

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

IZADORA BATISTA HENRIQUES

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO
EVIDENCIADOS EM RODAS FERROVIÁRIAS**

**BELO HORIZONTE
2017**

IZADORA BATISTA HENRIQUES

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO
EVIDENCIADOS EM RODAS FERROVIÁRIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ivan J. de Santana.

BELO HORIZONTE

2017

IZADORA BATISTA HENRIQUES

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO
EVIDENCIADOS EM RODAS FERROVIÁRIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado no curso de Graduação em
Engenharia de Materiais do Centro
Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais

Aprovado em / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivan J. de Santana – Orientador

Prof. MSc. Aderci de Freitas Filho

Prof. MSc. Wanderlei Ferreira de Freitas

Engenheiro de Materiais Leonardo Viana Dias

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus e à minha família, pelo suporte e abrigo nos momentos de incerteza, não somente na realização deste trabalho mas também durante toda minha caminhada.

Gostaria de agradecer também ao Prof. Dr. Ivan J. de Santana, por todos os ensinamentos acadêmicos, pessoais e por toda a ajuda prestada nesses últimos anos. E também, a todos os colaboradores do CEFET e da GE Transportes, que fizeram com que a proposta desse trabalho pudesse ser concretizada.

Por fim, e não menos importante, ao meu namorado Icaro Seabra e aos meus amigos de vida e de faculdade, por todo o incentivo e compreensão durante essa longa jornada.

RESUMO

O aumento do percentual de uso da malha ferroviária brasileira vem acompanhado da necessidade de uma rede de transportes alternativa à atual rede rodoviária. Dessa forma, o estudo dos componentes de uma locomotiva se torna interessante a medida que se tem um ciclo de reparo e uso dos mesmos. Em específico, as rodas ferroviárias, em constante contato e atrito com os trilhos, podem ser caracterizadas como componentes críticos e alvo de estudos para garantir a segurança do transporte em questão. Também, no ponto de vista financeiro, é interessante não somente o conhecimento sobre as atividades de reparo mas também, da fabricação do componente, de maneira a minimizar a quantidade de itens importados e até mesmo internalizar processos de forma a elevar a demanda e capacidade da manufatura. Neste sentido, foi realizada a caracterização do material de uma roda ferroviária como recebida, o estudo de seus processos de fabricação, no sentido de replicar os processos térmicos conforme norma técnica, para determinação de sua real condição mecânica. Avaliou-se a composição química da roda de maneira a estudar sua compatibilidade com a especificação em norma. Pode-se verificar baixa variação quanto à composição química, porém, após a caracterização verificou-se a ausência de tratamento térmico prévio no material como recebido, e medidas de dureza uniformes ao longo de toda estrutura do componente.

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

ABSTRACT

The increase of Brazilian percentage railway network is followed by the awareness and the need for an alternative transportation network to the road. In this way, the study of the components of a locomotive becomes interesting as one has a cycle of repair and use. Specifically, such as railway wheels, in close contact and friction with rails, can be characterized as critical components and targeted studies to ensure safety in the locomotive transport. Also, from the business view, it is interesting not only the knowledge about the repair process and also the component manufacturing, in order to decrease the quantity of import components and internalize more processes and increase the demand of the factory. In this sense, this work aimed to characterize the material of a railway wheel, as well as the study of its manufacturing processes, in order to replicate the thermal processes undergone, in order to determine its real mechanical condition. . The chemical composition of the wheel was evaluated in order to study its compatibility with the standard specification. It is possible to verify low variation in the chemical composition, however, after the characterization the absence of previous thermal treatment in the material as received was verified, and uniform hardness measurements throughout the structure of the component.

Key-words: Railway wheels, Characterization, Heat Treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo de locomotivas à vapor.....	17
Figura 2 - Esquema representativo dos componentes de uma locomotiva diesel-elétrica.....	18
Figura 3 - Truque ferroviário para vagões.....	19
Figura 4 - Esquema das principais rodagens de locomotivas diesel-elétricas.....	19
Figura 5 - Representação esquemática da bitola.....	19
Figura 6 - Principais regiões de uma roda ferroviária.....	20
Figura 7 - Possíveis formatos dos discos de rodas ferroviárias.....	21
Figura 8 - Representação da fabricação de rodas por fundição.....	25
Figura 9 - Parte inicial do processo de forjamento em matriz aberta.....	27
Figura 10 - Tipos de fluxo do material forjado em matriz fechada	27
Figura 11 – Representação da fabricação de rodas por forjamento.....	28
Figura 12 - Roda ferroviária forjada.....	29
Figura 13 - Ilustração esquemática de têmpera por indução.....	31
Figura 14 - Representação das transformações microestruturais na temperatura eutetóide.....	33
Figura 15 - Representação das múltiplas vidas da roda ferroviária.....	34
Figura 16 - Representação de medição de dureza Rockwell.....	36
Figura 17 - Representação de constituíntes através da microscopia.....	37
Figura 18 - Exemplo de análise de soldas pelo método da macrografia.....	38
Figura 19 - Representação esquemática de funcionamento do sistema de espectrometria.....	39
Figura 20 - Roda ferroviária utilizada para o estudo em questão.....	41
Figura 21 - Fluxograma da metodologia adotada neste trabalho.....	42
Figura 22 - Representação da geometria da amostra de seção transversal utilizada neste trabalho.....	43
Figura 23 - Máquina de usinagem por Serra de Fita utilizada para corte das seções transversais da amostra.....	43
Figura 24 - Fresa utilizada no preparo da amostra para macrografia.....	44
Figura 25 - Retificadora utilizada no preparo da amostra para macrografia.....	44
Figura 26 - Capela e Nital 5% utilizados nos ensaios metalográficos	45
Figura 27 - Representação da região do friso utilizada para micrografia.....	45

Figura 28 - Máquina cortadora metalográfica utilizada para corte da região do friso.....	45
Figura 29 – Lixadeiras mecânicas utilizadas para o preparo da amostra para micrografia.....	46
Figura 30 - Politrizes utilizadas para o preparo da amostra para micrografia.....	46
Figura 31 - Microscópio modelo IM713 utilizado para análise de microestrutura	47
Figura 32 - Regiões para medição de dureza da amostra segundo norma técnica.....	47
Figura 33 - Durômetro utilizado para os ensaios de dureza ao longo de todo o trabalho.....	48
Figura 34 - Região para corte em seção quadrada para análise química.....	48
Figura 35 - Espectrômetro utilizado para análise química.....	49
Figura 36 – Regiões para corte em seções quadradas para tratamento térmico.....	49
Figura 37 - Forno utilizado para o processo de têmpera.....	50
Figura 38 - Forno utilizado para o processo de revenimento.....	51
Figura 39 - Amostra para análise macrografia após ataque químico.....	52
Figura 40 - Imagens da amostra para micrografia.....	53
Figura 41 - Imagens da microestrutura da roda ferroviária – ataque químico Nital 3%.....	53
Figura 42 - Amostra submetida ao ensaio de dureza Rockwell C segundo norma AAR.....	54
Figura 43 - Comportamento das medidas de dureza conforme a região da amostra.....	56
Figura 44 – Amostra após análise química	55
Figura 45 – Curva de Revenimento.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química segundo a norma AAR para rodas ferroviárias.....	33
Tabela 2 - Temperaturas de revenimento utilizadas.....	50
Tabela 3 - Medidas de dureza conforme norma.....	54
Tabela 4 - Comparação entre composição química da amostra e especificação em norma....	55
Tabela 5 - Medidas de dureza obtidas após revenimento.....	56

LISTA DE SIGLAS

ANTT = Agência Nacional de Transportes Terrestres.....	17
ANTF = Agência Nacional de Transportes Ferroviários.....	17
AAR = <i>Association of American Railroads</i>	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo geral.....	15
2.2 Objetivos específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Rede Ferroviária Brasileira	16
3.2 Funcionamento de locomotivas em geral	17
3.3 Sistema de rodas	18
3.4 Projeto de rodas ferroviárias	20
3.5 Processos de Fabricação	22
3.5.1 Fundição	22
3.5.2 Fundição de rodas ferroviárias	24
3.5.3 Forjamento	26
3.5.4 Forjamento de rodas ferroviárias.....	28
3.6 Tratamentos térmicos.....	29
3.6.1 Recozimento.....	29
3.6.2 Têmpera.....	30
3.6.3 Revenimento.....	31
3.6.4 Microestrutura dos materiais	32
3.7 Tratamentos térmicos aplicados a rodas ferroviárias.....	33
3.8 Especificação do material	33
3.9 Caracterização e ensaios de materiais.....	35
3.9.1 Ensaios de dureza	36
3.9.2 Ensaios metalográficos.....	37
3.9.3 Análise Química por Espectrometria de emissão óptica.....	39
3.10 Mecanismos de desgaste	40
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
4.1 MATERIAIS.....	42
4.2 MÉTODOS	43
4.2.1 Caracterização	43
4.2.2 Construção da Curva de Revenimento	50

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
5.1 Caracterização.....	53
5.1.1 Metalografia.....	53
5.1.2 Dureza.....	55
5.1.3 Análise Química.....	56
5.2 Construção da Curva de Revenimento.....	57
6 CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Seja para a movimentação de carga ou de pessoas, o transporte ferroviário vem surgindo como uma alternativa à rede rodoviária brasileira. Os gastos com manutenção de estradas, o elevado e crescente índice de acidentes, dentre outros fatores, estão presentes na motivação para se criar uma via alternativa. No caso da malha ferroviária brasileira já existente, apenas parte é efetivamente utilizada, porém esse percentual vem crescendo.

Tendo em vista tal perspectiva de crescimento, se torna cada vez mais necessário o estudo aprofundado dos componentes e sistemas que juntos formam a locomotiva, de maneira a garantir seu desempenho. Dessa forma, um dos componentes de maior criticidade encontrado se trata das rodas, e todo o sistema de guia e tração. Pelo fato de ser o componente que possui contato direto e constante com os trilhos, as rodas devem ser tratadas de maneira particular, uma vez que seu funcionamento garante a movimentação correta e com segurança da locomotiva como um todo. Para que seja possível o aprofundamento dos estudos das rodas, é necessário o conhecimento de sua obtenção, desde o processo de fabricação até a análise de seus componentes após o uso.

Com relação ao processo produtivo das rodas, sabe-se que comumente são processadas por fundição ou forjamento. Partindo dessa etapa, com o auxílio de normas pré estabelecidas, é possível analisar os parâmetros de tais processos de maneira a guiar o produto final, garantindo seu correto desempenho e eficiência.

Tratando também de uma perspectiva financeira, tendo em vista o atual cenário de importação das rodas, uma montadora de locomotivas, que também seja capaz de fabricar suas próprias rodas e rodeiros teria como vantagem o aumento de sua demanda de fabricação e maior entendimento do componente e dos processos como um todo, e também uma redução de custo em trâmites.

Neste sentido, buscou-se neste trabalho, por meio da caracterização do material já conformado, a obtenção de informações sobre a micro e macroestrutura do componente através de ensaios metalográficos, medições de dureza conforme escala em norma, efeitos causados pelo histórico térmico durante o processo de fabricação, bem como a simulação de tais tratamentos, em diferentes temperaturas, com o intuito de correlacionar as informações e averiguar compatibilidade com as especificações da norma. Avaliou-se a composição química da amostra de roda obtida, por meio de espectrometria por emissão óptica, de maneira a

corroborar para a caracterização do componente. Pode-se então verificar pequena variação em alguns elementos, como carbono e manganês, porém sem valores expressivos. Porém, com relação aos tratamentos térmicos, foi observado desvios no que diz respeito ao processo de têmpera, de acordo com os valores de dureza obtidos, e determinou-se um possível faixa de temperatura a qual o revenimento da roda possa ser então realizado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Caracterização de materiais e processos de fabricação evidenciados em rodas ferroviárias.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o material de uma roda ferroviária por meio de ensaios metalográficos e medição de dureza;
- Comparar as propriedades mecânicas e metalográficas da roda analisada com as recomendações apresentadas em normas técnicas de fabricação;
- Obter curva de revenimento do material de uma roda temperada em óleo;
- Avaliar quais temperaturas de revenimento poderiam atender às especificações encontradas em normas técnicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Rede Ferroviária Brasileira

O transporte ferroviário, segundo o Ministério dos Transportes, se trata de todo transporte realizado sobre linhas férreas, seja para transportar pessoas ou mercadorias. As mercadorias transportadas são geralmente de baixo valor agregado e em grandes quantidades como: minério, produtos agrícolas, fertilizantes, carvão, derivados de petróleo, etc. No Brasil, o desenvolvimento ferroviário sempre esteve ligado a políticas de governo, que por sua vez, tiveram diversas variações ao longo da história do país (ANTF,2016).

