

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**BRUNA GABRIELA BRIDI DE PAULA**

**INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NO PROCESSO DE  
ESFEROIDIZAÇÃO DA PERLITA E SUAS CONSEQUÊNCIAS**

Juiz de Fora

2021

**BRUNA GABRIELA BRIDI DE PAULA**

**INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NO PROCESSO DE  
ESFEROIDIZAÇÃO DA PERLITA E SUAS CONSEQUÊNCIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves

Juiz de Fora

2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Bridi de Paula, Bruna Gabriela .

Influência da deformação plástica na esferoidização da perlita e suas consequências / Bruna Gabriela Bridi de Paula. -- 2021.  
58 p.

Orientador: Luiz Henrique Dias Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, ICE/Engenharia, 2021.

1. Deformação Plástica. 2. Perlita. 3. Aços. 4. Ovalização. I. Dias Alves, Luiz Henrique , orient. II. Título.

BRUNA GABRIELA BRIDI DE PAULA

INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NO PROCESSO DE  
ESFEROIDIZAÇÃO DA PERLITA E SUAS CONSEQUÊNCIAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 20 de Março de 2021.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Professor Dr. Carlos Renato Pagotto  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Professor Dr. Raphael Fortes Marcomini  
Universidade Federal de Juiz de Fora



## AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento que desejo realizar nesse trabalho é para Deus que nunca me abandonou e nem deixou que eu desistisse.

À minha mãe que sempre me deu um ombro para chorar e me resguardar.

Ao meu avô que sempre investiu em mim.

Ao meu primo João Paulo por me ajudar sempre que necessário.

À minha querida tia avó Jandira, que não está mais aqui, e ao meu tio avô Armando que juntos sempre torceram por mim, mesmo que de longe.

À toda família e amigos.

Ao Prof. Luiz Henrique Dias Alves, por todo conhecimento e confiança.

Ao técnico do Laboratório de Processos da UFJF, Guilherme, por toda ajuda e disponibilidade.

"É ótimo celebrar o sucesso, mas mais importante ainda é assimilar as lições trazidas pelos erros que cometemos"

- Bill Gates

## RESUMO

O trecho ferroviário no território nacional é uma aposta necessária e certa para a evolução da economia e setores afins, visando uma forma de evoluir esse setor, o estudo e compreensão da microestrutura de materiais de componentes é uma alternativa. Dessa forma, com o foco no material utilizado na fabricação de uma roda, tem-se que, a microestrutura e seus detalhes interferem nas propriedades mecânicas do material do componente, como a deformação causada pelos impactos na roda que podem acelerar o processo de esferoidização da perlita, interferindo na dureza do aço. Esse então é o tópico de estudo deste trabalho, a influência da deformação plástica na esferoidização do grão da perlita e suas consequências, principalmente a ovalização que será o objeto de estudo dos testes. Inicialmente, o aço 1080 também foi instrumento de teste, porém, com a situação pandêmica não foi possível dar continuidade. Com as análises feitas da roda de modelo CP33 empregada na EFVM e os trabalhos já presentes na literatura, foi possível relacionar os resultados e concluir que existem fortes indícios que a deformação plástica influencia a esferoidização da perlita. Foram analisadas microscopicamente amostras que sofreram deformação previa (um lado mais que o outro) e assim posteriormente foram comparadas suas durezas constatando-se então que quanto mais deformação maior a perda de dureza, ou seja, a estrutura modifica-se em temperaturas mais baixas do que normalmente ocorre quando não há deformação e fica menos dura. Com o resultado, foi possível atestar que essa diferenciação nos parâmetros como temperatura e deformação, trariam a mudança nas propriedades do aço, o que leva, para setores da ferrovia, necessidade de precauções, ajustes e novas estratégias de fabricação para evitar a ovalização da roda.

Palavras-chave: Trecho Ferroviário. Microestrutura. Deformação Plástica. Consequências. Perlita. Ovalização.

## ABSTRACT

The railway section in the national territory is a necessary and sure bet for the evolution of the economy and related sectors, it needs a way to evolve this sector, the study and understanding of the microstructure of component materials is an alternative. Thus, with the focus on no material used in the manufacture of a wheel, the microstructure and its details interfere with the mechanical properties of the component material, such as the deformation caused by impacts on the wheel that can accelerate the spheroidization process of the wheel. perlite, interfering in the hardness of the steel. This then is the topic of study of this work, the influence of the plastic deformation on the spheroidization of the pearlite grain and its consequences, mainly the ovalization that will be the object of study of the tests. Initially, steel 1080 was also a test instrument, however, with the pandemic situation it was not possible to continue. With the analyzes made of the wheel of the model CP33 used in EFVM and the works already present in the literature, it was possible to relate the results and conclude that there are strong indications that the plastic deformation influences the spheroidization of the pearlite. They were analyzed microscopically that had undergone previous deformation (one side more than the other) and thus their hardnesses were later compared, thus realizing that the more deformation the greater the loss of hardness, that is, a structure changes at lower temperatures than it usually occurs when there is no deformation and is less hard. With the result, it was possible to attest that this differentiation in parameters such as temperature and deformation, would bring about a change in the properties of steel, which leads, for sectors of the railway, the need for precautions, adjustments and new manufacturing strategies to avoid the ovalization of the wheel .

Key-words: Railway section. Microstructure. Plastic deformation. Consequences. Perlita. Ovalization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema ilustrativo sapata de freio e pista de rolamento. . . . .	17
Figura 2 – Nomenclatura das partes constituintes da roda ferroviária. . . . .	18
Figura 3 – Esquema de processos de fabricação de rodas forjadas. . . . .	21
Figura 4 – Esquema de processos de fabricação de rodas pelo processo Griffin. . .	22
Figura 5 – Disposição átomos Ferro-Carbono. . . . .	24
Figura 6 – Composição vs Temperatura do ferro carbono. . . . .	25
Figura 7 – Porcentagem de Perlita por teor de Carbono . . . . .	26
Figura 8 – Propriedades do ferro carbono . . . . .	27
Figura 9 – Roda com lascamento . . . . .	28
Figura 10 – Exemplos de diferentes tipos de rodas ovalizadas. . . . .	31
Figura 11 – Ovalização de roda ferroviária. . . . .	32
Figura 12 – Defeitos nas rodas. . . . .	34
Figura 13 – Efeito do raio de curvatura de uma partícula sobre a esferoidização. .	36
Figura 14 – Procedimentos . . . . .	39
Figura 15 – Roda de 33 polegadas modelo CP33 empregada na EFVM. . . . .	41
Figura 16 – Desenho esquemático dos pontos de medição dos diâmetros da roda. . .	42
Figura 17 – A Figura mostra as regiões onde foram medidas as durezas, apresentadas na tabela 9. . . . .	43
Figura 18 – Local de retirada das amostras. . . . .	44
Figura 19 – Local de retirada das amostras. . . . .	44
Figura 20 – Microestrutura do lado muito deformado (Pista). . . . .	45
Figura 21 – Microestrutura do lado muito deformado (1 mm Pista). . . . .	46
Figura 22 – Microestrutura do lado muito deformado (10 mm da pista). . . . .	47
Figura 23 – Microestrutura do lado pouco deformado (Pista) . . . . .	48
Figura 24 – Microestrutura do lado pouco deformado (10 mm da pista). . . . .	48
Figura 25 – Diagrama CCT. Alves . . . . .	49
Figura 26 – Comparação entre Amostras Padrão-Aquecida-Aquecida/Deformada – 500°C. . . . .	51
Figura 27 – Comparação entre Amostras Padrão-Aquecida-Aquecida/Deformada – 550°C. . . . .	52
Figura 28 – Comparação entre Amostras Padrão-Aquecida-Aquecida/Deformada – 600°C. . . . .	52
Figura 29 – Comparação entre Amostras Padrão-Aquecida-Aquecida/Deformada – 650°C. . . . .	53
Figura 30 – Caracterização das microestruturas perlita fina, perlita esferoidizada e o processo de esboroa-mento da perlita . . . . .	53
Figura 31 – Diagrama de fase ferro-carbono calculado usando Thermo-Calc indi- cando temperaturas típicas para tratamentos . . . . .	54

Figura 32 – Comparação de durezas entre amostras sem formação e com deformação. 55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de rodas ferroviárias. . . . .	19
Tabela 2 – Composição química de rodas ferroviárias. . . . .	19
Tabela 3 – Composição química resumindo as principais ligas empregadas no <i>heavy haul</i> para o padrão americano e europeu. . . . .	20
Tabela 4 – Produção de rodas ferroviárias no Brasil segundo Maxion (2013) e MWL (2013). . . . .	20
Tabela 5 – Microdureza . . . . .	26
Tabela 6 – Mecanismos de danos Microestruturais. . . . .	35
Tabela 7 – Dimensões dos corpos de prova. . . . .	38
Tabela 8 – Resultado das Medições dos diâmetros. . . . .	42
Tabela 9 – Valores coletados das durezas. . . . .	43
Tabela 10 – Leituras de dureza obtidas para as amostras submetidas ao processo de aquecimento e aquecimento/deformação. . . . .	54
Tabela 11 – Percentual de redução da dureza do material. . . . .	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	Association of American Railroads
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
USP	Universidade de São Paulo



## LISTA DE SÍMBOLOS

%C	Porcentagem de carbono em massa
Fe <sub>3</sub> C	Cementita na liga ferro-carbono
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Rockwell
L	Fase líquida da liga ferro-carbono
R	Raio da roda
t	Tonelada

## SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha$	Fase $\alpha$ da liga ferro-carbono
$\gamma$	Fase $\gamma$ da liga ferro-carbono
$\theta$	Número de ordem
$\lambda$	Comprimento de onda
$\sigma$	Fase $\sigma$ da liga ferro-carbono

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA . . . . .	14
1.2	ESCOPO . . . . .	15
1.3	OBJETIVOS . . . . .	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>16</b>
2.1	A RODA FERROVIÁRIA . . . . .	17
2.2	SISTEMA FERRO CARBONO . . . . .	23
2.2.1	Fases do Sistema Fe-C . . . . .	23
2.3	DEFEITOS EM RODAS FERROVIÁRIAS . . . . .	27
2.3.1	Lascamento (Spalling) . . . . .	28
2.3.2	Escamação (Shelling) . . . . .	28
2.3.3	Vertical Split rim . . . . .	28
2.3.4	Falhas por Ovalização ou “out-of-roundness wheels” . . . . .	29
2.3.5	Trincas Térmicas . . . . .	32
2.3.6	Deep Shelling . . . . .	33
2.4	ESFEROIDIZAÇÃO DA PERLITA . . . . .	35
2.4.1	Consequência da Esferoidização . . . . .	37
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>38</b>
3.1	ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA . . . . .	38
3.2	PROCESSO DE OVALIZAÇÃO . . . . .	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>41</b>
4.1	ANÁLISE VISUAL E DIMENSIONAL . . . . .	41
4.2	ENSAIO DE DUREZA . . . . .	43
4.2.1	ANÁLISE MICROESTRUTURAL . . . . .	44
4.2.2	Microestrutura no lado muito deformado. . . . .	45
4.2.3	Microestrutura do lado com pouca deformação . . . . .	48
4.3	DISCUSSÃO . . . . .	50
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>59</b>
	<b>ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE . . . . .</b>	<b>61</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O aço, que possui a maior utilização comercial entre os materiais metálicos, pode ser tratado em diversos níveis e com diferentes tipos de tratamentos que, por sua vez, atribuem propriedades físicas e mecânicas auxiliadoras na sua empregabilidade. Os benefícios podem ser listados como diferentes níveis de resistência mecânica, dureza, ductilidade e tenacidade. Essas propriedades, dependendo da utilização, são objetos de estudo para melhorias e correção de falhas. Dessa forma, estudando a composição do aço, e suas diferentes formas de tratamento térmico e ou termomecânico, percebe-se um avanço da tecnologia, segurança e diminuição de custos.

Na sociedade em geral, a utilização de aços é bem constante, desde milhares de anos para diferentes fins. Ao passar do tempo, e com a evolução da ciência, mesmo que experimentalmente, descobriu-se tratamentos térmicos que, se feitos da maneira correta, podem potencializar ou anular alguma propriedade. As empresas de transporte ferroviário, por exemplo, visam melhorias de desempenhos dos componentes, maior resistência, durabilidade e segurança que proporcionam uma competitividade melhor, menores custos com manutenção bem como menores riscos operacionais. Por outro lado, as empresas de usinagem almejam uma menor resistência e dureza que convergem para facilitar a fabricação de suas peças e afins. Tendo isso em vista, percebe-se a dualidade encontrada do processo de esferoidização da perlita que, para o conjunto trilhos e roda de trem, é prejudicial, já para a usinabilidade, é algo desejável. Dessa forma, é fato que, os estudos nessa vertente são de suma importância tanto para evitar danos quanto para melhorar processos e, sendo assim, será analisado e estudado nesse trabalho a influência da deformação plástica na esferoidização do grão da perlita.

Aproveitando oportunidades nesse cenário, esse trabalho busca entender qual a influência da deformação plástica no processo de esferoidização da perlita e suas consequências. Sehitoglu (2006), descreve que esse processo pode ser crítico e acelerar a formação de falhas por fadiga termomecânica em pistas de rolamento de rodas de trem, gerando um defeito conhecido por *shelling* ou escamação. Com o enfoque no fenômeno da ovalização e com estudos já publicados referentes ao assunto, os resultados serão baseados em análises da microestrutura de uma roda ferroviária que sofreu ovalização e deformação plástica.

Portanto, a contribuição acadêmica desse trabalho pode auxiliar os profissionais da engenharia de manutenção das operadoras ferroviárias a estruturar ações para mitigar a formação de escamação em rodas ferroviárias empregadas no *heavy haul*.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A parte referente às transformações de fase que ocorrem em materiais metálicos empregados em componentes mecânicos é uma área de grande importância para a enge-

nharia mecânica. Essas transformações de fase podem gerar mudanças de comportamento que podem comprometer o emprego do componente. Dessa forma, o estudo se justifica, face à sua relevância por se tratar de mudanças de fase em aços largamente empregados na indústria mecânica de maneira geral, bem como o entendimento do impacto que essas mudanças podem ter na segurança e desempenho dos aços para aplicação mecânica.

## 1.2 ESCOPO

Esse trabalho faz parte do projeto Cátedra Roda-Trilho desenvolvido pela UFJF, sob coordenação do Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves, com o título “Fatores que levam a falhas como ovalização e fratura de rodas empregadas no *heavy haul* e sua relação com os processos de fabricação”. Essa parte refere-se ao estudo da correlação da ovalização de rodas com transformações microestruturais que podem ocorrer no material da roda durante o uso. As análises estão limitadas à somente uma amostra, que apresentou forte deformação plástica durante o uso. Porém, trata-se de um problema recorrente nas ferrovias que operam com *heavy haul* (LEWIS E OLOFSSON, 2009).

## 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal analisar e correlacionar a deformação plástica do material da roda com a microestrutura bem como avaliar a influência da deformação plástica na própria transformação microestrutural.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Levantar com base na literatura as causas que levam à ovalização de rodas ferroviárias durante o uso;
- Analisar a microestrutura e dureza de uma roda de 33 polegadas, que em sua primeira vida na EFVM apresentou forte ovalização;
- Avaliar a possível influência da deformação plástica na mudança microestrutural do material da roda.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aços eutetóides, que são empregados nas rodas e trilhos, apresentam uma ampla gama de propriedades mecânicas interessantes (alta resistência, resistência ao desgaste, ductilidade e tenacidade) e podem ser uma alternativa mais barata aos aços de baixa liga de alta resistência (HSLA), em aplicações onde a soldabilidade não é um requisito crítico. As propriedades mecânicas da perlita são ditadas principalmente pelo espaçamento interlamelar e a esferoidização da cementita (CARUSO e GODET, 2010).

A esferoidização nesses aços é um tratamento muitas vezes utilizado em processos de fabricação de algumas ferramentas e matrizes que necessitam da diminuição da dureza para que seja possível a usinagem. Segundo Alves (2000), no caso do contato roda-trilho e roda-trilho-sapata, que constitui um importante tribossistema, não é interessante que se diminua a dureza do material em serviço e nem na sua fabricação. Esse processo de esferoidização, nessa situação, como reduz resistência e conseqüentemente a dureza, acaba deixando o material mais suscetível a deformação plástica e como a deformação plástica acelera o desgaste, inicia-se um ciclo vicioso que prejudica o desempenho do componente. (ALVES, 2000).

O Brasil é um país exportador de commodities de dimensões continentais. Quase 50% das exportações brasileiras estão concentradas em seis produtos (minério de ferro, petróleo bruto, soja, café, carne e açúcar) e esses produtos precisam ser transportados por longas distâncias, entre as regiões de onde são produzidos, para portos e, posteriormente, para o exterior. Por se tratarem de produtos de baixo valor agregado, grande volume e transportados a grandes distâncias, o ideal é que o transporte fosse realizado pelos modais ferroviário ou fluvial, o que permitiria uma substancial redução de custos, tornando os produtos brasileiros mais competitivos (ANDRADE, 2015).

O modal fluvial é ainda muito incipiente no Brasil e o ferroviário tem uma participação mais expressiva, mas muito aquém do necessário. Na pesquisa de Andrade (2015), nota-se que o modal ferroviário possui diversas vantagens, por utilizar-se de vias exclusivas, é pouco afetado por tráfego e também tem baixo impacto ambiental, tendo em vista que trens com 10.000 a 15.000 t de carga utilizam um pequeno número de locomotivas, que emitem carbono em quantidades muitas vezes menor do que os caminhões que seriam necessários para transportar a mesma quantidade de cargas. Por outro lado, a velocidade de transporte é mais lenta e o percurso é pouco flexível. Além disso, existe um alto custo fixo de investimento em locomotivas, vagões, terminais e linha permanente, que deve ser necessariamente longa para ser competitiva. Buscando diminuição de custos, quanto menos problemas ou gastos com reparos, melhor seria para o desenvolvimento do setor, tendo impactos na economia do país e no giro de capital (ANDRADE, 2015).

