elementos de liga, como o cromo, em concentração da ordem de 1% em massa, e o vanádio, em concentrações inferiores a 0,1% em massa, é uma das formas de se obter microestruturas perlíticas mais finas. A adição de cromo promove o deslocamento das curvas de início e término de transformação perlítica no resfriamento contínuo para a direita. Assim, a transformação em perlita acontece em temperaturas mais baixas mesmo adotando resfriamento ao ar (PORCARO, 2019).

A partir da mistura de dois metais para formar uma solução sólida, pode-se desenvolver uma solução sólida intersticial, na qual os átomos do soluto se alojam nos espaços vazios da matriz, ou uma solução sólida substitucional, na qual os átomos do soluto substituem uma fração dos átomos da matriz. A formação da solução sólida substitucional só é possível se os átomos do soluto apresentarem compatibilidade eletroquímica e tamanho próximo do tamanho dos átomos da matriz (MEI, P.R., SILVA, A.L.C., 2021).

A perlita é um microconstituente formado a partir da reação eutetóide de duas fases, ferrita e cementita, a 727 °C. A ferrita tem estrutura CCC e, em comparação com a austenita, é menos compacta, apresentando interstícios tetraédricos menores e, conseqüentemente, tendo menor capacidade de dissolver carbono. A cementita é formada a partir da rejeição do carbono durante a formação da ferrita. A cementita é uma fase rica em carbono, de composição Fe_3C (MEI, P.R., SILVA, A.L.C., 2021).

2.4 Soldagem de Trilhos Ferroviários

A aplicação do processo de soldagem na construção de ferrovias substituiu a união mecânica do tipo tala-parafuso, de modo que possibilitou melhorar o comportamento dinâmico dos trilhos na passagem das composições, além de aumentar a capacidade do sistema por permitir maiores velocidades e maiores cargas por eixo nos vagões. Além disso, juntas soldadas geralmente possuem baixo custo, maior produtividade na montagem das linhas ferroviárias e permitem reduzir os impactos e vibrações observados em juntas parafusadas. Esse processo, portanto, contribuiu para reduzir a ocorrência de alguns modos de falhas associados à fadiga e à concentração de tensão nos furos de fixação de parafusos (PORCARO et al, 2017).

Os dois principais processos de soldagem de trilhos são soldagem por centelhamento (soldagem elétrica ou flash butt welding), realizada por meio de máquina estacionária ou móvel, e soldagem por aluminotermia (também denominada por thermite), a qual é um processo de soldagem-fundição que geralmente é realizado em campo (PORCARO et al, 2017; NISHIKAWA, 2018).

2.4.1 Soldagem por Centelhamento

Estima-se que essa técnica de soldagem corresponde por cerca de 90% da soldagem em trilhos longos soldados (TLS) no mundo (PORCARO et al, 2017).

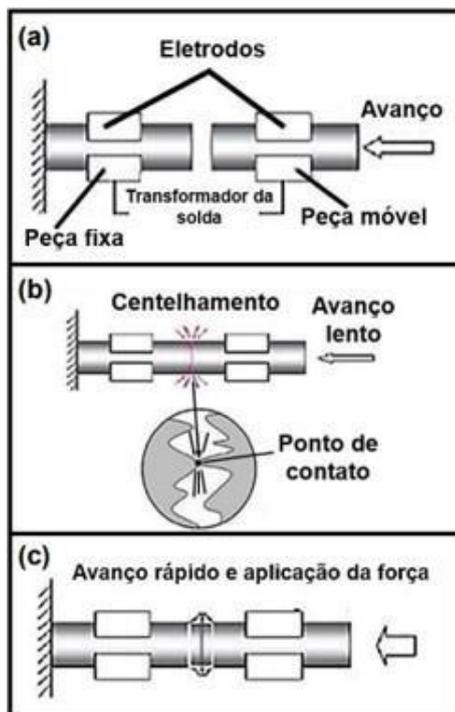
Para a realização desse processo é necessário que os trilhos possuam dimensões similares e, além disso, que as faces recebam uma limpeza inicial para evitar inclusões no interior da solda. Ademais, para garantir que haja a expulsão dos óxidos e de partículas soltas, o eletrodo deve ser limpo com uma pistola de ar comprimido, o que elimina, assim, a possibilidade de falhas na junta soldada em decorrência da deposição de cobre nessa área. A

soldagem de topo por centelhamento é considerado superior à solda aluminotérmica, visto que elimina os defeitos de solidificação como porosidades, inclusões e falta de fusão. Porém, essa técnica deve ser ajustada conforme a classificação do trilho, uma vez que quanto maior o carbono equivalente do trilho menor deve ser a taxa de resfriamento do trilho pós soldagem a fim de evitar a formação martensítica (NISHIKAWA, 2018; BAURI, 2020).

De acordo com BAURI (2020), esse processo de soldagem é dividido em três etapas, respectivamente: pré-aquecimento, centelhamento e recalque:

1. No pré-aquecimento (preheating), as extremidades dos trilhos são colocadas em contato, havendo o pré-aquecimento por efeito Joule. Nesta etapa o mordente móvel, o qual está fixado a um trilho, faz o movimento de aproximação e afastamento, o qual é repetido de forma controlada, em direção ao trilho que está preso ao mordente fixo, de tal forma que é produzido uma série de contatos elétricos, o que ajuda a aquecer uniformemente as faces dos trilhos. Essa etapa é importante não só para diminuir a resistência mecânica entre as superfícies que entrarão em contato como também contribui para a redução da troca de calor entre a região soldada e o ambiente e o trilho não soldado, o que faz com que a taxa de resfriamento após a solda seja suavizada e, conseqüentemente, evitando a formação de martensita, a qual é um microconstituente duro, frágil e indesejável nos trilhos.
2. A etapa de centelhamento (flashing) é iniciada com um movimento contínuo do trilho, com velocidade fixa, e, em seguida, o movimento de aproximação e afastamento mais acelerado. Durante o processo, as superfícies formam alguns pontos de contato, devido às irregularidades das superfícies, por onde passa uma elevada quantidade de corrente elétrica, que já estava sendo aplicada previamente, produzindo centelhamento.
3. O Recalque (up-setting force), ocorre imediatamente após o centelhamento, de modo que é aplicado uma força de compressão para que ocorra o forjamento entre as partes. Para obter uma solda com boa qualidade, a pressão exercida na etapa de recalque deve obrigatoriamente expulsar os metais líquidos, óxidos e impurezas da interface, garantindo, portanto, o contato metal/metal.