Nesse sentido, segundo a Associação Nacional de Transportes Ferroviários (ANTF), visando sistematizar essa relação, procurou-se dividir a evolução do sistema ferroviário segundo fases cronológicas, correlacionadas a fases da história imperial e republicana brasileira. Segundo estudos do eng. José Eduardo Castello Branco, a evolução ferroviária no país pode ser dividida nas seguintes fases (ANTF,2016):

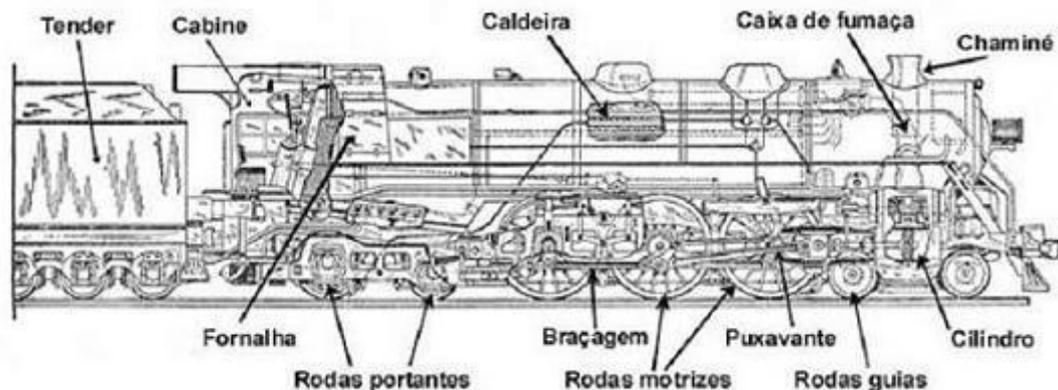
- Fase I (1835 - 1873) : Período de Regência e Segundo Reinado, sendo observado o início da implantação de ferrovias no Brasil e o desenvolvimento desse sistema transporte de forma lenta, através de empresas essencialmente privadas (ANTF,2016);
- Fase II (1873 - 1889) : abrangendo o Segundo Reinado e caracterizada por uma expansão acelerada da malha ferroviária, através de empreendedores privados, estimulados pelo instituto da garantia de juros (ANTF,2016);
- Fase III (1889 - 1930) : englobando a República Velha, ainda sendo observada uma expansão acelerada da malha, porém com o estado sendo obrigado a assumir o controle de várias empresas em dificuldades financeiras (ANTF,2016);
- Fase IV (1930 - 1960) : compreendendo a era Vargas e o pós-guerra, com o ritmo de expansão diminuindo e um amplo controle estatal das empresas antes privadas (ANTF,2016);
- Fase V (1960 - 1990) : situada quase que inteiramente ao longo do período em que a nação foi governada por um regime militar, estando a malha consolidada em poucas empresas públicas, ocorrendo erradicação de ramais anti-econômicos e implantação de projetos seletivos de caráter estratégico (ANTF,2016);
- Fase VI (a partir de 1990) : período da Nova República, marcado pela privatização de todo o sistema ferroviário nacional (ANTF,2016).

Segundo o Ministério do Transporte, após passar por inúmeras fases, o Brasil possui atualmente cerca de 28.190 km de extensão em sua rede ferroviária, passando por 22 estados e o Distrito Federal. De acordo com a ANTT, o sistema ferroviário nacional é o maior da América Latina, em termos de carga transportada, atingido 166,2 bilhões de tku (tonelada quilômetro útil) em 2001 (ANTT,2016).

3.2 Funcionamento de locomotivas em geral

Segundo a ANTF, desde a criação das redes ferroviárias pelo mundo, inúmeras evoluções relacionadas ao funcionamento das locomotivas ocorreram. Uma vez que a locomotiva é entendida como a máquina capaz de tracionar vagões, seu funcionamento garante que o produto transportado nos vagões chegará ao seu devido destino. Em um primeiro momento, com relação às locomotivas que eram movidas à vapor, como apresentado na figura 1, temos o esquema de seus componentes, de maneira geral (ANTF,2016).

Figura 1 - Esquema representativo de locomotivas à vapor



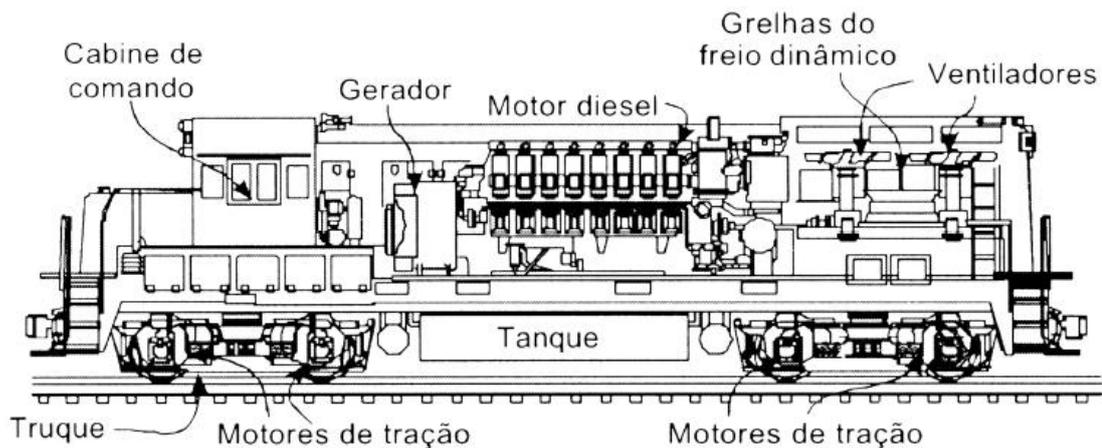
Fonte: (<http://www.antf.org.br/>)

Nesta locomotiva, a partir da queima de carvão, lenha ou óleo na fornalha, o vapor gerado é pressurizado na caldeira. Tal pressão é capaz de movimentar êmbolos que transmitem os movimentos, através de puxavantes e braçagens, às rodas, movimentando a máquina (ANTF, 2016).

Posteriormente foram criadas locomotivas elétricas, que captam a energia da rede aérea por um pantógrafo, ou do terceiro trilho através de uma sapata lateral, e através de equipamentos de controle, alimentam os motores de tração, acoplados ao rodeiro, formando o truque (ANTF, 2016).

Porém, devido à obsolescência dos equipamentos existentes e aos elevados custos de manutenção das máquinas, várias delas foram desativadas, se restringindo apenas ao sistema de transporte metropolitano de capitais nos dias atuais. Por fim, as locomotivas diesel-elétricas, como representado na figura 2, são atualmente utilizadas. Neste caso, o motor diesel aciona um gerador, produzindo energia elétrica, fornecida aos motores de tração no truque, que por sua vez, está acoplado às rodas motrizes através de engrenagens (ANTF, 2016).

Figura 2 - Esquema representativo dos componentes de uma locomotiva diesel-elétrica



Fonte: (MATERIAL RODANTE, 2011)

Dessa forma, as locomotivas diesel-elétricas são até hoje produzidas e fazem parte da frota brasileira.

3.3 Sistema de rodas

Os rodeiros são compostos, em sua maioria, por rodas cônicas, dependendo do modelo de vagão e locomotivas, que desenvolvem forças de direcionamento no contato. O sistema de guiagem do veículo produz a propriedade de direcionamento que permite a centralização do rodeiro em retas e a inscrição em curvas (ALMEIDA, 2006).

O acoplamento dos rodeiros aos motores de tração formam o componente chamado de combo. Tal sistema é capaz de gerar a tração necessária para o movimento das rodas sob os trilhos. De maneira geral, as locomotivas presentes nas ferrovias brasileiras são compostas por dois truques, que é composto basicamente pelo conjunto dos combos com uma estrutura metálica chamada de armação ou “aranha”. Internacionalmente se torna mais comum máquinas com 4 truques, elevando a força de tração gerada (ALMEIDA, 2006).

No caso de truque para vagões têm-se uma estrutura simplificada, sem a presença dos motores, como representado abaixo na figura 3.

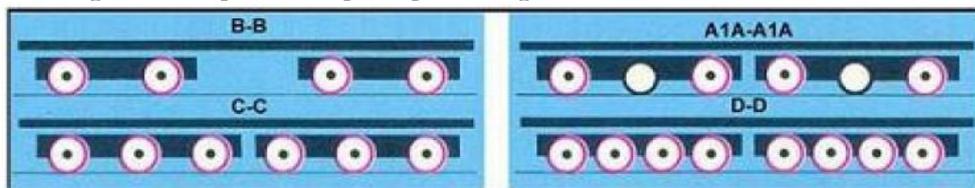
Figura 3 – Truque ferroviário para vagões



Fonte: (<http://www.cruzaco.com.br>)

Segundo a ANTF, de acordo com o arranjo das rodas nos truques, as locomotivas tem uma classificação específica, como esquematizado na figura 4 à seguir. Para classificá-las, atribui-se letras às rodas motrizes e número às rodas “livres”, sem tração, como mostrado abaixo.

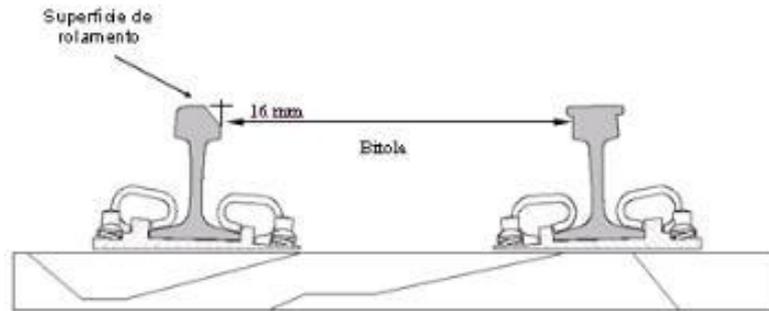
Figura 4 - Esquema das principais rodagens de locomotivas diesel-elétricas



Fonte: (ANTF,2016)

Uma característica importante da linha férrea por onde as rodas das locomotivas passam é a “bitola”, que se trata da distância entre os trilhos de uma ferrovia, determinando assim a distância entre as rodas da locomotiva capaz de se mover pelo mesmo. Por definição, a bitola é a distância entre os dois trilhos da linha, medida de 12 a 16 mm abaixo da superfície de rolamento do boleto, como representada na figura 5 (MACEDO, 2009) .

Figura 5 – Representação esquemática da bitola



Fonte: (Technicontrol,2007)

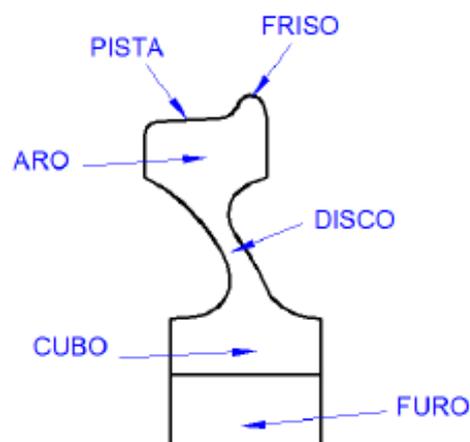
A medida da bitola varia conforme o país, sendo que no Brasil, segundo a ANTF, são adotadas as seguintes bitolas: 1,00m; 1,435m , 1,60m e bitolas mistas, sendo dominante a bitola métrica ou estreita, com 1,00m (ANTF,2016).

3.4 Projeto de rodas ferroviárias

Considerando o aumento de carga transportada por locomotivas e vagões em geral, têm-se observado as evoluções significativas nos projetos de rodas ferroviárias, tanto quanto à geometria quanto ao material utilizado em sua fabricação, visam evitar as possíveis falhas desse componente (OLIVEIRA,2013).

A configuração geral de uma roda ferroviária segue os moldes da figura 6 abaixo, com as devidas regiões especificadas (OLIVEIRA,2013).

Figura 6 – Principais regiões de uma roda ferroviária

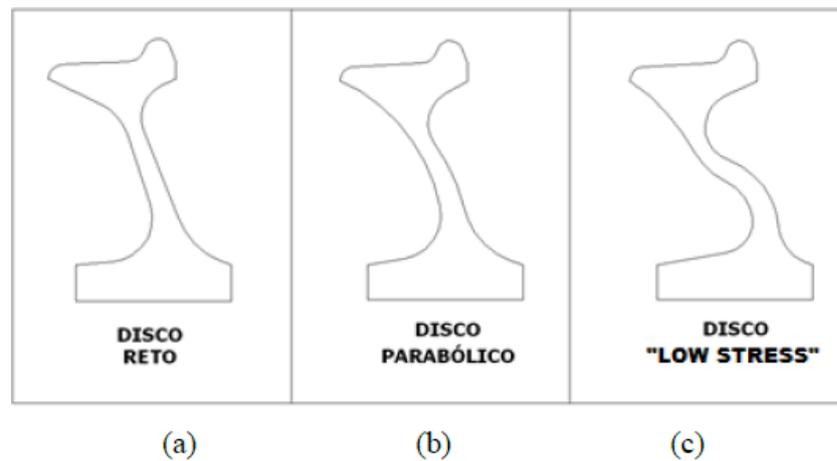


Fonte: (OLIVEIRA,2013)

A nível de projeto, a norma AAR S-669 2011 especifica o perfil a ser utilizado em rodas de locomotivas. Apenas as características e dimensionamento dos discos das rodas são especificadas na norma citada, por ser considerado a região mais crítica do componente. Já as demais dimensões são padronizadas pela AAR M-107, também anteriormente citada, logo, o restante dos dimensionais devem seguir apenas os dados presente na norma técnica AAR (OLIVEIRA,2013).

Os discos de rodas ferroviárias podem apresentar três geometrias diferentes, como mostrado na figura 7: (a) disco reto, (b) disco parabólico e (c) disco “*low stress*” (OLIVEIRA,2013).

Figura 7- Possíveis formatos dos discos de rodas ferroviárias



Fonte: (OLIVEIRA,2013)

O disco reto está presente em rodas mais antigas, mas algumas ainda em uso. Já o disco parabólico, atualmente em uso, surgiu como uma evolução do modelo anterior, e o disco “*low stress*” vem sendo atualmente desenvolvido e implementado em locomotivas de todo o mundo (OLIVEIRA,2013).