Dessa forma, tendo em vista a importância da ferrovia para a economia nacional,

confere-se que, quanto mais competitivo for, pelos benefícios vistos, mais vantajoso é para o país. Nesse contexto, visando a maior rentabilidade, segurança e otimização desse tipo de translado, estuda-se minuciosamente a microestrutura do material que compõe os trilhos, rodas e etc, com objetivos de melhorar sua vida útil e atingir níveis altos de segurança.

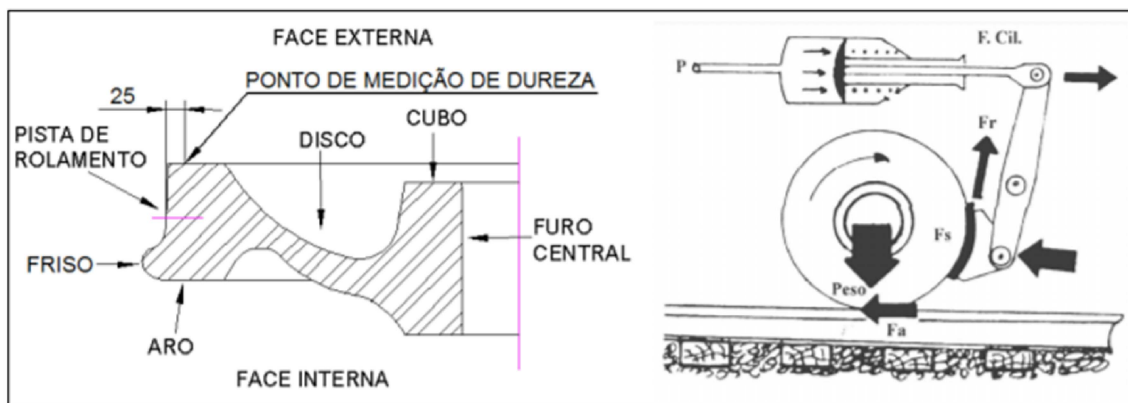
## 2.1 A RODA FERROVIÁRIA

O sistema roda-trilho ou roda-trilho-sapata constitui um tribossistema muito importante e por isso largamente estudado pela engenharia e pesquisa de interface em todo mundo, (ALVES, 2000). Tendo essa noção de importância, o desempenho e durabilidade das rodas e trilhos é sempre discutido.

Conceitualmente, a roda ferroviária tem, para cada uma de suas partes, uma nomenclatura característica conforme pode ser observada na figura 1, no lado esquerdo. A pista de rolamento é a parte que entra em contato com o trilho e também, para a maioria dos trens, principalmente de carga, região de contato da sapata de freio no momento da frenagem da composição.

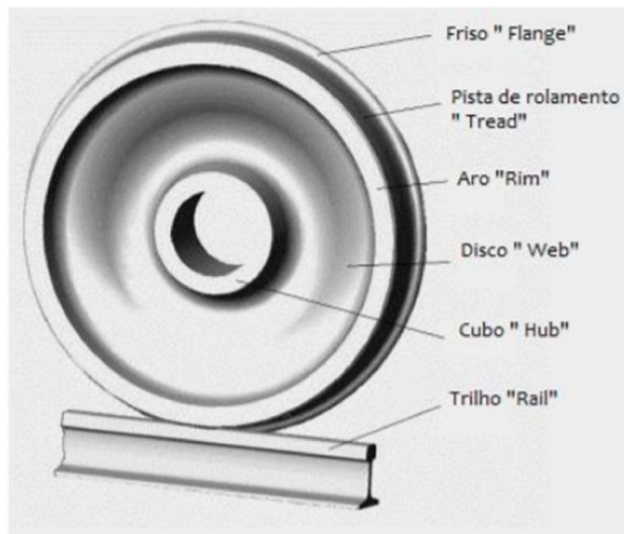
Na figura 1, no lado direito, pode-se observar um esquema da forma como a sapata de freio entra em contato com a pista de rolamento.

Figura 1 – Esquema ilustrativo sapata de freio e pista de rolamento.



Fonte: Villas Boas (2010).

Figura 2 – Nomenclatura das partes constituintes da roda ferroviária.



Fonte: Villas Boas (2010).

Os aços utilizados em rodas e trilhos tem composições químicas eutetóides. Os trilhos são produzidos por laminação e as rodas, normalmente por forjamento. As especificações que definem as características químicas, as propriedades mecânicas, requisitos de qualidade de rodas ferroviárias são definidas pela norma AAR (*Association of American Railroads*) para o padrão americano e UIC (*Union International Railways*) para o Europeu (ALVES, 2000). No Brasil, adota-se o padrão americano, que é apresentado na Tab. 1 e para o padrão europeu as composições são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 1 – Classes de rodas ferroviárias.

Classe	Aplicação	Composição Química				Dureza
		C	Mn	Si	P/S	BHN
L	Altas velocidades com severas condições de frenagem e cargas leves nas rodas	0,47 máx.	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	177 a 277
A	Altas velocidades com severas condições de frenagem e cargas moderadas nas rodas (vagões de cargas leves)	0,47 a 0,57	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	255 a 321
B	Altas velocidades com severa frenagem a altas cargas nas rodas (vagões de minério)	0,57 a 0,67	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	277 a 341
C	Serviços com condições leves de frenagem e altas cargas nas rodas ou altas cargas nas rodas com freios fora da pista (carro passageiro)	0,67 a 0,77	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	321 a 363
D	Serviços com condições leves de frenagem e altas cargas nas rodas ou altas cargas nas rodas com freios fora da pista (carro passageiro)	0,67 a 0,77	0,60 a 0,85	0,15 mín.	0,05 máx.	341 a 415

Fonte: AAR M-107, 2009.

Tabela 2 – Composição química de rodas ferroviárias.

Composição Química (Valores Máximos, %)											
Classe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr+Mo+Ni
R1	0,48	0,50	0,9	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R2	0,58	0,50	0,9	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R3	0,70	0,50	0,9	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R6	0,48	0,40	0,75	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R7	0,52	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R8	0,56	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5
R9	0,60	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,5

Fonte: AAR M-107/M-208,2009.

Segundo Alves (2000), as classes mais utilizadas conforme o padrão americano para tais fins são a B, C e D. Porém, todas apresentam microestrutura predominantemente perlítica, com presença de ferrita alotriomorfa. Pelas tabelas, extrai-se que, as durezas das duas classes flutuam de 321 a 415 BHN. O teor de carbono define as principais diferenças de propriedades entre as classes. E, com a finalidade de aplicar o aço nos conjuntos



de rodas e trilhos, é necessário que no processo de fabricação dessas peças sejam feitos tratamentos térmicos para que as propriedades necessárias sejam alcançadas.

A Tabela 3 sumariza as composições, mostrando inclusive os limites determinados para os elementos de liga (DIENER e GHIDINI, 2010).

Tabela 3 – Composição química resumindo as principais ligas empregadas no *heavy haul* para o padrão americano e europeu.

ELEMENTOS	EN 13262	AAR M107/M208 2004		
	ER7T	Classe B	Classe B+	Classe C/D
C	≤0.52	0.57–0.67	0.67–0.72	0.67–0.77
S	≤0.020	0.005–0.040	0.005–0.040	0.005–0.040
P	≤0.020	≤ 0.030	≤0.030	≤0.030
Mn	≤0.80	0.60–0.90	0.60–0.90	0.60–0.90
Cr	≤0.30	≤0.25	≤0.25	≤0.25
Ni	≤0.30	≤0.25	≤0.25	≤0.25
Mo	≤0.08	≤0.10	≤0.10	≤0.10
Cu	≤0.30	≤0.35	≤0.35	≤0.35
Si	≤0.40	0.15–1.00	0.15–1.00	0.15–1.00
V	≤0.06	≤0.04	≤0.04	≤0.04
Al	–	≤0.06	≤0.06	≤0.06
Nb	–	≤0.05	≤0.05	≤0.05
Ti	–	≤0.03	≤0.03	≤0.03
Cr + Mo + Ni	≤0.50	–	–	–

Fonte: AAR M-107/M-208,2009.

Percebe-se pela tabela 4 que as especificações para materiais de rodas permitem adições de elementos de liga. Isso facilita a obtenção de maior fração volumétrica de perlita, mesmo para menores teores de carbono.

Tabela 4 – Produção de rodas ferroviárias no Brasil segundo Maxion (2013) e MWL (2013).

Empresa	Tipo processo	Tipo de aço (% C)	Produção anual de rodas (unidades)
<i>MWL Brasil</i>	Forjada	0,47 – 0,77	≅ 50.000
<i>Amsted Maxion</i>	Fundida	0,47 – 0,77	≅ 50.000 <sup>1</sup>

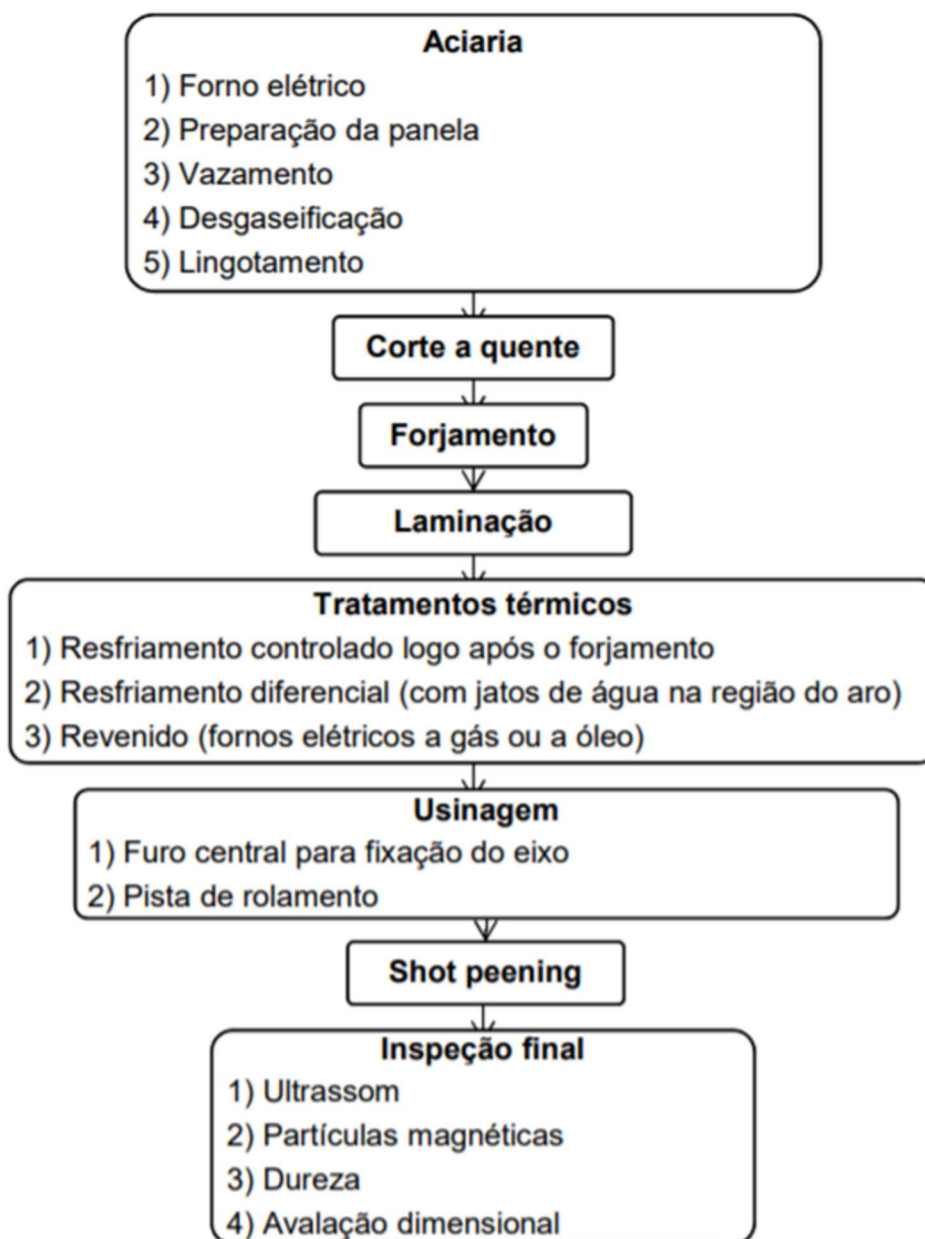
<sup>1</sup>Somente rodas do mercado de reposição, não inclui rodas de novos vagões.

Fonte: Maxion, 2013.

Para a entrega do produto final que é a roda utilizada em campo, é necessário que seja seguido um processo e que esse se adequa as normas adotadas como a AAR ou

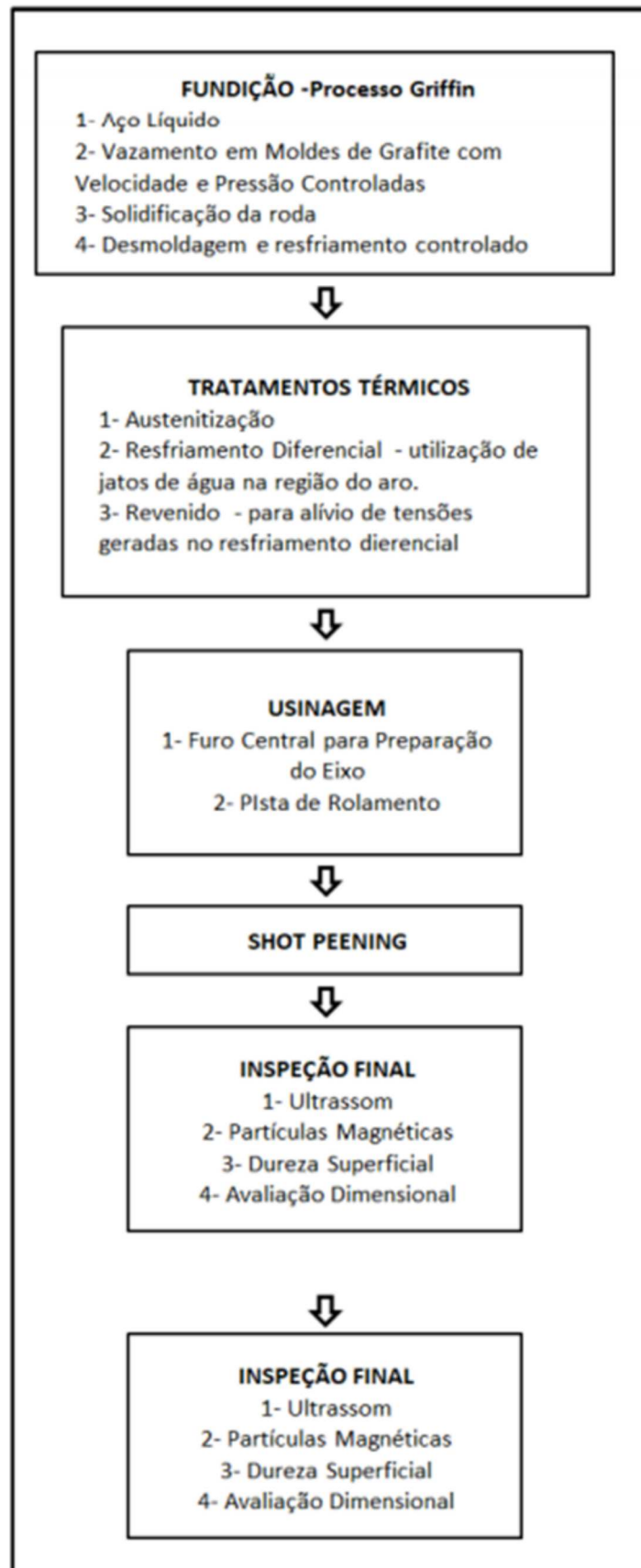
UIC. O objetivo final do processo de solidificação deve ser concluído sem que aconteçam algum tipo de defeito interno, trincas ou tensões prejudiciais. No Brasil, os processos legitimados são a fundição para rodas utilizadas em transportes de cargas mais leves e o forjamento para transportes mais pesados, como minério. As fabricantes devem seguir a norma AAR M-107/208 para que os processos sejam feitos adequadamente e não existam problemas relacionados a fabricação do elemento no seu uso. As empresas responsáveis por essa fabricação em território nacional são a MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda e Amsted Maxion SA.

Figura 3 – Esquema de processos de fabricação de rodas forjadas.



Fonte: Chaves (2017).

Figura 4 – Esquema de processos de fabricação de rodas pelo processo Griffin.



Alguns cuidados, estabelecidos pelas normas como AAR M-107/208, são importantes para assegurarem a qualidade, evitar falhas prematuras e defeitos que coloquem em risco a utilização e operação da roda. As rodas fundidas ou forjadas devem passar pelos processos de tratamento térmico compreendendo austenitização e um resfriamento diferencial na superfície do rolamento, seguido por revenimento. As rodas ferroviárias para trens de passageiro, carga ou locomotivas, devem ter estrutura perlítica fina no aro, não sendo admitida martensita revenida ou bainita (HIRAKAWA,1984). Finalizando o processo, é necessária uma inspeção final que assegure que tudo foi feito de acordo e evite problemas citados acima. Dentre os cuidados, é necessário que se faça ultrassom, partícula magnética, dureza superficial e avaliação dimensional.