Figura 3 – Etapas da soldagem de topo com centelhamento (a- pré-aquecimento; b- centelhamento; c- recalque).



Fonte: BAURI (2020).

2.5 Difração de Raios-X

Difração de raios-x é uma técnica utilizada para identificar fases cristalinas constituintes em um material. Os raios X são incididos sobre a superfície da estrutura de um cristal e são difratados em determinado ângulos (CULLITY; STOCK, 2001).

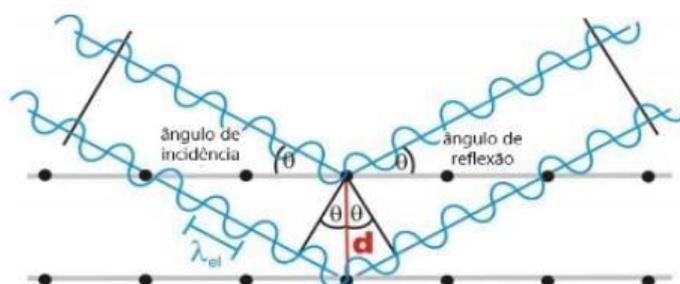
A difração de raios X é, portanto, uma técnica para o estudo de estruturas cristalinas e do espaçamento atômico em diversos materiais, a qual baseia-se na interferência construtiva entre os raios X monocromáticos e uma amostra cristalina. Esses raios X são gerados por um tubo de raios catódicos (tubos de raios X), filtrados para produzir uma radiação monocromática, colimados e direcionados para a amostra. Quando um cristal com uma distância interplanar d é irradiado pelos feixes de raios X, com um determinado comprimento de onda λ , a difração de raios X pode ser observada a ângulos específicos 2θ . A conversão dos picos de difração para espaçamentos d permite a identificação do composto, uma vez que cada composto possui um conjunto de espaçamentos d específicos. Esse método deve satisfazer a Lei de Bragg (3.1), a qual relaciona o comprimento de onda da radiação eletromagnética ao

ângulo de difração e ao espaçamento do retículo cristalino em uma dada amostra (SILVA, 2020).

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2.1)$$

onde n é uma integral, λ é o comprimento de onda dos raios-x, d é a distância interplanar que irá gerar a difração e θ é o ângulo de difração (SILVA, 2020).

Figura 4 – Fenômeno da difração para os planos cristalinos.



Fonte: Silva (2020).

2.5.1 Método de Rietveld

O método de Rietveld é uma técnica de análise estrutural utilizado para ajustar os parâmetros de uma estrutura cristalina a partir da difração de raios-x. O método de Rietveld está baseado na minimização da soma dos quadrados (representado pela função função S_y) da diferença entre as intensidades observadas e calculadas para cada ponto do padrão de difração da amostra (RIETVELD, 1967; ARAÚJO, 2021).

$$S_y = \sum w_i (y_{iobs} - y_{ical}) \quad (2.2)$$

onde y_{iobs} é a intensidade observada para o i -ésimo ponto, y_{ical} é a intensidade calculada no i -ésimo ponto e $w_i = 1/y_i$.

Por meio do refinamento de Rietveld, um conjunto de parâmetros ajustáveis podem ser calculados e refinados, a partir dos dados obtidos do difratograma, pois as variações nos parâmetros podem causar variações tanto na forma quanto na intensidade dos picos. Os parâmetro a serem ajustados abrange: fator de escala, que satisfaz à correção de proporcionalidade entre o padrão de difração calculado e observado; radiação de fundo (background), a qual é corrigida a partir de dados coletados no próprio difratograma e da interpolação entre estes pontos; perfil de pico de difração; parâmetros de rede ($a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$); posições atômicas (x, y, z); fatores de temperatura isotrópicos ou anisotrópicos e o número de

ocupação; orientação preferencial, correção de problemas gerados na preparação da amostra (RIGONI, 2014).

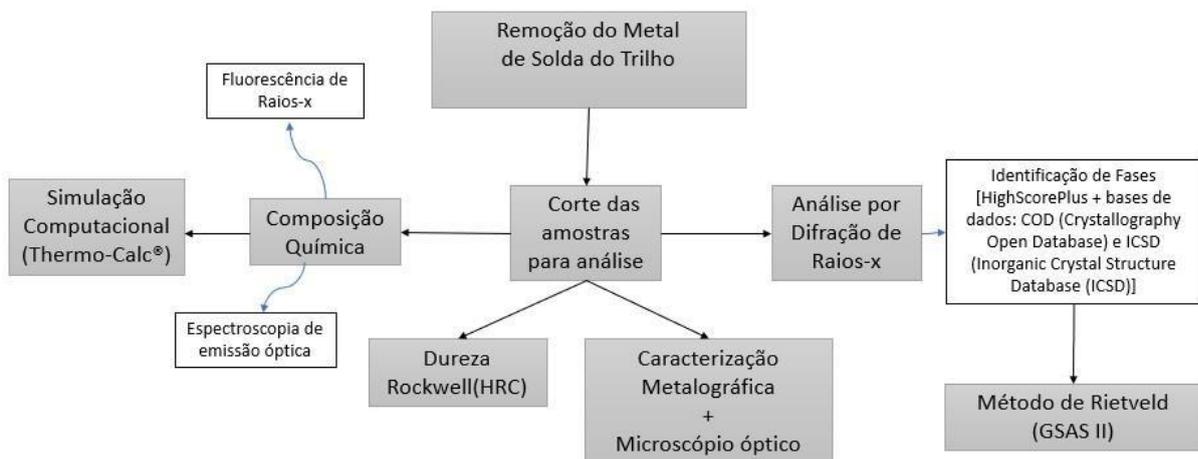
O ajuste do refinamento pode ser analisado numericamente a partir dos fatores de confiabilidade que são: R_{wp} , R_{exp} e χ^2 . O fator de ajuste, χ^2 , deve tender a 1, uma vez que esse fator é representado pela relação (R_{wp}/R_{exp}) e havendo convergência o valor dessa relação aproxima-se de 1 e podemos afirmar que a intensidade observada (I_{obs}) e a intensidade calculada (I_{calc}) são muito próximas (ARAÚJO, 2021). R_{wp} e R_{exp} apresentam valores típicos, para ajuste de refinamento, entre 15% e 30% para difração de raios-x, tal que depende, em parte, do grau de orientação preferencial e do número de parâmetros refinados (ARAÚJO *ET AL.*, 2005).

