



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**OBTENÇÃO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS PARA HOMOGENEIZAÇÃO DE
MICROESTRUTURAS SUPER DEFORMADAS**

IGOR FERREIRA PASSINHO SILVA

**São Luís
2023**

IGOR FERREIRA PASSINHO SILVA

**OBTENÇÃO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS PARA HOMOGENEIZAÇÃO DE
MICROESTRUTURAS SUPER DEFORMADAS**

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado à
coordenação curso de
Engenharia Mecânica como
requisito para a obtenção do
título de Bacharel(a) em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Andrei
Bavaresco Rezende.

**São Luís
2023**

IGOR FERREIRA PASSINHO SILVA

**OBTENÇÃO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS PARA HOMOGENEIZAÇÃO DE
MICROESTRUTURAS SUPER DEFORMADAS**

Trabalho aprovado. São Luís – MA, 19 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Andrei Bavaresco Rezende – UFMA/Orientador

Profa. Dra. Maria Eliziane Pires de Souza – UFMA/Engenharia Mecânica

Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues – UFMA/Engenharia Mecânica

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Silva, Igor Ferreira Passinho.

Obtenção de tratamentos térmicos para homogeneização de
microestruturas super deformadas / Igor Ferreira Passinho Silva. - 2023.
33 p.

Orientador(a): Andrei Bavaresco Rezende.

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Maranhão,
São Luís, 2023.

1. Dureza. 2. Rodas Ferroviárias. 3. Tratamento
Térmico. I. Bavaresco Rezende, Andrei. II. Título.

A Deus, aos meus pais e à minha irmã, dedico este trabalho como expressão sincera da minha gratidão e todo meu carinho. Que esta conquista seja para honra e glória do Senhor, o maior orientador da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Meu Deus, expresso minha profunda gratidão pelos Teus planos para a minha vida, pois superam sempre as minhas próprias aspirações.

Aos meus pais, José Antonio e Josinete Quirino, agradeço pelo amor, incentivo e apoio incondicional que têm sido alicerces fundamentais em minha jornada.

À minha irmã, Iasmim, reconheço sua parceria e encorajamento constantes, elementos valiosos que enriqueceram a minha trajetória.

À Universidade Federal do Maranhão e seu corpo docente, agradeço por proporcionarem o conhecimento essencial para a conclusão desta graduação.

Ao Professor Andrei Bavaresco, meu sincero agradecimento pela orientação acadêmica, apoio e confiança, elementos indispensáveis para a realização deste trabalho.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (Fapema) pelo valioso fomento concedido durante este projeto. O apoio financeiro proporcionado por esta instituição foi crucial para viabilizar a realização desta pesquisa e contribuiu significativamente para o desenvolvimento do conhecimento científico.

Estendo meus agradecimentos aos professores que me acompanharam ao longo deste curso, dedicando-se com empenho à nobre arte de ensinar.

Aos amigos e colegas de trabalho que compartilharam esta jornada, agradeço pela significativa contribuição à minha formação e sei que permanecerão presentes em minha vida.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação, expresso meu mais profundo obrigado.

RESUMO

Os componentes no setor ferroviário que mais sofrem desgaste, como os trilhos e as rodas, demandam um alto investimento na melhoria do sistema roda-trilho. As rodas precisam resistir à fadiga de contato e altas temperaturas para evitar trincas, especialmente na pista de rolamento. Durante a rotação, ocorre um campo de tensão que pode causar deformação plástica na microestrutura abaixo da pista. Para reutilizar as rodas, é necessário submetê-las a um processo de reperfilamento por usinagem, removendo uma fina camada de material para refazer o contorno do aro e melhorar seu desempenho. Esse processo aumenta a vida útil da roda, mas há limitações para a remoção de material, e quando ultrapassadas, as rodas devem ser substituídas. O trabalho visa restaurar a microestrutura deformada por fadiga de contato em uma roda de aço ferroviário por meio de tratamento térmico de recozimento, homogeneizar a microestrutura, analisar a resistência mecânica e tenacidade da roda após o tratamento, e aumentar a vida útil da roda reduzindo a espessura da camada usinada e o volume de material removido. Amostras de disco de aço de roda classe C foram submetidas a tratamento térmico de recozimento em diferentes temperaturas e tempos. Após o tratamento, as amostras foram preparadas para metalografia. A microestrutura foi analisada por meio de imagens capturadas por um microscópio óptico, e a dureza foi mapeada usando um microdurômetro em escala Vickers. A análise microscópica após o tratamento térmico mostra crescimento de grãos, homogeneização da microestrutura, aumento da tenacidade e resistência mecânica, redução da camada deformada. A análise de micrografias e resultados de dureza revelou que a amostra tratada a 650°C por 10 minutos apresentou microestrutura mais homogênea e refinada, indicando eficácia na recristalização, com dureza próxima dos requisitos mínimos da AAR para rodas novas. Um tempo maior a uma temperatura mais baixa também reduz a dureza decorrente da deformação. Concluindo-se que existe um potencial para melhorar a manutenção das rodas, aumentando sua vida útil e reduzindo a remoção de material. Isso pode levar ao desenvolvimento de um método de usinagem com tratamento térmico, sugerindo benefícios na redução de custos de manutenção nas rodas ferroviária.

Palavras-chave: Rodas Ferroviárias, Tratamento Térmico, Dureza.

ABSTRACT

The components in the railway sector that undergo the most wear and tear, such as tracks and wheels, require a significant investment in improving the wheel-rail system. The wheels need to withstand contact fatigue and high temperatures to prevent cracks, especially on the running surface. During rotation, a stress field occurs that can cause plastic deformation in the microstructure beneath the running surface. To reuse the wheels, they need to undergo a machining reprofiling process, removing a thin layer of material to reshape the rim and improve performance. This process extends the wheel's lifespan, but there are limitations to material removal, and when exceeded, the wheels must be replaced. The work aims to restore the microstructure deformed by contact fatigue in a railway steel wheel through an annealing heat treatment, homogenize the microstructure, analyze the mechanical strength and toughness of the wheel after treatment, and increase the wheel's lifespan by reducing the thickness of the machined layer and the volume of removed material. Samples of Class C steel wheel discs were subjected to annealing heat treatment at different temperatures and times. After treatment, the samples were prepared for metallography. The microstructure was analyzed through images captured by an optical microscope, and hardness was mapped using a Vickers microhardness tester. Microscopic analysis after heat treatment shows grain growth, homogenization of the microstructure, increased toughness and mechanical strength, and a reduction in the deformed layer. Micrograph analysis and hardness results revealed that the sample treated at 650°C for 10 minutes exhibited a more homogeneous and refined microstructure, indicating effectiveness in recrystallization, with hardness close to the minimum AAR requirements for new wheels. A longer time at a lower temperature also reduces hardness resulting from deformation. It is concluded that there is potential to improve wheel maintenance, increasing their lifespan and reducing material removal. This could lead to the development of a machining method with heat treatment, suggesting cost-saving benefits in railway wheel maintenance.

