

ANÁLISE MICROESTRUTURAL DA VARIAÇÃO DA TÊMPERA NA PISTA DE ROLAMENTO DAS RODAS FERROVIÁRIAS

Fernando Silvano Maia^{1,2}, **Ricardo Silva Homem de Mello**¹, **Kátia Regina Cardoso**¹,
Renato Lyra Villas Boas²

Resumo

Neste trabalho foram avaliados as rodas ferroviárias de mesma composição química (aço SAE 1070) e processo de usinagem (10 mm de sobre metal no diâmetro da pista de rolamento), verificando o efeito sobre a microestrutura e propriedades mecânicas de duas diferentes condições de tratamento térmico em rodas ferroviárias. Os parâmetros de tratamento térmico avaliados foram a pressão da água e tempo de resfriamento durante a têmpera das rodas ferroviárias. As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaios de tração, dureza e charpy, e a caracterização estrutural por microscopia ótica e eletrônica de varredura. A pressão da água aliada ao tempo de resfriamento transformou a austenita em martensita em um resfriamento brusco ou a austenita em ferrita e perlita em um resfriamento moderado.

Palavras-chaves: perlita, martensita, ferrita, roda ferroviária e ensaio mecânicos.

Abstract

In this work, the railway wheels with the same chemical composition (SAE 1070) and the same machine process (10mm in diameter on the metal on the roadway) were evaluated, and the effect on the microstructure and mechanical properties of two different heat treatment conditions in railway wheels was verified. The evaluated heat treatment parameters were: water pressure and cooling time during the quenching of railway wheels. The mechanical properties were evaluated by tensile, hardness and charpy tests, and structural characterization by optical and scanning electron microscopy. The water pressure combined with the time of cooling the austenite has transformed to martensite on quenching or an austenite to ferrite and perlite in a moderate cooling.

Keywords: perlite, martensite, ferrite, railway wheels and hardness

^{*1}Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP, São José dos Campos, SP.

^{**2}Empresa MWL Rodas e Eixos LTDA, Caçapava SP.

1. INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de rodas ferroviárias forjadas segue as normas internacionais sendo as mais conhecidas a AAR Association of American Railroads [AAR, 2009], UIC - Unin Internationale des Chemins de Fer [UIC, 1984], e mais recentemente a norma européia EN - European Standard [EN-13262, 2006].

O aço é produzido pela aciaria em forno elétrico a partir de sucata metálica. Nesta etapa há um controle rigoroso da composição química desejada através do espectrofotômetro. Posteriormente o aço é vazado em lingoteiras. A solidificação e resfriamento dos lingotes são controlados em fossas refratárias. Os lingotes são cortados em blocos que em seguida são aquecidos a temperaturas em torno de 1320°C em forno rotativo. No forjamento ocorrem três etapas, a etapa da pré-formação da roda em uma prensa de 6000 toneladas, a segunda etapa é a de laminação formando a pista de rolamento e o friso da roda e a última etapa é a formação do disco da roda e o puncionamento do furo desta em uma prensa de 1560 toneladas. Nas rodas ferroviárias forjadas existe um sobremetal das cotas acabadas que varia conforme o peso do bloco cortado, após o forjamento ocorre um resfriamento lento em fossas refratárias por um período de doze horas.

No tratamento térmico é realizada a têmpera (pista de rolamento) e o revenimento (alívio de tensões) das rodas ferroviárias conforme variações de composição química. São utilizados fornos elétricos para austenitização e revenimento. Os materiais normalmente empregados em rodas ferroviárias são aços de composições químicas próximas do ponto eutetóide. A composição química e o tratamento térmico do aço constituem os fatores mais importantes, pois definem a microestrutura e as propriedades mecânicas. 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]. A maioria das microestruturas alternativas foi investigada, mas apesar disso e da falta de alternativas, parece que o aço perlítico oferece o melhor desempenho, são baratas e são bem compreendidos. [CLARKE, 2008].

Na sequência as rodas são usinadas e posteriormente inspecionadas.

As rodas ferroviárias são dimensionadas para serem substituídas por desgaste e nunca por ocorrência de algum tipo de defeito, porém devido às diferentes condições de serviço e ocorrências ligadas ao seu processo de fabricação, alguns defeitos ocorrem durante o seu uso tendo como consequência a necessidade de reperfilamento ou sucateamento da roda. [MINICUCCI, 2000].

Considerando-se a necessidade do controle da microestrutura obtida durante o tratamento térmico das rodas e o fato destas serem tratadas com sobremetal que será removido por usinagem

após o tratamento, é de grande importância uma análise da variação da microestrutura com a profundidade a partir da superfície temperada.

Este trabalho tem como objetivo avaliar os parâmetros da microestrutura ainda não conhecidos no processo de tratamento térmico de rodas ferroviárias. Para este estudo utilizou-se dois valores extremos de pressão de água na pista de rolamento e o tempo de resfriamento, e seu efeito na microestrutura e dureza ao longo da profundidade a partir da superfície, bem como nas propriedades mecânicas da roda.

2. FUNDAMENTOS DA ESTRUTURA DO AÇO

2.1- MARTENSITA.

Na fabricação do aço, a martensita é uma fase metaestável composta por ferro que está supersaturada com carbono e que é o produto de uma transformação sem difusão (atérmica) da austenita. É formada quando ligas ferro - carbono austenitizadas são resfriadas rapidamente (como no tratamento térmico de têmpera).[CALLISTER,2002]

A martensita é uma estrutura monofásica, tetragonal de corpo centrado (TCC). A dureza da martensita depende do teor de carbono e dos elementos de liga do aço, sendo que um maior teor de carbono resultará em uma martensita de maior dureza. Maiores teores de elementos de certas ligas resultam em maior temperabilidade.

A martensita, no estado pós têmpera, praticamente nunca é utilizada, sendo necessária a aplicação de um tratamento térmico posterior a têmpera. Este tratamento térmico, denominado revenimento, tem como objetivos aliviar as tensões geradas pela formação da martensita, além de reduzir sua dureza, para os valores especificados pelo projeto.