A razão entre R_{wp} e R_{exp} é o valor esperado denominado de “goodnes of fit”, o qual deve estar próximo de 1 ao final do refinamento, o que significa que nada mais pode ser melhorado, pois o R_{wp} já atingiu o limite que se pode esperar para aqueles dados de difração medidos (RIGONI, 2014).

3 METODOLOGIA

Os procedimentos consistiram, inicialmente, em remover o metal de solda do trilho. Em seguida, realizou-se os cortes das regiões para obtenção das amostras que serão estudadas, bem como determinar a composição química, a dureza, além de realizar a caracterização metalográfica das amostras. Além disso, consistiu em determinar os diagramas de fração em massa das amostras, por meio do programa Thermo-Calc®. Por fim, utilizou-se a técnica de difração de raios-x aliada ao refinamento estrutural para realizar a identificação das fases cristalinas das amostras do metal de solda.

Figura 5 – Fluxograma dos procedimentos realizados



Fonte: Elaborado pela autora

3.1 Material

Os materiais utilizados no estudo são amostras das regiões boleto, alma e patim removidos do cordão de solda de trilho ferroviário modelo UIC60, o qual foi soldado pelo processo de centelhamento.

3.2 Cortes Metalográficos

Para realizar as técnicas de caracterização química e mecânica das amostras, foi necessário, inicialmente, remover as regiões do boleto alma e patim do cordão de solda de um trilho ferroviário soldado por centelhamento (Figura 6).

Figura 6 – Área mais escura, circundada em vermelho, referente ao cordão de solda do trilho ferroviário.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para a realização do corte, foi utilizada a máquina de serra fita mecânica horizontal, CLARK modelo SF250 do Instituto Federal do Ceará (IFCE) (Figura 7). A máquina possui um sistema de refrigeração para que as amostras removidas não tivessem suas propriedades microestruturais alteradas por aquecimento durante o procedimento (MANNHEIMER, 2022). O procedimento foi executado no cordão removidas correspondessem apenas ao metal de solda.

Figura 7 – Serra fita mecânica horizontal CLARK modelo SF250 do IFCE.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em seguida para que fosse possível utilizar as técnicas de caracterização microestrutural, foram realizados 2 cortes menores em cada região, com dimensões mínimas (2x2x0,3 cm) (Figura 8). Para esse procedimento, foi utilizado o equipamento cut-off AROTEC modelo AROCOR-250 (Figura 9), que possui sistema de refrigeração, juntamente com um disco de corte abrasivo no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) na Universidade Federal do Ceará (UFC).

Figura 8 – Perfil do Metal de solda após o corte com a serra fita, indicando em vermelho as regiões de remoção da amostras para análises.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 9 – Cut-off modelo AROCOR-250, disponível no LPC.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3 Técnica de Difração de Raios-X

A análise de Difração de Raios-X (DRX) das amostras foi realizada no Laboratório de Raios-X (LRX) do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará. O equipamento

utilizado foi o difratômetro da marca PANalytical X'Pert PRO MPD (Figura 10), com uma operação de voltagem de 40 kV por corrente de 40 mA, radiação em tubo de cobalto ($\text{CoK}\alpha_1$), comprimento de onda (λ) de 1,78901 Ångström. O intervalo angular ou varredura utilizado foi 2θ (inicial) de 40° e 2θ (final) de 110° com passo angular (2θ) de $0,013^\circ$, tempo por passo angular de 68,85s, spinner com 2 revolução/s (rps). O equipamento forneceu, como resultado da análise de raios-x, um difratograma para cada amostra analisada.

Figura 10 – Difratômetro PANalytical X'Pert PRO MPD, disponível no LRX.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.1 Identificação de fases

A identificação de fases dos difratogramas fornecidos pelo difratômetro foi realizada com o auxílio do programa PANalytical HighScorePlus (versão 3.0d) (ANALYTICAL, 2001) em conjunto com às bases de dados: Crystallography Open Database (COD) (QUIRÓS et al., 2018) e Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) (RENAULT et al., 1972).

3.3.2 Refinamento de Rietveld

Após esse procedimento, foi realizado o refinamento dos parâmetros estruturais por meio do Método de Rietveld através do software GSAS II (LARSON; DREELE, 1994; TOBY, 2013), que também forneceu os resultados dos fatores de confiabilidade.

3.4 Composição Química

Para análise de composição química, foram utilizadas as técnicas de espectroscopia de emissão óptica e fluorescência de raios-x para determinar os elementos químicos e suas concentrações presentes em cada região.

3.4.1 Espectroscopia de Emissão Óptica (EEO)

Para a obtenção da composição, as amostras de cada região, com dimensões aproximadamente de 2x2x0,3 cm, foram lixadas com lixas com granulometria de 120, 220, 320 e 400 mash, de acordo com a ASTM E3 (*Preparation of Metallographic Specimens*). O equipamento utilizado para a análise foi o Espectrômetro de Emissão Óptica modelo PDA 7000 (Shimadzu) pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará.

3.4.2 Fluorescência de Raios X (FRX)

A caracterização química por fluorescência de raios-X (FRX) foi realizada no equipamento ZSXMini II fabricado pela Rigaku, pertencente ao Laboratório de Raios-X da UFC. Além de possuir dois detectores (denominados de fluxo e cintilante), o equipamento utiliza três monocromadores (LiF, PET e TAP), os quais são responsáveis pela dispersão em comprimento de onda (WDXRF), e a equação de Bragg para selecionar os fótons de raios-X característicos de cada elemento atômico. O ZSXMini operou a uma tensão de 40 kV e 1,20 mA em uma atmosfera a vácuo, de modo que o equipamento irá analisar elementos desde o flúor (F) ao urânio (U), então elementos menores que o flúor, como o carbono, não poderão ser detectados por esse equipamento.

Figura 11 – Equipamento de FRX ZSXMini II, disponível no LRX.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.5 Simulação Termodinâmica

As composições químicas das amostras encontradas por meio da técnica de Espectroscopia de Emissão Ótica foram utilizadas no programa Thermo-Calc®, banco de dados TCFE6, para determinar os diagramas de fração em massa de fases. Os dados fornecidos pelo Thermo-Calc® foram exportados para o software OriginPro 8 para elaborar o diagrama, além disso foi considerada temperatura mínima de 300 °C e valores de fração de massa maiores que 0,1, para obtenção do diagrama.