Keywords: *Railway Wheels, Heat Treatment, Hardness.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema de uma roda ferroviária	14
Figura 1.2 – Micrografia de roda ferroviária encruada (a) e disco encruado (b)	15
Figura 1.3 – Roda ferroviária afetada por spalling	16
Figura 1.4 – Roda ferroviária afetada por shelling	17
Figura 1.5 – Esquema de crescimento de grão durante a recristalização	19
Figura 4.1 – Esquema dos discos de ensaio tribológico	21
Figura 4.2 – Microscópio óptico com analisador de imagens	22
Figura 4.3 – Microdurômetro digital	22
Figura 5.1 – Micrografia de amostra sem tratamento térmico	24
Figura 5.2 – Micrografia do tratamento térmico a 600°C. (a) 5 min, (b) 10 min, (c) 20 min e (d) 30 min	25
Figura 5.3 – Micrografia do tratamento térmico a 650°C. (a) 5 min, (b) 10 min, (c) 20 min e (d) 30 min	26
Figura 5.4 – Medições de dureza após tratamento térmico a 600 °C	28
Figura 5.5 – Medições de dureza após tratamento térmico a 650°C	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química em porcentagem de massa de roda de aço ferroviária classe C.

20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR Association of American Railroads

ZTA Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA	19
3	OBJETIVOS	19
	1.1.1 Objetivo Geral	19
	1.1.2 Objetivos Específicos	19
4	METODOLOGIA	20
4.1	Materiais	20
4.2	Métodos	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
6	CONCLUSÕES	30
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário é um dos meios de transporte mais antigo em todo o mundo, tendo surgido na primeira revolução industrial, com a invenção da primeira locomotiva a vapor em 1804 na Inglaterra, pelo inglês Richard Trevithick. Esta máquina revolucionou a forma de se transportar matéria-prima, produtos e passageiros, tendo em vista a sua grande capacidade de carga em toneladas por vias férreas. As ferrovias tornaram-se rapidamente essenciais para transformar a infraestrutura do transporte de uma nação, tendo como resultado o avanço tecnológico dessas máquinas ao longo dos anos, bem como o aumento do custo de manutenção dos mesmos (DOS SANTOS, 2011).

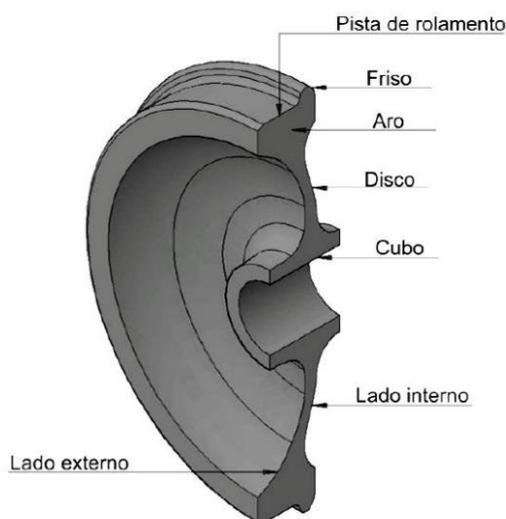
O custo de manutenção em equipamentos e máquinas que estão sujeitas a desgaste de contato de superfícies como no setor ferroviário, consome uma boa parte dos recursos de uma empresa. Por isso, existe uma necessidade crescente de se utilizar os melhores materiais com propriedades desejáveis de resistência ao desgaste e também fadiga de contato, com o objetivo de aumentar a vida útil desses componentes e dessa forma reduzir a frequência de reparos ou substituições (SOLANO-ALVAREZ et al., 2014).

Os componentes no setor ferroviário que mais sofrem ação de desgaste são os trilhos e as rodas. Considerando que empresas do transporte ferroviário a fim de aumentar sua competitividade no mercado, expandem a carga transportada por cada eixo no vagão, faz-se necessário um alto investimento na melhoria do sistema roda-trilho. Devido ao aumento do volume de carga, as rodas sofrem mais impacto na manutenção, e conseqüentemente necessitam de maior confiabilidade e segurança para a operação, gerando grandes custos (VILLAS BÔAS, 2010).

Seguindo o padrão AAR (Association of American Railroads), as rodas classe C são mais comumente utilizadas para cargas pesadas por eixo. A fabricação ocorre por meio de forjamento ou fundição, utilizando-se um aço com composição de alto teor de carbono, com perlita fina em sua microestrutura. Através da composição da liga de aço, propriedades tribológicas desejáveis podem ser alcançadas juntamente com a aplicação de tratamentos térmicos (AAR, 2014).

As rodas classe C adotam a norma M-107/208 da AAR, que tem por finalidade regulamentar e certificar padrão de segurança e qualidade, estabelecendo critérios para composição química e fabricação das mesmas. Devido a altas cargas por eixo, as rodas necessitam de uma boa resistência mecânica à fadiga de contato e de forma crucial resistir a altas temperaturas nas frenagens com o objetivo de evitar a formação e propagação de trincas, especialmente na pista de rolamento, como representado na figura 1.1.

Figura 1.1 – Esquema de uma roda ferroviária.



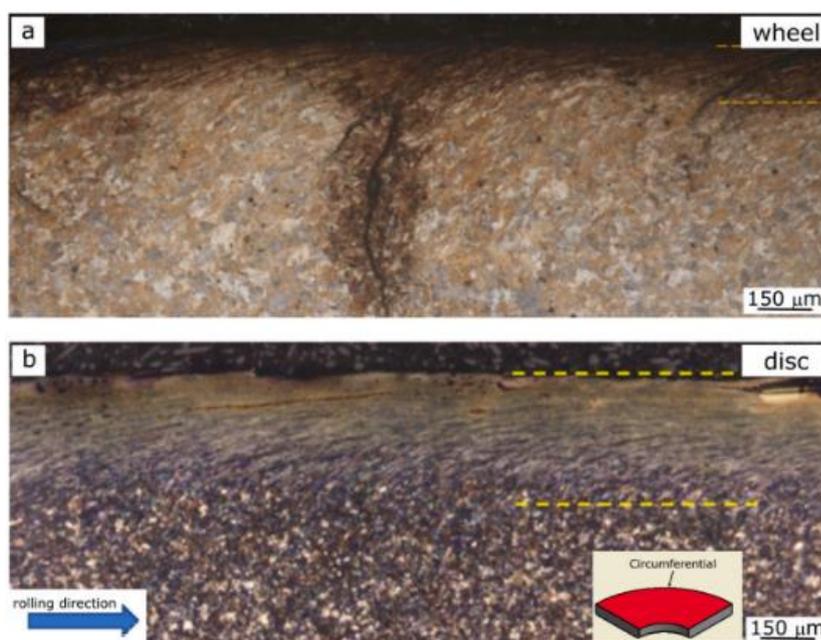
Fonte: Freitas (2015).