Após a análise de diversos fatores especificados pela AAR S-669 (2011), como medidas de dureza e atendimento ao dimensional estabelecido, para o caso de locomotivas, os resultados das mesmas são enviados ao comitê da AAR, que são então verificados e decide-se se haverá a liberação do certificado de aprovação do projeto, para autorizar a fabricação do componente em larga escala. Já as etapas de produção, bem como os ensaios e procedimentos de qualidade, são especificados pela AAR M-107 (2011) (OLIVEIRA,2013).

3.5 Processos de Fabricação

As rodas ferroviárias, em todo o mundo, são produzidas através dos processos de forjamento ou fundição. As rodas de ferro fundido atenderam satisfatoriamente ao segmento ferroviário durante anos. No entanto, a intensificação do transporte ferroviário de cargas e o crescente aumento da necessidade de aplicação de carga sobre as rodas exigiram a utilização de rodas mais robustas e resistente fabricadas com aço (LIMA, 2006).

As rodas de ferro fundido são consideradas obsoletas e sua utilização não é permitida. Rodas fundidas ou forjadas em aço carbono são permitidas para utilização em reposição ou montagem de veículos ferroviários novos. Os processos de fabricação de ambas são bastante distintos. Rodas forjadas em aço são aquecidas e conformadas a quente, enquanto rodas fundidas são feitas de metal fundido vazado em moldes (LIMA, 2006).

Os processos de fabricação utilizados pelos diversos fabricantes de rodas fundidas ou forjadas diferem em muitos detalhes, como o maquinário necessário e o ajuste da composição química necessária, mas todos foram desenvolvidos para produzir rodas que atendam às especificações das normas da *Association of American Railroads* (AAR) (LIMA,2006).

De maneira geral, têm-se de acordo com a especificação da AAR, as rodas de classe C são indicadas para serviços de alta velocidade com condições de frenagem consideradas mais severas se comparadas às demais classes (AAR,2009).

3.5.1 Fundição

A transformação de metais e suas ligas em componentes industriais podem ser realizadas de diversas formas, dentre elas as mais utilizadas partem do metal no estado líquido ou fundido. Esse metal fundido é então derramado em uma forma, com cavidades nas formas geométricas requeridas pela peça a ser produzida, chamada de molde. A técnica descrita é chamada de fundição. Essa forma ou molde, pode ter as dimensões exatas ou aproximadas do produto final, requerendo ou não um processo de acabamento para a mesma (CHIAVERINI, 1995).

Os componentes obtidos pelo processo de fundição são aplicados nos mais diversos setores, como: equipamentos de transporte, construção, comunicação, máquinas operatrizes, dentre outros. Tais aplicações na indústria em geral se devem as vantagens do processo, como o baixo custo na maioria dos casos e a obtenção de componentes de geometrias complexas (CHIAVERINI, 1995).

A fundição permite a fabricação de componentes nas mais variadas formas, com poucas limitações de dimensões, forma e complexidade. O processo pode ocorrer por: gravidade, sob pressão, por centrifugação, de precisão e por outros métodos. Em geral, independente de tais classificações do processo, as etapas para a produção de um equipamento através da fundição se dá pelas seguintes etapas (CHIAVERINI, 1995):

- a) Desenho do componente – Para tal, deve ser levado em conta os possíveis fenômenos que podem ocorrer durante a solidificação do metal líquido derramado sobre o molde, de maneira a evitar defeitos originados por tais fenômenos, como o rechupe e o não preenchimento de todo o molde devido a solidificação do metal (CHIAVERINI, 1995).
- b) Projeto do modelo – Geralmente os modelos são fabricados em madeira, ou alumínio para o caso de produção seriada de modelos, devido à sua baixa densidade e usinabilidade. Normalmente utilizados em uma única peça, sobretudo em casos de peças volumosas. Ou, são montados em placas para o caso de produção seriada e em menores dimensões, facilitando a utilização de máquinas de moldar (CHIAVERINI, 1995).
- c) Confeção do molde – Tal fase, também chamada de modelagem, se trata da confecção do molde no qual o metal líquido será vazado e tomará a forma do mesmo ao se solidificar. A confecção do molde por ser realizada manualmente ou mecanicamente, podendo ainda ser em areia, sendo então um molde apenas temporário, ou em metal, sendo então um molde permanente (CHIAVERINI, 1995).
- d) Fusão do metal – Existem inúmeras máquinas e fornos construídos para realizar a fusão dos metais e para a preparação de suas ligas (CHIAVERINI, 1995).
- e) Vazamento no molde – Essa etapa do processamento está ligada ao tipo de molde e fundição adotada para determinado componente, porém, genericamente, se trata da fase no qual o metal líquido é vertido em seu molde (CHIAVERINI, 1995).
- f) Desmoldagem, limpeza e rebarbação – Após a solidificação, deve-se retirar a peça do molde. Em seguida, as peças vão para a limpeza e rebarbação. A limpeza

primeiramente consiste na retirada dos canais e alimentadores e posteriormente a limpeza interna e externa das peças fundidas. Então, por fim, a rebarbação tem como finalidade retirar as rebarbas e as protuberâncias metálicas em excesso que eventualmente podem estar contidas nas peças (CHIAVERINI, 1995).

- g) Controle de qualidade – Tal controle tem como objetivo eliminar as peças defeituosas e manter a qualidade do processo como um todo. As inspeções realizadas ocorrem visualmente, dimensional e/ou metalurgicamente (CHIAVERINI, 1995).

Após essas etapas, o produto fundido está pronto para ser encaminhado ao cliente.

3.5.2 Fundição de rodas ferroviárias

No processo de fundição, preocupa-se inicialmente com a adequação da composição química no metal líquido a ser injetado no molde, que então dará forma à roda. Como em todos os produtos gerados por fundição, após o produto ser retirado do molde, deve-se analisar a porosidade e possível existência de falha na estrutura gerada. Após essa inspeção, se o produto estiver com todas as propriedades desejadas, pode ser encaminhado ao cliente (CHIAVERINI, 1995).

Como exemplo, no caso das rodas produzidas pela AmstedMaxion através do processo de fundição, são utilizados fornos de fusão a arco elétrico, cujas corridas são controladas através de espectômetro de emissão ótica, permitindo-se obter uma composição química do aço de forma precisa.

As rodas ferroviárias AmstedMaxion são fabricadas por um exclusivo processo de vazamento sob pressão, tecnologia da Griffin Wheel Company, que consiste em:

Uma panela com aço líquido colocada dentro de um tanque, onde será processado o vazamento. Então, fecha-se o tanque com uma tampa de aço revestida com refratário e dotada de um tubo cerâmico central. A operação de vazamento é iniciada pela entrada de ar pressurizado no tanque, o que provoca o fluxo de aço líquido da panela para o molde do grafite, através do tubo cerâmico de vazamento com velocidade controlada (AmstedMaxion, 2016).

Na AmstedMaxion, essa operação de vazamento é inteiramente automática e a altura do metal líquido nos moldes é controlada por uma sonda que fica dentro deste. No momento em que o aço líquido toca a sonda, o vazamento é interrompido. O ciclo de vazamento recomeça logo após o vazamento de um determinado molde e a colocação de outro molde vazio (AmstedMaxion, 2016).

Após o vazamento, depois de alguns minutos a roda está sólida e pronta para ser desmoldada. Na figura 8 a seguir está ilustrado um exemplo de rodas fabricadas através da fundição.

Figura 8 – Representação da fabricação de rodas por fundição



Fonte: (MATERIAL RODANTE,2011)

Após a desmoldagem, a roda é transferida para um túnel onde é submetida a um resfriamento controlado e gradual. Após o processo de resfriamento, a roda recebe uma estampagem a quente com identificações, permitindo, assim, sua rastreabilidade (AmstedMaxion, 2016).

De acordo com Agenor Lima, todas as rodas fundidas em aço são submetidas a tratamento térmico para a obtenção das propriedades metalúrgicas desejadas, visando-se a distribuição favorável das tensões residuais na roda. Ao receberem tratamento térmico na superfície de rolamento as rodas são temperadas para atingirem a dureza necessária especificada pela AAR e são classificadas como rodas A, B, C ou L de acordo com o nível de carbono e dureza (LIMA, 2006).

Com relação ao acabamento, se inicia logo após o tratamento térmico e o resfriamento da roda (AmstedMaxion, 2016).

Para limpeza e acabamento superficial adequado, as rodas são submetidas a um jateamento com granalhas de aço (*Shot Peening*). Essa operação produz na superfície das rodas uma tensão de compressão. Segue-se, então, a inspeção pelos ensaios de Partículas Magnéticas e Ultrassom para verificação de defeitos superficiais e sanidade interna, conforme padrões estabelecidos pela norma AAR M 107/208 (AmstedMaxion, 2016).

A seguir, todas as rodas (100%) passam pelo ensaio de dureza superficial e também por outros consoles dimensionais previstos na especificação AAR (AmstedMaxion, 2016).

3.5.3 Forjamento

Dentre os processos de conformação mecânica deve-se destacar o forjamento. Nesse processo dá-se forma ao material através de esforço de compressão ou martelamento, fazendo com que o metal tome a forma da ferramenta conformadora, chamada de matriz ou estampo. Praticamente todos os materiais metálicos podem ser forjados, desde que sua liga seja ajustada para que a mesma obtenha o grau necessário de conformabilidade requerido para o procedimento (USP, 2016).

De maneira geral os materiais conformados através do forjamento são caracterizados pelas suas aplicações que requerem elevados níveis de esforços e solicitações mecânicas em geral, logo, com elevada resistência mecânica. Comparativamente com o processo de fundição, o produto forjado possui acabamento mais refinado e maior resistência, devido ao refino do grão durante o processo de fabricação (USP, 2016).

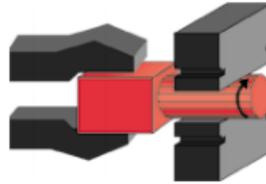
Com relação às etapas, de maneira simplificada, o forjamento ocorre primeiramente com o corte da matéria-prima a ser conformada, com seu posterior aquecimento e conformação propriamente dita, em matriz aberta ou fechada, como será apresentado a seguir. Após essa etapas podem ocorrer o rebarbamento e limpeza da peça, dependendo do produto final que se deseja obter (USP, 2016).

Como dito anteriormente, o processo de forjamento pode ocorrer com o uso de três tipos de matrizes, que são elas: (a)matriz aberta; (b)matriz fechada com rebarba; (c)matriz fechada sem rebarba (USP, 2016).

Para forjamento em matriz aberta, têm-se primeiramente que fixar a peça em suas extremidades, para garantir a segurança da operação. Dessa forma, ocorre a transformação do tarugo em uma peça de seção transversal circular para a obtenção de um diâmetro máximo do

mesmo, como exemplificado na figura 9. Após esse procedimento, com o auxílio de uma ferramenta específica de acordo com a geometria que se deseja obter, para realizar as marcações das partes que terão suas geometrias alteradas. Dessa forma, forja-se os lados direito e esquerdo da peça e por fim realiza-se um controle dimensional do produto obtido (USP, 2016).

Figura 9 – Parte inicial do processo de forjamento em matriz aberta.



Fonte: (www.scotforge.com)

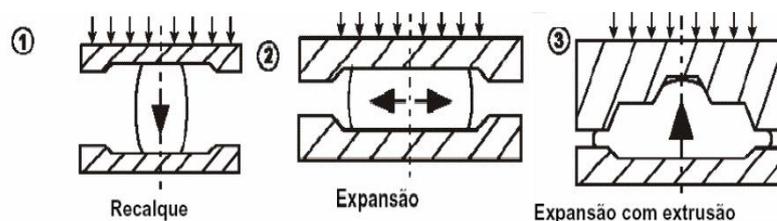
Já no forjamento em matriz fechada, como o próprio nome indica, o processo ocorre em matrizes que englobam a peça a ser forjada (USP, 2016).

Dessa forma, se subdivide em três tipo de processos com uso de matrizes fechadas, de acordo com o fluxo do material forjado, exemplificados na figura 10 em sequência:

- (a) Recalque: Ocorre a redução da altura inicial do tarugo sem grande expansão lateral e sem grande deslizamento relativo entre a peça e a ferramenta (USP, 2016).
- (b) Expansão: Ocorre com considerável escoamento lateral do material, com grande trecho de deslocamento peça-ferramenta, sendo o fluxo do material de maneira perpendicular ao movimento da ferramenta (USP, 2016).

Expansão com extrusão: Ocorre o aumento da altura inicial, de forma a preencher a cavidade oca da ferramenta e escoamento lateral do material após o preenchimento do canal de rebarba, sendo o fluxo do material perpendicular e paralelo com relação ao movimento da ferramenta (USP, 2016).

Figura 10 – Tipos de fluxo do material forjado em matriz fechada



Fonte: (USP,2016)

Em ambos os casos, matriz fechada e aberta, é necessário a seleção correta da matriz para suportar todo o processo de forjamento, dentre as características requeridas estão: resistência ao impacto, à abrasão, à fadiga térmica, ao desgaste e às elevadas pressões (USP, 2016).