## 2.2 SISTEMA FERRO CARBONO

Os metais no geral, segundo Tschiptschin (1988) são formados por um aglomerado de átomos que formam, fazendo uma analogia com a formação individual de átomos, uma espécie de bola de bilhar que se une formando uma estrutura cristalina. No caso dos aços, que são ligas de ferro e carbono, os átomos desses elementos ficam aglomerados de diferentes formas que dependendo da temperatura se organizam de diferentes maneiras.

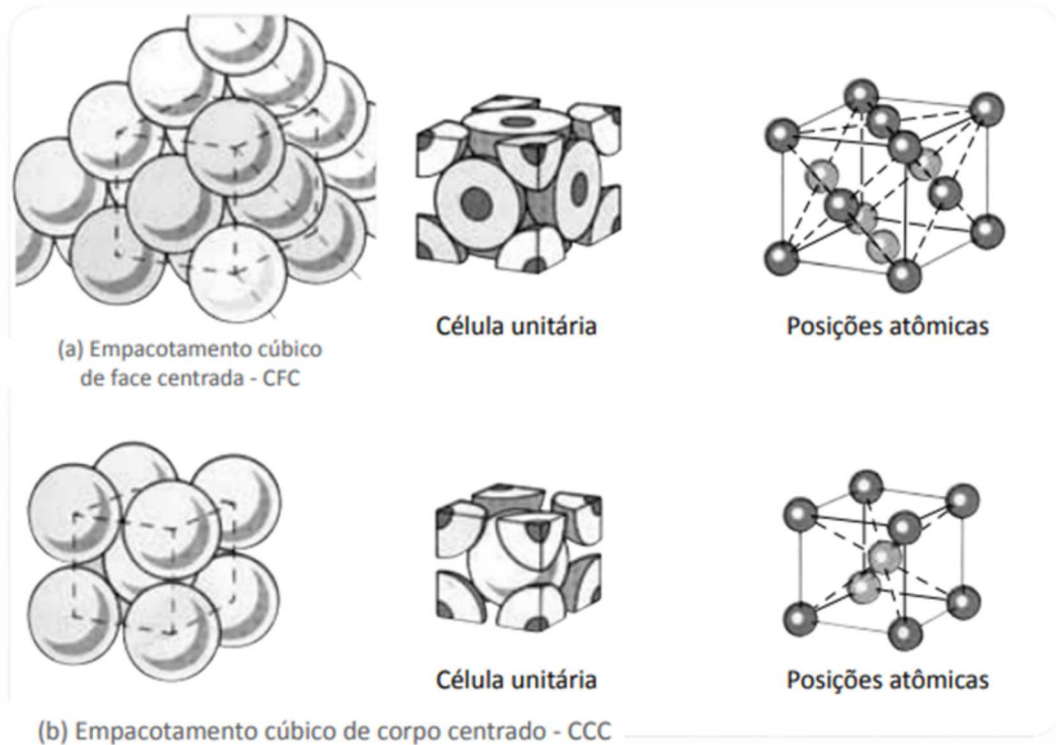
As propriedades mecânicas dos aços são dependentes de sua microestrutura e de sua composição química. Um bom entendimento das etapas de formação dos microconstituintes durante e após tratamentos térmicos permite selecionar com maior conhecimento e propriedade os materiais e tratamentos térmicos para se obter os níveis de resistência mecânica desejados (TSCHIPTSCHIN,1988).

### 2.2.1 Fases do Sistema Fe-C

Em temperaturas elevadas o aço apresenta uma estrutura denominada cúbica de face centrada – CFC, mostrada na parte superior da figura abaixo. A austenita ou fase  $\gamma$  (CFC) apresenta sinais de estabilidade desde temperaturas altas logo após a solidificação do aço, passando pelas temperaturas de laminação ou forjamento (1000 a 1200°C), até a temperatura de 912°C. A 912°C ocorre a transformação do ferro CFC para a estrutura CCC – denominada ferrita ou fase  $\alpha$ -estável até a temperatura ambiente. A austenita, nos aços de baixa liga, não é uma fase estável na temperatura ambiente. Já a ferrita é estável e apresenta propriedades mecânicas de dureza e resistência muito baixas. Em compensação é uma fase que apresenta alta ductilidade e alta conformabilidade (TSCHIPTSCHIN,1988).

A maioria dos tratamentos térmicos realizados em aços se baseiam na transformação  $Fe\gamma$  CFC em  $Fe\alpha$  ccc e vice-versa. Segundo Tschiptschin (1988), se tal transformação não existisse não haveria a possibilidade do endurecimento dos aços que são mais resistentes a fadiga e ao desgaste. O átomo de carbono, por ser bem pequeno se comparado com o do ferro, ocupa os espaços vazios no reticulado cristalino do ferro como na figura 5.

Figura 5 – Disposição átomos Ferro-Carbono.

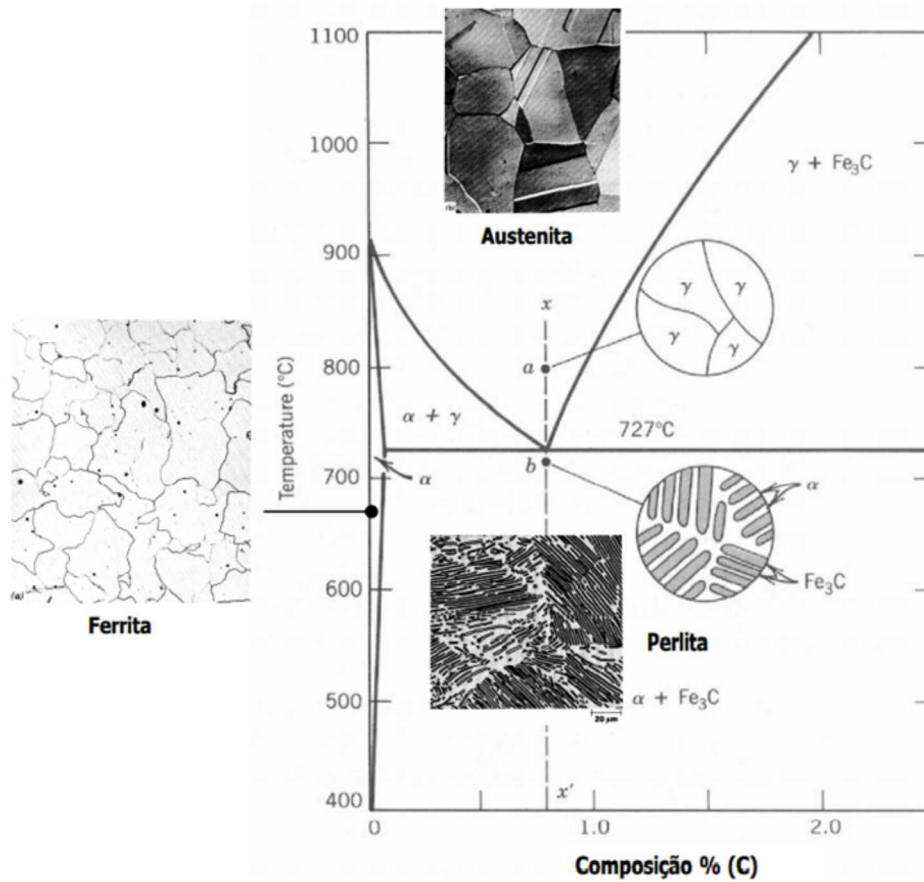


Fonte: Tschiptschin, 1988

Quando existe um maior teor de carbono, esse elemento se combina com o ferro que forma uma fase cerâmica, denominada cementita. A estrutura cristalina da cementita é complexa, com 16 átomos por célula unitária, 12 de ferro e 4 de carbono. É uma fase muito dura (1050 HV).

Para que se conheçam a estabilidade das fases de ferrita, cementita e austenita, existem os diagramas de equilíbrio. (TSCHIPTSCHIN,1988) Além disso, esses diagramas também mostram as temperaturas que ocorrem as transformações dessas fases. Com esse recurso, é possível prever quais fases se formam quando o aço é resfriado de forma lenta, ou seja, no equilíbrio (TSCHIPTSCHIN,1988). Pela figura, pode-se perceber que os aços de baixo teor de carbono possuem a ferrita como fase. Já nos aços com maior teor de carbono, maior que 0.02%, tem-se a precipitação da cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Dessa forma, tal precipitação se alternando com a ferrita, compõe uma estrutura lamelar conhecida como Perlita. Esse composto natural é constituído por lamelas alternadas de ferrita e cementita (TSCHIPTSCHIN,1988). A Figura 6 ilustra a seção do diagrama de equilíbrio Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  para a região do eutetóide.

Figura 6 – Composição vs Temperatura do ferro carbono.

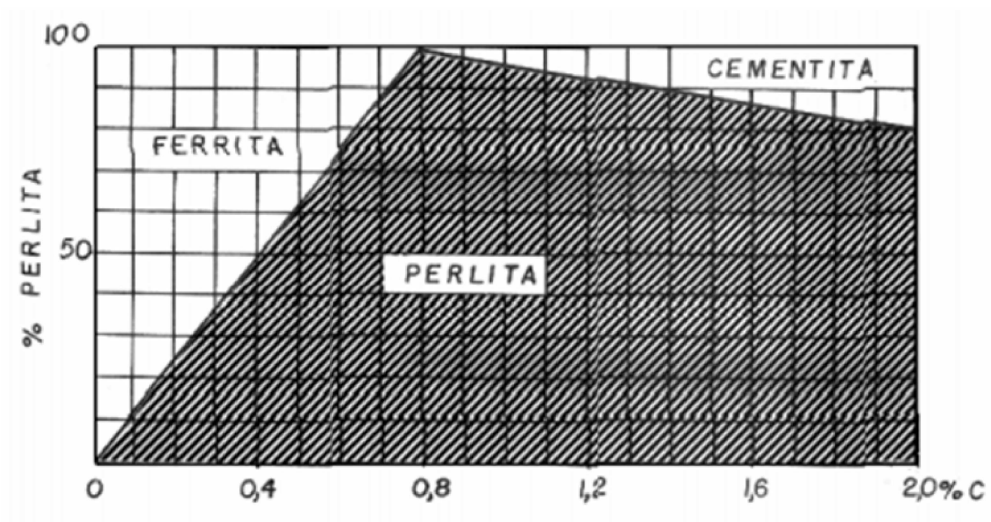


Fonte: Tschiptschin, 1988.

Os aços que possuem quantidade menor de carbono possuem a predominância da ferrita, e quanto menos carbono, mais dúctil é o material. Os aços que são utilizados nas rodas e nos trilhos de trem são aços 100% perlíticos, com porcentagem de carbono de 0,8%, em média. Variando a porcentagem de carbono nos aços, de 0,1% até 0,8%, aumenta-se a perlita e diminui-se a ferrita. A Fig. 7 apresenta a variação do percentual de perlita em função do teor de carbono.



Figura 7 – Porcentagem de Perlita por teor de Carbono



### Varição da porcentagem de perlita em função do teor de carbono, nos aços resfriados lentamente

Fonte: Tschiptschin, 1988.

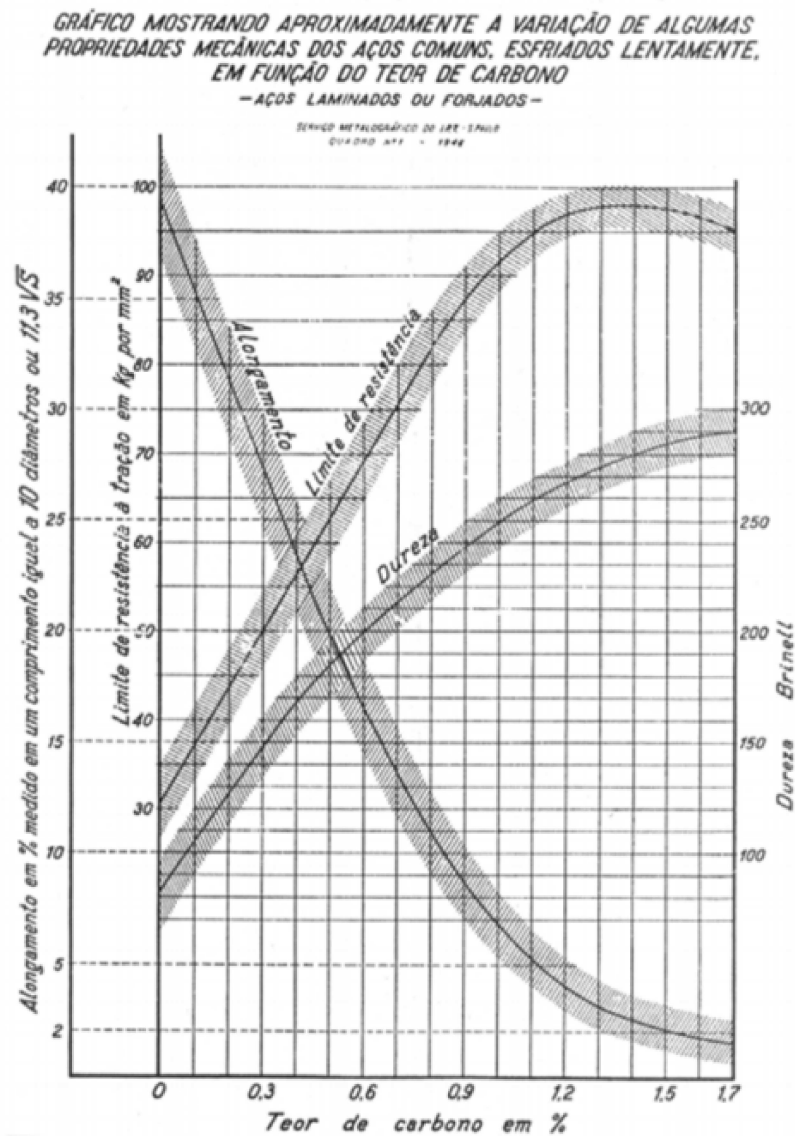
Exemplificando a diferença que essas porcentagens trazem para as propriedades mecânicas do aço segundo Tschiptschin (1988), temos que, a cementita endurece o aço e a ferrita o mantém tenaz. A dureza da perlita, por sua vez, é intermediária a da cementita e ferrita. A Tab. 5 apresenta a dureza dos microconstituintes dos aços e a Fig. 8 mostra esquematicamente a variação das propriedades mecânicas com o teor de carbono.

Tabela 5 – Microdureza

Microconstituente	Dureza (HV)
Ferrita (Fe- $\alpha$ )	90
Cementita (Fe <sub>3</sub> C)	1050
Perlita ( $\alpha$ + Fe <sub>3</sub> C)	230

Fonte: Tschiptschin, 1988.

Figura 8 – Propriedades do ferro carbono



Fonte: Tschiptschin, 1988.

### 2.3 DEFEITOS EM RODAS FERROVIÁRIAS

Inicialmente, as rodas ferroviárias são projetadas para resistirem aos diversos carregamentos térmicos e mecânicos à que estarão sujeitas durante o uso, prevenindo assim a ocorrência de defeitos, sendo necessário sua substituição apenas no caso de desgaste. Porém, na prática, as solicitações térmicas geradas durante a frenagem bem como as solicitações mecânicas devidos às elevadas tensões de contato e às cargas de impacto, especialmente as relacionadas com defeitos nos trilhos, culminam com deformações plásticas, muitas vezes concomitantes com transformações e fase que podem contribuir para ocorrência de defeitos que, no caso de rodas ferroviárias, são críticos (LEWIS, 2009). Foco de estudos por comprometerem os objetivos de desempenho, os defeitos aparecem com frequência em pistas de rolamentos advindos, normalmente, de fadigas, sendo elas térmicas ou mecânicas.

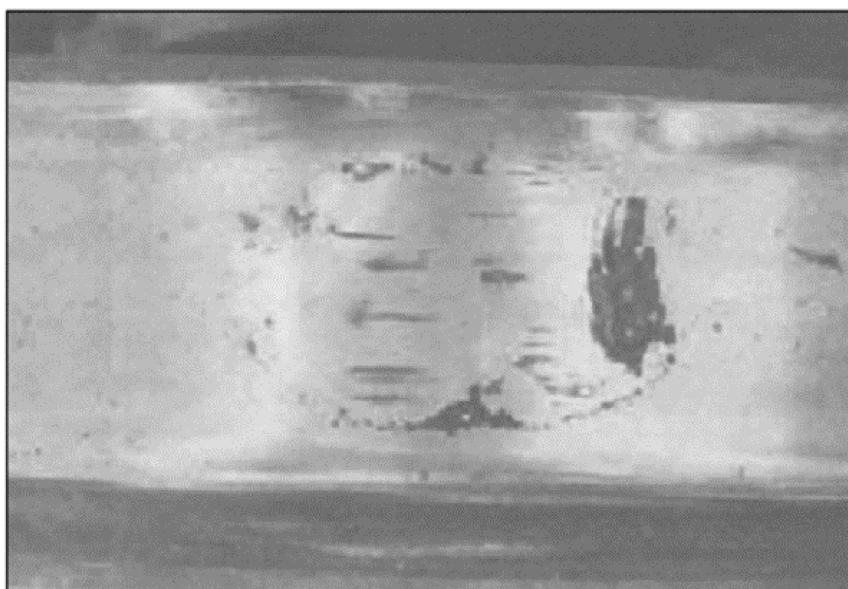


Muitas vezes, quando ocorridos, os defeitos trazem como necessidade o reperfilamento e até o sucateamento da peça (LEWIS, 2009).

### 2.3.1 Lascamento (Spalling)

Segundo Minicucci (2011), o defeito de lascamento pode acontecer por ocorrência da escamação que tem origem termomecânica oriunda do processo de frenagem. Como o atrito é muito alto, a temperatura local é potencializada, ficando acima da temperatura de austenitização, formando a martensita, devido ao aquecimento e abrupto resfriamento. A Figura 9 ilustra o defeito.