Com as frenagens e o travamento da roda, é alcançada de forma localizada no contato roda-trilho temperatura superior a 800° C. A esta temperatura ocorre a austenitização do aço, formando-se uma ZTA (Zona Termicamente Afetada) que é incapaz de suportar a carga aplicada devido a sua alta maleabilidade, resultando em deformação localizada na pista de rolamento. Com um rápido resfriamento na ZTA, sucede-se a formação da austenita em martensita, que possui característica de alta dureza e fragilidade, colocando em risco a segurança da operação da roda, podendo ocasionar falha por trincas térmicas e descarrilamento da locomotiva (RADINZ et al, 2008).

Abaixo da pista de rolamento ocorre altas deformações na microestrutura, estas estão condicionadas à fadiga de contato por rolamento, que causa deterioração na superfície com interação direta do trilho. Um campo de tensão

multiaxial é gerado na superfície e abaixo da superfície alternando ciclicamente à medida que o corpo rotaciona. Este campo de tensão é aumentado e acumulado com os ciclos, podendo ultrapassar o limite de escoamento do material, causando deformação plástica da microestrutura logo abaixo da pista de rolamento da roda (EKBERG; SOTKOVSKI, 2001).

Figura 1.2 – Micrografia de roda ferroviária encruada (a) e disco encruado (b).



Fonte: Strey et al. (2021).

A microestrutura perlítica abaixo da superfície de rolamento apresenta um refinamento de grãos decorrente da alta deformação, elevando o endurecimento da camada. Conforme mostrado na figura 1.2, o campo de tensão aumentado com os ciclos, leva a formação de três regiões na microestrutura. A deformação plástica elevada na camada mais próxima a superfície de contato, a região de transição logo abaixo, com tensões residuais elásticas e residuais concorrentes, e a região mais profunda com microestrutura não afetada plasticamente (STREY et al., 2021).

Com o limite de escoamento do aço podendo ser ultrapassado, e por consequência a deformação plástica, o defeito de lascamento (spalling) da roda ocorre, podendo ainda levar a formação do defeito de escamação (shelling). Trincas iniciadas abaixo da pista de rolamento se propagam até a superfície da roda, levando a escamação da mesma ou até mesmo à fratura do aro (CHAVES, 2017).

Na figura 1.3 apresenta-se uma fotografia do defeito de lascamento de uma roda ferroviária, onde se observa perda de material na superfície do rodante. O lascamento da superfície é causado por finas trincas térmicas originadas por pequenos escorregamentos (AAR, 2014). Devido a frenagens e o rápido aquecimento na região de contato entre a roda e o trilho, pode ocorrer escorregamento pelo baixo atrito, levando a formação das trincas térmicas, que ocorrem quando há um alto fluxo de calor por fricção em uma fração pequena da superfície de contato (FREITAS, 2015).

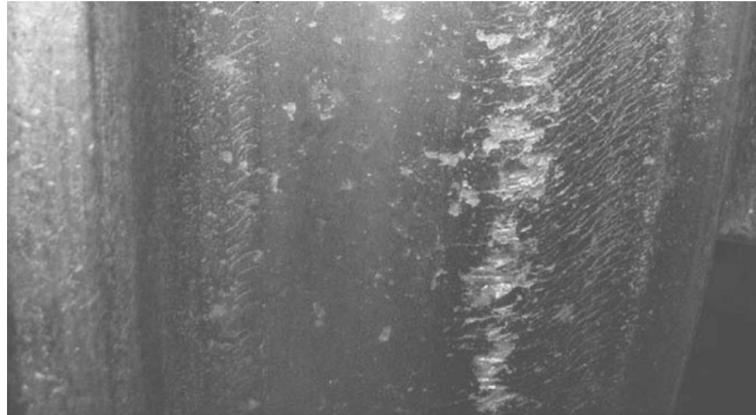
Figura 1.3 – Roda ferroviária afetada por spalling.



Fonte: Magel; Kalousek (1996).

A figura 1.4 demonstra a superfície de rolamento de uma roda que apresenta escamação ao longo de todo o perfil do aro. Pedacos do material da pista de rolamento se desprendem da região abaixo da superfície, devido a altas tensões no contato que deformam a camada ultrapassando o limite de escoamento do material (AAR, 2014). As tensões associadas a condições severas de frenagem em função do aquecimento, reduzem a resistência à fadiga da roda, levando a formação de trincas que se propagam e ao se cruzarem arrancam o material da pista de rolamento (FREITAS, 2015).

Figura 1.4 – Roda ferroviária afetada por shelling.



Fonte: Lewis; Olofsson (2009).

Para a reutilização das rodas é necessário que as mesmas sejam submetidas ao processo de reperfilamento por usinagem em tornos copiadores. A remoção de uma fina camada de material refaz o contorno do aro, e diminui o tamanho do diâmetro da roda. Esse processo é importante para a remoção dos defeitos superficiais que afetam o desempenho da roda e colocam em risco a sua segurança em operação (NETO, 2006).

O processo de reperfilamento aumenta a vida útil da roda, porém a retirada de material para recondicionar o perfil do aro é limitada a dimensões seguras para a usinagem. Após a roda ultrapassar essa tolerância dimensional, ocorre o sucateamento. Este processo possui custo bem menor se comparado à substituição das rodas por conjuntos novos, porém depende de um bom gerenciamento das vidas dos rodeiros (NETO, 2006).

Os tratamentos térmicos são formas de obter propriedades desejáveis dos materiais, induzindo mudanças na microestrutura dos mesmos através do aquecimento a determinadas temperaturas, tempo de permanência e o controle de resfriamento. Para aços submetidos a deformação plástica, o recozimento é um tratamento térmico recomendado, pois tem por objetivo a remoção de tensões provocadas por conformação a frio ou quente, diminuição da dureza, melhora da ductilidade e ajuste do tamanho do grão (CHIAVERINI, 1986).

A deformação plástica da microestrutura da roda ferroviária decorrente das

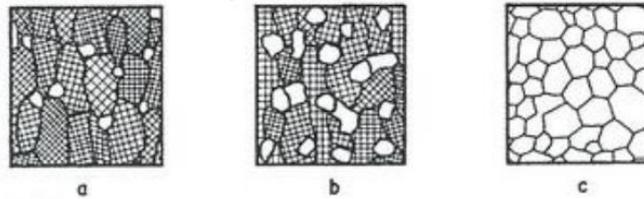
tensões cíclicas do contato entre a roda e o trilho, promove um endurecimento da camada superficial refinando os grãos, elevando a dureza e formando uma microestrutura heterogênea, característica de materiais encruados. Essa deformação cria tensões internas que são ocasionadas pela distorção na estrutura cristalina do aço e armazenadas na microestrutura. A quantidade de defeitos puntiformes e discordâncias é aumentada, bem como a orientação dos grãos é afetada (CHIAVERINI, 1986).