3.5.4 Forjamento de rodas ferroviárias

Na maior parte das rodas encontradas nas ferrovias brasileiras, o processo de fabricação se dá pelo forjamento. A fabricação da roda forjada se inicia com a produção do aço na aciaria, em forno elétrico a partir de sucata metálica, com rigoroso controle da composição química do mesmo durante essa etapa do processo. Após o vazamento do metal em lingoteiras, ocorre sua solidificação e resfriamento, em fossas refratárias. Em seguida, os lingotes formados são cortados em blocos (AAR,2009).

No processo de forjamento pode-se obter o produto a quente ou a frio. Em específico para a produção de rodas ferroviárias, ocorre o forjamento a quente, onde os blocos originados do processo de lingotamento contínuo são primeiramente aquecidos, a aproximadamente 1320°C, em fornos rotativos, como representado na figura 11 a seguir. E, posteriormente jateados com ar para a retirada da camada de carepa formada devido a exposição a elevadas temperaturas (AAR,2009).

Figura 11 – Representação da fabricação de rodas por forjamento



Fonte: (ROSA, 2006)

Ocorrem três etapas no processo de forjamento, sendo a primeira a etapa de pré-formação, em uma prensa de aproximadamente 6000 toneladas. Após prensagem, o material segue para a laminação, capaz de formar o friso e a pista da roda. Novamente o material é então prensado, porém desta vez em uma prensa de defasagem, para a conformação do disco e o furo bruto é pulsionado, gerando o produto como mostrado na figura 12 (AAR,2009).

Figura 12 – Roda ferroviária forjada



Fonte: (ROSA, 2006)

3.6 Tratamentos térmicos

Os processos de produção de componentes mecânicos nem sempre obtêm seu produto final em condições desejadas de uso, devido a fatores como: tensões originadas pelo processo de obtenção, empenamentos, dentre outros que afetam o desempenho do produto. Devidos a tais fatores, na maioria dos casos se torna necessário submeter as peças metálicas a determinados tratamentos que objetivam minimizar ou até mesmo eliminar tais inconvenientes, antes das mesmas serem de fato colocadas em serviço (CHIAVERINI, 1995).

Os tratamentos mencionados são denominados de “tratamentos térmicos”, uma vez que envolvem processos de aquecimento e resfriamento. Tais processos trabalham com taxas controladas de temperatura, tempo e velocidade, de acordo com o objetivo específico necessário. Porém, de maneira geral, os objetivos de tais tratamentos são: alívio de tensões internas; elevação ou diminuição da dureza do material; aumento da resistência mecânica; melhoria de ductilidade, usinabilidade, resistência ao desgaste, propriedades de corte, resistência à corrosão, resistência ao calor e por fim, modificação de propriedades elétricas e magnéticas. A seguir serão citados os tratamentos térmicos mais comuns dentro da indústria (CHIAVERINI, 1995).

3.6.1 Reozimento

A operação de recozimento, tem como objetivos principais: alívio de tensões, diminuição da dureza do material, melhoria da ductilidade, ajuste do tamanho de grão, regularização da textura bruta de fusão e eliminação de quaisquer efeitos de tratamentos térmicos

anteriormente sofridos pelo material. O tratamento de recozimento pode ser especificado nos demais tratamentos (CHIAVERINI, 1995):

a)- Recozimento total ou pleno: Processo no qual o material é aquecido a uma temperatura acima da temperatura de recristalização, seguido de resfriamento lento. O tratamento se aplica a todas as ligas Fe-C e a um grande número de ligas não-ferrosas como ligas de alumínio e ligas de cobre (CHIAVERINI, 1995).

b)- Recozimento em caixa: O aquecimento e resfriamento ocorrem da mesma forma já dita, porém sob uma atmosfera protetora, de forma a eliminar os efeitos do encruamento do material e proteger a superfície do mesmo contra a oxidação. Tal operação é comumente aplicada em aços (CHIAVERINI, 1995).

c)- Recozimento para alívio de tensões: Durante o aquecimento não é necessário que se atinja a temperatura de recristalização do material, aliviando assim tensões originadas pelos processos de fundição, soldagem, usinagem, dentre outros. O tratamento pode ser aplicado a todas as ligas Fe-C e algumas ligas não-ferrosas (CHIAVERINI, 1995).

d)- Esferoidização: Nesse caso, o aquecimento é elevado a uma temperatura em torno do limite inferior da zona crítica do material. Aplicável em aços de médio a alto carbono, tal tratamento objetiva melhorar a usinabilidade do componente (CHIAVERINI, 1995).

3.6.2 Têmpera

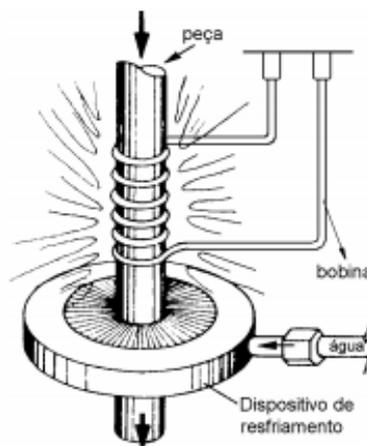
O processo de têmpera é caracterizado pelo aquecimento do material acima de sua temperatura de recristalização, assim como no recozimento. Porém, o processo de resfriamento ocorre de maneira rápida, geralmente em meios líquidos, como a água. Essa operação é comum dentre as aplicadas aos aços para finalidades em componentes mecânicos. Resultando em aços temperados, com modificações estruturais significativas, com elevação da dureza, da resistência ao desgaste e da resistência à tração. Por outro lado, há diminuição da ductilidade e tensões internas são geradas (CHIAVERINI, 1995).

Uma variação do processo se trata, por exemplo, da “têmpera por indução”, baseado no princípio da indução eletromagnética, onde um condutor de eletricidade (no caso, a peça metálica que será aquecida) é exposto a ação de um campo eletromagnético, desenvolvendo uma corrente elétrica induzida. A corrente que circula através da peça e da resistência oferecida pelo material à passagem da corrente, gera o aquecimento. Dessa forma, o

aquecimento indutivo compõe-se de um aparelho de alta frequência e de uma bobina. A bobina é feita de tubo fino de cobre, com uma ou mais espiras, e toma a forma da área da peça a ser aquecida (SENAI,2000).

A peça a ser aquecida é colocada em uma bobina em que circula uma corrente elétrica de alta frequência. Um campo eletromagnético é então gerado dentro da bobina indutora, como mostrado na figura 13. Após o aquecimento, a peça é resfriada por jatos de água ou de óleo (SENAI,2000).

Figura 13 – Ilustração esquemática de têmpera por indução



Fonte: (SENAI,2000)

Esse processo traz a vantagem do controle preciso da profundidade da camada que recebe o tratamento. É largamente empregado na fabricação de peças de grande responsabilidade, como eixos, rodas e engrenagens (SENAI,2000).

As tensões internas citadas anteriormente são de duas naturezas distintas, sendo elas: tensões estruturais e tensões térmicas, de maneira que as últimas devidas ao fato de que diferentes seções da peça resfriam de forma e em velocidades distintas, causando tais tensões. Dessa forma é sugerido que, após esse tratamento, realize-se um novo procedimento para alívio das tensões, correção da elevada dureza e da quase ausência de ductilidade. Tal tratamento é chamado de revenimento, como será mostrado a seguir (CHAVERINI, 1995).

3.6.3 Revenimento

O tratamento de revenimento, aplicado após o material ser temperado, imediatamente após o processo de têmpera, eleva o aço a temperaturas inferiores à zona crítica, modificando assim

as estruturas obtidas na têmpera como martensita, melhorando a ductilidade, reduzindo os valores de dureza e de resistência à tração, ao mesmo tempo que há o alívio ou até mesmo eliminação das tensões internas do material (CHIAVERINI, 1995).

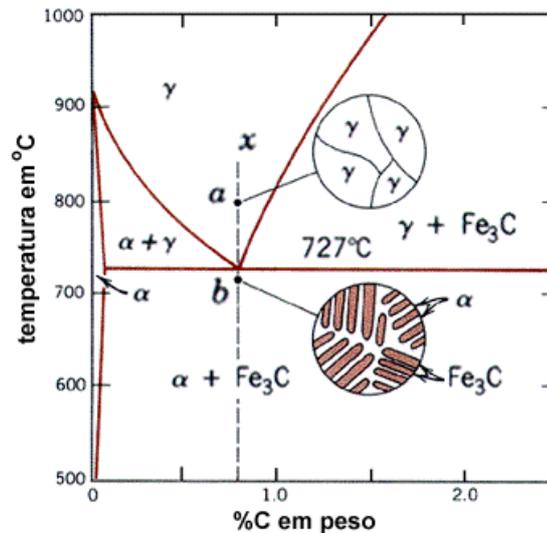
Dependendo da temperatura atingida pelo aço durante esse tratamento, pode ser que até mesmo o ganho de propriedade avance para uma melhor usinabilidade do mesmo, em caso de modificações estruturais mais intensas. Lembrando que os tratamentos de têmpera e revenimento ocorrem sempre de maneira associada (CHIAVERINI, 1995).

3.6.4 Microestrutura dos materiais

A microestrutura de um material compreende, tipicamente, nas diferentes fases e o formas como elas estão arrançadas, variando com a composição química e a temperatura a qual o material foi exposto, e conseqüentemente alterando nas propriedades mecânicas geradas por cada fase. Um exemplo de um arranjo, comum em aços e ligas, é a perlita. Porém, a perlita não é uma fase, mas sim uma combinação geométrica das fases alfa e Fe₃C (ferrita e cementita)(HECK,2013).

A perlita é uma estrutura formada por camadas intercaladas de ferrita e cementita, sendo uma matriz de ferrita com lamelas de cementita. Quando não existe cementita (como no ferro 'puro' – Fe com teor de C < 0,004%) não há perlita; quando só há cementita, o mesmo ocorre. Nas composições intermediárias, sempre haverá perlita. Na composição correspondente ao teor de 0,76%C – eutetóide – a perlita compõe 100% da microestrutura, sendo então necessário elevar a temperatura acima de 727°C caso se queira obter estrutura diferente, como a austenita. A figura 14 ilustra essa situação, apresentando o diagrama Fe-Fe₃C, com as possíveis transformações de fase no ponto eutóide(HECK,2013).

Figura 14 – Representação das transformações microestruturais na temperatura eutetóide



Fonte: (HECK,2013)

3.7 Tratamentos térmicos aplicados a rodas ferroviárias

É comum, após o processo de forjamento, submeter o produto gerado a tratamentos térmicos, uma vez que é comum observar tensões internas e estrutura heterogênea, devido ao aquecimento a elevadas temperaturas e posterior resfriamento da peça. Além desses fatores, é possível tornar o produto gerado com melhor usinabilidade e adequação às propriedades requeridas do produto (AmstedMaxion,2016).

O objetivo da têmpera diferencial é obter a dureza apropriada e introduzir um adequado padrão de tensão interna (compressão interna). Logo em seguida, as rodas entram no Forno de Revenido para receberem um alívio das tensões desenvolvidas na têmpera, ajustando suas propriedades mecânicas (AmstedMaxion,2016).

Para rodas forjadas, o material gerado do processo de laminação pós forjamento, é então encaminhado para o resfriamento, lento e controlado em fossas refratárias, por aproximadamente 12 horas. Nas rodas ferroviárias forjadas há um sobremetal que varia conforme o peso do bloco cortado durante o processamento, que será removido por usinagem, após o devido tratamento térmico (AAR,2009).

3.8 Especificação do material

As rodas ferroviárias são fabricadas em aço, seja ele fundido ou forjado. As recomendações utilizadas para a produção de rodas nas ferrovias brasileiras também seguem a norma da

Associação de Ferrovias Americanas (AAR), através das especificações M-107/M-208(AAR,2009).

A especificação determina as classes de aplicação das rodas, composição química de seus materiais, os devidos tratamentos térmicos, níveis de dureza, dentre outros critérios. Especificamente para o estudo da roda em questão, a classe utilizada, determinada pela norma, é a classe C, composta por aços de estrutura ferrítica-perlítica, na qual determina-se uma composição química específica, evidenciada na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 Composição química segundo a norma AAR para rodas ferroviárias

Elemento	Composição Química Classe C (%)
Carbono	0,67 - 0,77
Manganês	0,60 - 0,90
Fósforo	0,030 – máximo
Enxofre	0,005 - 0,040
Silício	0,15 - 1,00
Níquel	0,25 – máximo
Cromo	0,25 – máximo
Molibidênio	0,10 – máximo
Vanádio	0,040 – máximo
Cobre	0,35 - máximo
Alumínio	0,060 – máximo
Titânio	0,03 – máximo
Nióbio	0,05 - máximo

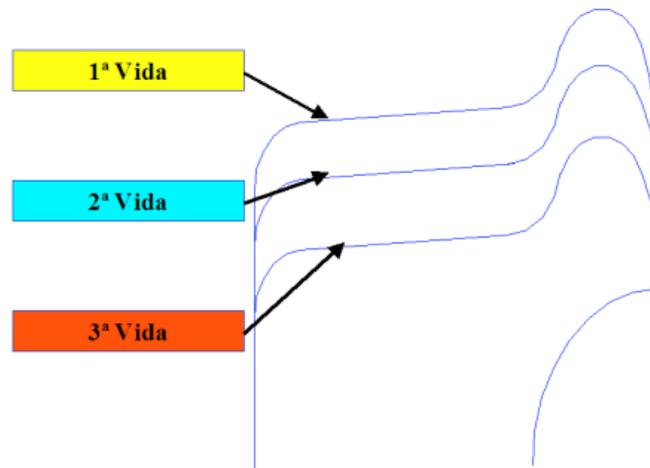
Fonte: (AAR,2009)

De acordo com as especificações, para rodas de classe C, o material que mais se adequa é o aço SAE 1070. Dessa forma, se trata de um aço-carbono, de uso geral, com dureza entre 321-363 HB e 30-42 HRC (AAR,2009).