Figura 9 – Roda com lascamento



Fonte: Minicucci, 2011.

### 2.3.2 Escamação (Shelling)

O *shelling* é uma das mais visíveis manifestações de defeito na pista de rolamento das rodas ferroviárias. Esse defeito é resultante da propagação de trincas, sejam elas iniciadas por fadiga de contato de rolamento ou por fratura de martensita gerada na superfície da roda (MAGEL e KALOUSEK, 1996). Porções de materiais são removidas em formas de escamas, daí o nome, como consequência da propagação de trincas oriundas de ciclos de carregamentos vindas dos rolamentos que se unem na subsuperfície.

### 2.3.3 Vertical Split rim

O defeito *vertical split* (fenda vertical) como um defeito que se inicia na pista de rolamento da roda a partir de uma área com *spalling* (lascamento) ou *shelling* (escamação).

O defeito *vertical split* se propaga através de uma fratura frágil com a perda de uma significante porção do aro da roda (VILLAS BOAS, 2010).

#### 2.3.4 Falhas por Ovalização ou “out-of-roundness wheels”

Ovalização de uma roda ferroviária em serviço é um processo que ocorre com uma certa frequência dentro das ferrovias, tanto para vagão de carga quanto passageiros. Este processo leva a deformações e desgastes heterogêneos na pista de rolamento das rodas e é normalmente acompanhado de escoamento no material do aro da roda. Todo o processo culmina com uma variação no diâmetro da pista de rolamento (VASAUSKAS *et al.*, 2005; BEHR, 2013; VYAS; GUPTA, 2006; THAKKAR, 2009; STEFFENS, 2005; MADLER E BANNASCH, 2006; MULLER *et al.*, 2013).

Segundo Barke e Chiu (2005), Steffens (2005), Vyas e Gupta (2006), Madler e Bannasch (2006), Thakkar (2009), Lewis e Olofsson (2009) são consideradas ovalizadas rodas com qualquer defeito na pista de rolamento que levem a variação em seu diâmetro. Entre os defeitos apresentados destacam-se os *skid flats*, *shelling*, *spalling* e amassamentos concentrados.

Reinschmidt *et al.*, (2015) relata que uma roda ovalizada tem uma influência muito prejudicial aos componentes do vagão, contribuindo para o aumento de falhas na via permanente com maior risco de quebra de trilhos e dormentes, acarretando também danos aos componentes do truque, acelerando o desgaste e podendo causar fratura de molas, eixo e danos aos rolamentos. Behr (2013), Muller *et al.*, (2013), citam que uma roda ovalizada é mais propensa a acelerar o processo de fadiga de contato (RCF) uma vez que as deformações plásticas localizadas e heterogêneas exaurem a ductilidade do material deixando-o mais propenso a propagação de trinca. Além disso, uma roda ovalizada, pelo fato de não rolar corretamente, aplica pequenas cargas de impacto no trilho, acelerando o processo de RCF também no trilho.

Reinschmidt *et al.*, (2015) classificam as rodas com ovalização de maior alcance ou abrangendo maiores áreas, como as mais críticas, com detrimento da influência sobre a via permanente e todos os componentes do vagão. Segundo Reinschmidt *et al.*, (2015) as heterogeneidades no material bem como os defeitos relacionados a RCF superficial e subsuperficial são responsáveis por grandes ovalizações ou ovalizações que afetam áreas maiores ao passo que o *skid flats* abrange áreas menores e normalmente são verificados nas duas rodas do rodeiro na mesma direção.

Somado aos danos ao tribossistema como um todo e aos componentes do vagão, uma roda ovalizada produz forte ruído durante o tráfego (ZHANG, 2014; XUE-SONG 2014; JOHANSSON, 2006). Este problema é agravado com o aumento da velocidade do trem e, especialmente, torna-se mais crítico quando a ferrovia cruza cidades e regiões povoadas (THAKKAR, 2009).

Madler e Bannasch (2006) mostram que as heterogeneidades tanto da microestrutura quanto das propriedades mecânicas ao longo de toda a pista de rolamento da roda influenciam diretamente na ovalização. Cassidy (2003) relata que a qualidade do material da roda, no que diz respeito a sua homogeneidade e sua maior resistência mecânica, pode retardar o aparecimento de ovalização na roda. Uma roda com propriedades e microestrutura heterogênea desgasta e deforma-se de forma desigual. Regiões de menor dureza desgastam e deformam-se mais que regiões de maior dureza. Como consequência tem-se uma roda ovalizada.

Lewis e Olofsson (2009) também descrevem os efeitos deletérios de rodas ovalizadas sobre o trilho e sobre todo o vagão, contribuindo para quebra de dormentes, danos aos rolamentos, quebra de rodas e aceleração do processo de RCF além dos ruídos, danos ambientais e do desconforto para as pessoas, especialmente para carros de passageiros.

Barke e Chiu (2005), Lewis e Olofsson (2009) descrevem que todo defeito na pista de rolamento de uma roda gera uma ovalização, uma vez que, no local do defeito, com o destacamento ou desgaste irregular do material, ou mesmo uma deformação plástica heterogênea, ocorre uma variação no diâmetro e conseqüentemente uma perda de rotundidade ou circularidade.

Lewis e Olofsson (2009) relatam que vários mecanismos ou problemas podem resultar em uma roda ovalizada, tais como desgaste irregular em torno da circunferência da roda, falhas do sistema de freio, problemas de usinagem da roda, furos e eixo desalinhados, RCF, flats, variações locais na microestrutura do material, deformação plástica, calos e outras acumulações de material na pista da roda. Lewis e Olofsson (2009) classificam e quantificam a ovalização de acordo com o tipo de defeito formado na pista de rolamento, sendo eles defeitos discretos (defeitos com menor magnitude) e grandes deformações ou achatamentos. Os defeitos discretos que geram a ovalização são os *flats*, o *shelling*, a poligonização da roda e pequenos calos.

Segundo Lewis e Olofsson (2009) as corrugações e falhas nos trilhos também geram ovalizações nas rodas. Especialmente se houver uma superposição de efeitos, ou seja, um trilho corrugado ou com defeitos, por exemplo, atrelado a canoamento e roda aquecida devido frenagem. As cargas de impacto aceleram o processo e estando o material aquecido pela operação de frenagem, sua resistência ao escoamento é diminuída e este pode escoar localizadamente gerando ovalizações.

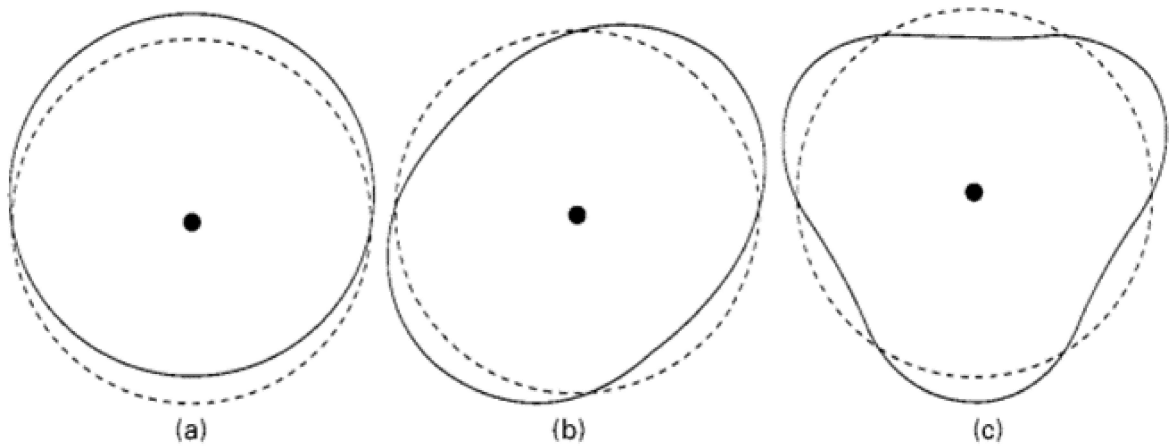
Lewis e Olofsson (2009) sugerem uma classificação para a forma da ovalização baseado na série de Fourier conforme mostrado na Eq. 2.1.

$$\lambda = \frac{2\pi R}{\theta} \quad \text{sendo, } \theta = 1, 2, 3, \dots \quad (2.1)$$

Onde,  $R$  é o raio da roda,  $\theta$  é o número da ordem e  $\lambda$  o comprimento de onda

que determina as irregularidades geométricas na pista de rolamento. Para um dado valor de  $\theta$ , obtém-se uma forma de ovalização. A Figura 10 apresenta as formas possíveis de ovalizações, para valores de “ $\theta$ ” variando de 1 a 3. Para a condição apresentada na figura 10 (a) onde  $\theta=1$ , tem-se uma perfeita excentricidade causada normalmente por desalinhamento do furo da roda (cubo a ser eixado) em relação a pista de rolamento ou desalinhamento na fixação da roda durante o reperfilamento. Para o caso da figura 10 (b) onde  $\theta=2$ , tem-se uma roda de fato oval. A condição da figura 10 (c) representa um  $\theta=3$ .

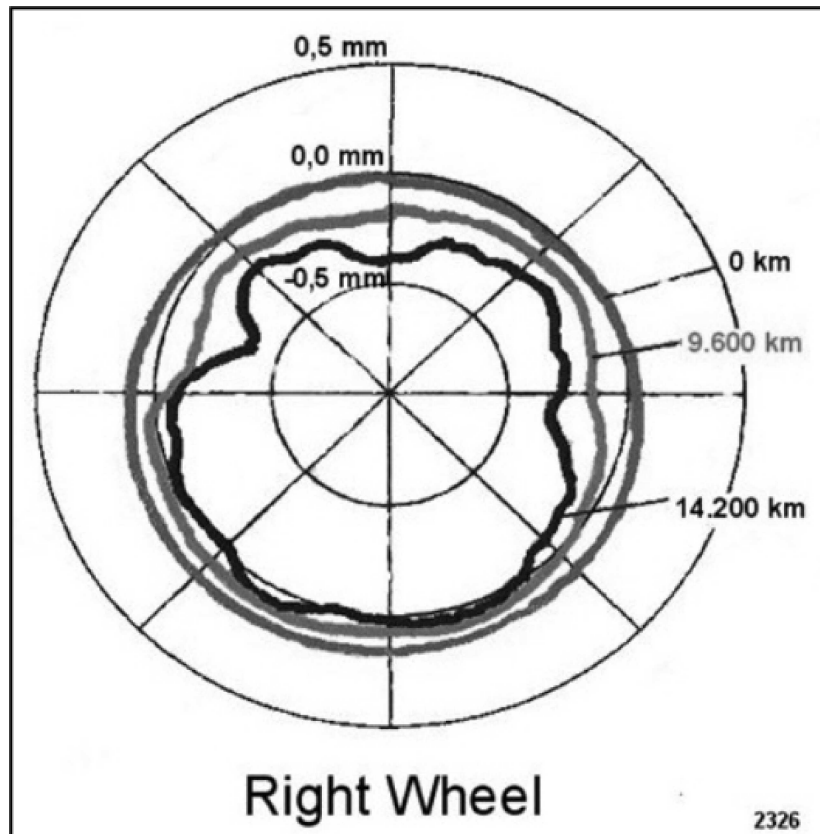
Figura 10 – Exemplos de diferentes tipos de rodas ovalizadas.



Fonte: Adaptado de Lewis e Olofsson (2009).

Reinschmidt *et al.*, (2015) relatam que quando a pista de rolamento da roda apresenta um desgaste ondulatorio, não homogêneo, deixando essa superfície ovalizada, a causa raiz para sua ocorrência é uma usinagem fora de centro ou montagem em um eixo desgastado. A Figura 11 apresenta esquematicamente uma roda ovalizada, ou seja, fora do centro, devido a formações de defeitos, poligonização ou ainda desgaste não homogêneo ao redor da circunferência da roda.

Figura 11 – Ovalização de roda ferroviária.



Fonte: Reinschmidt *et al.*, (2015).

Conforme descrito, todos os modos de falha apresentados na pista de rolamento das rodas bem como heterogeneizadas microestruturais, podem culminar com a ovalização ou *out-of-round wheels*. Desta forma, faz-se necessário uma revisão dos diversos mecanismos de desgaste que levam a falhas em rodas ferroviárias aplicadas no *heavy haul* para melhor entendimento do processo.

### 2.3.5 Trincas Térmicas

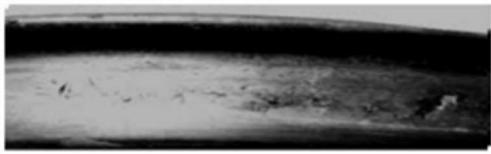

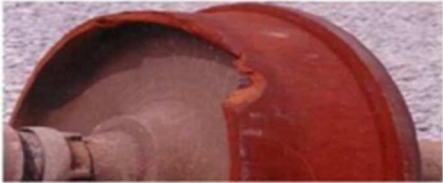
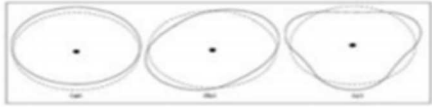
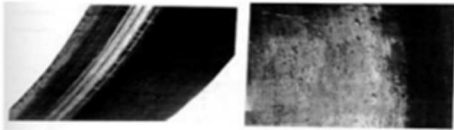

As trincas térmicas podem ser originadas em rodas ferroviárias devido ao aquecimento e subsequente resfriamento. A elevação da temperatura pode resultar na deformação plástica do material por compressão devido à restrição da expansão térmica na direção circunferencial (MAGEL e KALOUSEK, 1996). Após isso, quando o material é resfriado, tensões residuais nativas na direção circunferencial são induzidas na superfície da roda, o que leva ao surgimento de trincas. As trincas térmicas são diferenciadas visualmente das trincas de fadiga devido ao comprimento e à orientação que apresentam (MAGEL e KALOUSEK, 1996). Na superfície da roda, enquanto as trincas de fadiga tendem a ser estreitas, alongadas e apresentarem diferentes ângulos, as trincas térmicas geralmente apresentam separação entre as superfícies da trinca e sempre são orientadas axialmente (MAGEL e KALOUSEK, 1996).

### 2.3.6 Deep Shelling

Segundo Verly (2018), o *deep shelling* consiste numa falha que se dá inicialmente pela nucleação da trinca subsuperficial a pista da roda ferroviária. A trinca nucleada no aro propaga-se em uma direção circunferencial e ao redor da superfície de rolamento da roda até que ocorra a fratura final, expandindo-se na direção da superfície da pista, ou ainda, mas não muito comum, para o cubo (LEWIS, 2009; REINSCHMDT, 2015). A principal causa das falhas oriundas do aro são a alta tensão de contato do conjunto roda- trilho e os defeitos do material da roda que diminuem sua resistência à fadiga (VERLY,2018).

A Figura 12 sumariza esses principais defeitos.

Figura 12 – Defeitos nas rodas.

<p><b>1. SPALLING</b> (lascamento)</p>	
<p><b>2. SHELLING</b> (escamação)</p>	
<p><b>3. VERTICAL SPLIT</b> (fenda vertical)</p>	
<p><b>4. OUT-OF-ROUND WHEEL</b> WHEEL (Ovalização)</p>	
<p><b>5. TRINCAS TÉRMICAS</b></p>	
<p><b>6. DEEP SHELLING</b></p>	

Fonte: Barbosa (2018).

Na Tab. 6, Alves (2000) expõe um sumário dos mecanismos de danos microestruturais em aços de rodas devido à combinação de deformação plástica e temperaturas, baseando-se nas conclusões de Sehitoglu (1996).

Tabela 6 – Mecanismos de danos Microestruturais.

**FADIGA TERMOMECÂNICA -SUMÁRIO DOS MECANISMOS DE DANOS MICROESTRUTURAIIS**

**AÇOS DE RODAS FERROVIÁRIAS**

FADIGA TERMOMECÂNICA - MÁXIMA TEMPERATURA COINCIDE COM A MÁXIMA DEFORMAÇÃO	FADIGA TERMOMECÂNICA - MÁXIMA TEMPERATURA COINCIDE COM A MÍNIMA DEFORMAÇÃO
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crescimento de trincas nos contornos das colônias de perlita; interfaces perlita-ferrita;</li> <li>• Ataque interno pelo oxigênio às partículas de MnS;</li> <li>• Esferoidização da perlita lamelar;</li> <li>• Coalescimento da perlita lamelar;</li> <li>• Transformação de fase CCC - CFC</li> <li>• Recristalização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efeito do envelhecimento por deformação devido a exposição a elevadas temperaturas, seguida por baixas temperaturas;</li> <li>• Formação e fratura repetida de óxidos;</li> <li>• Ataque interno pelo oxigênio às partículas de MnS;</li> <li>• Esferoidização da perlita lamelar;</li> <li>• Coalescimento da perlita lamelar.</li> </ul>

Fonte: Alves 2000.

## 2.4 ESFEROIDIZAÇÃO DA PERLITA

A esferoidização é um processo de ajuste morfológico que se dá sob a ação da energia superficial, onde ocorre uma evolução microestrutural da perlita pelo mecanismo de coalescimento, com conseqüente formação de carbonetos globulares em uma matriz ferrítica (FAGUNDES, 2006). Partículas de cementita lamelar, presentes na perlita, têm uma área de superfície por unidade de volume de partícula muito grande, e, portanto, uma elevada energia interfacial. Afim de reduzir esta energia, as lamelas de cementita ou placas se quebram em pequenas partículas que eventualmente assumem forma esférica. Uma vez quebrada as lamelas, as menores partículas esféricas se dissolvem às custas do crescimento das maiores, novamente em função da redução da energia interfacial (FAGUNDES, 2006).