3.6 Dureza

As medidas de dureza foram feitas no no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da UFC, utilizando o durômetro Rockwell(HR). O equipamento Rockwell foi escolhido tendo em vista a forma rápida de se obter os resultados, a partir da leitura direta no visor do equipamento. O procedimento foi realizado de acordo com a norma ASTM E 18 - 05, de modo que a amostra de cada região foi lixada com lixas de granulometria 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 mash antes do ensaio do ensaio. Além disso, conforme a norma, para o ensaio foi escolhido o penetrador de cone de diamante, aplicando-se uma carga preliminar de 10 kgf sobre a amostra. Os valores de dureza foram obtidos com carga de 150 kgf por 12 segundos. Foram aplicadas 7 impressões em cada amostra, sendo que a distância entre cada impressão foi equivalente a 3mm.

Figura 12 – Durômetro Rockwell(HR), disponível no LEM.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.7 Metalografia

Para identificar a microestrutura presente na superfície das amostras, foi realizado o ensaio metalográfico. A amostra de cada região foram reduzidas para dimensões de aproximadamente $15 \times 15 \times 3 \text{ mm}^3$, em seguida foi realizado o embutimento a quente em baquelite. As amostras foram lixadas com lixas de granulometria 80, 120, 320, 400, 600 e 1200, seguida por limpeza com etileno e uso de jato de ar quente para secar a superfície, de acordo com a Norma ASTM E3 (Preparation of Metallographic Specimens). Logo depois foi realizado o polimento com pasta de diamante de 6, 3 e 1 micron, respectivamente. Para revelar a microestrutura da superfície do material, realizou-se o ataque químico das amostras com o uso de solução de Nital 2% por aproximadamente dois segundos. A análise microestrutural foi realizada no microscópio ótico Leica DMI 3000M, acoplado a um computador para realizar o tratamento das imagens por meio do programa Leica Applications Suite V4.9, disponível no LPC.

4 RESULTADOS

4.1 Análise da Composição Química

As amostras do metal de solda de cada região (boleto, alma e patim), conforme mencionado no item 3.4.1 de Metodologia, foram analisadas pela técnica de espectroscopia de emissão óptica, utilizando o espectrômetro modelo PDA 7000 (Shumadzu), com a finalidade de determinar sua composição química.

Tabela 2 – Composição química obtida do metal de solda nas regiões do bolete, alma e patim através da técnica de Espectroscopia de Emissão Óptica.

Composição	Boleto	Alma	Patim
Fe	97,1230	97,1160	97,1120
C	0,94610	0,95778	0,96143
Si	0,37544	0,37742	0,37667
Mn	1,17240	1,17750	1,16980
P	0,01390	0,01293	0,01357
S	0,02119	0,02138	0,02175
Ni	0,02169	0,02055	0,02101
Cr	0,22647	0,22798	0,22726
Mo	0,03706	0,03490	0,03458
Cu	0,03107	0,02566	0,02993
Nb	0,01382	0,01088	0,01314
Al	0,00821	0,00776	0,00862
V	0,00699	0,00635	0,00721
Ti	0,00254	0,00255	0,00263

Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nos dados obtidos, o percentual de carbono nas regiões está entre 0,90% e 1,0%, o que pode-se definir que a solda foi realizada em um trilho ferroviário de aço com composição hipereutetóide. Além disso, verifica-se que a região do patim apresenta maior teor de carbono e a menor concentração de carbono é observada na região do bolete. Ademais, observa-se que o enxofre (S) e o fósforo (P), os quais são elementos indesejados no aço, apresentam baixo percentual, estando dentro dos padrões da norma (AREMA, 2010).

Em relação a análise de composição química determinada por FRX, pode-se observar na tabela abaixo que, dentro da amplitude de análise que o equipamento realiza (elementos químicos do flúor ao urânio), a técnica valida os principais elementos encontrados na espectroscopia. A baixa concentração dos outros elementos pode ter sido significativa para que o equipamento de FRX não detectasse.

Tabela 3 – Resultados da composição química das regiões por meio da técnica de Fluorescência de Raios-X.

Composição	Fe	Mn	Si	Cr	P	S
Boleto	97,5073	1,358	0,7664	0,3404	-	0,0279
Alma	97,4853	1,4587	0,7165	0,2952	-	0,0442
Patim	97,306	1,3666	0,9733	0,3051	-	0,0489

Fonte: Elaborado pela autora.

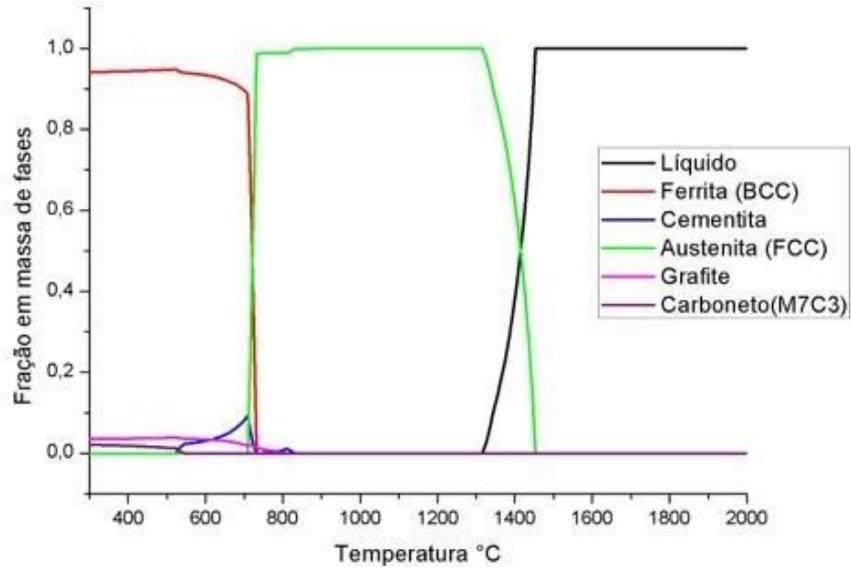
Pode-se verificar que, ao comparar as duas técnicas de composição química, o manganês é o principal elemento de liga, apresentando maior percentual em relação aos outros elementos, seguido por silício e cromo. Além disso, o FRX não detectou a presença de fósforo, o que indica a baixa concentração desse elemento indesejado. A concentração de enxofre teve um ligeiro aumento nas regiões da alma e patim.

4.2 Análise dos diagramas de fração em massa

Tendo em vista que o resultado do diagrama mostra a transformação de fases que ocorre no sistema, com base nesse diagrama, é possível prevê a ocorrência de fases e microconstituente na microestrutura das amostras do metal de solda. As amostras referentes ao boleto, alma e patim apresentaram resultados semelhantes de diagrama de fração em massa. Isso pode ter acontecido devido as amostras apresentarem dados de composição química similar para o mesmo intervalo de temperatura inseridos no programa Thermo-Calc® para elaboração dos diagramas de fração em massa.