Conforme especificado em norma, as rodas de classe C também são classificadas como rodas de “múltipla vida”, permitindo a operação de mais de um reperfilamento. No Brasil, atualmente é feito entre dois e três reperfilamentos até que a roda seja então dada como “condenada” e de fato descartada, como mostrado na figura 15 a seguir. As rodas novas possuem frisos de 34,9mm, e após o reperfilamento atingem 29,4mm, de forma a limitar a quantidade de material removido do aro no sentido a restaurar o contorno do friso. As rodas são descartadas quando seu friso atinge 24mm durante a primeira e a segunda vida, e 21mm na última. O fato de se utilizar rodas de múltiplas vidas se dá pelo baixo custo do

reperfilamento se comparado ao custo de rodeiros montados com rodas novas, mesmo com rodas de única vida (SISDELLI,2006).

Figura 15 Representação das múltiplas vidas da roda ferroviária



Fonte: (LIMA, 2006)

Com relação à inovação no uso de aços para rodas ferroviárias, não é possível notar um grande avanço, porém em decorrência de uma maior demanda por segurança do componente e das operações que o envolvem, existe o desenvolvimento de aços microligados e aços bainíticos para tal aplicação, visando a adição de elementos de liga específicos para atacar falhas recorrentes e a elevação da tenacidade através da presença de bainita em sua estrutura (OLIVEIRA, 2013).

Tal demanda é também gerada para evidência de surgimento de trincas nas atuais rodas processadas com estrutura ferrítica-perlítica na qual é possível notar o constante surgimento de trincas na interface da fase ferrítica com a cementita presente na perlita (OLIVEIRA, 2013).

3.9 Caracterização e ensaios de materiais

Entende-se por “caracterização de materiais”, o conjunto de técnicas capazes de gerar informações sobre determinado material a fim de se obter as características do mesmo, e de tal forma, prever seu comportamento e desempenho em determinadas situações de uso (MANSUR,2016).

O interesse pela área de análise e caracterização é crescente devido a necessidade da seleção correta de materiais baseado em seu desempenho, como resultados das análises em questão.

As análises podem abranger a avaliação de propriedades mecânicas, elétricas, químicas, térmicas, dentre outras (MANSUR,2016).

Quanto aos ensaios mecânicos, tem-se as classificações quanto à integridade do material, podendo o ensaio ser destrutivo ou não-destrutivo. Já quanto á velocidade, os ensaios podem ser estáticos, dinâmicos ou de carga constante (FRANCO,2010).

A seguir serão apresentados os ensaios aplicáveis ao trabalho em questão.

3.9.1 Ensaios de dureza

O princípio da técnica se baseia na aplicação de um esforço mecânico compressivo sobre determinada superfície do material a ser caracterizado, durante um intervalo de tempo específico. A impressão ou marcação no material detectada após a retirada da força é capaz de indicar a resistência do material à deformação plástica localizada, logo, a dureza do material (LOPES, 2014).

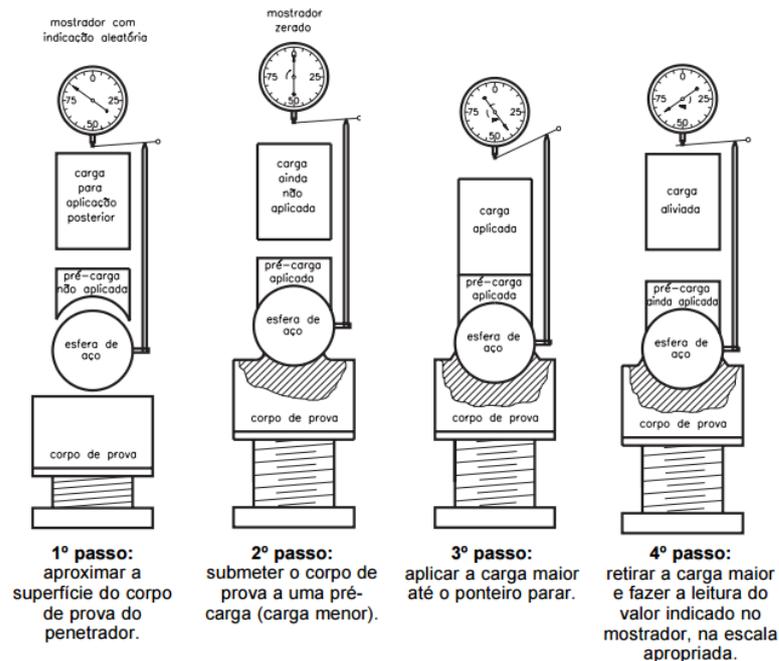
Dentre as técnicas de dureza, para o caso em questão, é possível destacar três técnicas de durezas: Brinell, Rockwell e Vickers. Por meio de uma tabela também se torna possível comparar os resultados obtidos pelas diferentes técnicas (SENAI, 2013).

O método de dureza Brinell consiste na compressão de uma esfera de diâmetro por uma força, durante um tempo, contra a superfície do material. A superfície deve ser plana e polida ou preparada através de lixamento. Essa compressão produz uma impressão permanente no material, que após a remoção da força, pode ser medida por meio de uma lupa graduada ou por um micrômetro óptico acoplado ao durômetro. A condição padrão para o ensaio é determinada por: diâmetro da esfera de 10 milímetros, carga aplicada de 3000 kilogramaforça, com duração de 10 a 15 segundos. Dessa forma, a dureza Brinell é obtida pelo quociente entre a carga aplicada e a superfície da calota marcada no material. (SENAI,2013).

Já o método de dureza Rockwell, leva em consideração a profundidade alcançada pelo penetrador, com desconto da recuperação elástica do material. O resultado é obtido pela leitura direta na máquina de ensaio, eliminando assim o possível erro do operador no momento da medição. Tal método é realizado em três etapas, mostrado na figura 16 a seguir: primeiramente o corpo de prova é submetido a uma pré-carga , em seguida aplica-se a carga maior, que somada à pré-carga origina a carga total ou também chamada de nominal. Na

terceira etapa, retira-se a carga, e a profundidade é dada pela máquina, sob forma de número de dureza (SENAI, 2013).

Figura 16 Representação de medição de dureza Rockwell



Fonte:

(http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM336/dureza%20rockwell.pdf)

A distinção entre as escalas A, B e C, dentro da dureza tipo Rockwell, se deve à carga utilizada em cada uma delas, sendo que a dureza Rockwell C, utilizada pela norma AAR, adota a carga de 150kgf.

Por fim, o método de dureza Vickers se caracteriza por um ensaio no qual um penetrador de diamante, em forma de uma pirâmide de base quadrada, é comprimido contra o material por uma força pré determinada. Após a remoção da força, com a impressão gerada no material, mede-se as diagonais, de forma que o valor de dureza será obtido pela divisão da carga utilizada pela área de impressão (SENAI, 2013).

3.9.2 Ensaios metalográficos

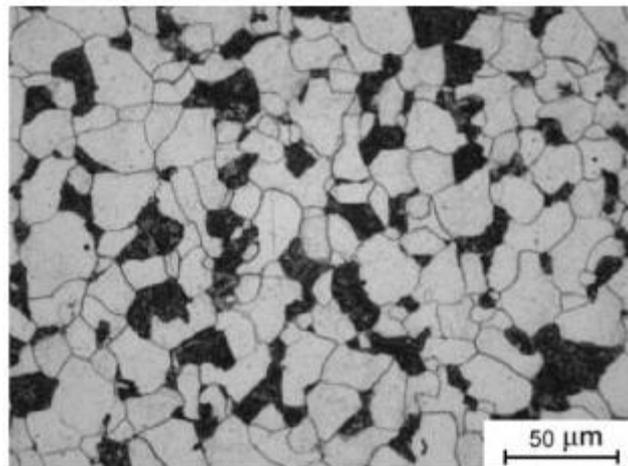
A metalografia consiste nos estudos das características estruturais ou da própria constituição dos metais e suas ligas, com o objetivo de relacionar tais características às propriedades físicas, químicas e mecânicas do material. Tal categoria se divide em macrografia e micrografia (LABTESTE, 2016).

A micrografia, se trata da análise de aspectos microestruturais de amostras metálicas, previamente preparadas e atacadas para tal. A análise é feita com o auxílio de um microscópio óptico, com aumento de até 1000 vezes (LABETSTE, 2016).

Dentre as aplicações da micrografia pode-se destacar: a caracterização da matriz da microestrutura, caracterização dos microconstituintes e de tratamentos térmicos realizados, classificação de inclusões em aços, tamanho de grãos, proporção das fases, homogeneidade, entre outros aspectos (LABTESTE, 2016).

A figura 17 exemplifica a identificação de constituintes do material através da análise por microscopia, como no caso, a presença de ferrita e perlita.

Figura 17 Representação de constituintes através da microscopia



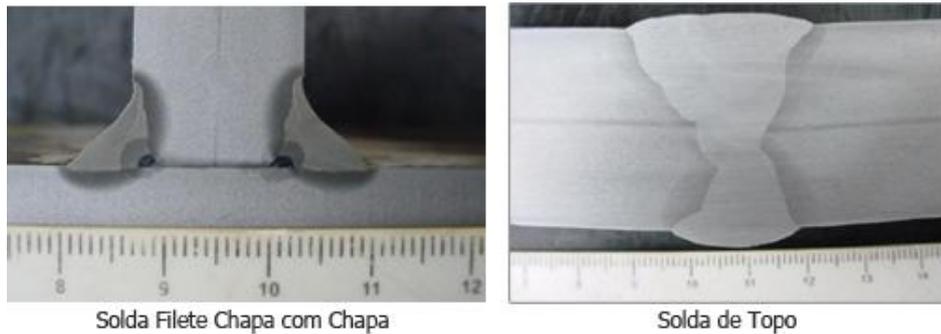
Fonte: (LABTESTE, 2016)

Já a macrografia consiste nas análises dos aspectos macroestruturais do material. O ensaio é realizado a olho nu, ou com auxílio de alguns instrumentos, como lupa e estereoscópio, com obtenção de aumento máximo de até 10 vezes (LABTESTE, 2016).

Dentre as aplicações da técnica de macrografia pode-se destacar a análise de tratamentos térmicos e de regiões do material afetada pela presença de solda (LABTESTE, 2016).

A figura 18 abaixo representa exemplos nos quais a macrografia foi utilizada para análise dos materiais.

Figura 18 Exemplo de análise de soldas pelo método da macrografia



Fonte: (LABTESTE,2016)

3.9.3 Análise Química por Espectrometria de emissão óptica

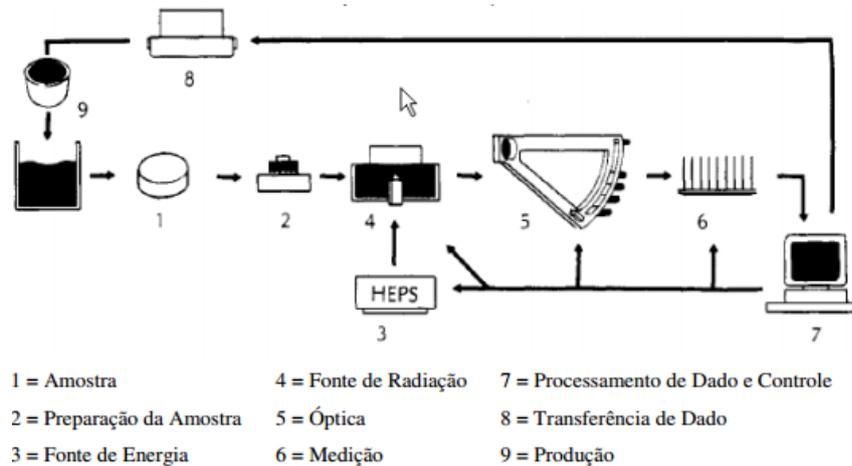
O espectrômetro de emissão óptica é um instrumento para a análise de ligas metálicas. A espectroscopia com fontes de arco ou centelha é utilizada desde 1920, capaz de fazer a determinação qualitativa e quantitativa de diversos elementos metálicos. Atualmente continua sendo empregada para determinações qualitativas e semi-quantitativas, ficando restrita apenas as amostras sólidas (MANFRON,2016).

A excitação da amostra ocorre através de eletrodos. A passagem de eletricidade do eletrodo pela amostra promove a energia necessária para atomizar a amostra e excitar os átomos para um estado eletrônico mais elevado (OLIVEIRA,2010).

As medidas quantitativas requererem um conjunto de padrões cuidadosamente preparados para a calibração. Esses padrões devem aproximar-se o mais possível da composição e das propriedades físicas das amostras a serem analisadas (OLIVEIRA,2010).

Em todas as técnicas de análise de espectrometria de emissão a concentração da amostra é determinada com auxílio de uma curva de calibração construída com padrões. A intensidade dos fótons é proporcional à concentração do elemento que gerou esses fótons. Uma vez que padrões e amostras são excitados em condições idênticas pode-se determinar a concentração dos elementos por comparação com a curva de calibração, a figura 19 (OLIVEIRA,2010).