Seguindo o esquema de Samuel (1980), o processo se define em algumas fases, sendo elas:

1. As placas de cementita que compõe a perlita são quebradas em intervalos relativamente regulares por crescimentos de canais dentro da placa.
2. Acontece a redução progressiva dos fragmentos das placas a valores mínimos que se esferoidizam.
3. O diâmetro das esferas é aumentado através de crescimento cooperativo ou coalescimento onde as esferas maiores crescem através da eliminação das esferas menores.

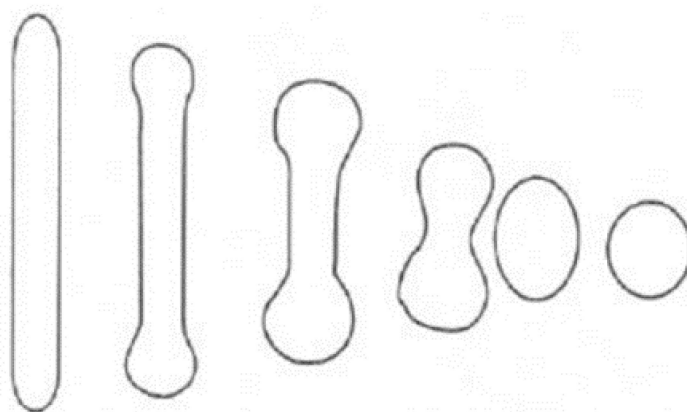
Contextualizando a esferoidização da perlita nas rodas de trilho, segundo Samuel (1980), a mesma pode ocorrer em aços que operam por longos períodos em temperaturas



elevadas, cuja situação se encaixa na situação de operação das ferrovias. A partir de conhecimentos das mudanças estruturais que podem ocorrer, pode-se tentar estimar o ciclo térmico a que um aço foi submetido a partir das observações dessas mudanças, podendo então prevenir o acontecimento.

Esse processo na perlita apresenta-se como um risco potencial nas rodas e possível causa da queda das propriedades mecânicas, levando a defeitos importantes como *shelling* e *deep shelling*. Tal processo pode ocorrer por mudança na microestrutura, na geometria, composição química e até mesmo no processo de fabricação da peça. A Figura 13 mostra esquematicamente esse processo.

Figura 13 – Efeito do raio de curvatura de uma partícula sobre a esferoidização.



Fonte: Schastlivtsev, 1994.

A deformação plástica produz sub-contornos na cementita que tomam forma arredondada por difusão, dirigida pelo gradiente de potencial químico na interface ferrita-cementita. O arredondamento da interface avança nas arestas de cementita até completar a banda da ferrita, formando esferoides do carboneto e separando a ferrita da cementita (SEHITOGLU, 1996).

Segundo Caruso e Godet (2010), um aspecto importante na aceleração da cinética de esferoidização é que, a laminação a frio pode acelerar fortemente esse fenômeno. A grande deformação leva a fragmentação e até dissolução das lamelas de cementita. Essa fratura mecânica acelera significativamente a cinética de esferoidização pois permite que o processo de difusão lenta de crescimento do defeito seja evitado. Nota-se então que, a deformação das lamelas de cementita acelera a esferoidização pois produz um grande número de defeitos nas lamelas, contribuindo morfológicamente para o processo.

Outra observação importante, afirmada por Caruso e Godet (2010) é que a grossura do grão da perlita tem influência no grau de dificuldade da esferoidização, através de seus estudos é possível verificar que quanto mais grosso for o grão da perlita, mais se encontrará

dificuldades para esferoidização. A taxa de esferoidização diminui com o aumento do espaçamento interlamelar. A perlita mais grossa, que é formada em temperaturas mais altas, possui intrinsecamente menos defeitos que a fina e, por isso, há maior dificuldade para a difusão das partículas, então, o tempo necessário para atingir a fratura da lamela pelo crescimento dos defeitos é proporcional à espessura da lamela.

#### 2.4.1 Consequência da Esferoidização

Uma das mais importantes consequências da esferoidização da perlita é a perda da resistência mecânica e da dureza. Isso culmina com a deformação plástica do material durante o uso. Essa situação deixa as rodas mais suscetíveis a defeitos importantes relacionados com a deformação. Conforme Kalousek (1996), sabe-se que, ocorre uma transição de desgaste moderado para severo, caracterizado por deformação plástica devido ao contato entre as asperezas dos corpos em contato. Ademais, pode acontecer um processo de laminação, que se dá por nucleação e crescimento de trincas sub-superficiais que propagam para a superfície destacando material. Fato similar à formação de *shelling*. Quando se passa de perlita fina para média ou grossa, ou mesmo perlita esferoidizada, cujos espaçamentos entre carbonetos são muito grandes, uma vez que o substrato tem uma maior deformação plástica durante a aplicação dos esforços, rompe-se o filme de óxido da interface, passando-se a haver contato direto entre as asperezas dos corpos em contato.

Segundo Alves (2000), na operação das rodas, um aquecimento gerado pela frenagem consegue alcançar temperaturas (em torno de 650°C) em que as lamelas de cementita fraturadas pela deformação da esferoidização aglutinam-se, reduzindo a energia de superfície, o que leva a uma microestrutura com menos resistência do que a da perlita lamelar, sendo mais susceptível a deformação plástica. Além disso, existe a possibilidade da ocorrência da transformação austenítica, formando possivelmente (a depender da velocidade de resfriamento) uma microestrutura de elevada dureza e fragilidade (martensita).

Em Magel e Kalousek (1996) e Lewis e Olofsson (2009) relatam que o processo de deformação plástica é facilitado pelo aumento da temperatura. Durante o uso, devido às operações de frenagem o material da roda é aquecido. Esse aquecimento reduz a resistência mecânica do aço o que facilita sua deformação plástica. A combinação de cargas térmicas geradas na frenagem e de elevadas cargas mecânicas a que estão sujeitas as rodas, como já citado anteriormente, pode causar alterações microestruturais no seu material. Estas alterações poderão vir a reduzir mais ainda sua resistência mecânica ou ainda fragilizar o material devido à formação ou precipitação de microconstituente de elevada dureza e ou baixa ductilidade. Todo esse processo acaba levando à ovalização e a formação de defeitos na pista conforme mostrado na seção 2.2.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Um dos objetivos específicos desse trabalho foi avaliar a influência da deformação plástica na cinética e ocorrência de esferoidização em um material puramente perlíticos. Dessa forma, deu início com a escolha da amostra de aço eutetóide ABNT 1080 formado por perlita pura, material similar ao utilizado nas rodas de trem.

Foram cortadas em 12 corpos de prova que mediam em torno de 5,5 mm de diâmetro e 10,5 mm de comprimento.

Primeiramente, um corpo de prova foi reservado para servir de comparação sem ter sua microestrutura alterada. Os demais foram aquecidos em um forno por 30 minutos a temperatura de 250 graus Celsius que corresponde a temperatura de operação de roda. Após, foram deformados manualmente com uma marreta e novas medidas foram retiradas. Essa etapa inicial foi desenvolvida no Laboratório de Processos da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora.

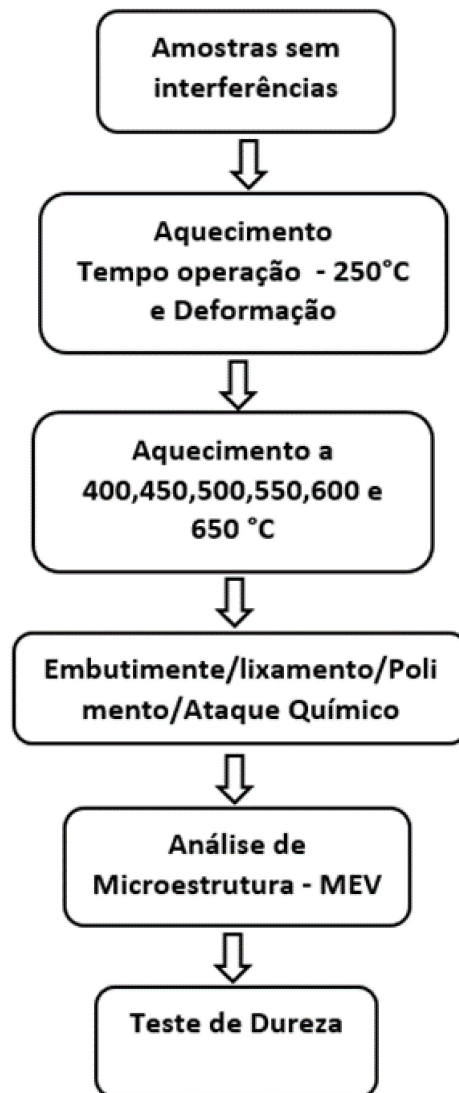
Na Tab. 7 encontra-se as dimensões dos corpos de prova que foram deformados e que seriam mais uma vez aquecidos e seguiriam os processos da figura 14.

Tabela 7 – Dimensões dos corpos de prova.

	Sem deformação		Com Deformação	
	Comprimento	Diâmetro	Comprimento	Diâmetro
1	10,6 mm	5,6 mm	9,10 mm	6,00mm
2	9,65 mm	5,55 mm	7,30 mm	6,01 mm
3	10,3 mm	5,40 mm	8,70 mm	6,85 mm
4	9,45 mm	5,50 mm	7,70 mm	6,40 mm
5	10,15 mm	5,40 mm	7,25 mm	7,00 mm
6	9,90 mm	5,70 mm	7,25 mm	7,20 mm
7	10,5 mm	5,60 mm	7,40 mm	6,65 mm
8	10,0 mm	5,65 mm	7,1 mm	7,45 mm
9	10,35 mm	5,50 mm	7,25 mm	8,00 mm
10	10,85 mm	5,40 mm	8,45 mm	8,65 mm
11	10,4 mm	5,70 mm	6,55 mm	8,30 mm
12	8,70 mm	5,40 mm	-	-

Fonte: A autora.

Figura 14 – Procedimentos



Fonte: A autora.

Devido a pandemia do COVID-19, e as situações que se encontravam as universidades, não foi possível realizar o restante do trabalho prático de aquecimento, tratamento e análise dos corpos de prova. Um dos trabalhos utilizados como base foi o de Barbosa (2018) cujo instrumento de pesquisa foi uma amostra retirada de uma roda fundida, micro-ligada com propriedades equivalentes à AAR M107/208 classe D. Os testes realizados por Barbosa (2018) seriam os mesmos aplicados ao presente trabalho. Porém, num material com microestrutura 100% perlita lamela fina, sem nenhuma alteração. O material aço ABNT 1080 que serviria de instrumento para os testes era uma barra redonda trefilada, que serve de matéria prima para fabricação de arames para pneus. Esse material, quando processado corretamente, atinge propriedades mecânicas fantásticas, com limite de resistência atingindo valores superiores à 4.000 MPa.

Os experimentos inicialmente previstos seguiam a sequência a apresentada na figura 14 que era aquecer novamente as amostras pares com diferentes temperaturas que seriam elas de (400, 450, 500, 550, 600, 650°C), embuti-las e prepara-las através de seu lixamento, polimento e ataque químico, para que houvesse uma análise final da microestrutura através da técnica de microscopia eletrônica de varredura.

### 3.2 PROCESSO DE OVALIZAÇÃO

Esse tópico do trabalho, como já citado no escopo, faz parte do projeto Cátedra Roda-Trilho desenvolvido pela UFJF, sob coordenação do Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves, com o título “Fatores que levam a falhas como ovalização e fratura de rodas empregadas no *heavy haul* e sua relação com os processos de fabricação”. Essa parte refere-se ao estudo das causas de ovalização de rodas devido ao material da roda.

Para avaliar o processo de ovalização e sua relação com a microestrutura, selecionou-se uma roda de 33 polegadas, número de série 1809Z, que em sua primeira vida apresentou ovalização de até 8,2 mm durante o uso com forte escoamento de material de um lado da roda. Para a caracterização completa foi realizado as seguintes análises:

1. Análise visual e dimensional;
2. Ensaio de dureza;
3. Ensaio metalográficos.

Os ensaios foram realizados nos laboratórios de processo e de metrologia da UFJF, exceto as análises micrográficas, que foram realizadas no Laboratório de Fenômenos de Superfície da USP. Para essas análises empregou-se Microscopia óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Os ensaios de dureza também foram realizados no laboratório de metalografia da UFJF. Dispôs-se do Durômetro Rockwell EQUILAM Modelo EQTSM, com carga de 150 kgf e Indentador de Diamante. Todos os ensaios foram realizados na temperatura ambiente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE VISUAL E DIMENSIONAL

A Figura 15 apresenta a roda, objeto do estudo. Percebe-se pela figura 15 a ocorrência de um expressivo escoamento de material de um lado. Do lado oposto, a deformação foi muito pequena.

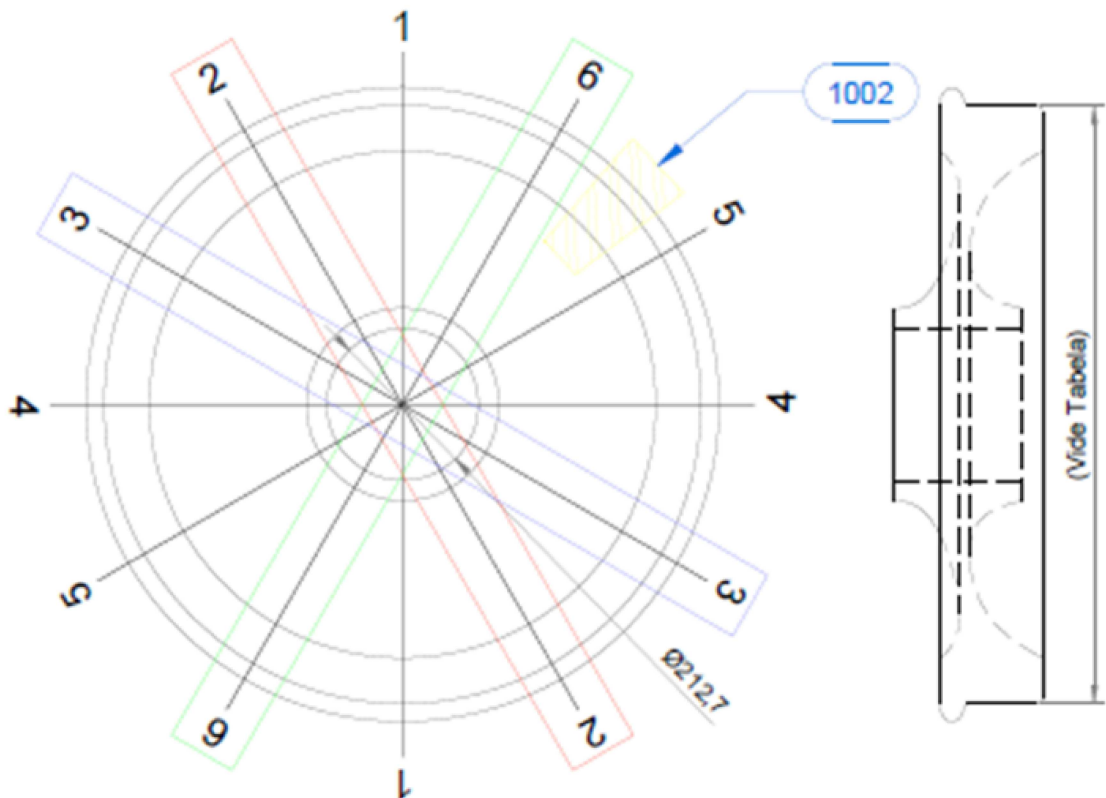
Figura 15 – Roda de 33 polegadas modelo CP33 empregada na EFVM.



Fonte: A autora.

Para análise dimensional a peça foi dividida em diâmetros, conforme mostrado na figura 16. As medições foram realizadas usando paquímetro. A Tabela 8 apresenta os resultados das medições.

Figura 16 – Desenho esquemático dos pontos de medição dos diâmetros da roda.



Fonte: A autora.

Tabela 8 – Resultado das Medições dos diâmetros.

<b>Roda número de série 1809Z</b>			
	Posição	Diâmetro (mm)	Diferença maior-menor
	1	826,5	1,9
	2	830,5	5,9
<b>Maior Diâmetro</b>	3	832,8	8,2
	4	832,2	7,6
	5	829,1	4,5
<b>Menor Diâmetro</b>	6	824,6	0

Fonte: A autora.

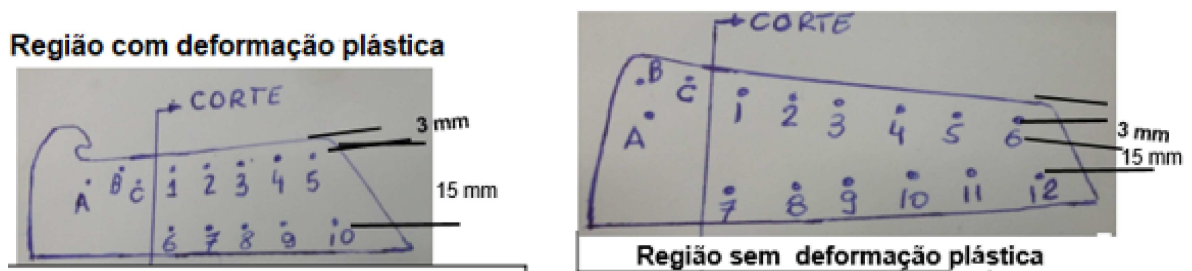
A Tabela 8 expõe as medições dos diâmetros em milímetro encontrados nas indicações conforme a figura 16. Percebe-se que a maior diferença entre os diâmetros é da

posição 3 e 6 cujas medidas foram 832,8 e 824,6 mm. Diferença de 8,2 mm do maior diâmetro encontrado para o menor.