Portanto, como resultado do tratamento térmico de têmpera, espera-se a formação de uma microestrutura totalmente martensítica, com a maior dureza que possa ser atingida pelo aço tratado. Depois, no revenimento, em função do tempo de tratamento e da temperatura, atinge-se a dureza desejada. [CALLISTER, 2002].

2.2 – PERLITA.

A reação eutetóide, em aços produz uma microestrutura característica chamada “perlita”. A perlita não é uma fase, e sim uma mistura de duas fases, ferrita e cementita, que ocorrem sob a forma de lamelas paralelas. A perlita consiste na mistura mecânica das fases ferrita e cementita formada pelo crescimento cooperativo destas fases. [SILVA, 2006].

A transformação da austenita em perlita é um processo controlado por difusão e é governado por nucleação e processos de crescimento. [SAHAY, 2009].

A microestrutura desejada em roda ferroviária é a perlita fina que melhor se comporta face a efeitos combinados de cargas térmicas e mecânicas. [ALVES, 2000].

2.3 – FERRITA.

A ferrita tem estrutura CCC e em comparação com a austenita é menos compacta, apresentando interstícios tetraédricos menores e, conseqüentemente, tendo menor capacidade de dissolver carbono. O carbono, que é rejeitado pela formação da ferrita, dá origem à cementita

A formação da ferrita e da perlita se dá por processos difusionais, nos quais ocorrem nucleação e crescimento. Se resfriarmos uma amostra de um aço eutetóide desde 1000 °C (região austenítica) até uma temperatura abaixo de 727 °C haverá a formação da perlita. Obviamente, essa transformação não será instantânea, pois, como o processo é difusional, haverá um tempo de incubação para os átomos se rearranjarem e formarem os primeiros núcleos de perlita. [SILVA, 2006].

2.4 – CEMENTITA.

A cementita é uma fase meta estável. Esta é um carboneto de ferro com estrutura ortorrômbica e de alta dureza. A cementita da origem a um eutetóide de extrema importância no estudo dos aços que é a perlita. [SILVA, 2006].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

3.1 – MATERIAIS.

O aço usado nas rodas de teste corresponde à classe C da norma da AAR – M-107 cuja codificação MWL corresponde ao aço M16. As duas rodas ensaiadas foram fabricadas com a mesma corrida do aço cuja composição química encontra-se na Tabela 01.

Esse aço é largamente utilizado no Brasil em rodas de vagão para transporte de altas cargas (principalmente minério de ferro).

Tabela 01 - Composição Química da roda ferroviária.

Composição Química (% em massa)										
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V	Nb
0.74	0.74	0.28	0.008	0.023	0.20	0.057	0.02	0.008	0.002	0.002

Os números de série das rodas ensaiadas são 150843 e 150844, os quatro primeiros números indicam a corrida da aciaria e os dois últimos números indicam a seqüências das rodas forjadas dentro da corrida.

3.2 – TRATAMENTO TÉRMICO.

3.2.1 – AUSTENITIZAÇÃO.

O setor de tratamento térmico é dividido em duas linhas, cada linha possui dois fornos elétricos, sendo um para austenitização e outro para revenimento, além de uma máquina de têmpera.

O forno de austenitização eleva a temperatura da roda para 860°C e é responsável pela transformação da microestrutura do aço em austenita. O tempo de permanência no forno é determinado considerando-se a capacidade do forno (massa aquecida horária de 3800 kg/h) e o peso da roda, pela seguinte fórmula:

$$\frac{3800}{\text{Peso da roda}} = \text{Rodas por hora}$$

O inverso do valor obtido na formula acima é multiplicado por 60 obtendo-se o valor do tempo em minutos por roda, que é chamado ciclo ou tempo de descarga. Para determinar o tempo de residência no forno de austenitização multiplicamos o tempo de descarga pela quantidade de peças dentro do forno.

As rodas enforadas são apoiadas em calços (de aço especial) chamadas de sapatas (conforme Figura 01), e possuem suas dimensões de acordo com o diâmetro da roda que está sendo tratada.



Fig. 01 – Entrada da roda no forno de austenitização.

O forno de austenitização possui 4 zonas de aquecimento (Zona 1: 730°C , Zona 2: 810°C., Zona 3: 875°C. e Zona 4: 865°C.). O monitoramento e registro das temperaturas são realizados por um software (Pressys), o qual armazena os gráficos diários.

3.2.2 – TÊMPERA.

Após a saída do forno de austenitização a roda é transportada para a máquina de têmpera. Na máquina de têmpera a roda recebe jatos de água com uma temperatura máxima de 50°C em todo o perfil da pista de rolamento.

As rodas 150843 e 150844 foram tratadas conforme processo indicado na Tabela 02. Na roda 150843 o resfriamento foi feito com 12 bicos, tendo cada um 15 orifícios de 5mm de diâmetro Na roda 150844 o resfriamento foi feito com 4 bicos, tendo cada um 15 orifícios de 1mm de diâmetro (o orifício é de diâmetro menor pois a pressão da água é baixa), conforme Figura 02. A distância utilizada entre os bicos e a roda na máquina de têmpera foi de 150mm.

Tabela 02 – Processo de Tratamento térmico.

Roda	Austenitização		Têmpera		Revenimento	
	Temp. - °C	Tempo - h	Tempo - Min	Pressão - Bar	Temp. °C	Tempo
150844	865	2h48min	5'	0,8	500	2h24min
150843	865	3h02min	3' 45"	2,5	500	2h36min



Fig. 02 – Têmpera da roda com 4 bicos com orifícios de 1mm.

3.2.3 – REVENIMENTO.

Para aliviar as tensões térmicas no material provenientes do tratamento térmico de têmpera, as rodas passam pelo tratamento de revenimento.