Durante o tratamento térmico de recozimento a energia armazenada da deformação é diminuída pelo rearranjo da microestrutura e eliminação de defeitos na estrutura cristalina do aço. As modificações microestruturais que ocorrem são relacionadas a recuperação e recristalização durante a aplicação de calor para o tratamento (CHIAVERINI, 1986). Na recuperação, as propriedades mecânicas são parcialmente restauradas pela diminuição da energia de deformação através do movimento de discordâncias, os interstícios e lacunas no aço são eliminados e a formação de subgrãos ocorre (DE OLIVEIRA, 2019). Na recristalização, sucede-se a transformação de fase com início através da nucleação e posterior crescimento de grão. Regiões na microestrutura isentas de defeitos dão início ao crescimento do grão, pelo movimento dos contornos de grão que ao aumentarem de tamanho, também aumentam a ductilidade e diminuem a dureza (CALLISTER JUNIOR, 2002).

A recristalização ocorre em duas etapas distintas. A primeira etapa é a nucleação, onde novos grãos começam a se formar na microestrutura deformada. A segunda etapa é o crescimento, que ocorre à medida que os contornos de alto ângulo migram, resultando no aumento dos grãos recristalizados. A microestrutura apresenta regiões recristalizadas e recuperadas até que se complete todo o processo de recristalização durante o recozimento (ALVES, 2009).

O potencial termodinâmico para que aconteça a recristalização é a energia armazenada na deformação que ocorre na forma de defeitos cristalinos. Quando uma região livre de defeitos é formada e circundada por um contorno de alto ângulo, a recristalização ocorre com o crescimento dessa região sobre a matriz encruada. Após a recristalização novos grãos surgem na microestrutura e o tamanho e forma dos mesmos são diferentes do estado anterior de deformação, conforme esquema do processo de recristalização na figura 1.5 (PADILHA, 1996).

Figura 1.5 – Esquema de crescimento de grão durante a recristalização.



Fonte: Padilha (1996).

2 JUSTIFICATIVA

Visando a restauração de propriedades como resistência mecânica e de fadiga, redução de tensões residuais, melhor usinabilidade e aumento de vida útil do componente, a aplicação de tratamento térmico de recozimento, promove através da recuperação e recristalização, uma microestrutura com as características acima desejadas para operação segura e economicamente viável das rodas ferroviárias. Assim o reperfilamento pode ocorrer com menores forças de usinagem, promovendo redução do desgaste ferramental, e a microestrutura final apresentará melhores propriedades mecânicas pelo refinamento do grão.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral:

O objetivo deste estudo é analisar a restauração da microestrutura da camada deformada por fadiga de contato em uma roda de aço ferroviário por meio de tratamento térmico de recozimento.

3.2 Objetivos Específicos:

- Obter a homogeneização da microestrutura da camada deformada através da recristalização e normalização;
- Analisar a resistência mecânica e tenacidade da roda submetida ao tratamento térmico;
- Promover maior vida útil da roda com diminuição da espessura da camada usinada e volume de material removido.
- Obter estratégias para aplicação na roda real.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais:

Para obtenção das camadas deformadas, foram utilizadas amostras de aço carbono classe C em formato de discos, submetidas ao teste tribológico twin-disc realizado por Rezende et al. (2021).

A composição da liga é apresentada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química em porcentagem de massa de roda de aço ferroviária classe C.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V	Nb
0.74%	0.74%	0.28%	0.008%	0.023%	0.20%	0.057%	0.02%	0.008%	0.002%	0.002%

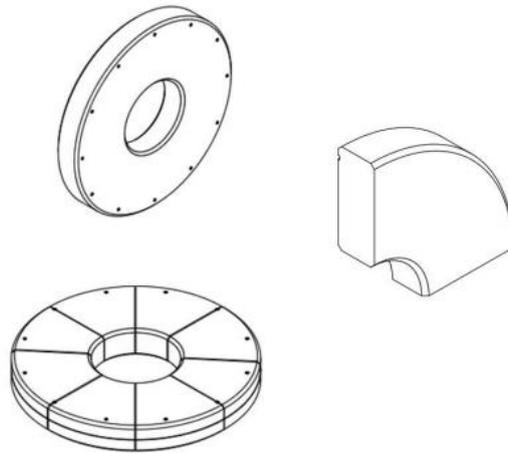
Utilizou-se os seguintes materiais para realização deste trabalho:

- Forno mufla;
- Embutidora (Fortel EFD 40);
- Lixas d'água (300, 600, 1200, 1500, 2000 e 2500);
- Politriz (PL02E);
- Alumina para polimento metalográfico de 1 μ m;
- Microscópio óptico (Olympus BX51);
- Microdurômetro digital (Shimadzu HMV-2T).

4.2 Métodos:

Para a preparação das amostras, foram utilizados discos de aço classe C, cortados conforme esquema da figura 4.1, que simulam uma roda ferroviária em ensaio tribológico. Essas amostras foram submetidas a um tratamento térmico de recozimento em um forno mufla com temperaturas de 600°C e 650°C, por tempos variados de 5, 10, 20 e 30 minutos. Após o tratamento térmico, as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente fora do forno.

Figura 4.1 – Esquema dos discos de ensaio tribológico.



Fonte: Autor (2023)

Em seguida, as amostras foram preparadas para a análise metalográfica. O processo de preparação começou com o embutimento das amostras em baquelite utilizando uma embutidora metalográfica (Fortel EFD 40). O tempo de embutimento foi de 15 minutos para garantir uma adequada fixação das amostras. Após o embutimento, foi realizado o lixamento das amostras com lixas d'água de diferentes granulometrias: 300, 600, 1200, 1500, 2000 e 2500. As amostras foram lixadas em sequência, iniciando com a lixa d'água de granulometria 300 e progredindo até a granulometria 2500. Em seguida, as amostras foram polidas em uma politriz (PL02E) utilizando alumina com 1 micrômetro de tamanho de grão.

Após a etapa de polimento, as amostras foram submetidas a um ataque químico com Nital 2% durante 4 segundos. Esse procedimento permitiu a revelação da microestrutura das amostras. As amostras foram então analisadas em um microscópio óptico (modelo Olympus BX51), conforme figura 4.2, equipado com um analisador de imagens. Foram capturadas imagens da microestrutura em cada condição do tratamento térmico. Posteriormente, as imagens foram analisadas utilizando o software Image J para a medição da microestrutura da camada deformada.

Figura 4.2 – Microscópio óptico com analisador de imagens.



Fonte: Autor (2023)

A análise de dureza das amostras foi realizada utilizando um microdurômetro digital (modelo Shimadzu HMV-2T), conforme figura 4.3, em escala Vickers. Foram feitos mapeamentos de dureza na camada deformada e na matriz das amostras, com carga de 0,3 kg durante 15 segundos. Os dados obtidos foram analisados para avaliar os efeitos do tratamento térmico nas propriedades de dureza das amostras e evidenciar a homogeneização da microestrutura.

Figura 4.3 – Microdurômetro digital.