#### 4.2 ENSAIO DE DUREZA

A tabela 9 mostra a dureza HRC dos lados da roda. O lado com muita deformação apresentou durezas significativamente menores do que o lado que foi pouco deformado, chegando a apresentar durezas 20% menores do que do lado com pouca deformação.

Figura 17 – A Figura mostra as regiões onde foram medidas as durezas, apresentadas na tabela 9.



Fonte: A autora.

Tabela 9 – Valores coletados das durezas.

LADO COM MUITA DEFORMAÇÃO		LADO COM POUCA DEFORMAÇÃO	
PONTO	Dureza HRC	PONTO	Dureza HRC
A	34,5	A	40
B	36	B	44
C	35	C	44
1	34	1	37
2	34	2	37
3	34	3	36
4	33	4	34
5	31,5	5	33
6	32	6	33,5
7	31	7	34
8	27	8	34
9	30	9	34
10	31	10	33

Fonte: A autora.



#### 4.2.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

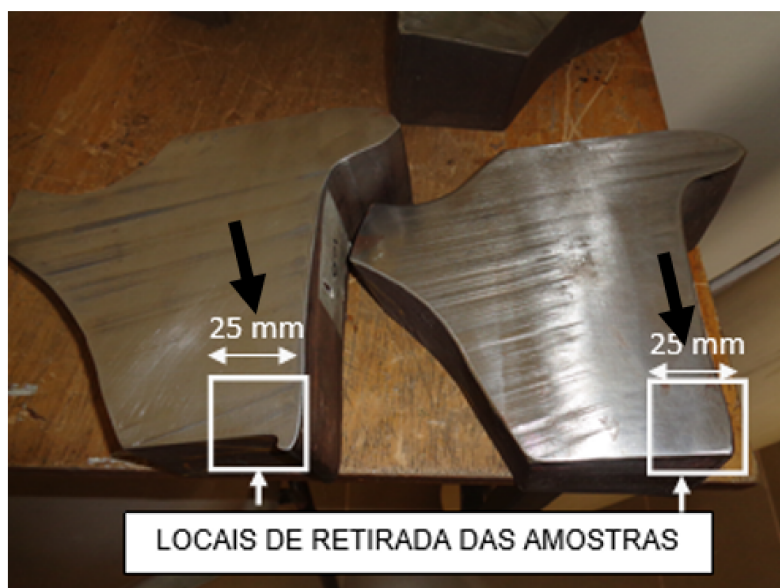
As análises microestruturais foram realizadas em amostras retiradas a partir da pista de rolamento das rodas. Os cortes foram realizados com serra refrigerada para evitar alteração na microestrutura como pode ser verificado na figura 18. A Figura 19 mostra o ponto correto da análise. A setas brancas apontam a região que foi feita análise e a seta preta a face.

Figura 18 – Local de retirada das amostras.



Fonte: A autora.

Figura 19 – Local de retirada das amostras.

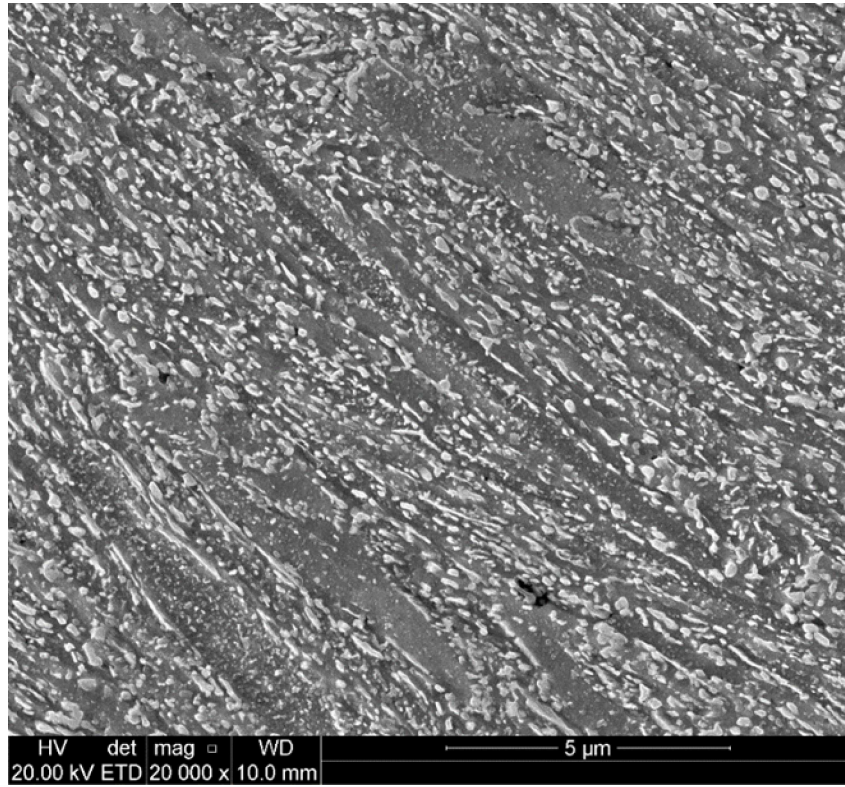


Fonte: A autora.

#### 4.2.2 Microestrutura no lado muito deformado.

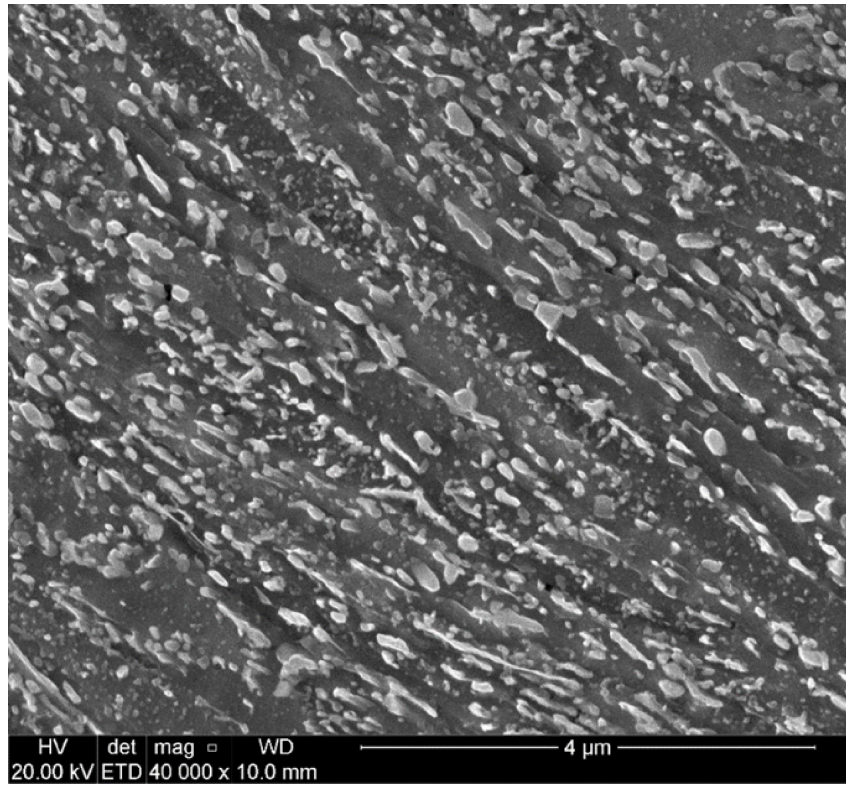
As Figura 20, 21, 22 apresenta, a microestrutura próxima a pista de rolamento.

Figura 20 – Microestrutura do lado muito deformado (Pista).



Fonte: A autora.

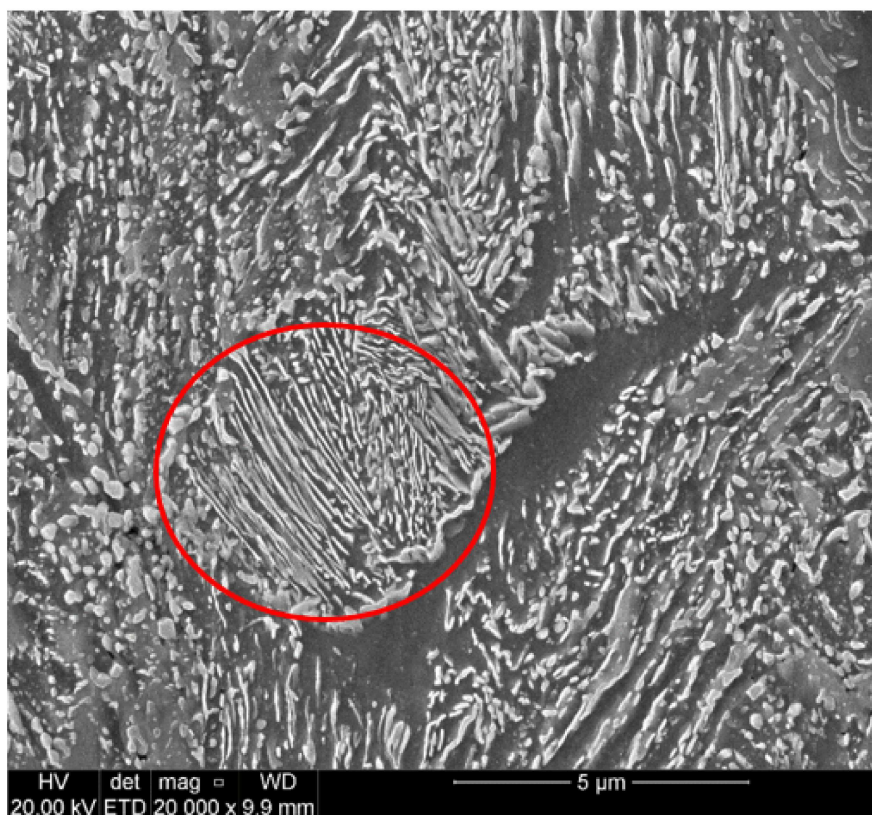
Figura 21 – Microestrutura do lado muito deformado (1 mm Pista).



Fonte: A autora.



Figura 22 – Microestrutura do lado muito deformado (10 mm da pista).



Fonte: A autora.

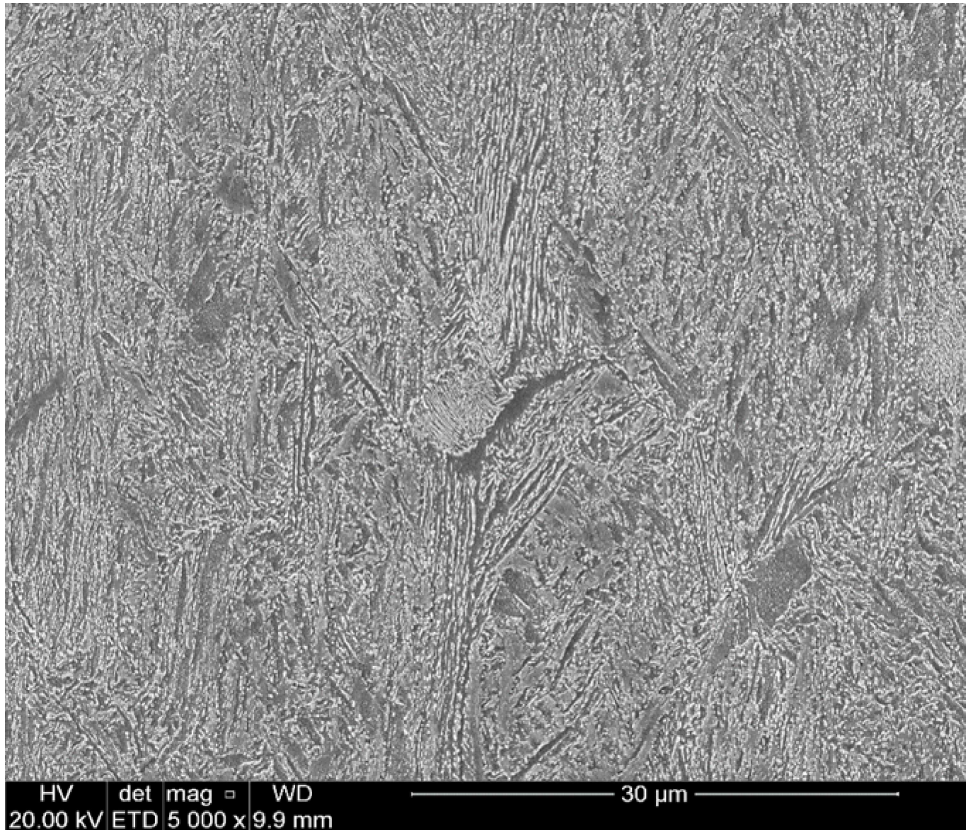
Percebe-se pela figura 20 que a microestrutura está alinhada no sentido da deformação. Além disso, a microestrutura está totalmente fragmentada, vide carbonetos fragmentados e em processo de esferoidização. A figura 21 apresenta uma ampliação da figura 20, possibilitando a nítida visão dos carbonetos bem esferoidizados e fragmentados.

Conforme apresentado na seção de fundamentação teórica sobre a esferoidização, tal como a teoria de Samuel (1980) e Caruso e Godet (2010) observa-se a fragmentação e até dissolução das lamelas de cementita, algo que parece ter ocorrido nos testes deste trabalho, sendo possível assim, observar o processo descrito pelos autores em suas teorias que foi apresentado na seção 2.3.

A figura 22 apresenta a microestrutura da região deformada de camadas mais profundas a 1mm da pista. No círculo vermelho, ainda é possível identificar a presença de colônias de perlita lamelar. Em alguns pontos é possível verificar a perlita fragmentada, o que é um forte orientativo de que a deformação plástica somada ao calor oriundo do processo de frenagem, acelera o processo de esferoidização.

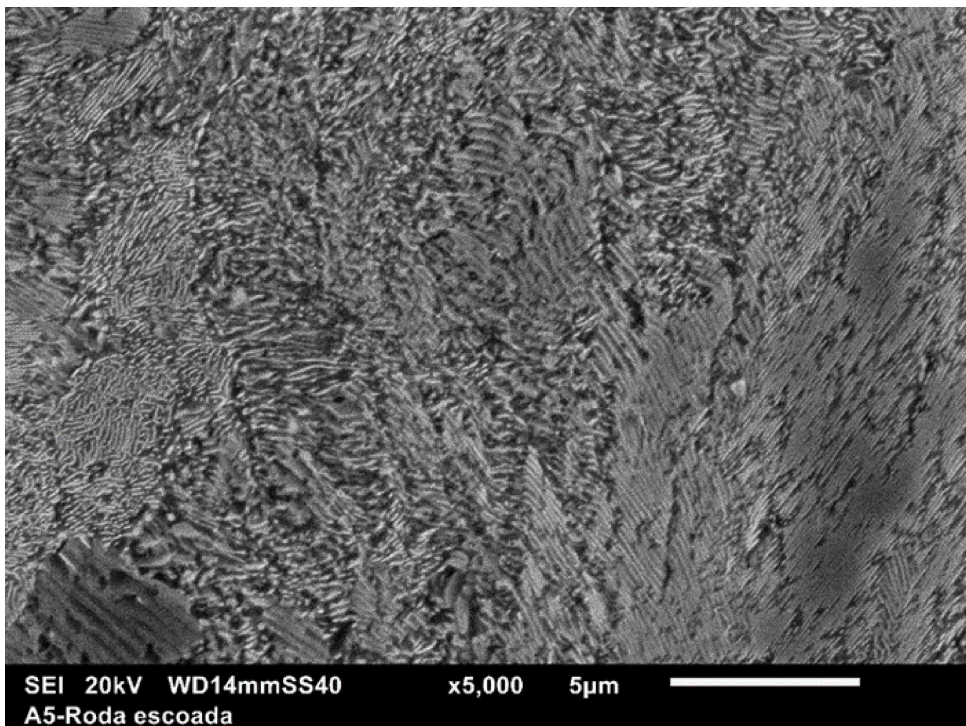
#### 4.2.3 Microestrutura do lado com pouca deformação

Figura 23 – Microestrutura do lado pouco deformado (Pista)



Fonte: A autora.

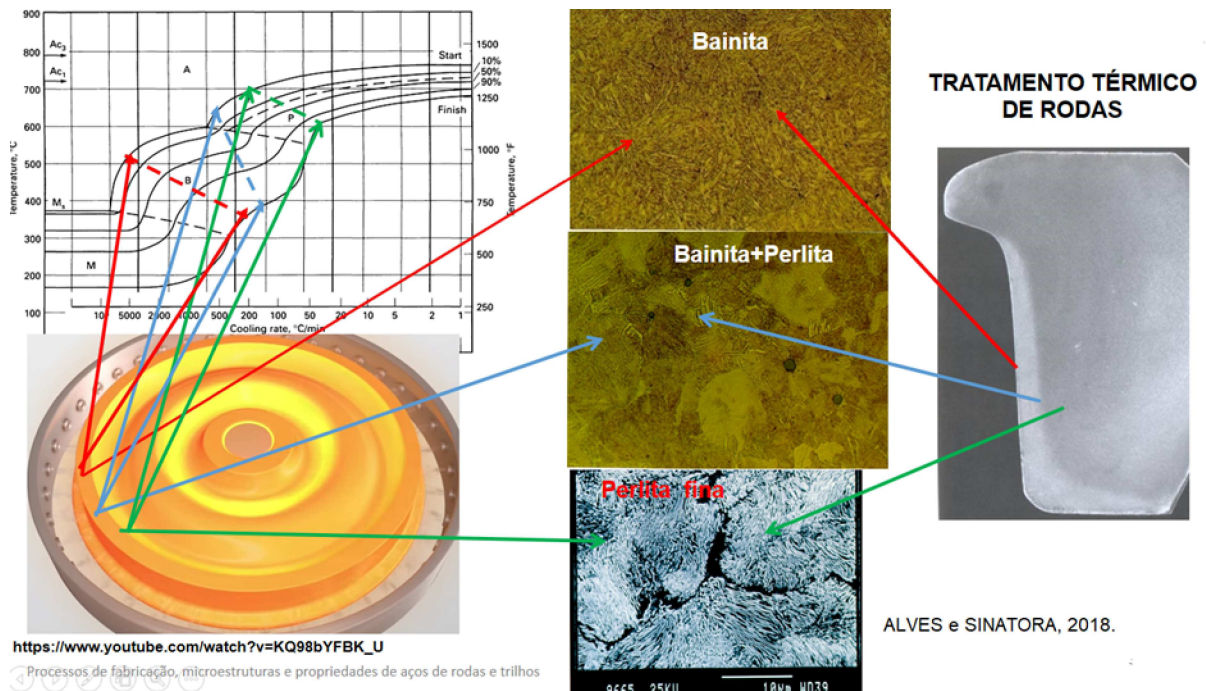
Figura 24 – Microestrutura do lado pouco deformado (10 mm da pista).