O forno de revenimento consiste em 4 zonas de aquecimento com a temperatura controlada de 500°C. O tempo em que a roda permanece no forno de revenimento é determinado pela multiplicação da quantidade de rodas dentro do forno pelo tempo de descarga. A variação de temperatura e o tempo de revenimento entre as duas rodas é demonstrado na Tabela 2.

O forno de revenimento possui praticamente as mesmas características do forno de austenitização. A sua principal diferença é a capacidade e as temperaturas.

Após ser desenfundada, a roda é primeiramente resfriada próximo ao forno e posteriormente levada ao pátio para ser resfriada ao ar livre.

3.3 – AMOSTRAS E CORPOS DE PROVA.

A Figura 03 mostra a posição de retirada das amostras para a realização da caracterização microestrutural e dos ensaios de microdureza. Foram obtidas amostras em cada uma das rodas nas seguintes profundidades 0, 3, 6, 9, 12 e 15 mm para diferenciar a variação estrutural em cada posição.

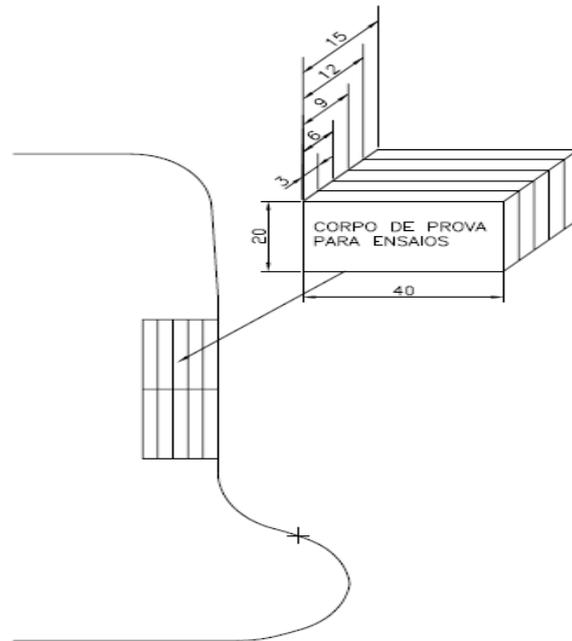


Fig. 03 - Posição de retirada das amostras para os ensaios (cotas em mm).

A posição para retirada dos corpos de prova para os ensaios de tração e impacto está indicada na Figura 04, dados extraído da norma EN13262.

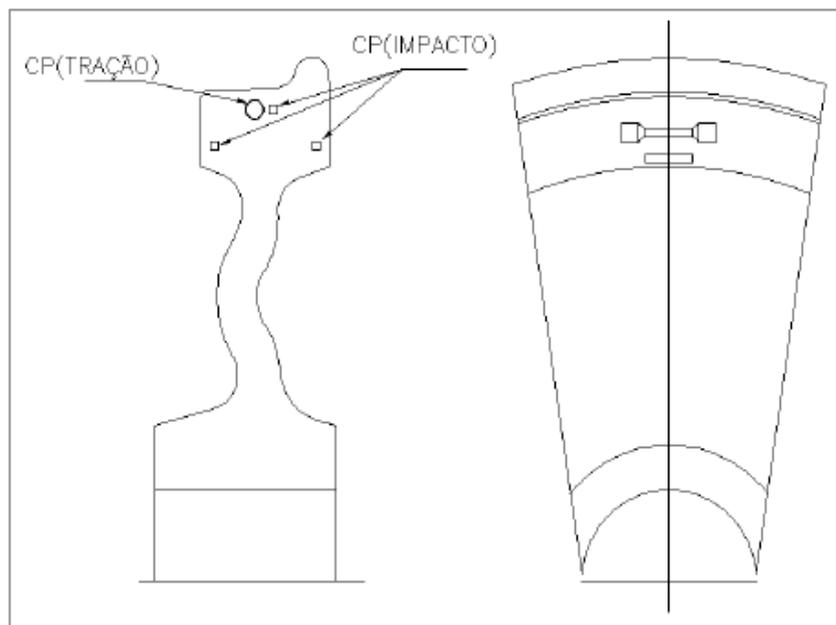


Fig. 04 - Posição de retirada dos corpos de prova de tração e impacto conforme norma EN13262.

3.4 – ANÁLISE DE MICROESTRUTURA.

As análises para os ensaios metalográficos foram efetuadas na seção transversal dos corpos de prova. As amostras foram cortadas com os dimensionais de 40 mm x 20 mm da parte central da pista de rolamento (Figura 03) de cada roda tratada conforme especificação desejada e posteriormente lixadas #220, #320, #400, #600, #1200 e polidas em politriz com pasta diamante com granulométrica de 3 e 1 µm respectivamente nesta seqüência Feita a limpeza adequada, foram atacadas com Nital 3% por 10 segundos. Após o ataque foram lavadas, secadas e examinadas no microscópio óptico modelo OLIMPUS Tóquio.

As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) tiveram como finalidade uma caracterização mais detalhada da microestrutura das amostras e a medição do espaçamento interlamelar da perlita.

As análises de MEV foram realizadas no Laboratório de Caracterização Estrutural do IP&D da UNIVAP em um microscópio EVO MA 10 de fabricação ZEISS, utilizando corpos de prova de seção retangular, faceados a cada 3 mm de profundidade para cada uma das rodas e analisadas nas profundidades de 00 mm até 15 mm.

Em cada profundidade ensaiada, foram tiradas fotos em três posições distintas da amostra e nas ampliações de 20.000, 15.000, 10.000, 5.000 e 2.000 vezes em cada posição.

Após a obtenção das fotos no MEV, foi utilizado outro software (Auto Cad) para efetuar a contagem da quantidade de lamelas interceptadas por uma linha padrão de 50 mm nas regiões de lamelas mais finas. Foi calculado então o valor médio que se denomina “espaçamento interlamelar mínimo”.