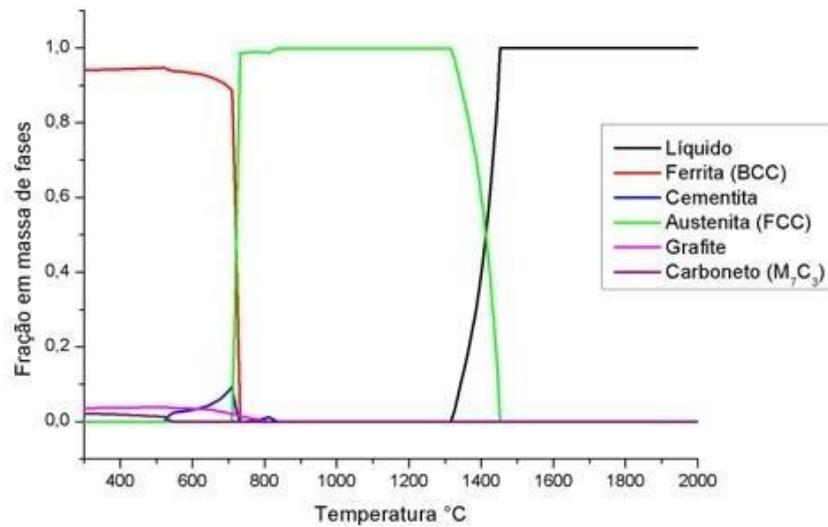
Nos diagramas (Figura 13, 14, 15), é possível observar que entre 2000°C e uma temperatura ligeiramente inferior a 1500 °C a única fase existente é a fase líquido. Quando a temperatura atinge um valor ligeiramente superior a 1440°C começa a se formar a austenita(FCC) e a fase líquido começa a decair a medida que a temperatura diminui. A fase austenita é a fase predominante até uma temperatura próxima de 700°C quando começa a cair drasticamente e a fase ferrita (BCC) começa a se formar. Além disso evidencia-se a formação da fase cementita, bem como a precipitação, em menor fração de massa, de carboneto (M7C3) e grafite. Entre 700 °C e 300°C, a matriz do sistema torna-se predominantemente ferrita (BCC).

Figura 13 – Diagrama de fração em massa do boleto.



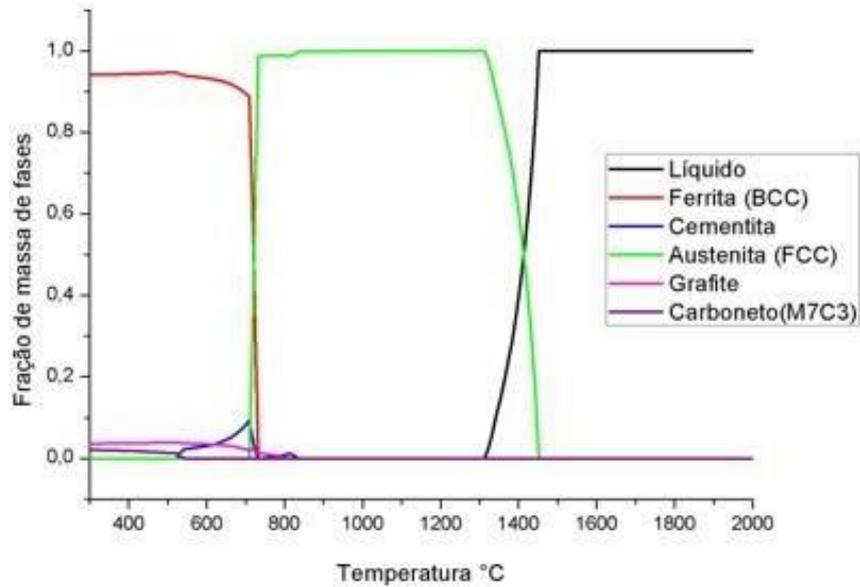
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 14 – Diagrama de fração em massa da alma.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 – Diagrama de fração em massa do patim.

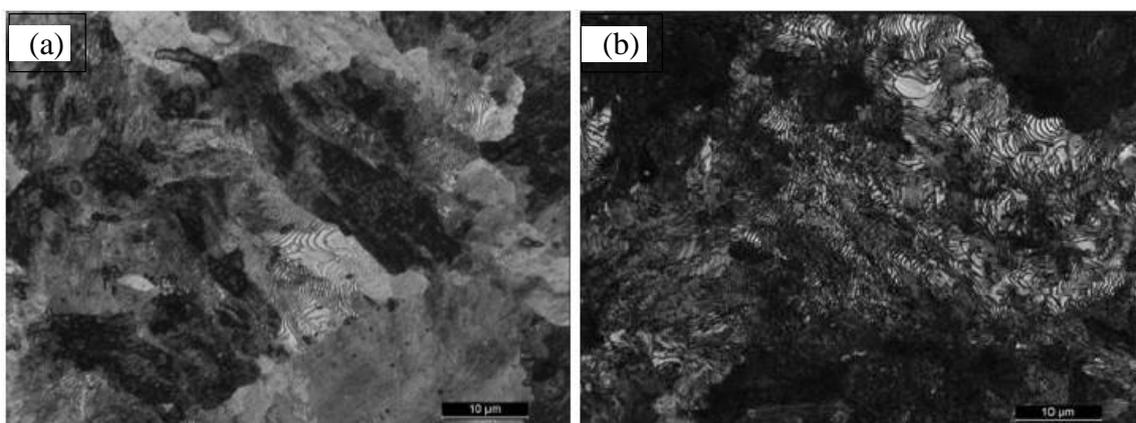


Fonte: Elaborado pela autora.