Fonte: Autor (2023)

Essa metodologia foi aplicada visando a caracterização da microestrutura e da dureza dos discos de aço classe C submetidos ao tratamento térmico. Os equipamentos e materiais utilizados foram selecionados de acordo com os objetivos do estudo e os procedimentos foram conduzidos seguindo as melhores práticas para garantir resultados confiáveis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

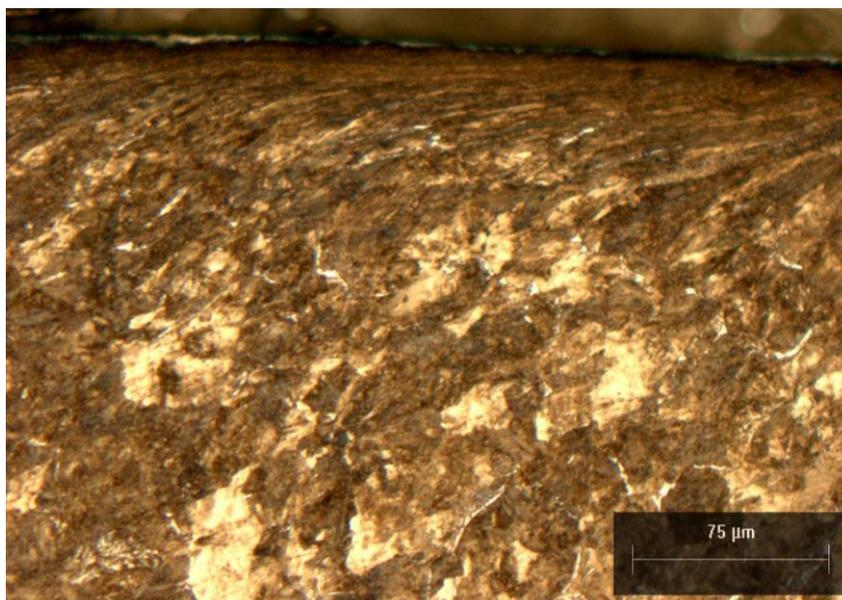
Os resultados da análise metalográfica demonstrados abaixo abrangem as imagens microscópicas adquiridas tanto antes quanto após o tratamento térmico das amostras, os valores de dureza obtidos para diferentes combinações de tempo e temperatura durante o processo de recozimento.

5.1 Análise metalográfica das amostras

A micrografia obtida da amostra sem tratamento térmico e com ampliação de 200X, apresenta uma microestrutura com alto nível de deformação plástica na camada mais superficial. A figura 5.1 evidencia as distorções na direção de rolamento dos discos e a presença de linhas de discordância com fronteiras de grãos indicando a intensidade da deformação. Próximo a superfície de rolamento dos discos, houve uma diminuição do tamanho médio dos grãos, aumentando a densidade de discordâncias e formando regiões com heterogeneidade de camadas (CHIAVERINI, 1986).

Os resultados encontrados nas micrografias das amostras submetidas ao teste de tribologia twin-disc apresentaram características similares às observadas no estudo recente em rodas (STREY et al., 2021). Um endurecimento substancial foi notado na superfície do disco, abrangendo uma espessura entre 255 e 270 μm . Este endurecimento se originou nas amostras devido às forças tangenciais geradas pela carga de contato e pelo movimento de deslizamento. Com a redução do tamanho dos grãos, aumenta-se a dureza da camada devido à sua influência na restrição de movimento de defeitos cristalinos e o incremento do número de discordâncias (CALLISTER JUNIOR, 2002).

Figura 5.1 – Micrografia de amostra sem tratamento térmico.

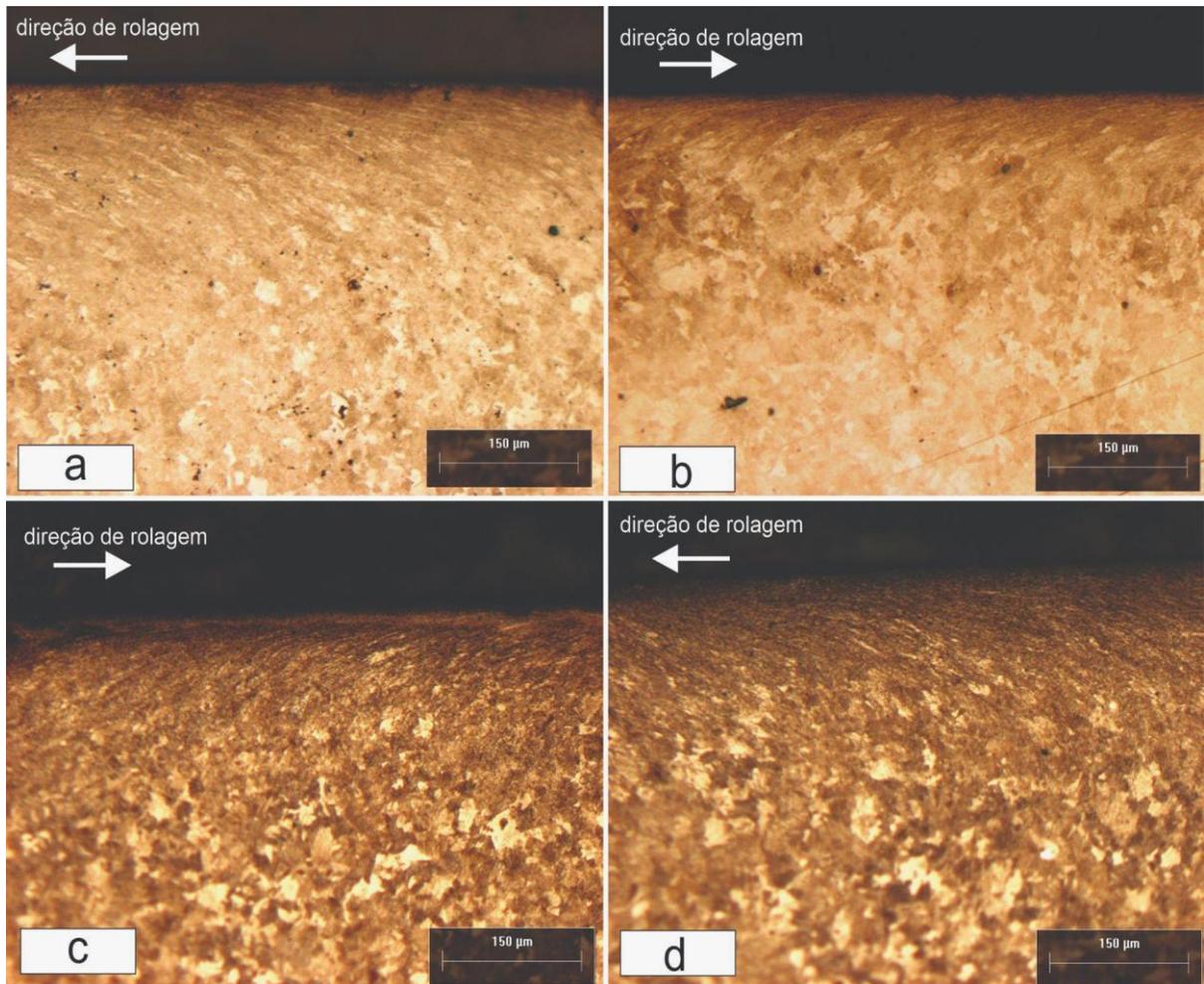


Fonte: Autor (2023)

A figura 5.2 exibe as imagens microscópicas dos tratamentos térmicos realizados a 600 °C. Nas micrografias com ampliação de 100X, observa-se uma diminuição gradual da deformação plástica para tempo de recozimento de 5 e 10 minutos no forno, conforme ilustrado nas figuras 5.2 (a) e (b). Os grãos apresentaram uma tendência em alinhar-se e adotar uma forma mais arredondada, indicando o início do processo de recuperação (DE OLIVEIRA, 2019). É possível notar também o surgimento de limites de grão mais definidos, sugerindo uma possível recristalização parcial. Contudo, a estrutura microscópica ainda preserva algumas características do estágio de deformação inicial (PADILHA, 1996).