As medidas de número de lamelas foram obtidas através do método de interceptos lineares utilizando a Equação 01 a seguir.

$$N_L = \frac{L_T}{I \times A} \quad (01)$$

[Villas Boas, 2010]

N_L = número de lamelas

L_T = comprimento da linha teste (50 mm)

I = número de intersecções entre a linha teste e as lamelas

A = ampliação do microscópio

3.5 – ENSAIOS MECÂNICOS.

3.5.1 – MICRODUREZA VICKERS.

Nas mesmas amostras utilizadas nos ensaios de metalografia, foram realizadas as medidas de microdureza Vickers em um MICRO HARDNESS TESTER HMV da marca SHIMADZU com uma capacidade máxima de carga de 19, 614N (HV2). A carga utilizada neste teste foi de 9, 807N (HV1) com um tempo de impressão de 10 segundos, os ensaios foram realizados na empresa MUBEA. A cada profundidade, utilizou-se 10 pontos de identificação de dureza aleatoriamente e determinou-se a média e o desvio padrão. Foi usado penetrador piramidal de diamante com ângulo de 136 graus entre as faces opostas conforme norma ISO 6507 e JIS Z2244-1992.

3.5.2 – ENSAIO DE IMPACTO.

O ensaio de impacto Charpy foi realizado na empresa MWL Brasil, de acordo com o especificado na norma ASTM E23 [ASTM, 2007], utilizando um pêndulo de impacto de marca LOSENHAUSEN, modelo PSW, capacidade máxima de 294 J.

Foram utilizados corpos de prova com entalhe em “U” conforme Figura 05.

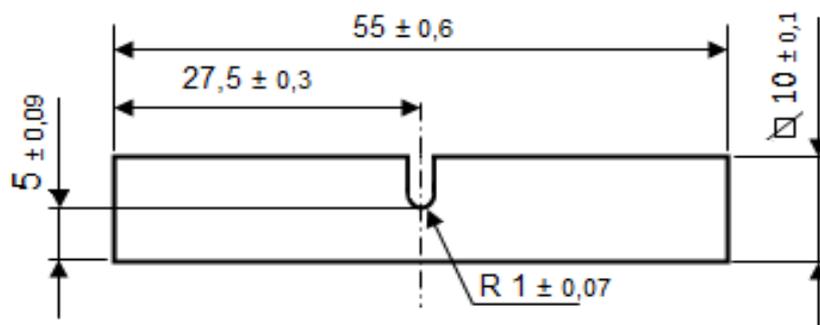


Fig. 05: Corpo de prova do ensaio de impacto (dimensões em mm).

3.5.3 – ENSAIO DE TRAÇÃO.

O ensaio de tração nas rodas ensaiadas foi feito conforme norma ASTM - A -370. Para este ensaio foi utilizada uma máquina de tração marca LOSENHAUSEN modelo UHP com capacidade de 40 toneladas, onde foi determinado o limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e redução de área. Os ensaios foram realizados em temperatura controlada de 20°C.

Na Figura 06 é possível observar as dimensões do corpo de prova utilizado para o ensaio. O alongamento foi medido com o auxílio de marcas feitas ao longo da parte central do corpo de prova e foi determinado através da medição da distância entre tais marcas antes do ensaio e após o rompimento da amostra, unindo-se as partes separadas. A redução de área foi determinada pela medição do diâmetro do corpo de prova antes do ensaio e após seu rompimento, através da união das partes.

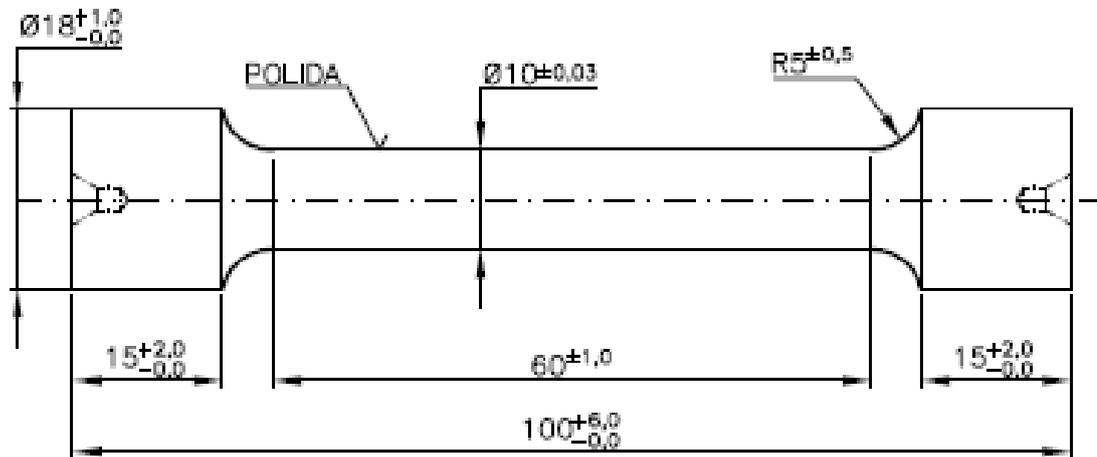


Fig. 06: Corpo de prova para ensaio de tração (dimensões em mm).

4. - RESULTADOS E DISCUSSÕES.

4.1 – CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA.

A Figura 07 apresenta micrografias obtidas por microscópio ótico de corpos de prova obtidos por cortes nas profundidades 0, 3 e 6 mm. Devido à alta velocidade de resfriamento da roda 150843, a estrutura predominante nas profundidades de 0 e 3 mm é martensita revenida. Nas profundidades de 6 e 9 mm onde o resfriamento é mais lento, observa-se estrutura mista com martensita revenida e perlita, além da presença de ferrita livre.

A amostra da roda 150844, cujo resfriamento foi mais brando, apresentou estrutura perlítica com ferritas livres desde a profundidade de 0 mm, ou seja, da superfície da pista de rolamento da roda.

Nas demais profundidades analisadas 12 e 15 mm, as duas rodas apresentaram estruturas perlíticas com presença de ferritas livres e em contorno de grão.