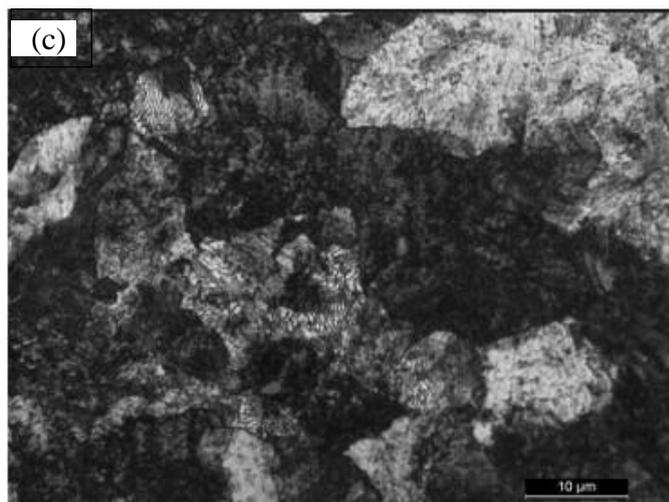
4.3 Identificação da microestrutura

Com base nos resultados obtidos por meio da técnica de metalografia, após as amostras passarem pelo ataque químico com nital 2%, foi observada, por meio do microscópio óptico a presença da microestrutura perlítica representada pela formação de lamelas (Figura 16).

Figura 16 – Microestrutura perlítica, representada pelas lamelas, presente nas regiões do metal de solda [(a) - boleteo, (b) - alma, (c) - patim] - 10µm.



Fonte: Elaborado pela autora.



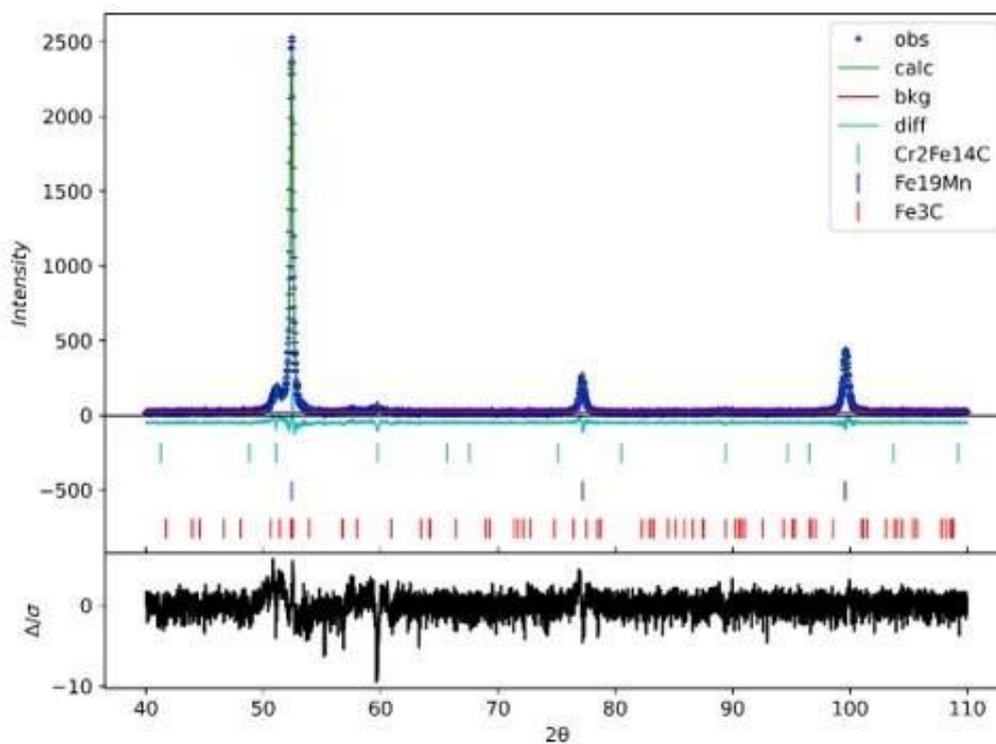
Fonte: Elaborado pela autora.

4.4 Identificação de fases aliada ao método de Rietveld

A identificação das fases cristalinas, do difratograma obtido na análise de difração, foi realizada utilizando o software PANalytical HighScorePlus (ANALYTICAL, 2001) com auxílio do banco de dados Crystallography Open Database (COD) (QUIRÓS et al., 2018) e Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) (RENAULT et al., 1972). Em seguida, por meio do software GSAS II (LARSON; DREELE, 1994; TOBY, 2013), foi aplicado o método Rietveld para calcular e ajustar os parâmetros.

Para o difratograma do boleto (Figura 17), temos a intensidade observada (pontos em azul) e a intensidade calculada (linha verde). Além disso, verifica-se a identificação de três fases cristalinas: (i) a fase principal, correspondente ao ferro manganês (Fe_{19}Mn) (COD 1523952), que possui sistema cristalino cúbico e apresenta maior concentração (77%); a fase cementita (Fe_3C) (ICSD 16593) com sistema cristalino ortorrômbico e concentração 16,3%; e a fase referente ao carboneto de ferro cromado ($\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$) (ICSD 76800) com sistema cristalino cúbico e com menor concentração 6,6%. A presença dessas fases na estrutura dos cristais revela informações das características do material, uma vez que a presença dos elementos manganês, carbono e cromo, conforme a literatura, influencia nas propriedades, tais como redução de óxidos e dureza.

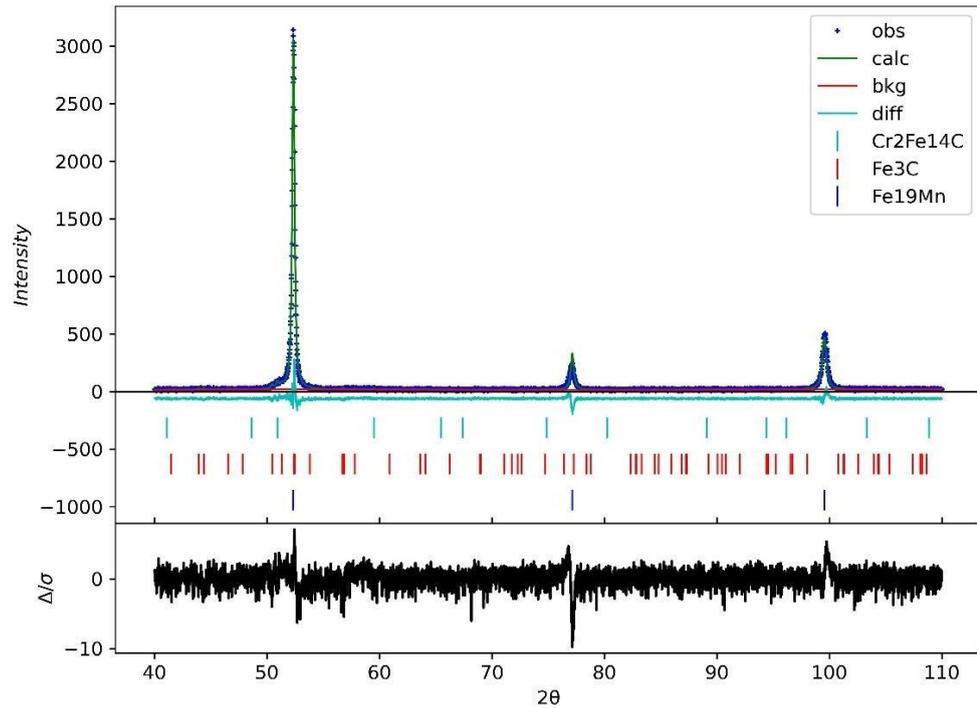
Figura 17 – Difratoograma do boleto.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para o difratograma da alma (Figura 18), foi observada apenas três fases cristalinas: (i) a fase principal, correspondente ao ferro manganês (Fe_{19}Mn) (ICSD 632489), que possui sistema cristalino cúbico e apresenta maior concentração (76,4%); a fase cementita (Fe_3C) (ICSD 38308) com sistema cristalino ortorrômbico e concentração 22,8%; e a fase referente ao carboneto de ferro cromado ($\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$) (ICSD 76800) com sistema cristalino cúbico e com menor concentração 0,7%.