Figura 19 Representação esquemática de funcionamento do sistema de espectrometria



Fonte: (OLIVEIRA,2010)

3.10 Mecanismos de desgaste

Durante o funcionamento da locomotiva a roda sofre constante desgaste em contato com o trilho ferroviário, podendo levar à alteração do perfil da mesma, ou até mesmo gerando vibrações ao longo da movimentação. Tais vibrações, juntamente com o desgaste do perfil da roda, podem levar ao descarrilhamento de toda a locomotiva, sendo então de grande importância a manutenção constante e periódica desse componente para garantir a segurança do transporte (SISDELLINI,2006).

A interface roda-trilho constitui um sistema tribológico de grande interesse de pesquisa, uma vez que apresenta variados mecanismos de desgaste que muitas vezes estão relacionados a importantes transformações metalúrgicas na roda e no trilho resultado de cargas térmicas e mecânicas aplicadas ao sistema. Estes mecanismos podem levar à formação de defeitos na pista de rolamento da roda que serão posteriormente responsáveis pelo seu sucateamento ou retrabalho pelo processo de usinagem refazendo seu perfil original (reperfilamento da roda) (SISDELLINI,2006).

As rodas estão sujeitas principalmente a dois tipos de desgastes: desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento. O desgaste abrasivo tem origem em partículas externas ao sistema roda-trilho-sapata, como fragmentos de minério e areia, entre outros, ou em partículas removidas do sistema oriundas de qualquer de seus membros e encruadas devido ao movimento relativo entre as partes (SISDELLINI,2006).

Já o desgaste por deslizamento ocorre segundo os mecanismos de deformação plástica, fadiga de contato, fadiga termomecânica, oxidação, micro-escorregamento e macro-escorregamento da roda sobre trilho. Estes mecanismos, em conjunto com a abrasão podem levar a roda e o trilho a uma condição de desgaste normal e homogêneo, com redução das dimensões do friso e do aro da roda e do boleto do trilho ou formar defeitos na pista e friso tais como escoamento, escamação (*shelling*), calos e lascagens (*spalling*). O escoamento deve-se às deformações plásticas macroscópicas. Tal fenômeno pode ser causado por: carregamento, que muitas vezes ultrapassa o limite de escoamento do material; aquecimento oriundo da operação de frenagem; micro-escorregamentos devido aos arrastes em curvas causados por diferença de velocidade tangencial entre as duas rodas do rodeiro ou devido à rigidez do truque (SISDELLINI,2006).

A escamação ou *shelling* é um defeito que ocorre devido à ação combinada de fadiga de contato e cargas térmicas, sendo, portanto, um processo de fadiga termomecânica. Estes esforços combinados nucleiam trincas que se propagam e levam ao destacamento de material ao longo de toda a pista de rolamento da roda. A lascagem ou *spalling* e calos, devem-se aos macro-escorregamentos que ocorrem devido ao travamento da roda durante a frenagem, conforme citado no item anterior. Os desgastes naturais ou os defeitos citados aqui podem ser minimizados com o gerenciamento da interface roda-trilho, e o possível desenvolvimento de perfis modificados de rodas e de trilhos (SISDELLINI,2006).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para realização do estudo, foi utilizada uma roda ferroviária, como recebida, em sua primeira vida, cortada em uma seção de aproximadamente 400mm de comprimento, como representado na figura 20, para a confecção dos corpos de prova e posteriores ensaios e análises.

Figura 20 Roda ferroviária utilizada para o estudo em questão



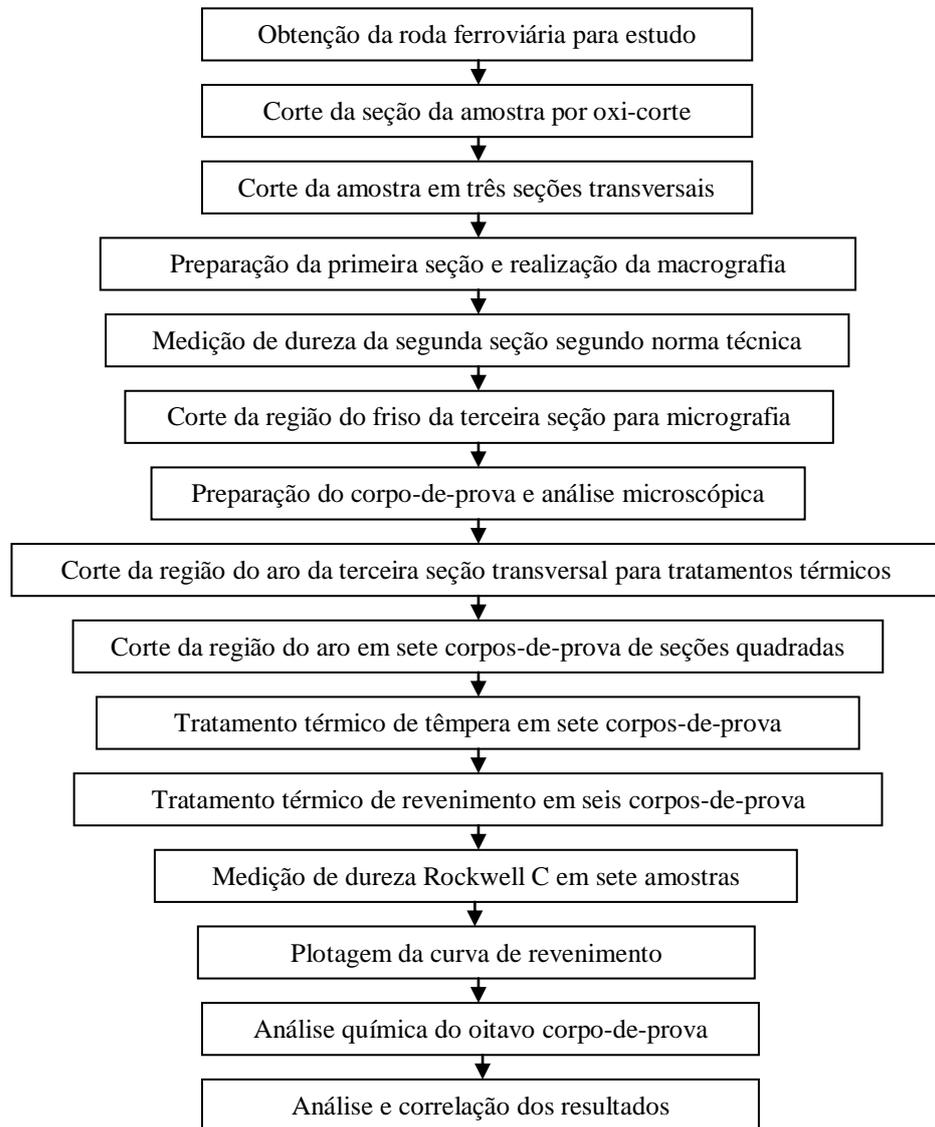
Fonte: Próprio Autor

O material foi disponibilizado por uma oficina de locomotivas localizada em Contagem, região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. De acordo com a especificação da norma AAR M-107/M-208 , o material da roda se é AISI 1070, forjado, temperado e revenido.

4.2 MÉTODOS

As etapas e metodologia adotada deste trabalho podem ser observadas na figura 21.

Figura 21 – Fluxograma da metodologia adotada neste trabalho



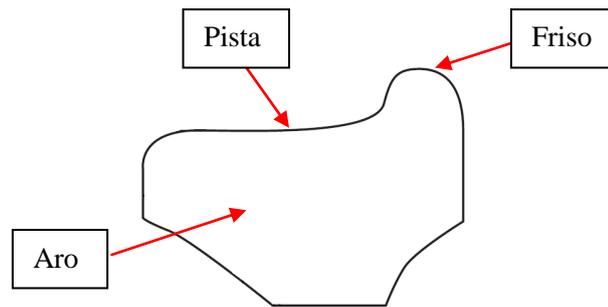
Fonte: Próprio autor.

4.2.1 Caracterização

4.2.1.1 Metalografia

A partir da roda, apresentada anteriormente, foi obtida a amostra para este trabalho pelo processo de oxi-corte. Dessa forma, foram então obtidos três corpos de prova de seções transversais, de mesmas espessuras (20mm), de geometria apresentada na figura 22 a seguir.

Figura 22 – Representação da geometria da amostra de seção transversal utilizada neste trabalho



Fonte: (AAR,2009)

O corte da seção representada, foi obtida pela usinagem por Serra de Fita, da marca Franho, modelo FM 1600, como mostrado na figura 23, indicada para o corte de materiais de elevada dureza.

Figura 23 – Máquina de usinagem por Serra de Fita utilizada para corte das seções transversais da amostra



Fonte: Próprio autor.

Devido as irregularidades dimensionais oferecidas pelo equipamento de usinagem utilizado, se fez necessário o fresamento da seção transversal obtida, de maneira a obter o corpo de prova com superfícies paralelas e rugosidade superior ao processo anterior, como evidenciado na figura 24.

Figura 24 Fresa utilizada no preparo da amostra para macrografia



Fonte: Próprio autor.

Após a fresagem foi necessário ainda a retifica da amostra, como mostrado na figura 25, para garantir uma superfície de rugosidade superior à oferecida pela usinagem.

Figura 25 Retificadora utilizada no preparo da amostra para macrografia



Fonte: Próprio autor.

Após a seção ser retificada, a mesma seguiu para o lixamento e atacou-se toda a superfície da amostra com algodão imerso em Nital 5%, sobre a bancada de uma capela, como mostrado na figura 26.

Figura 26 Capela e Nital 5% utilizados no ensaios metalográficos

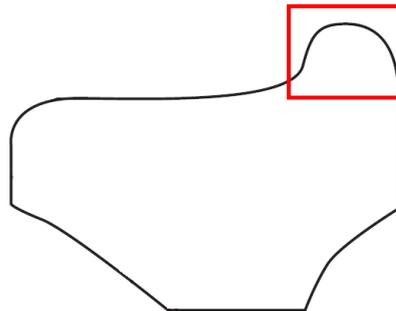


Fonte: Próprio autor.

Então, a amostra foi lavada em água corrente, álcool e posterior secagem à quente para a visualização macroscópica da estrutura do componente.

Com relação à micrografia, uma amostra da roda, referente à seção do friso, como representado na figura 27, foi cortada pela máquina cortadora metalográfica, modelo COR 80/2, como mostra a figura 28 a seguir, para materiais com dureza na faixa de 15 a 35 HRC.

Figura 27 Representação da região do friso utilizada para micrografia



Fonte: Próprio autor.

Figura 28 Máquina cortadora metalográfica utilizada para corte da região do friso

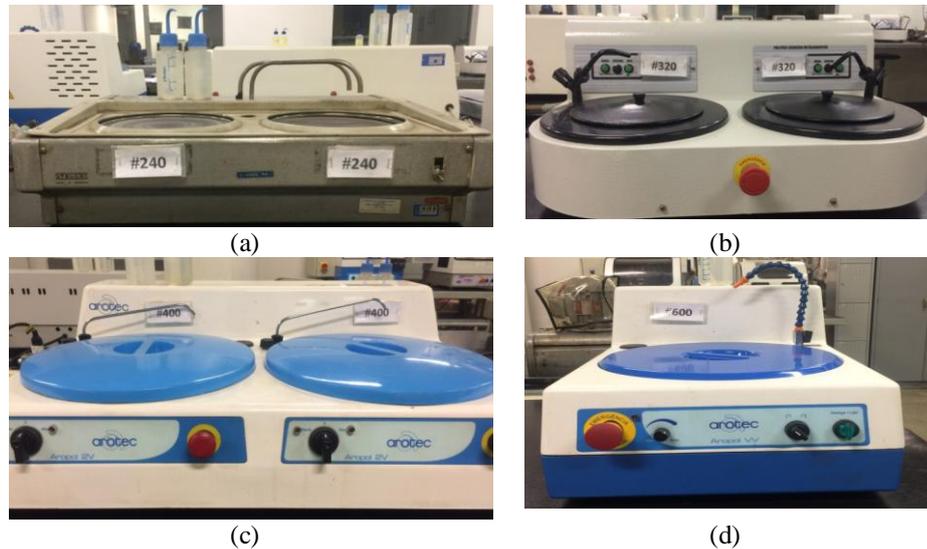


Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, a amostra foi submetida ao processo de embutimento à frio, com a utilização da resina acrílica de polimerização a frio, de maneira a garantir o melhor preparo da amostra para os processos posteriores de lixamento e polimento mecânico.

Após embutida, a amostra foi submetida ao lixamento mecânico com as lixas #240, #320, #400 e #600, com as lixadeiras apresentadas na figura 29.