À medida que o tempo de tratamento térmico é estendido para 20 e 30 minutos a 600°C conforme figuras 5.2 (c) e (d), os efeitos de recuperação e recristalização se tornam mais evidentes. A deformação plástica é notavelmente reduzida, havendo a presença de grãos bem delineados e limites de grão mais acentuados. A microestrutura exibe uma proporção maior de grãos recristalizados, o que sugere a transformação dos grãos previamente deformados em novos grãos com orientação cristalográfica mais uniforme (PADILHA, 1996).

Figura 5.2 – Micrografia do tratamento térmico a 600°C. (a) 5 min, (b) 10 min, (c) 20 min e (d) 30 min.

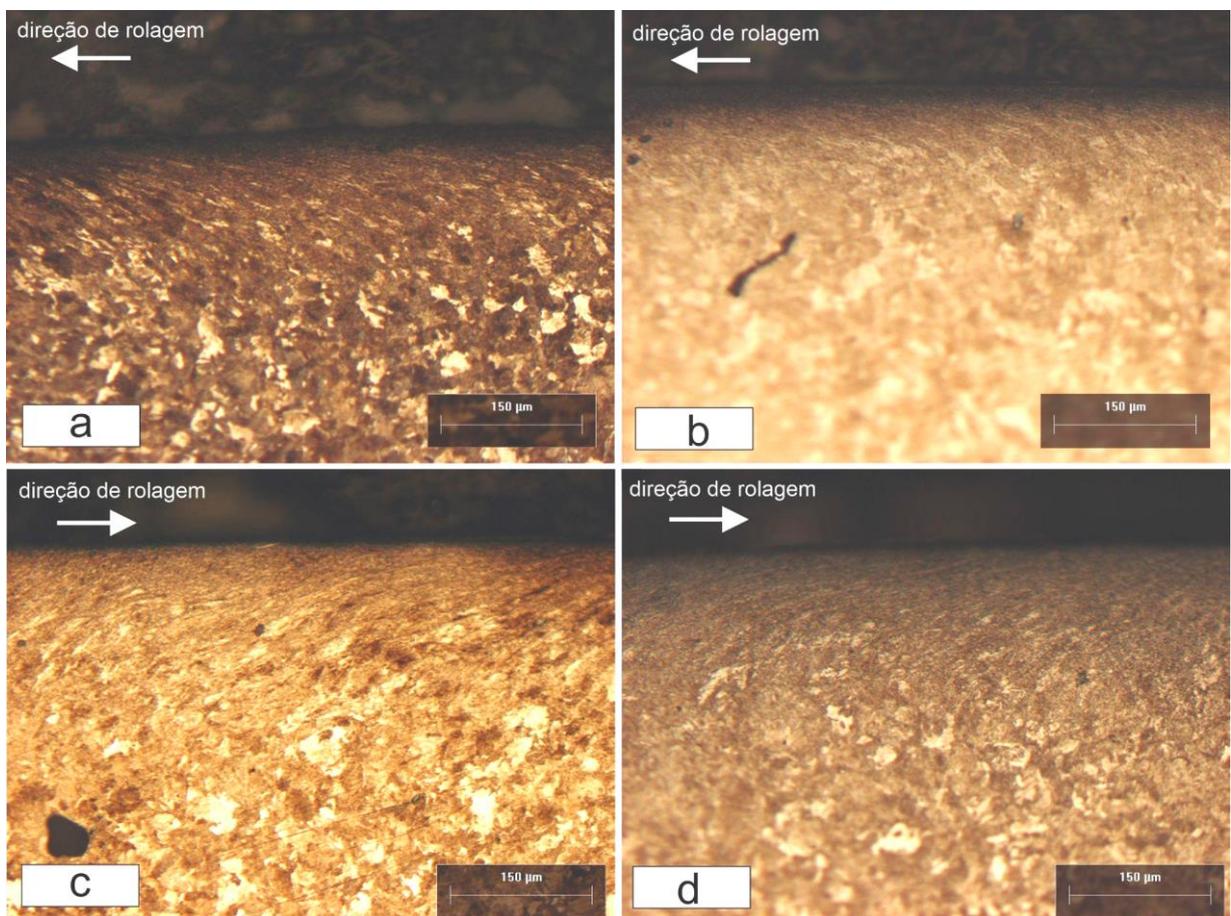


Fonte: Autor (2023)

Na figura 5.3, são demonstradas as micrografias resultantes dos tratamentos térmicos a temperatura de 650 °C. Nos intervalos de tempo de 5 e 10 minutos conforme figura 5.3 (a) e (b), destaca-se uma notável intensificação dos processos de recuperação e recristalização quando comparados com as amostras tratadas a 600°C pelo mesmo período de permanência em forno. A microestrutura revela uma proporção consideravelmente maior de grãos que passaram pelo processo de recristalização, notando-se limites de grãos distintos e uma estrutura mais equiaxial. Adicionalmente, a deformação plástica é ainda mais reduzida, evidenciando a maior efetividade do tratamento térmico em temperaturas mais elevadas, dessa forma a camada deformada diminui à medida que a temperatura aumenta, bem como o tempo em recozimento da amostra (CHIAVERINI, 1986).

A difusão atômica desempenha um papel crucial nesse processo, permitindo que os átomos se redistribuam para formar novas estruturas cristalinas. Com o aumento da temperatura, a velocidade da difusão atômica é intensificada, resultando em um maior movimento dos átomos e, como resultado, uma redistribuição mais rápida dos átomos, o que é essencial para a recristalização. Isso resulta em uma taxa mais elevada de recristalização em temperaturas mais altas durante o procedimento de tratamento térmico (CALLISTER JUNIOR, 2002).

Figura 5.3 – Micrografia do tratamento térmico a 650°C. (a) 5 min, (b) 10 min, (c) 20 min e (d) 30 min.