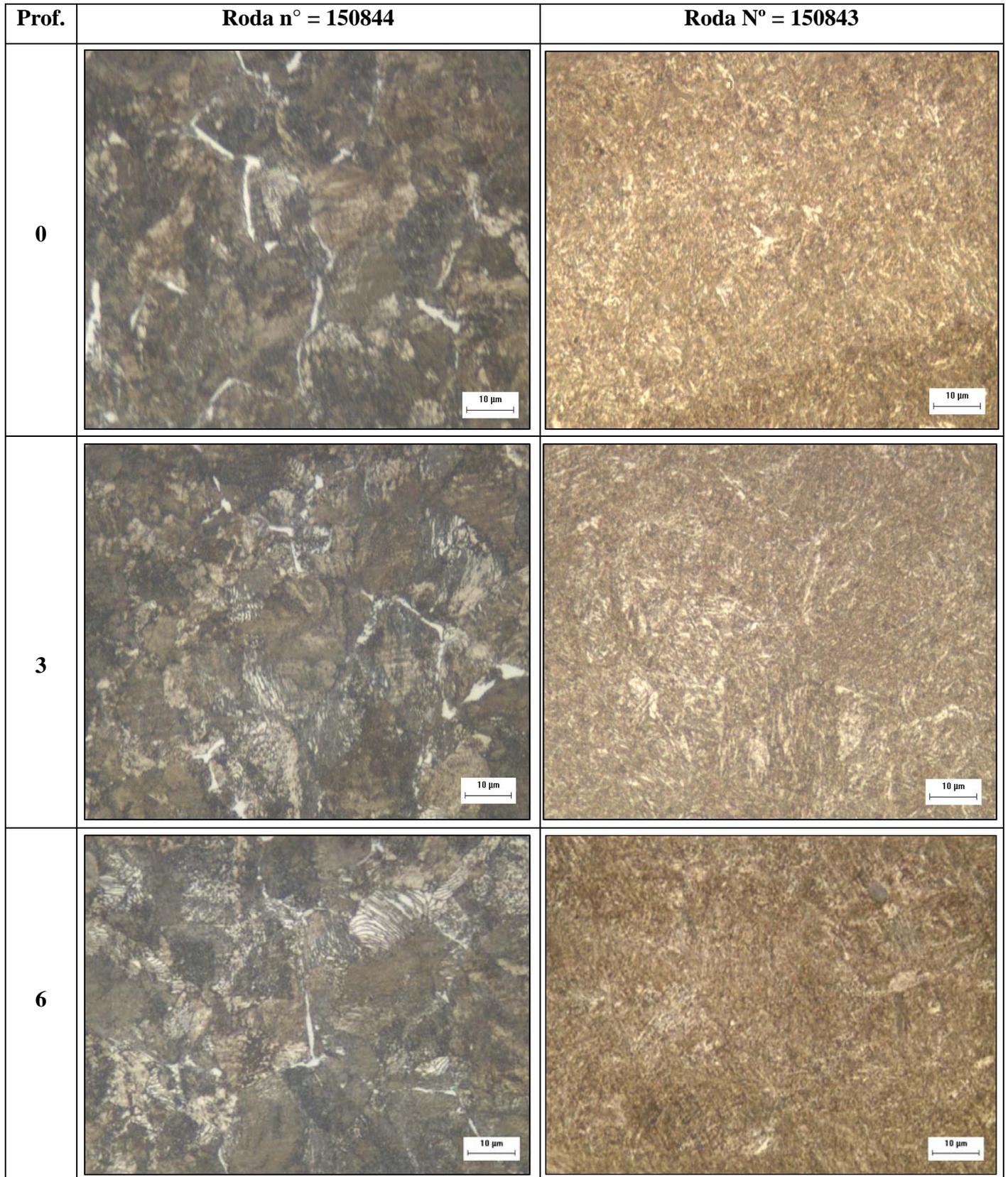


Fig. 07 – Micrografias das duas rodas ensaiadas nas profundidades 0, 3 e 6 mm (Nital 3%).

Na Figura 08 é possível observar que a roda 150843 na profundidade de 0 mm apresenta estrutura martensítica revenida enquanto a roda 150844, na mesma profundidade, apresenta estrutura perlítica devido à menor velocidade de resfriamento na têmpera. Na profundidade 6 mm para a roda

150843 é possível notar o início da formação de perlita e ferrita mais ainda com alta quantidade de martensita revenida o que também se dá até a profundidade de 9 mm com menos presença da martensita revenida. Na mesma profundidade, na roda 150844 observou-se a presença de ferrita em contornos de grão da perlita. A partir da profundidade de 12 mm observam-se estrutura perlítica com presença de ferrita em ambas as rodas.