Figura 29 Lixadeiras mecânicas utilizadas para o preparo da amostra para micrografia

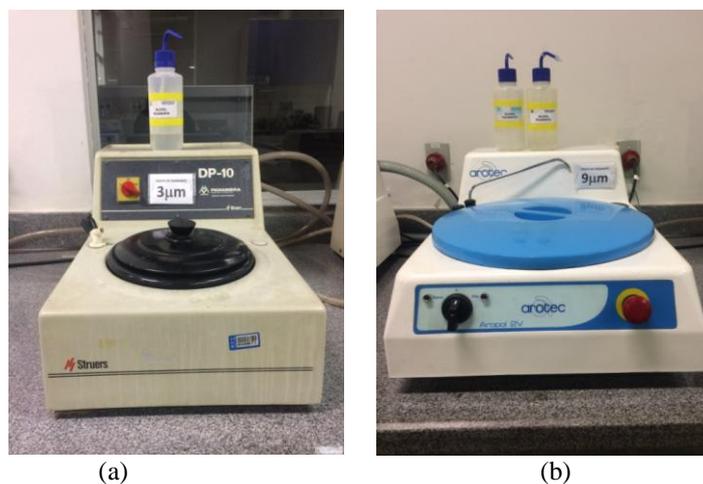


Lixadeiras mecânicas utilizadas para o preparo da amostra de micrografia com especificações de (a) #240 (b) #320 (c) #400 e (d) #600.

Fonte: Próprio autor.

Para o polimento, foram utilizadas as politrizes de #9 μ m e #3 μ m, como mostrado na figura 30.

Figura 30 Politrizes utilizadas para o preparo da amostra para micrografia



Politrizes de (a) 3 μ m e (b) 9 μ m.

Fonte: Próprio autor.

Após a obtenção de uma amostra com superfície espelhada e homogênea, a amostra sofreu ataque químico com Nital 3% em toda sua superfície, também na mesma capela utilizada anteriormente, e então lavada com água corrente, álcool, e seca à quente.

Dessa forma a amostra se encontrava preparada para a análise em microscópio óptico Fortrel modelo IM713, acoplado com software Scope Photo de transmissão de imagens, como mostrado na figura 31 a seguir.

Figura 31 Microscópio modelo IM713 utilizado para análise de microestrutura

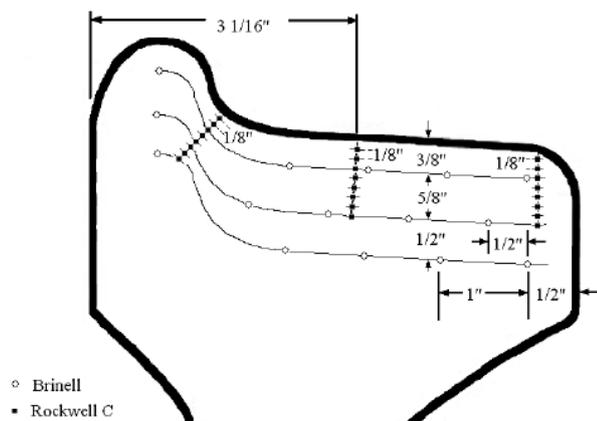


Fonte: Próprio autor.

4.2.1.2 Dureza

Para corroborar com a caracterização da amostra, a segunda seção transversal, de mesma geometria, foi submetida ao ensaio de dureza Rockwell em escala C, conforme apresentado em norma, em regiões específicas, como mostrada na figura 32 abaixo.

Figura 32 Regiões para medição de dureza da amostra segundo norma técnica



Fonte: (AAR,2009)

As durezas foram medidas especificamente nas marcações pretas indicados conforme legenda, referentes à medição de dureza Rockwell C, através do durômetro IGV, tipo RM 401/A, mostrado na figura 33, com carga de 150kgf.

Figura 33 Durômetro utilizado para os ensaios de dureza ao longo de todo o trabalho

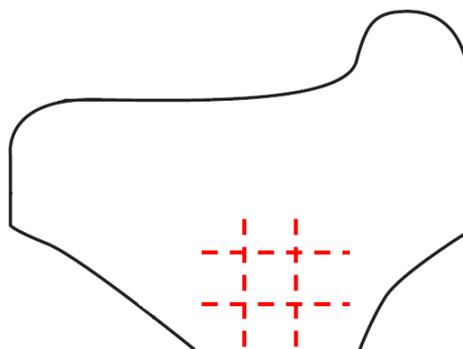


Fonte: Próprio autor.

4.2.1.3 Análise Química

A partir de uma terceira fatia da roda ferroviária, também obtida através da usinagem por serra de fita, foi obtida uma amostra de sessão quadrada, de 20x20x20 mm, como representado na figura 34.

Figura 34 Região para corte em seção quadrada para análise química



Fonte: Próprio autor.

A amostra foi submetida a análise química pelo equipamento de espectrometria de emissão ótica, espectrômetro Oxford, Foundry Master Xpert, apresentado na figura 35, para que fosse possível a caracterização de fato, e a comparação com a composição especificada em norma.

Figura 35 Espectrômetro utilizado para análise química

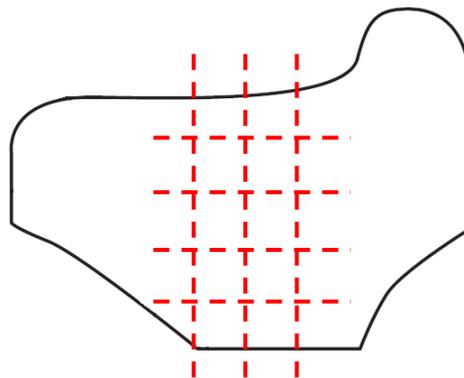


Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Construção da Curva de Revenimento

Ainda a partir da terceira fatia da roda ferroviária, também obtida através da usinagem por serra de fita, foram então cortadas em sete amostras cúbicas, de aproximadamente 20x20x20mm, como representado na figura 36 a seguir.

Figura 36 Regiões para corte em seções quadradas para tratamento térmico



Fonte: Próprio autor.

As amostras foram submetidas ao processo de têmpera, de maneira a atender aos requisitos da norma quanto ao processo de fabricação de uma roda ferroviária e de construção da curva de revenimento. O processo foi possível com o uso do forno da Brasimet Tipo K R170, como representado na figura 37.

Figura 37 Forno utilizado para o processo de têmpera

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a especificação, o material após ser forjado é então temperado e revenido. Portanto, foi realizado o aquecimento das sete amostras a 900°C e então resfriadas em óleo, à temperatura ambiente, por agitação.

Seguindo as instruções de fabricação, após a têmpera foi realizado o tratamento de revenimento. Tendo em vista a não prescrição em norma da temperatura de revenimento utilizada para a fabricação do componente, e o objetivo da construção de uma curva de revenimento e de determinação da faixa de temperatura na qual o processo deve ocorrer, seis amostras foram separadas de maneira que cada uma fosse submetida a determinada temperatura, e a sétima sem tratamento de revenimento, para posterior comparação, obtendo assim sete amostras distintas, conforme a tabela 2.

Tabela 2 Temperaturas de revenimento utilizadas

Amostra	Temperatura de Revenimento (°C)
1	130
2	230
3	330
4	430
5	530
6	630
7	-

Fonte: Próprio autor.

Sendo assim, cada uma das seis amostras permaneceram na temperatura determinada durante 20 minutos, no forno da Brasimet Tipo BRL 320 representado na figura 38, e então resfriadas ao ar.

Figura 38 Forno utilizado para o processo de revenimento



Fonte: Próprio autor.

Posteriormente ao tratamento térmico, foi medida a dureza Rockwell na escala C, de cada uma das amostras, incluindo a sétima amostra que não foi submetida ao revenimento, para possível comparação posterior.

A partir das temperaturas de revenimento alcançadas em cada amostra e de suas respectivas medida de dureza, foi traçada uma curva de revenimento visando analisar o comportamento das amostras de acordo com as temperaturas as quais foram submetidas, aprofundando assim a análise para se determinar a temperatura de revenimento adequada para a fabricação da roda e o comportamento e relação entre tais temperaturas e as durezas obtidas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização

5.1.1 Metalografia

A partir da análise macrográfica foi possível observar a formação de uma região de coloração mais escura, próxima ao friso e ao aro, encobrindo grande parcela da amostra, como mostrado na figura 39 a seguir.

Figura 39 Amostra para macrografia após ataque químico



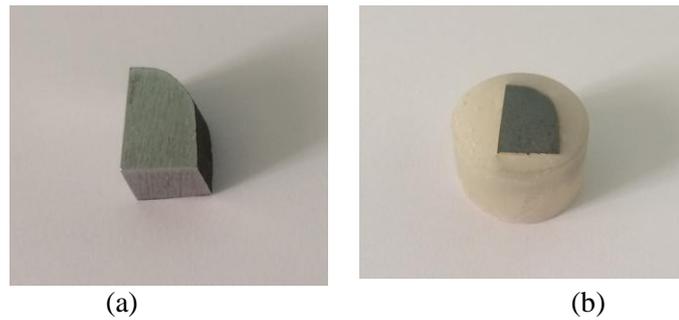
Fonte: Próprio Autor

Como apresentado na figura anterior, a amostra apresenta coloração homogênea ao longo de toda a seção transversal, com leve tom mais escuro na região do aro e do friso. Dessa forma, pode-se concluir que o componente não foi submetido a tratamento especial com intuito de ajustar sua dureza, sendo possível então ou a imersão de toda a roda para tratamento, ou nenhum tratamento térmico anterior.

Dessa forma, não é possível garantir que a região da pista, em constante atrito com o trilho, tenha propriedades devidamente superiores em relação às demais regiões do componente.

Com relação à micrografia, utilizou-se a região do friso, conforme representado na parte (a) da figura 40, e então a amostra embutida e após o ataque químico com Nital 3%, na parte (b) da mesma figura a seguir.

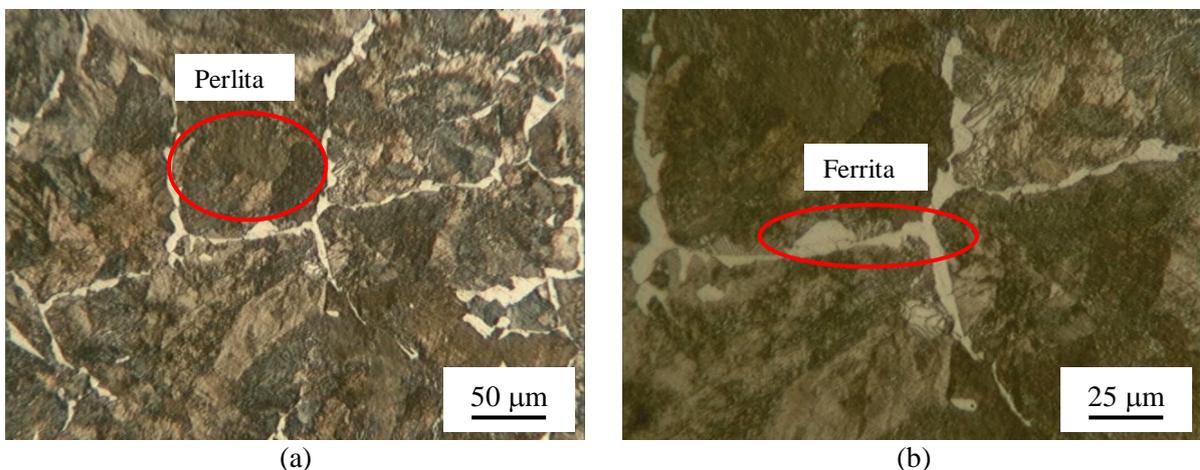
Figura 40 – Imagens da amostra para micrografia



(a) Amostra pré preparo (b) e amostra após ataque químico.
Fonte Próprio Autor.

Então, com o uso do microscópio óptico mostrado anteriormente, foram obtidas as imagens mostradas na figura 41 abaixo.

Figura 41 – Imagens da microestrutura da roda ferroviária – ataque químico Nital 3%



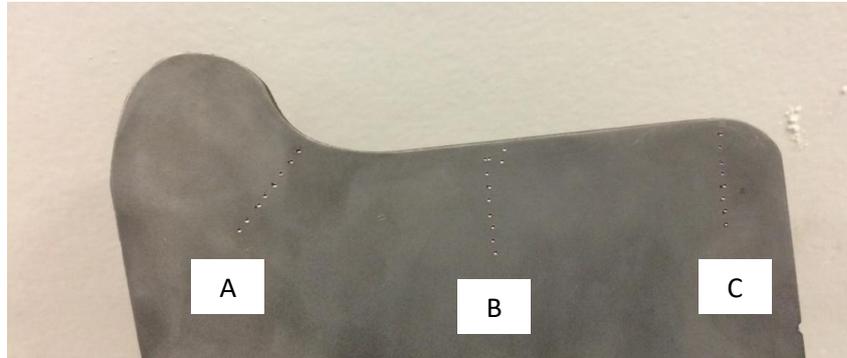
(a) Ampliação de 200x (b) e 400x.
Fonte Próprio Autor.

Como é possível observar nas imagens acima, a estrutura claramente evidenciada se trata de uma estrutura ferrítica-perlítica. Porém, a microestrutura apresentada se dá a partir de difusão de carbono, com a necessidade de elevadas temperaturas para que ocorra a partir da estrutura martensítica. Conforme norma, o material teria que passar por têmpera e revenimento, de forma que, a têmpera formaria martensita e o revenimento aliviaria as tensões e ajustaria a dureza. Dessa forma, deveria ser possível ainda observar a presença de regiões martensíticas, fruto de um histórico de formação de martensita pós têmpera, uma vez que o componente não foi aquecido a temperaturas tão elevadas a ponto de permitir toda a difusão e formação de estrutura perlítica e ferrítica como mostrado na figura anterior.

5.1.2 Dureza

Como forma de caracterização do material, foram obtidos os valores de dureza da seção transversal da roda ferroviária, conforme especificado em norma técnica, representado na figura 42, a seguir.