Fonte: Autor (2023)

5.2 Análise de dureza das amostras

A análise combinada das micrografias e das medições de dureza desempenha um papel fundamental na obtenção de uma compreensão completa da transformação da camada deformada após o processo de recozimento. Ao realizar medições de dureza nas amostras tratadas termicamente, foi possível obter informações sobre a

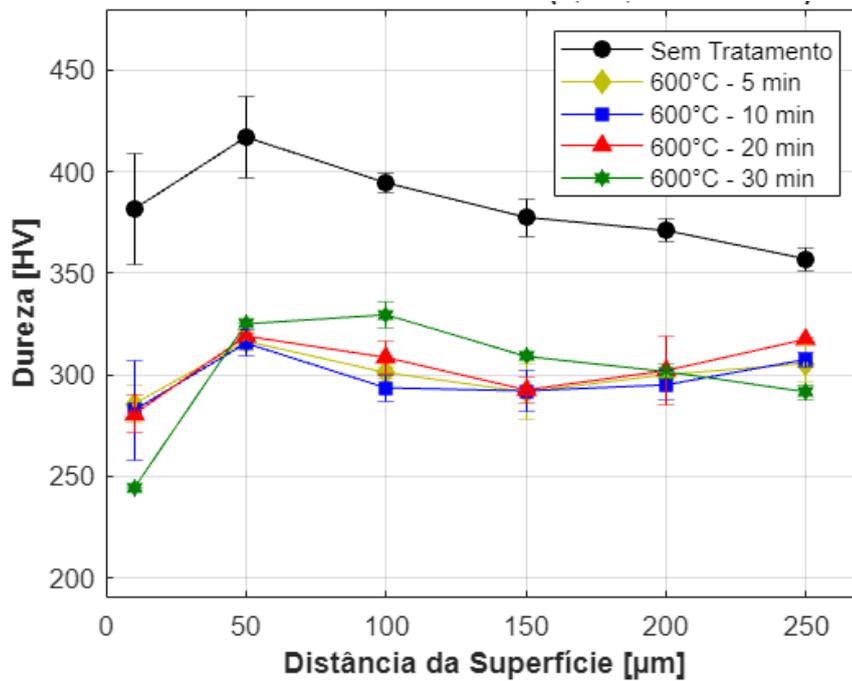
resistência do material e sua capacidade de se recuperar e recristalizar. Identificaram-se amostras com níveis de dureza variados na camada deformada, o que sugere a presença de áreas que ainda não foram completamente homogeneizadas para certas temperaturas e períodos de permanência no forno (CHIAVERINI, 1986).

A figura 5.4 e 5.5 apresentam as medições de dureza abaixo da pista de rolamento em corte transversal das amostras tratadas a 600°C e 650°C, respectivamente e o perfil de dureza da amostra sem tratamento térmico. Na figura 5.4, foi constatado que o tratamento térmico resultou em uma redução da dureza em todos os intervalos de tempo de permanência a 600°C. A partir de 5 minutos de permanência em forno, os valores de dureza se tornaram notavelmente similares. Além disso, as amostras apresentaram uma homogeneidade maior na dureza da camada deformada se comparado com os valores de dureza antes do tratamento térmico, que apresentou diferenças de 60 HV à medida que se aumentava a distância da superfície de rolamento, demonstrando a heterogeneidade da camada deformada plasticamente.

É possível notar que a dureza da amostra não tratada apresenta valores mais elevados em distâncias da superfície menores, porém os valores de dureza apresentam uma tendência de serem menores na camada mais próxima à pista de rolamento, demonstrando uma fragilidade na mesma. Esses resultados são coerentes com o que é mostrado na figura 5.1, onde a microestrutura retrata uma camada deformada com grãos de ferrita e cementita alongados e refinados em comparação com a parte central da amostra (EKBERG; SOTKOVSKI, 2001). À medida que a profundidade se afasta da superfície, os resultados de dureza indicam valores menores, já que a microestrutura não sofreu deformação plástica para além de uma profundidade de 140 μm .

Quando comparados com as micrografias da figura 5.2, a dureza apresentou uma queda significativa, o que comprova a eficácia do tratamento térmico. Em relação à uniformização da microestrutura, a amostra submetida a um tempo de 30 minutos no forno alcançou resultados mais satisfatórios, apresentando uma menor variação nos valores de dureza. A microestrutura, como ilustrado na figura 5.2 (d), passou por uma recristalização mais acentuada e, conseqüentemente, uma menor densidade de discordâncias, evidenciando uma forte relação entre os valores de dureza e os de tenacidade (CALLISTER JUNIOR, 2002).

Figura 5.4 – Medições de dureza após tratamento térmico a 600 °C.



Fonte: Autor (2023)

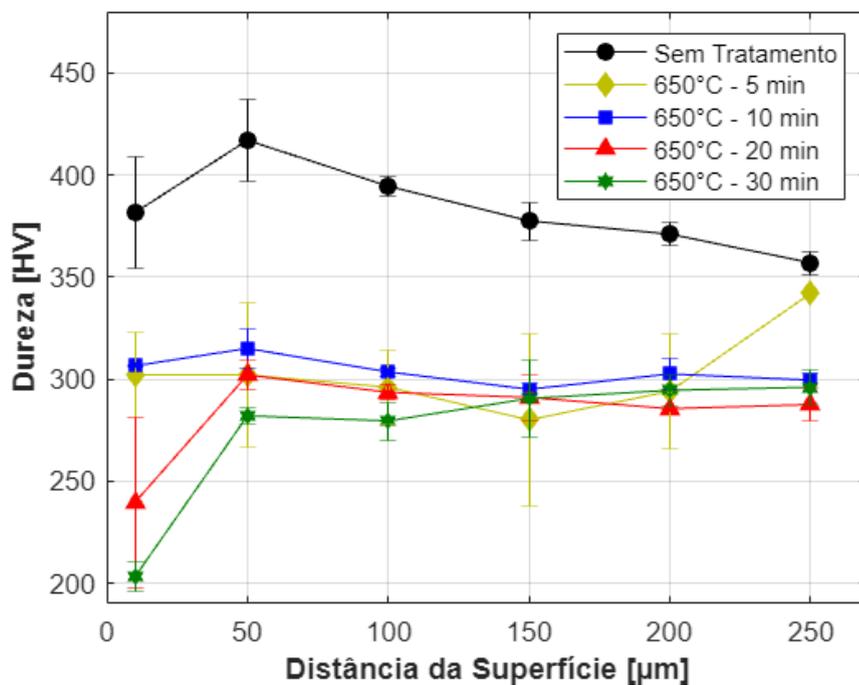
Para a temperatura de 650°C, como ilustrado na figura 5.5, observou-se que a dureza diminuiu nas amostras tratadas termicamente à medida que o tempo de permanência no forno aumentou. Esse resultado indica um grau mais elevado de recuperação na camada deformada em comparação com 600°C pelo mesmo tempo de permanência no forno. Com a temperatura mais alta, a energia disponível para o movimento dos átomos aumenta, aniquilando as linhas de discordância e reduzindo a dureza (CHIAVERINI, 1986). Na amostra tratada a 650°C por 30 minutos, os valores de dureza foram mais baixos, atingindo uma dureza média de 274 HV, uma diferença de 78 HV em comparação com o núcleo da amostra não tratada termicamente.