Fonte: A autora.



Figura 25 – Diagrama CCT. Alves



Fonte: Sinatora, 2018.

A figura 23 mostra o lado pouco deformado da roda, é possível observar a presença de bainita, explicado pelo fato de que as pistas de rolamento de rodas ferroviárias passam por tratamentos térmico que influenciam na microestrutura do material. A cinética da esferoidização está diretamente relacionada com a microestrutura de partida. Badeshia (2001, p.91-115) relata que as transformações na microestrutura durante o revenimento são tanto mais rápidas quanto mais metaestáveis são as microestruturas. Dessa forma a cinética da esferoidização é maior na martensita, seguido da bainita, perlita fina e por último perlita grossa. A pista é austenitizada a  $880^{\circ}\text{C}$  e em seguida é feito o resfriamento brusco com água em forma de jato como é visto na figura 25. Na parte inferior da figura 25, nota-se uma roda ferroviária que vai receber o resfriamento, os bicos em volta da carenagem são tubos por onde passam a água que será injetada somente na pista de rolamento da roda. Esse resfriamento é um tratamento térmico diferencial que induz tensões de compressão na roda. A linha vermelha indica a parte da pista de rolamento que tem sua transformação dentro do campo da bainita. A linha azul é um pouco mais profunda e a transformação começa no campo da bainita e termina no campo da perlita, logo a microestrutura é uma mistura de ambas. Já na profundidade subsequente, que é representada pela seta verde, encontra-se a perlita fina que é o produto principal da roda. A imagem da direita (figura 25) é uma macrografia da secção da roda, sendo a região clara a bainita e a região mais escura onde se encontra a perlita fina.

A figura 24 é a parte pouco deformada em camadas mais profundas com a detecção de perlita, correspondente a seta 3 da figura 25 (seta verde).

### 4.3 DISCUSSÃO

Como uma consequência importante da deformação plástica e da esferoidização da perlita percebe-se a ocorrência de ovalização que, segundo Lewis e Olofsson (2009), pode ser oriundo de mudanças na microestrutura e por deformação plástica. Ainda pelo critério de Lewis e Olofsson (2009), se analisarmos as posições de maior diferenciação da medida de diâmetro, pode-se caracterizar a ovalização com  $\theta = 3$ , aproximadamente.

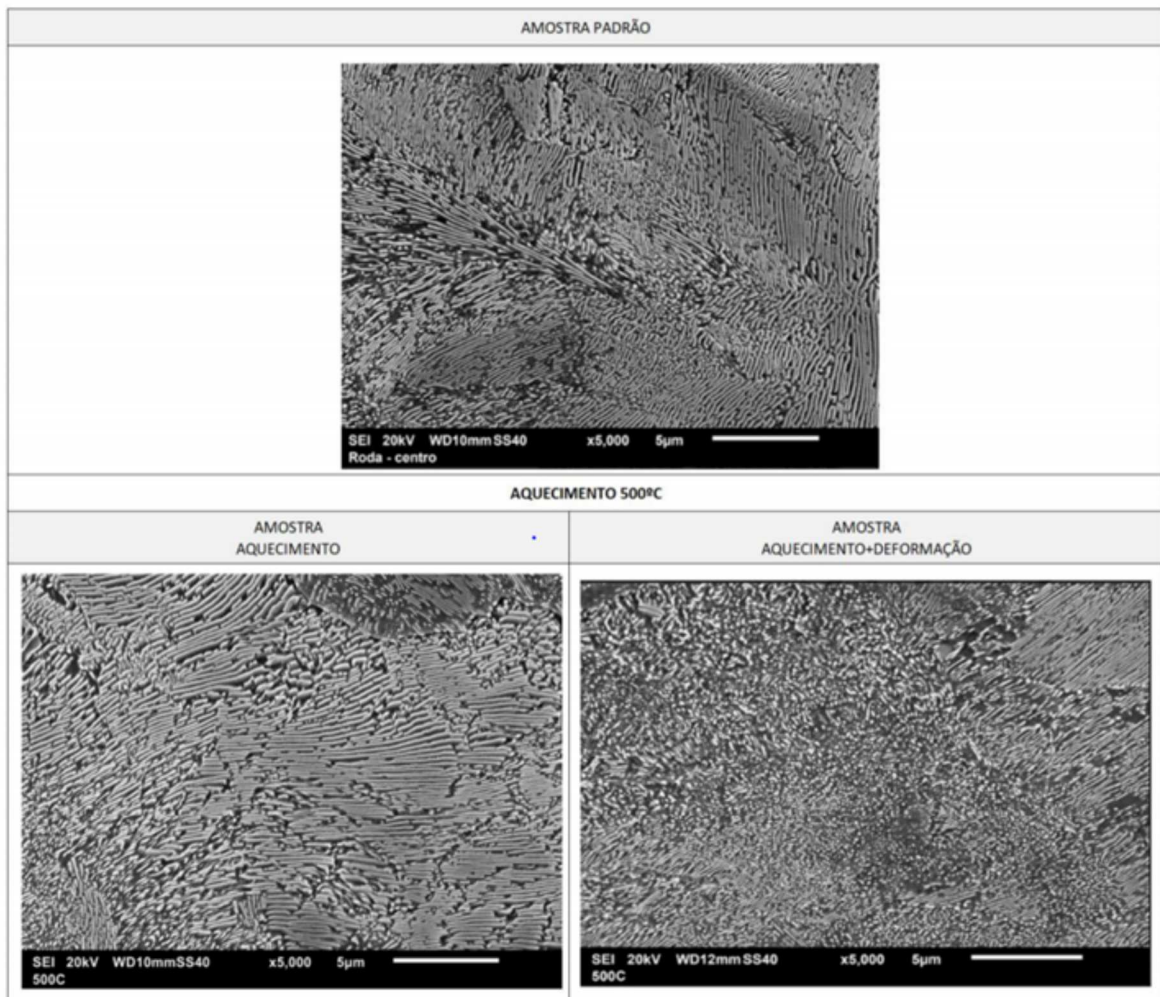
A roda utilizada e analisada neste trabalho encontra-se com um lado mais deformado que outro e com mudanças no diâmetro, explicitadas pela tabela 8, caracterizando a ovalização, (VASAUSKAS *et al.*, 2005; BEHR, 2013; VYAS; GUPTA, 2006; THAKKAR, 2009; STEFFENS, 2005; MADLER E BANNASCH , 2006; MULLER *et al.*, 2013). Além disso, é observado que a microestrutura esferoidizada é mais evidenciada no lado mais deformado. Na figura 22, é fácil perceber que a maior parte da estrutura é formada por lamelas, já na figura 20, constata-se presença de pequenos glóbulos esferoidais. Portanto, os resultados se comparados com os descritos na literatura são esperados, convergindo para o fato de que o lado da roda de deformação possui mais perlita esferoidizada e também foi afetada mais bruscamente pela ovalização.

Com os resultados gerados pelo projeto Cátedra, foi possível ver que, pelo teste de dureza, o lado com maior deformação possui durezas de 10 a 20% menores do que o lado que não sofreu deformação. Com a análise microscópica da microestrutura, nota-se que, o lado que está mais deformado e sofreu ovalização é o lado esferoidizado. Agrupando os dois resultados, tem-se que, com a perlita esferoidizada, o material que sofreu maior deformação regrediu seu nível de dureza e assim tornou-se mais vulnerável a ovalização, evidenciando assim a relação da deformação com o processo de esferoidização.

Assim como no projeto Cátedra, os testes realizados por Barbosa (2018) comparando amostras que sofreram e não sofreram deformação plástica, constataram que as amostras que sofreram apenas aquecimento não possuíam tanta perlita esferoidizada quanto as que foram deformadas.

Observando as fotos apresentadas nas figuras 26, 27, 28, 29, 30, percebe-se que, na temperatura mais alta do ensaio, de  $650^{\circ}C$ , verifica-se uma estrutura toda esferoidizada. Já nas outras temperaturas, pode-se observar a intercalação de colônias esferoidizadas com presença de perlita fina também.

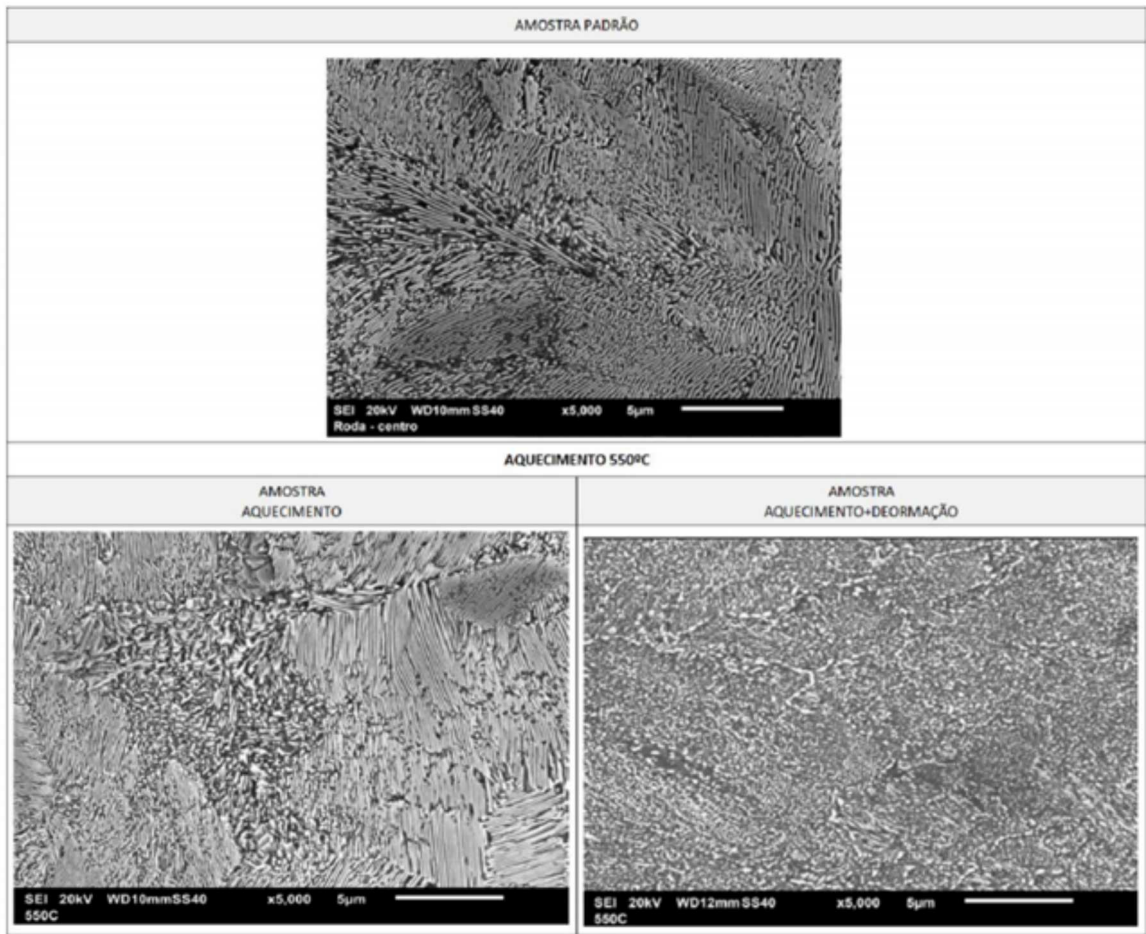
Figura 26 – Comparação entre Amostras Padrão-Aquecida-Aquecida/Deformada – 500°C.



Fonte: Barbosa, 2018.

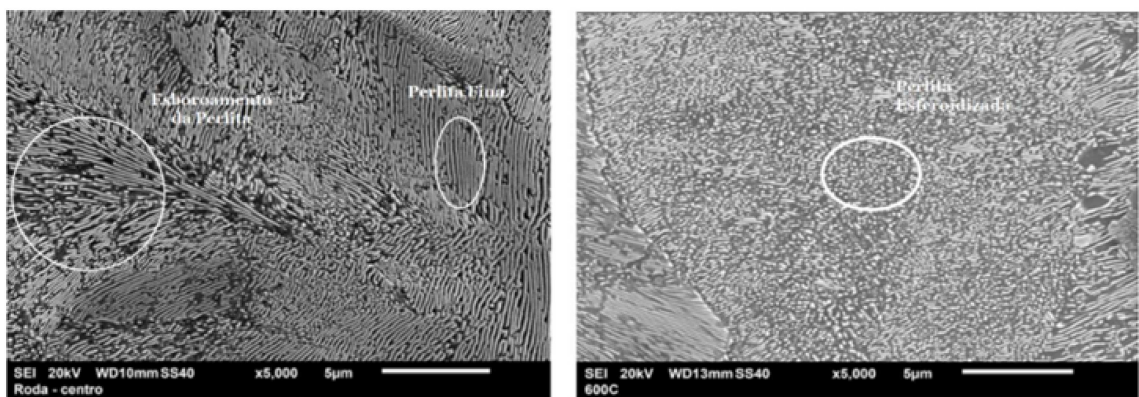


Figura 27 – Comparação entre Amostras Padrão-Aquecida-Aquecida/Deformada – 550°C.



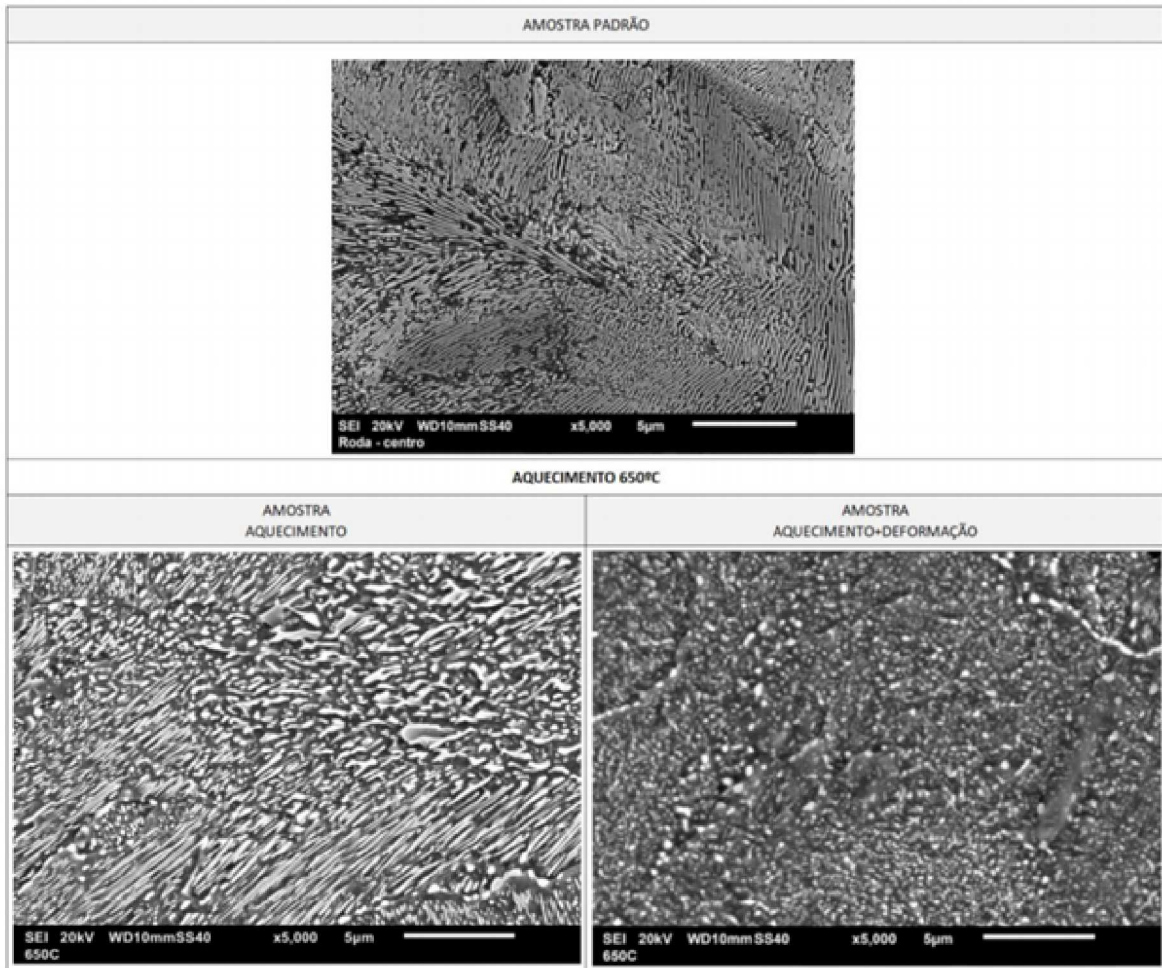
Fonte: Barbosa, 2018.