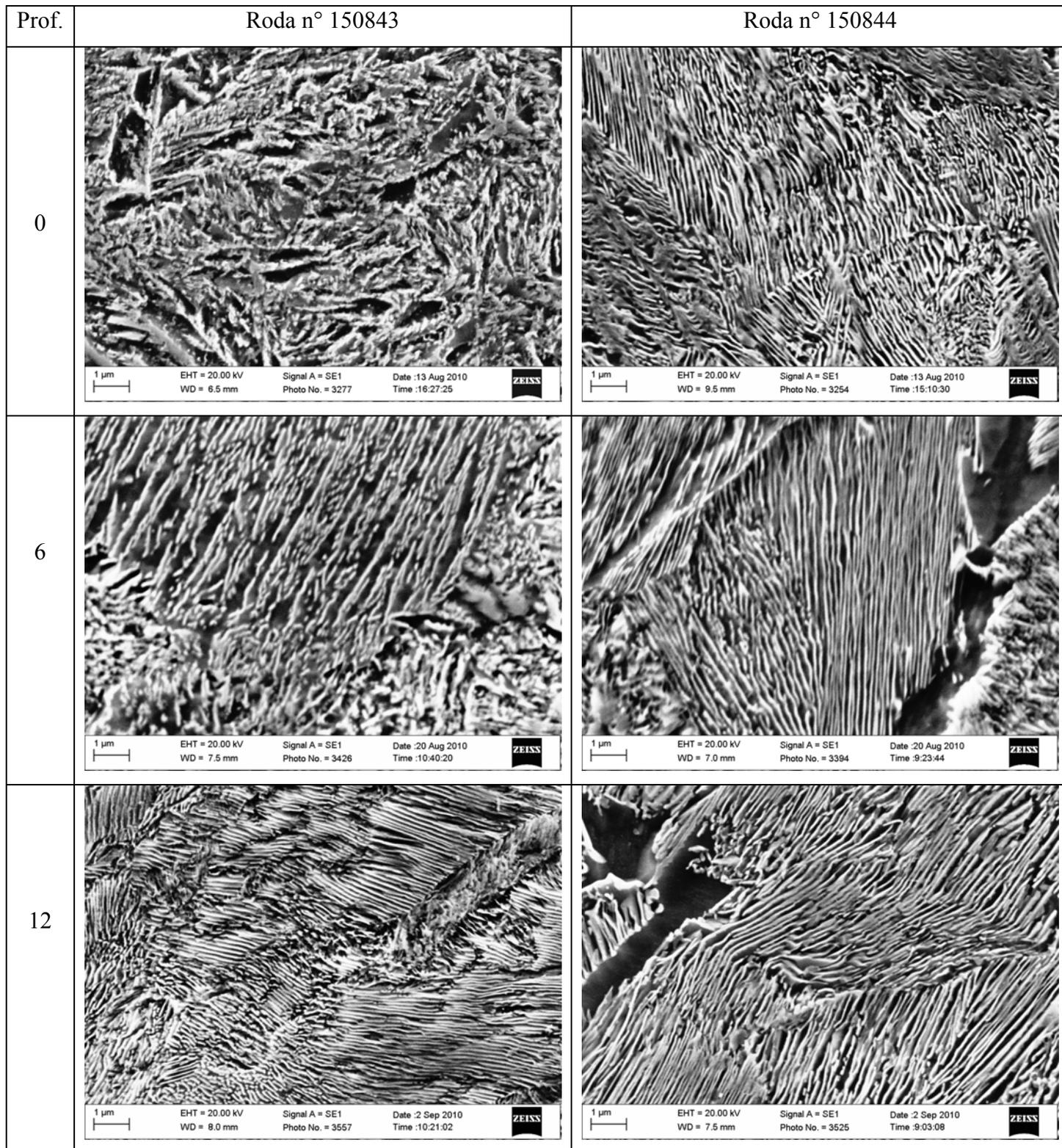


Fig. 08 – Micrografias por MEV das rodas (ampliação de 20.000 X)

A Tabela 03 mostra os valores médios e o desvio padrão do espaçamento interlamelar mínimo da perlita medidos em micrografias obtidas por MEV como as da Figura 08. Nota-se que para a roda 150843 nas profundidades de 0 e 3 mm não foi possível contar o número de lamelas, pois a estrutura é martensítica não existindo perlita. Também observa-se que para a roda 150843 nas profundidades de 6 e 9 mm os valores são influenciados pela presença de martensita revenida ainda existente mesmo que em menor quantidade, o que impossibilita a contagem de números de lamelas de maneira confiável.

Tabela 03 – Espaçamento interlamelar mínimo da perlita.

Profundidade (mm)	Roda 150843						Roda 150844					
	0	3	6	9	12	15	0	3	6	9	12	15
Média	-	-	0,216	0,185	0,156	0,127	0,144	0,144	0,144	0,151	0,148	0,125
Desvio Padrão	-	-	0,021	0,041	0,016	0,009	0,011	0,021	0,015	0,023	0,007	0,019

Os gráficos da Figura 09 demonstram os dados da Tabela 03, para cada roda.

A maioria das propriedades mecânicas depende da formação da estrutura perlítica. Quanto mais fino o espaçamento interlamelar melhores serão as propriedades mecânicas, tais como o desgaste e resistência, ou seja, quanto menor o espaçamento interlamelar, maior resistência ao desgaste. [SAHAY, 2009].

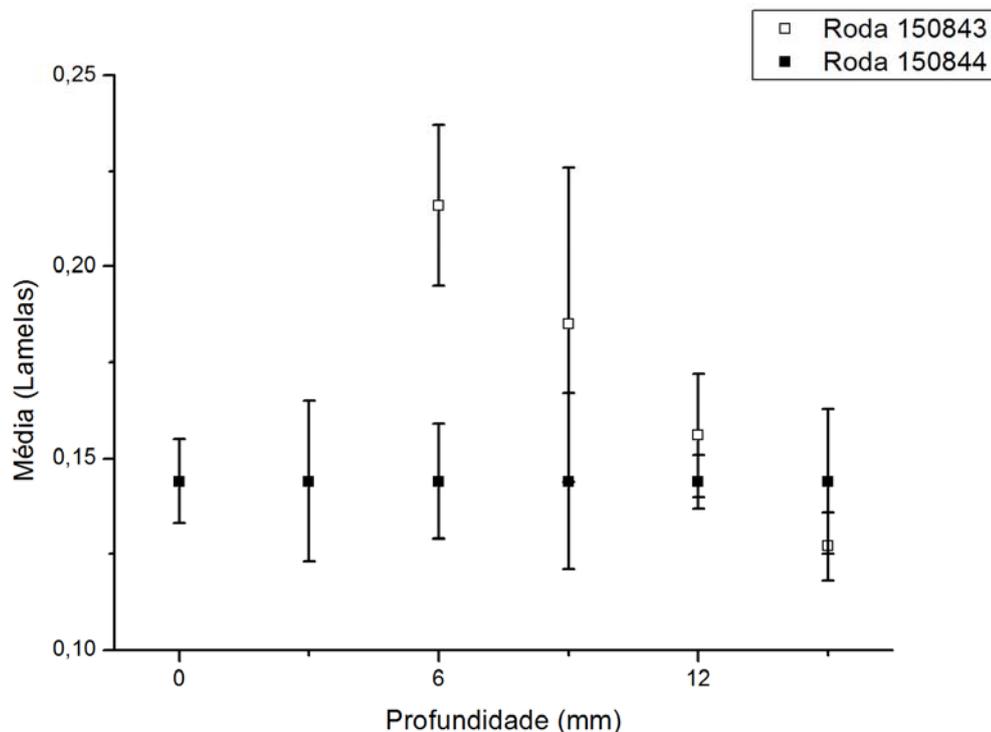


Fig. 09- Médias e desvio padrão das lamelas em relação às profundidades.