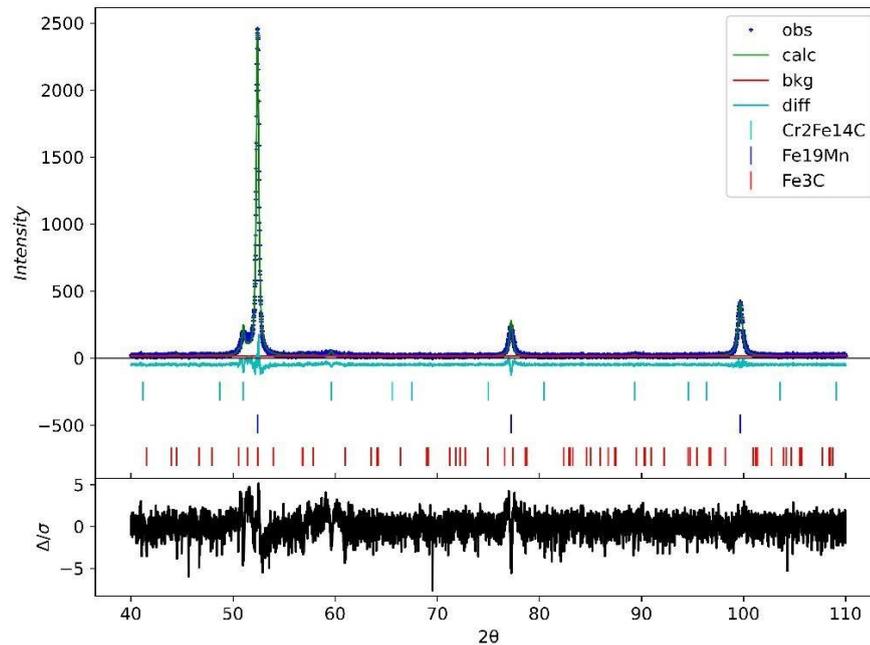
Figura 18 – Difratoograma da alma.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação ao patim, os resultados do difratograma (Figura 19) correspondem: (i) a fase principal, correspondente ao ferro manganês (Fe_{19}Mn) (COD 1523952), que possui sistema cristalino cúbico e apresenta maior concentração (69,0%); a fase cementita (Fe_3C) (ICSD 16593) com sistema cristalino ortorrômbico e concentração 24,4%; e a fase referente ao carboneto de ferro cromado ($\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$) (ICSD 76800) com sistema cristalino cúbico e com menor concentração 6,5%.

Figura 19 – Difratoograma do patim.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nessa identificação de fases, pode-se verificar a ausência de fases cristalinas indesejadas como a martensita.

A qualidade do refinamento é verificada por meio dos fatores de confiabilidade, de acordo com o que foi descrito na literatura. Com base nisso, temos que o refinamento das amostras está dentro dos padrões com o fator de ajuste (χ^2) e a relação R_{wp}/R_{exp} tendendo a 1, bem como o valor R_{wp} está dentro dos valores aceitáveis.

Tabela 4 – Características das amostras do obtidas pelo refinamento.

Amostra	R_{wp} (%)	R_{wp}/R_{exp}	χ^2	Fases Identificadas
Boleto	19,19	1,24	1,54	Fe ₁₉ Mn (77%) Fe ₃ C (16,3%) Cr ₂ Fe ₁₄ C (6,6%)
Alma	19,698	1,28	1,64	Fe ₁₉ Mn (76,4%) Fe ₃ C (22,8%) Cr ₂ Fe ₁₄ C (0,7 %)
Patim	19,442	1,26	1,58	Fe ₁₉ Mn (69,0%); Fe ₃ C (24,4%); Cr ₂ Fe ₁₄ C (6,5%).

Fonte: Elaborado pela autora.

4.5 Resultados de Dureza

Os resultados finais de dureza obtidos em cada amostra (Tabela 4), correspondem a média das impressões descritas no item 4.6 da Metodologia. O boleto, alma e patim apresentaram, respectivamente, valores de 44,4 HRC, 46,6 HRC e 46,9 HRC. O boleto apresentou menor dureza, de modo que, como observado nos resultados de composição química (item 5.1) e de fases cristalinas (item 5.4), em comparação com a alma e o patim, apresentou menor percentual de carbono, além de apresentar menor concentração da fase cementita (uma fase rica em carbono, como apresentado na revisão bibliográfica). Esse valor pode ser, portanto, em decorrência da influência do teor de carbono que, conforme apresentado no item 3.3, esse elemento é basicamente responsável pelo endurecimento do metal.

Tabela 5 – Resultados de dureza obtidos para cada amostra.