Na figura 5.3 (d), é possível observar que os grãos parecem menos alongados e distorcidos em comparação com a amostra não tratada, o que explica a menor dureza, não sendo a melhor configuração para utilização nas rodas. O tratamento térmico não apenas reduziu a dureza na camada deformada, mas também afetou o núcleo das amostras, com valores de dureza muito inferiores à dureza do núcleo na condição não tratada (CALLISTER JUNIOR, 2002). Essa diminuição excessiva pode levar a uma redução na resistência mecânica e menor capacidade de suporte de

carga, resultando em uma vida útil da roda mais curta e falhas prematuras (AAR, 2014).

Na configuração com tempo de 10 minutos a 650 °C, os valores de dureza apresentaram a melhor homogeneização. O tratamento térmico de recozimento reduziu a dureza da camada de forma mais uniforme ao longo da distância da superfície e o núcleo da amostra permaneceu em 308 HV.

Figura 5.5 – Medições de dureza após tratamento térmico a 650°C.



Fonte: Autor (2023)

De acordo com o padrão (AAR, 2014), às rodas de aço Classe C novas devem atender a valores mínimos de dureza tanto no núcleo quanto na superfície. No que diz respeito ao núcleo da roda, é requerida uma dureza mínima de 306 HV, enquanto na superfície, o valor mínimo é de 330 HV. Ao comparar esses critérios com as amostras não tratadas, é possível observar que a dureza medida no núcleo da roda é de 357 HV, o que se encontra acima do requisito padrão. Considerando que após os tratamentos térmicos, a condição 650 °C e 10 minutos apresentou dureza média de 308 HV, este tratamento deixaria a microestrutura acima dos 306 HV requeridos. O mesmo é válido para a condição de 600 °C e 30 minutos.

Os resultados promissores do tratamento térmico a 650°C por 10 minutos e 600°C por 30 minutos oferecem perspectivas otimistas para melhorar a manutenção das rodas, aumentar sua vida útil e reduzir as forças de corte e o volume de remoção de material durante o processo de reperfilamento (NETO, 2006). A partir desses resultados, é possível projetar uma forma de aplicar o tratamento térmico nas rodas antes do processo de usinagem.

Assim, para aplicação do tratamento em rodas reais, pode-se utilizar um sistema de chama a gás direcionado para a superfície da roda. Assim, o tratamento térmico fica direcionado apenas para a camada deformada. Um suporte para a suspensão do rodeiro também precisa ser empregado para a posicionamento das rodas. Com a chama direcionada para a superfície, a roda será rotacionada, para aplicação homogênea do calor em toda a circunferência. O tempo de aquecimento, precisa ser estudado utilizando termopares instalados na superfície, para avaliar o tempo necessário para a temperatura da superfície alcançar 650 °C.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos a partir do tratamento térmico de recozimento de discos de aço Classe C utilizados no teste de disco duplo, cuja área abaixo da pista de rolamento apresentou uma camada deformada com dureza de 400 HV, as seguintes conclusões são apresentadas:

- As micrografias revelaram a presença de intensa deformação plástica na amostra não tratada, com distorções e linhas de discordância indicando a extensão da deformação. O tratamento térmico a 600°C e 650°C mostrou ser eficaz na recuperação da microestrutura, com uma redução progressiva da deformação plástica e uma proporção maior de grãos recristalizados, sem uma diminuição significativa da dureza.
- Um tempo de permanência em forno maior com uma temperatura mais baixa também produz efeito desejável de redução de dureza e homogeneização da camada deformada.
- O tratamento térmico a 650°C por 10 minutos demonstrou resultados promissores, com uma microestrutura mais homogênea e uma distribuição de dureza mais uniforme, que se aproximou mais dos requisitos padrão.

- O tratamento térmico a 650°C com tempo de permanência em forno de 30 minutos reduziu excessivamente a dureza. Portanto, essa temperatura com tempo maior não é indicada para alcançar a homogeneização e uma boa dureza.

REFERÊNCIAS

AAR – ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD. M-107/M-208: Manual of Standards and Recommended Practices Wheels and Axles - Section G. Washington, 2014.

ALVES, Gabriel Godinho. Recristalização do aço ARBL microligado ao nióbio CSN 2336. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CALLISTER JUNIOR, W. D. Uma introdução a engenharia e a ciências dos materiais (pp. 589). Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CHAVES, Ana Paula Gonçalves. Rodas ferroviárias: análise, microestrutura e propostas de melhoria. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia Mecânica Vol. I, II e III. 2ª edição. Ed. 1986.

DE OLIVEIRA, Dyana Alves; FRAGA, Francisco Edson Nogueira. Influência do tempo de recozimento sobre a recristalização e tenacidade ao impacto de um aço baixo carbono. Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, v. 1, n. 1, p. 235-244, 2019.

DOS SANTOS, Silvio. Transporte ferroviário: história e técnicas. Cengage Learning Edições, 2011.

EKBERG, Anders; SOTKOVSKI, Peter. Anisotropy and rolling contact fatigue of railway wheels. International journal of fatigue, v. 23, n. 1, p. 29-43, 2001.

FREITAS, Isaias Moreira de. Análise de propriedades e metalografia de rodas ferroviárias microligadas. 2015.

LEWIS, R.; OLOFSSON, U. Wheel-rail interface handbook. Woodhead Publishing, 1st Edition, 2009.

MAGEL, E.; KALOUSEK, J. Identifying and interpreting railway wheel defects. International Heavy Haul Association Conference on Freight Car Trucks/Bogies. Montreal, 1996.

NETO, A. Lima. O Desgaste de Rodas e o Processo de Reperfilamento. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Carga do Instituto Militar de Engenharia, 2006.

PADILHA, Angelo Fernando; SICILIANO JUNIOR, Fulvio. Encruamento,

recristalização, crescimento de grão e textura. 1996.

RADINZ, G. A. ; GOMES, R. A. ; ALMEIDA FILHO, O. P. . Desgaste de Rodas de Locomotivas- Estudo de Caso. In: XIX Seminário Espírito Santense de Manutenção, 2008, Vitória. XIX Seminário Espírito Santense de Manutenção, 2008.

REZENDE, A. B. et al. Wear behavior of bainitic and pearlitic microstructures from microalloyed railway wheel steel. *Wear*, v. 456, p. 203377, 2021.

SOLANO-ALVAREZ, W.; PICKERING, E. J.; BHADSHIA, H. K. D. H. Degradation of nanostructured bainitic steel under rolling contact fatigue. *Materials Science and Engineering: A*, v. 617, p. 156-164, 2014.

STREY, Nathan Fantecelle et al. Comparison of rolling contact fatigue damage between railway wheels and twin-disc test specimens. *Tribology International*, v. 160, p. 107037, 2021.

VILLAS BÔAS, R. L. Desenvolvimento de aço microligado para rodas ferroviárias. 121 p. - Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, 2010.