As Figuras 10 e 11 apresentam representações esquemáticas de curvas TTT do aço carbono da roda 150843 e roda 150844, com sobreposição do esquema do perfil da roda mostrando as diferenças das transformações microestruturais para cada profundidade da pista de rolamento para cada roda.

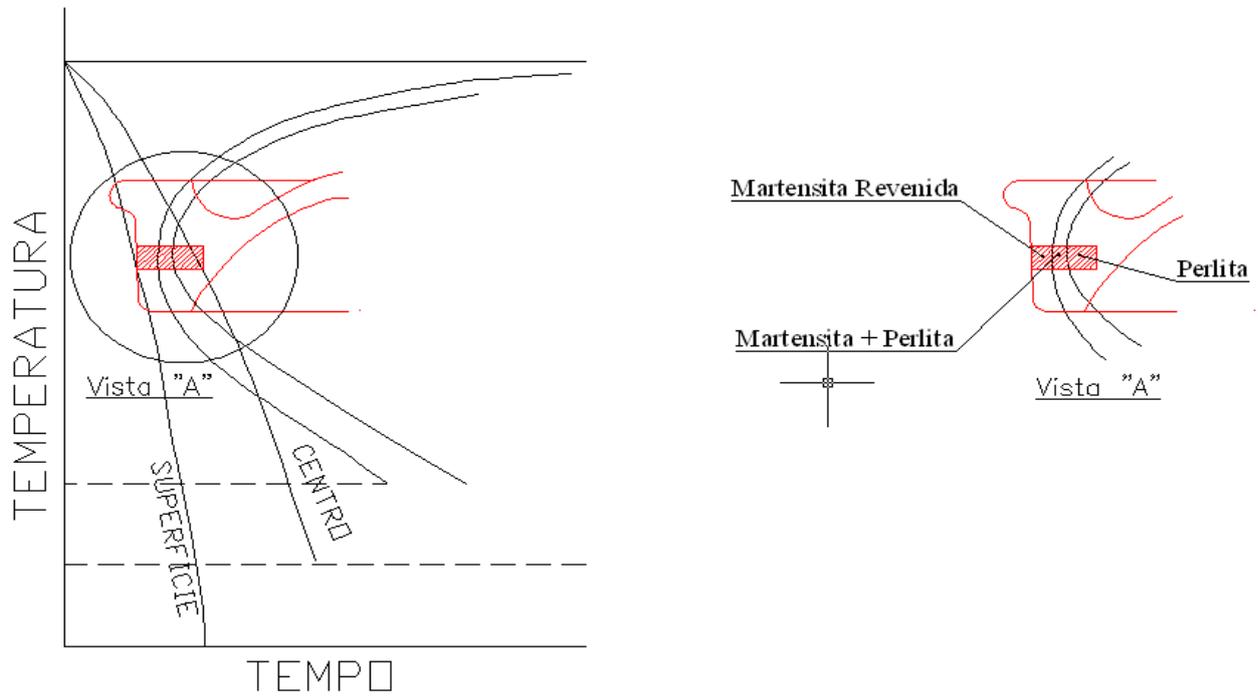


Fig. 10 – Representação esquemática de uma curva TTT da roda 150843 para análise da transformação da microestrutura (aço hipoeutetóide).

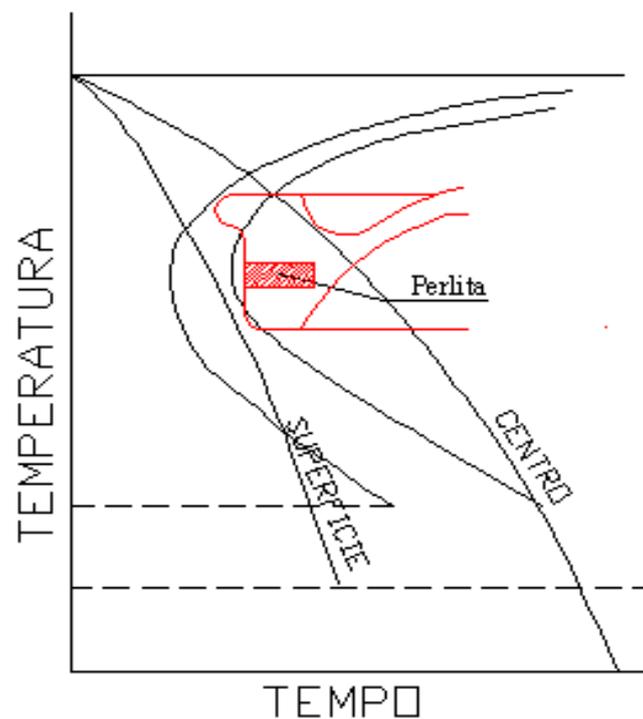


Fig. 11 – Representação esquemática de uma curva TTT da roda 150844 para análise da transformação da microestrutura (aço hipoeutetóide).

4.2 – ENSAIOS MECÂNICOS.

4.2.1 – ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS.

Na Tabela 04 e Figura 12 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de Microdureza Vickers nas profundidades estudadas. Observou-se que a diferença do processo de tratamento térmico gerou durezas bastante distintas entre as rodas. Como era esperada a roda 150843 apresentou maior dureza que a roda 150844.

Tabela 04 – Microdureza Vickers para profundidade de 0 a 15 mm.