Amostra	Dureza (HRC)							Média (HRC)	Desvio Padrão
Boleto	44	45	44	44	45	45	44	44,4	0,49
Alma	46	47	46	47	47	46	47	46,6	0,49
Patim	47	47	46	47	47	47	47	46,9	0,35

Fonte: Elaborado pela autora

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado uma caracterização do metal de solda das regiões do boleto, alma e patim, de modo que essa caracterização envolveu a análise de composição química, com base na qual verificou-se a influência dos elementos de liga nos resultados de dureza e na formação de fases cristalinas. O boleto foi a região que apresentou menor dureza, o que coincidiu com o seu percentual inferior de carbono e menor concentração da fase cementita, uma vez que conforme a literatura o carbono tem grande influência na dureza do material. Verificou-se também que o manganês é o elemento de liga com maior percentual, o que pode ter influenciado no desenvolvimento da fase cristalina ferro-manganês, com fórmula molecular $Fe_{19}Mn$, que pode ser observada por meio da análise de difração de raios-x. Ademais, pode-se compreender e prevê a formação do microconstituente perlita do metal de solda, com base na simulação computacional do diagrama de fração em massa, tendo como base temperatura e composição química das amostras. Com os resultados da caracterização metalográfica, pode-se observar as lamelas de perlita, por meio do microscópio óptico. Por fim, não foi verificado nenhuma fase indesejada, como a martensita, que pode ser formada durante o processo de resfriamento da solda nos trilhos.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros:

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Estabelecer uma comparação de caracterização química e dureza no metal de solda com o metal base do trilho;
- Utilizar a técnica de difração de raios-x (DRX) para análise de tensões residuais no metal de solda para compreender possíveis falhas do metal;
- Utilizar a técnica de caracterização Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para análise microestrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 7590, Trilho Vignole - Requisitos. [S.l.]: **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2012.

ANALYTICAL, B. V. P. **X'Pert HighScore**. The Netherlands. Koninklijke Philips Electronics NV, 2001.

ARAÚJO, M. R. V. **Caracterização microestrutural do metal de solda depositado por arco submerso em chapas de aço-carbono estrutural**. 2006. 118 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/94493>>.

ARAÚJO, J. C., ASSIS, J. T., MONIN, V. I., BERTOLINO, L. C., 2005, Determinação dos Parâmetros Microestruturais de Amostras de Caulinitas Usando o Método de Refinamento do Perfil de Difração de Raios-X. **Revista da Escola de Minas de Ouro Preto**. n. 58, v. 4, p. 299-307.

ARAÚJO, M. R. **Efeito do tamanho de cristalito no sensor de campo magnético baseado no interferômetro de Mach-Zehnder com nanopartículas**. 2021. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2021.

AREMA. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association: Manual for railway engineering. (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, 2010).

ASM International. ASM Handbook: Welding, brazing, and soldering. 6, 2873 (1993).

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

BRINA, H. L. **Estradas de Ferro**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1988

BONNETT, C. F. **Practical railway engineering**. London: Imperial College Press, 2005.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. Elements of X-ray diffraction. 3. ed., internat. ed.. ed. Upper Saddle River, NJ [u.a.]: Pearson/Prentice Hall, 2001. **Previous ed.: Reading, Mass.: Addison-Wesley**, 1978. ISBN 0131788183.

FALCÃO, V. A Importância do Transporte Ferroviário de Carga para a Economia Brasileira e

suas Reais Perspectivas de Crescimento. **Revista Engenharia Civil**, Braga, n. 45, p. 51-63, Janeiro 2013.

FICI, R. P. **O sistema ferroviário mundial: o caso brasileiro**. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8136/tde-02022018-153134/>.

GIRSCH, G. et al. Advanced rail steels for heavy haul application–track performance and weldability. In: IHHA conference. **Shanghai: Internations Heavy Haul Association**, 2009.

IHHA. **Guidelines to best practices for Heavy Haul Railway Operations: Wheel Rail Interface**. (2001).

LANNA, A. L. D. Ferrovias no Brasil, 1870-1920. **História Econômica & História de Empresas**, v. 8, n. 1, 23 jul. 2012.

LARSON A.C., VON DREELE, R.B. **General Structure Analysis System (GSAS)**. Los Alamos National Laboratory Report LAUR 86-748, 2000.

MANNHEIMER, Walter A. **Microscopia dos Materiais**. Rio de Janeiro/RJ, Brasil: E-papers Serviços Editoriais – 1ª edição, 2002.

MEI, P. R., SILVA, A. L. C., **Aços e Ligas Especiais**, 4. ed., Blucher, 2021.

MOREIRA, L. P. **Efeito de 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.

NISHIKAWA, L. P. **Soldagem de trilhos ferroviários perlíticos: origem das microestruturas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. doi:10.11606/D.3.2018.tde-13072018-103942.

PORCARO, R. R. **Efeito da soldagem elétrica por centelhamento na microestrutura, propriedades mecânicas e resistência à fadiga de um aço para trilhos ferroviários – análise experimental e numérica**. 2019. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018

PORCARO, R. R. et al. Microestrutura e propriedades mecânicas de um aço para trilhos ferroviários soldado por centelhamento. **Soldagem & Inspecao**, v. 22, p. 59-71, 2017.

PLU, J; BONDEUX, S; BOULANGER, D; HEYDER, R. Application of Fracture Mechanics

Methods to Rail Design and Maintenance. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 76, 2009, p. 2602-2611.

QUIRÓS, M., GRAŽULIS, S., GIRDZIJAUSKAITĖ, S., MERKYS, A. & VAITKUS, A. (2018). Using SMILES strings for the description of chemical connectivity in the Crystallography Open Database. *Journal of Cheminformatics*, 10(23). doi: 10.1186/s13321-018-0279-6 (BibTeX, plain text).

REGIS, R. C; BARRA, S. R. **Influência dos Elementos de Liga nos Aços Carbono, Baixa e Média Liga - Uma Revisão**. In: SEMINÁRIO BAIANO DE TECNOLOGIAS DE FABRICAÇÃO,1., 2010, Salvador. Anais [...]. Salvador: Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, 2010. p. 1-13

RIETVELD, H. M., **Acta Crystallographica**, v. 22, n. 151, 1967.

RIGONI, J. F. “**Síntese e caracterização de perovskitas sem e com dopagem de Nb₂O₅**”. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado em Química) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA, Ponta Grossa, 2014.

SCHNEIDER, E. L. **Análise da Vida Remanescente de Trilhos com Defeitos Transversais Desgastados em Serviço**. 2005. 115 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRS, 2005.

SILVA, R. F. DA. **A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais**. *Revista Processos Químicos*, v.14, n.27, p.73-82, 2020.

SILVA, P. R. T. **Caracterização de trilhos ferroviários quanto a tenacidade à fratura e comportamento em fadiga**, 93p. Dissertação, Mestrado – PPGEMM Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1995.

SILVEIRA, M. R. **Transporte e logística: as ferrovias no brasil**. *Geosul*, v. 17, n. 34, p. 63–86, 2002.

TOBY, B.H.; VON DREELE R.B. **Journal of Applied Crystallography**, v. 46, p. 544-549, 2013.