Figura 42 Amostra submetida ao ensaio de dureza Rockwell C segundo norma AAR



Fonte: Próprio Autor

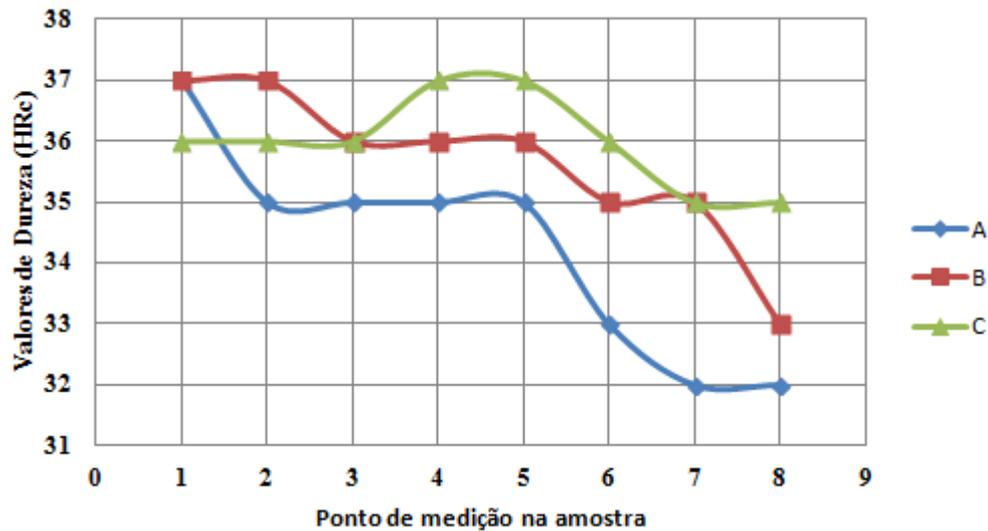
Como representado acima, as regiões A, B e C possuem, cada uma, oito medições que foram numeradas de forma crescente partindo da borda da peça em direção a seu centro. Os valores obtidos com as medições estão apresentados na tabela 3 e na figura 43.

Tabela 3 Medidas de dureza conforme norma

Região da Amostra	Medição de Dureza Rockwell C (HRc)			Média (HRc)	Desvio Padrão	
	Ponto	A	B			C
	1	37	37	36	36,7	0,58
	2	35	37	36	36,0	1,00
	3	35	36	36	35,7	0,58
	4	35	36	37	36,0	1,00
	5	35	36	37	36,0	1,53
	6	33	35	36	34,7	1,73
	7	32	35	35	34,0	1,73
	8	32	33	35	33,3	1,53

Fonte: Próprio autor.

Figura 43 Comportamento das medidas de dureza conforme a região da amostra



Fonte: Próprio Autor.

Analisando as medidas encontradas, e então comparando com os valores especificados em norma, obtém-se valores dentro da faixa especificada de 32 a 40 HRc, assim como os valores de média encontrados.

Os valores obtidos evidenciam uma leve queda das medidas de dureza conforme a região se aproxima do centro da amostra. Porém, devido à baixa diferença entre os valores de maneira geral, e dos valores de desvio padrão obtidos, pode-se analisar que a dureza de toda a sessão se apresenta de forma uniforme e homogênea, sem valores de dureza elevada próximo à extremidade, onde há o contato constante e direto com o trilho, exigindo maior esforço mecânico da região em relação às demais, logo, esperando-se valores de dureza mais elevados, próximo do limite de 42HRc exigido em norma.

5.1.3 Análise Química

Também visando a caracterização do material, a oitava amostra de 20x20x20mm foi submetida à análise química, através de três queimas pelo equipamento de espectrometria, como mostrado na figura 44, que teve como resultado, as médias dos percentuais encontrados, apresentados na tabela 4.

Figura 44 Amostra após análise química

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 Comparação entre composição química da amostra e especificação em norma

Elemento	Composição Química Segundo Norma (%)	Composição Química Amostra (%)
Carbono	0,67 - 0,77	0,64
Manganês	0,60 - 0,90	1,20
Fósforo	0,030 – máximo	0,0145
Enxofre	0,005 - 0,040	0,0195
Silício	0,15 - 1,00	0,348
Níquel	0,25 – máximo	0,0069
Cromo	0,25 – máximo	0,0243
Molibidênio	0,10 – máximo	0,0050
Vanádio	0,040 – máximo	0,0179
Cobre	0,35 – máximo	0,0148
Alumínio	0,060 – máximo	0,0458
Titânio	0,03 – máximo	0,0046
Nióbio	0,05 - máximo	0,0050
Tungstênio	-	0,0100

Fonte: Próprio autor.

A partir dos dados obtidos, e a comparação com a composição química especificada em norma, é possível notar uma pequena alteração com relação ao teor carbono, com variação de 0,03% abaixo do especificado, e de manganês, 0,3% acima do esperado. As alterações não são de grandeza suficientemente elevada para comprovar um desvio da composição do componente com relação à norma, levando também em consideração o grau de incerteza do equipamento utilizado.

5.2 Construção da Curva de Revenimento

Para fins de validação das temperaturas de revenimento e posterior construção da curva, cada amostra teve sua dureza medida, na escala Rockwell C, em três diferentes regiões das amostras, e então obtida a média entre elas. Os dados obtidos seguem na tabela 5.

Tabela 5 Medidas de dureza obtidas após revenimento

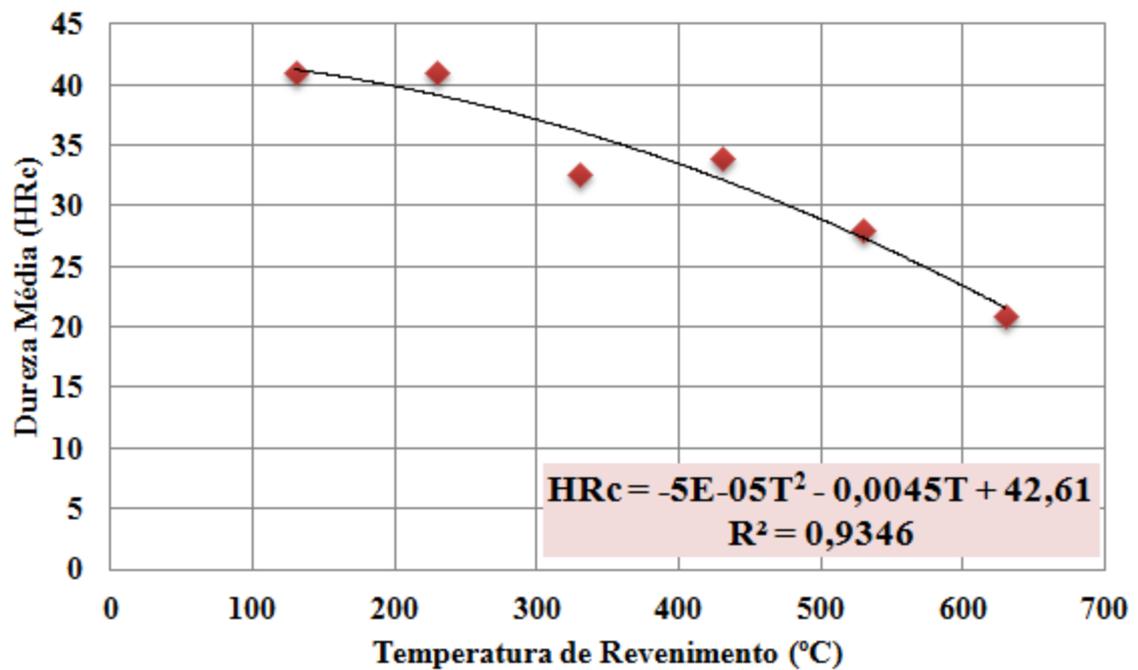
Amostra	Temperatura de Revenimento (°C)	Dureza HRC (HRc)	Média da Dureza HRC (HRc)	Desvio Padrão
1	130	39	41	2,1
		40		
		43		
2	230	39	41	2,1
		42		
		43		
3	330	30	33	2,5
		33		
		35		
4	430	32	34	2
		34		
		36		
5	530	27	28	1
		28		
		29		
6	630	20	21	1
		21		
		22		
7	-	42	43	2
		43		
		45		

Fonte: Próprio autor.

A partir dos dados, foi possível sugerir que a temperatura de revenimento adequada, seria entre 230°C e 430°C. Uma vez que a temperatura de revenimento não é apresentada em norma, e correlacionando as possíveis temperaturas com os dados de dureza, é possível sugerir tal faixa de temperatura para o processo de fabricação do componente.

De maneira a obter uma visão geral das amostras após o tratamento térmico, e suas medida de dureza, e a relação e possível padrão de comportamento entre elas, uma curva de revenimento foi construída, como segue na figura 45 a seguir.

Figura 45 Curva de revenimento



Fonte: Próprio autor.

Analisando a curva obtida, foi possível notar a tendência de decrescimento das medições de dureza em relação ao aumento das temperaturas de revenimento as quais as amostras foram submetidas. O valor de R^2 , próximo de 1, mostra a proximidade de um padrão de decrescimento entre os valores da reta obtida. Dessa forma, a curva representa essa tendência e reafirma a correlação entre a temperatura de revenimento a qual a amostra foi submetida, e seu valor de dureza correspondente.

6 CONCLUSÃO

Baseando-se nos resultados obtidos e em suas análises, as seguintes conclusões foram estabelecidas:

- A análise macrográfica evidencia a ausência de histórico de tratamento térmico nas regiões esperadas.
- A microestrutura apresentada evidencia a ausência de tratamento térmico anterior, desviando da especificação de fabricação em norma técnica.
- A composição química corresponde ao especificado em norma, com desvios aceitáveis.
- A dureza do componente está coerente com a especificação em norma, porém, é homogênea ao longo de toda sua estrutura.
- A temperatura de revenimento determinada para a produção do componente está na faixa de temperatura de 230-430°C.
- A curva de revenimento explicita o comportamento e a relação esperada entre a dureza e as temperaturas aplicadas às amostras, e o desvio entre elas.
- Sugestão do tratamento térmico de têmpera por indução para a fabricação do componente.

REFERÊNCIAS

AMSTEDMAXION, **Rodas Ferroviárias**. Disponível em: <http://www.amstedmaxion.com.br/negocios_ferrovuario_rodas.php> Acesso em: 05. Mai. 2016.

ALMEIDA, C. F., **Análise das Forças de Contato e Comportamento Dinâmico de Rodeiro Ferroviário**. Tese de Mestrado – Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo. 132p. 2006.

ASSOCIAÇÃO AMERICANA DE FERROVIAS - AAR (*ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD*)-**Manual of Standards and Recommended Practices – Wheel and Axles**, AAR M-107/M-208, USA, 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS. **Informações do Setor**. Disponível em: <<http://www.antf.org.br/index.php>>. Acesso em: 20. Apr. 2016.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2.ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill LTDA, 1995

Coleção Tecnológica SENAI, **Soldagem**, 1 ed., 1997. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/212-ensaio-mecanico-dureza.html>> Acesso em 02.jul.2016.

Coleção Tecnológica SENAI, **Tratamento Térmicos**, 1 ed., 2000. Disponível em: <http://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/2_Mecatr%C3%B4nica/Materiais_1_Meca_2/Apostila_%20Tratamento_Termico_Complementar.pdf> Acesso em 02.jul.2016.

HECK, N., **Microestrutura**. Introdução à engenharia metalúrgica-Universidade Federal do Rio Grande do Sul-DEMET, 2013.

LABTESTE, 2016. Disponível em: <http://www.labteste.com.br/analises_metalograficas.asp> Acesso em : 02.jul.2016.

LIMA, A. **O Desgaste de Rodas e o Processo de Reperfilamento**. Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Carga. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 62p., 2006.

- LOPES, Wellington. **Apostila da disciplina Caracterização dos Materiais.** Graduação em Engenharia de Materiais. Cefet-MG, 2014.
- MACEDO, F. B., **Estudo do Desgaste de Trilhos Ferroviários.** Tese de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais. 41p. 2009.
- MAFRON, M. **Análise de Ligas Metálicas Utilizadas em Jóias e Bijuterias na Região de Passo Fundo.** Disponível em: < <http://www.abq.org.br/cbq/2016/trabalhos/12/9521-14831.html> > Acesso em: 20.jun.2017.
- MANSUR, H.S., **Técnicas de Caracterização de Materiais.** Disponível em: < <http://www.biomaterial.com.br/capitulo7part01.pdf> > Acesso em: 02. jul. 2016.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL. **Transporte Ferroviário.** Disponível em: < <http://www.transportes.gov.br/transporte-ferroviario.html> >. Acesso em: 20. Abr. 2016.
- OLIVEIRA, A.D. **Estudo Comparativo da Espectrometria de Emissão Atômica com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado com a Espectrometria de Emissão Atômica com Fonte de Centelha para Análise Quantitativa de Aço.** Revista TECCEN, vol.3,2010.
- OLIVEIRA, L. G. **Influência do Processo de Fabricação no Comportamento Mecânico de Rodas Ferroviárias.** 2013. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.
- SISDELLI, A. **Estudo de Desgastes de Rodas e suas Consequências no Material Rodante em Via Permanente.** Tese de Conclusão de Curso – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. Orientação: Ratton, H. X., 124p., 2006.
- Universidade de São Paulo. **Processo de Forjamento.** Disponível em: <<http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3079/A2PIM.pdf>> Acesso em: 05. Mai. 2016.