Figura 28 – Comparação entre Amostras Padrão-Aquecida-Aquecida/Deformada – 600°C.



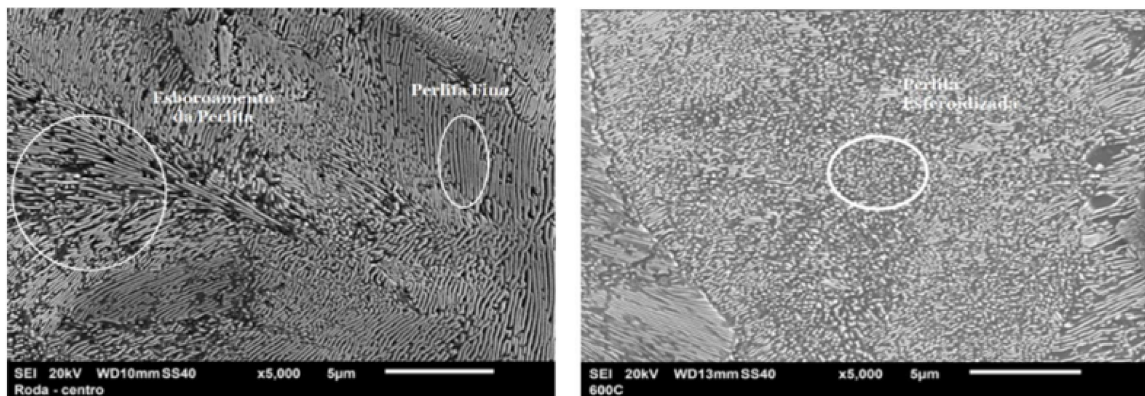
Fonte: Barbosa, 2018.

Figura 29 – Comparação entre Amostras Padrão-Aquecida-Aquecida/Deformada – 650°C.



Fonte: Barbosa, 2018.

Figura 30 – Caracterização das microestruturas perlita fina, perlita esferoidizada e o processo de esboroa-mento da perlita



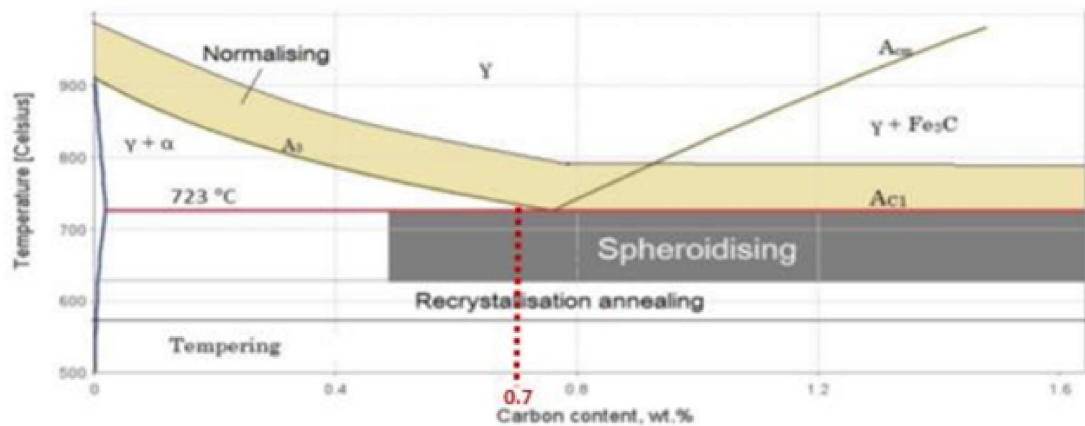
Fonte: Barbosa, 2018.

Num contexto geral, evidencia-se que , experimentalmente, nessas amostras, é

possível ver que os corpos de prova que foram deformados apresentam maior índice de estrutura esferoidizada, tanto no trabalho de Barbosa (2018), quanto no presente trabalho.

Além disso, por essas imagens, é possível identificar que, o processo de esferoidização da perlita no aço utilizado (1070) ocorre em temperaturas abaixo das mostradas na literatura, sendo assim, a deformação é um acelerador da cinética de esferoidização, como mostra a imagem abaixo:

Figura 31 – Diagrama de fase ferro-carbono calculado usando Thermo-Calc indicando temperaturas típicas para tratamentos



Fonte: Barbosa, 2018.

Tabela 10 – Leituras de dureza obtidas para as amostras submetidas ao processo de aquecimento e aquecimento/deformação.

	500 °C		550 °C		600 °C		700 °C	
	Processo de Aquecimento	Processo de Aquecimento + Deformacao	Processo de Aquecimento	Processo de Aquecimento + Deformacao	Processo de Aquecimento	Processo de Aquecimento + Deformacao	Processo de Aquecimento	Processo de Aquecimento + Deformacao
	Dureza Rockwell C - HRC							
1	32,5	21	35	24	32	28	30	23,5
2	34,5	29	32,5	28	33	29	31	26,5
3	35	26	35	26	33	26	30	22,5
4	36	20	33	23	33	29	30	26
5	35	23	34,5	26	35	29	30	22
MÉDIA	35	23	34,5	26	33	29	30	23,5

Fonte: Barbosa, 2018.

Analisando a tabela 10 de comparação de dureza Rockwell C de Barbosa (2018) é perceptível uma diminuição da dureza nas amostras que foram deformadas, comparando-as com as que não foram. Fato que mostra mais uma vez que esses corpos de prova estariam mais esferoidizados e assim, suas durezas sofreram queda considerável.

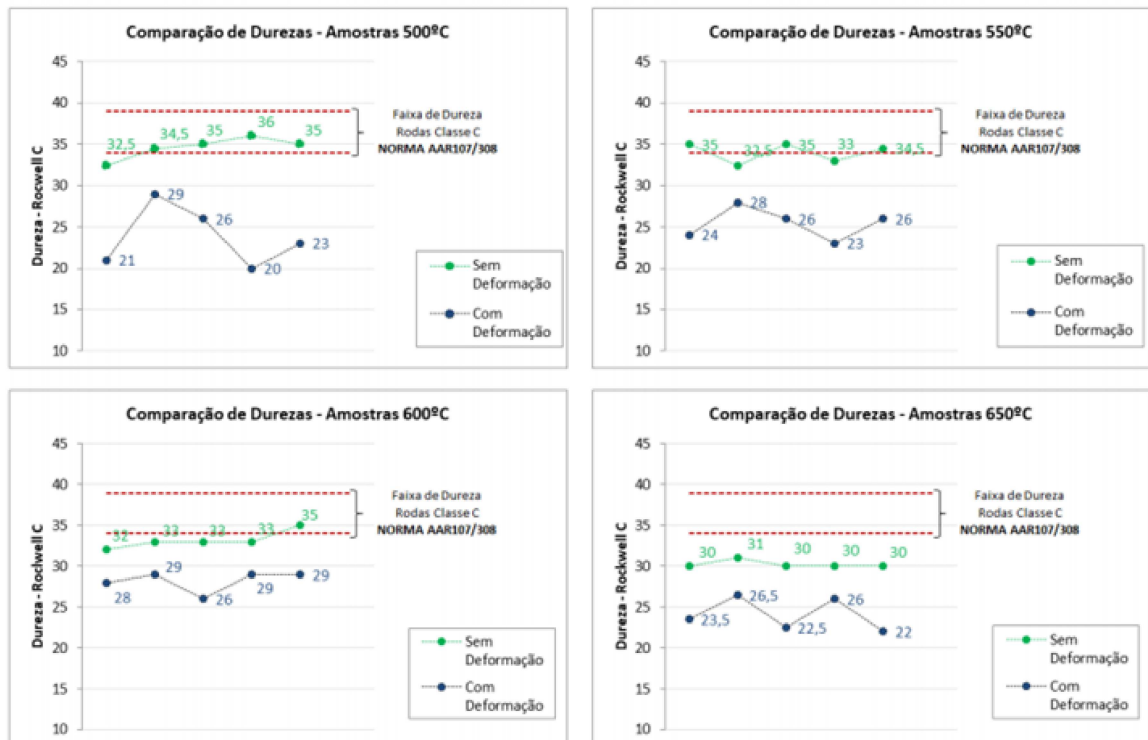


Tabela 11 – Percentual de redução da dureza do material.

T (°C)	Diferença no Percentual de Redução de Dureza
500	34,29%
550	24,64%
600	12,12%
650	21,67%

Fonte: Barbosa, 2018.

Figura 32 – Comparação de durezas entre amostras sem formação e com deformação.



Fonte: Barbosa, 2018.

Pelos gráficos, pode-se concluir que, as amostras que sofreram deformação plástica tiveram sua dureza reduzida comparando-as com as que foram somente aquecidas.

Pela literatura, de acordo com Samuel (1980), os índices de dureza não sofreriam alterações até que um nível de esferoidização fosse alcançado, e após a chegada nesse estágio, a dureza regride até que uma colônia de perlita esferoidizada uniforme se construa. Ou seja, evidenciando mais uma vez que, as amostras que sofreram deformação prévia, teriam uma porcentagem maior de perlita esferoidizada, a ponto de existir uma diminuição no seu grau de dureza.

De acordo com alguns autores, como Samuel (1980) e Caruso e Godet (2010) a deformação pode influenciar a cinética de esferoidização. Caruso e Godet (2010) que utilizam também um aço eutetóide, por exemplo, afirmam que, a deformação a frio leva a fragmentação e até dissolução das lamelas de cementita. Essa fratura mecânica acelera significativamente a cinética de esferoidização pois permite que o processo de difusão lenta de crescimento do defeito seja evitado. Sendo assim, conclui-se que, a deformação das lamelas de cementita pode acelerar a cinética de esferoidização devido a produção de um grande número de defeitos nas lamelas.

Como uma consequência importante da deformação plástica e da esferoidização da perlita tem-se a ovalização que, segundo Lewis e Olofsson (2009), pode ser oriunda de mudanças na microestrutura e por deformação plástica.

A roda utilizada e analisada neste trabalho encontra-se com um lado mais deformado que outro e com mudanças no diâmetro. Além disso, é observado material deformado e microestrutura esferoidizada, tendo mais evidências destes no lado mais deformado. Portanto, os resultados se comparados com os descritos na literatura são esperados, convergindo para o fato de que o lado da roda deformada possui mais perlita esferoidizada e também foi afetada mais bruscamente pela ovalização.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelas análises apresentadas, com as devidas comparações entre os trabalhos e livros de referência, além de artigos utilizados, mostra-se que, sobre a deformação plástica influenciar a esferoidização da perlita:

1. A esferoidização da perlita no aço utilizado nos testes, é de fato maior para as amostras que sofreram maior deformação se comparadas com as que foram somente aquecidas ou sofreram menos, distingue-se nos experimentos que, a porcentagem de perlita esferoidizada é maior nos corpos deformados a mesma temperatura do que nos que não foram.
2. Não é necessária uma deformação tão alta para que ocorra a esferoidização, haja vista as comparações entre o trabalho de Barbosa (2018) com a obra de Samuel (1980). Uma deformação de 10% na roda ferroviária de aço 1070 já é suficiente para que sua microestrutura perlítica, se submetida a temperaturas entre  $500^{\circ}C$  e  $650^{\circ}C$ , sofra esferoidização e esteja susceptível a defeitos severos e possíveis falhas como foi visto.
3. Contextualizando a série de testes e resultados obtidos para o âmbito ferroviário, conclui-se que, a roda em operação submetida a deformações plásticas e a temperaturas entre  $450^{\circ}C$  e  $650^{\circ}C$ , terá sua dureza reduzida em um pequeno intervalo de tempo e sofrerá as consequências. Situação que compromete acintosamente a segurança do transporte em questão.
4. A diminuição da dureza pode facilitar a deformação plástica e o aparecimento da ovalização e o contrário também pode ocorrer. A roda deformada terá mais facilidade em ter a dureza diminuída.
5. Um indicador de que o material está em processo de esferoidização da perlita pode ser a diminuição da dureza do material como aconteceu no aço utilizado em Barbosa (2018). Contudo, somente essa perda de dureza não é suficiente para afirmar a esferoidização, sendo necessário análises de microscópio eletrônico de varredura.

Em um apanhado final, pode-se argumentar que, o processo de esferoidização possui fortes indicadores de ser influenciado pela deformação plástica. Mesmo que os testes apresentados não tenham sido feitos com aços 1080, tendo em vista os aços próximos que foram testados.

Essas conclusões podem ajudar na elaboração de novos tipos de estratégias que protejam melhor o material de uso das rodas de submeterem-se a perdas de durezas importantes para que a operação se torne ainda mais segura e duradoura, favorecendo o

crescimento e custo benefício do transporte ferroviário nacional. Além disso, como já foi apresentado nas partes iniciais desse trabalho, a aceleração do processo de esferoidização pode ser uma vantagem para alguns setores da indústria, como companhias que visam uma maior usinabilidade e outras propriedades que são favorecidas por esse processo. Portanto, para uma questão social e ambiental, este trabalho pode influenciar de forma que, os estudos aqui mostrados possam contribuir para uma menor ocorrência de falhas, aumento da vida útil dos componentes, diminuição da perturbação sonora potencializada pela ovalização e assim auxiliar para que, em locais urbanizados, a população não seja prejudicada por ruídos causados por equipamentos danificados.

## REFERÊNCIAS

- [1] ALVES, L.H. D. Mecanismos de desgaste de rodas ferroviárias. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, Brasil, 2000
- [2] ALVES L.H.D.; SINATORA, A. “Processos de fabricação, microestruturas e propriedades de aços de rodas e trilhos”.2018. ITV.
- [3] AMSTED MAXION [MAXION, 2013; MWL, 2013].
- [4] ANDRADE, M; LACKSYNSKI,P; Artigo Panorama do Transporte Ferroviário no Brasil - Desafios e Oportunidades, FGV projetos, 2015.
- [5] ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD. Manual of Standards and Recommended Practices: Section G, AAR M-107. USA, 2009
- [6] BADESHIA, H. K. D. H. Bainite in Steel. Transformations, Microstructure and Properties. 2 th Edition, 2001. Cambridge.
- [7] BARBOSA, F.F. Influência da deformação plástica no processo de esferoidização da perlita em materiais de rodas ferroviárias com composição próxima de eutetóide. Universidade Federal de Juiz de Fora: 2018. Juiz de Fora
- [8] CARUSO, M; GODET, S; Microstructural Evolution during Spheroidization Annealing of Eutectoid Steel: Effect of Interlamellar Spacing and Cold Working;Advanced Materials Research Vols. 89-pp 79-84, Bruxelles, Belgium, 2010.
- [9] CARVALHO,S.F ; Análise de Contato Roda Trilho e sua Influência na Vida em Ser-viço de Rodas Ferroviárias, Campinas, 2000.
- [10] CHAVES, A. Rodas ferroviárias: análise, microestrutura e propostas de melhoria. Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- [11] DIENER,M.; GHIDINI, A. Materials for heavy haul solid wheels: new experiences. JRRT356, Proc. IMechE Vol. 224 Part F: J. Rail and Rapid Transit. 2010, p. 421-428.
- [12] FAGUNDES, E.J. Análise da Influência do Ciclo de Recozimento de Esferoidização nas Propriedades Mecânicas do Aço SAE
- [13] HIRAKAWA, K; Effects of Chemical Composition and Microstructure on Wear Properties of Steels for Railroads Wheel, Heavy Haul Conference, 1984, Colorado Springs, USA
- [14] LEWIS, R e OLOFSSON, U. Wheel-rail interface handbook. Whood head Publishing Limited, 2009.
- [15] MAGEL, E.; KALOUSEK, J. Identifying and interpreting railway wheel defects. Inter-national Heavy Haul Association Conference on Freight Car Trucks/Bogies. Mon-treal, 1996.
- [16] MINICUCCI, D. J; Tratado de Estradas de Ferro – Material Rodante, 1 ed. Rio de Janeiro: Reflexus, 2000, Parte IV, item 1.3, Rodeiros



- [17] NIKAS, Dimitrios. Effect of Temperature on Mechanical Properties of Railway Wheel Steels. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY: 2006
- [18] REINSCHMDT, A; LEEPER, J; ALLEN, R. Wheel and Rail Damage Mechanisms. Guidelines to Best Practices For Heavy Haul Railway Operations. IHHA, June 2015, p. 5- 01/5-11.
- [19] VILLAS BÔAS, R.L., Desenvolvimento de aço microligado para rodas ferroviárias, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campi-nas, 2010.104 p. Dissertação (Mestrado).
- [20] SAMUEL, L. E. Optical Microscopy of Carbon Steels. ASM (1980), p. 225- 246.
- [21] SCHASTLIVTSEV, V.M.; YAKOVLEVA, I.L. Structural Transformation in Perlite Up-on Heating: III. Spheroidization of Carbides; Gibbs-Thomson Equation and the Prob-lem of Carbide Coagulation; The Physics of Metals and Metallography, Vol. 78, n.3, 1994.p. 317-324.
- [22] TSCHIPTSCHIN, A. P; GOLDENSTEIN, H e SINATORA, A - Metalografia dos Aços. Associação Brasileira de Metais-ABM, 1988, 223 pags SP, Brasil.
- [23] VERLY, L. Fatores que levam a falhas como ovalização de rodas ferroviárias empre-gadas no Heavy Haul. Universidade Federal de Juiz de Fora: 2018. 70 p.

**ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE****UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA****Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria**

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral<sup>1</sup> e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 20 de Março de 2021.

---

Bruna Gabriela Bridi de Paula – Discente  
Matrícula: 201471068 – CPF: 06268034627

<sup>1</sup> LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

<sup>2</sup> Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.