Profundidade	150843		150844	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
00 mm	404,80	3,29	325,00	6,18
03 mm	413,00	4,52	339,20	5,65
06 mm	370,80	9,33	317,30	14,20
09 mm	355,00	6,73	344,50	8,06
12 mm	365,40	4,99	329,90	5,76
15 mm	339,90	8,21	327,00	9,01

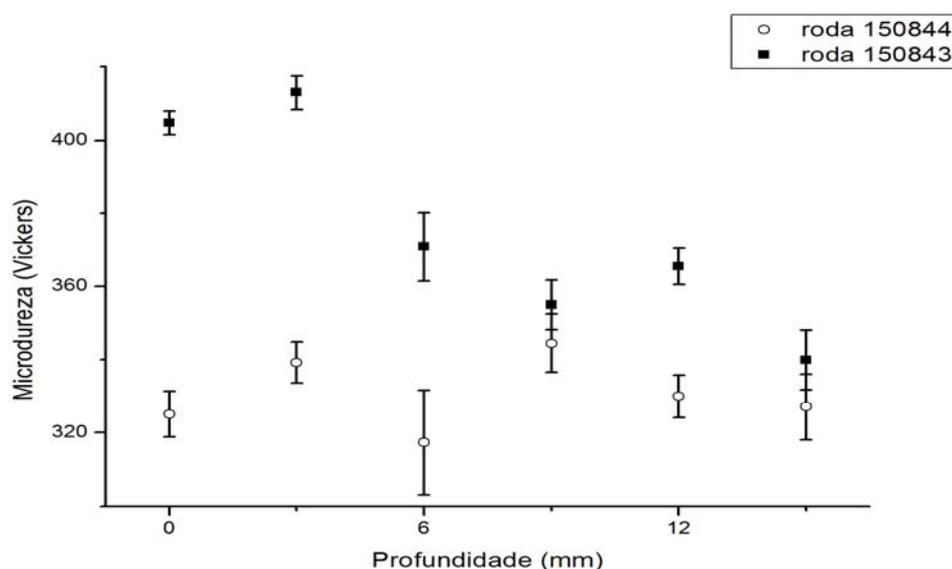


Fig. 12 – Microdureza Vickers para profundidade de 0 a 15 mm.

Para ambas as rodas observa-se que a microdureza na superfície de rolamento (profundidade de 0 mm) apresentou-se mais baixa que a 3 mm. Isto se deve provavelmente à decarbonetação superficial do aço. A partir da profundidade de 3 mm, a tendência para as duas rodas é de reduzir a dureza à medida que diminui o diâmetro, devido à menor taxa de resfriamento. Quanto mais baixa a

taxa de resfriamento, menor é a dureza obtida no tratamento térmico. A roda 150844 apresentou, na profundidade de 6 mm, uma dureza bastante baixa e alta dispersão em relação às demais. Esse fenômeno precisa de maior estudo para ser entendido.

4.2.2 – ENSAIOS DE IMPACTO.

A Tabela 05 apresenta os resultados dos ensaios de impacto, que são utilizados para medir a tenacidade do aço. Os resultados obtidos para as rodas ensaiadas são típicos para rodas de aço classe C conforme norma AAR.

Tabela 05 – Médias e Desvio padrão do ensaio de impacto.

Ensaio de Impacto		
Roda	Média (J)	Desvio Padrão
150843	13,67	0,58
150844	14,67	3,06

A diferença entre os resultados não é significativa. A roda 150844 teve um resultado médio maior, porém com maior dispersão. Os resultados mostram tenacidades similares para as duas rodas.

4.2.3 – ENSAIOS DE TRAÇÃO.

Na Tabela 06 podemos observar os resultados obtidos nos ensaios de tração. Analisando os resultados é possível notar que a roda 150843 tem valores de limite de resistência e escoamento maiores que a roda 150844. Por outro lado, o aumento do limite de resistência leva à redução da ductilidade medida pelo alongamento e redução de área. Pode-se observar na roda 150844 que, sendo o limite de escoamento menor, a ductilidade é maior que na roda 150843. Os valores obtidos para a roda 150844 são típicos de rodas classe C da norma AAR.

Tabela 06 – Ensaio de Tração das Rodas ferroviárias.

Ensaio de Tração				
Roda	Limite de Escoamento (Mpa)	Limite de Resistência (Mpa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)
150843	857,10	1234,80	13,16	25,50
150844	745,10	1151,90	13,80	32,89

5. CONCLUSÃO.

Foi possível observar nos ensaios realizados que a variação do processo de tratamento térmico produz estruturas e propriedades mecânicas diferentes.

No caso deste estudo, optou-se por dois tipos de têmpera na pista de rolamento das rodas ferroviárias em condições extremas. No caso da roda 150843, obteve-se estrutura martensítica revenida até a profundidade de aproximadamente 9 mm. Como a roda tinha 10 mm de sobremetal no diâmetro, após a usinagem final, 5 mm seriam retirados, restando ainda na pista de rolamento da roda estrutura martensítica revenida, o que não é desejável em pista de rolamento de rodas ferroviárias.

A roda 150844 apresentou estrutura perlítica com valores de resistência mecânica típicos para roda classe C da norma AAR. Como esta roda estava com sobremetal, após a usinagem final os corpos de prova seriam retirados em um diâmetro menor da roda provavelmente levando a valores de resistência mais baixos.

Portanto, para futuros estudos sugere-se que seja realizado um processo de tratamento térmico (têmpera da pista de rolamento) em uma taxa de resfriamento intermediária entre os dois processos apresentados.

6. AGRADECIMENTOS.

A nossa Orientadora Dra KÁTIA REGINA CARDOSO pelo aprendizado e dedicação por esses meses que trabalhos juntos, e também pela sua compreensão e profissionalismo.

Ao nosso Orientador Msc. RENATO LYRA VILLAS BÔAS pelo incentivo, e presteza no auxílio às atividades e discussões sobre o andamento e normatização desta Monografia de Conclusão de Curso.

À empresa MWL Rodas e Eixos LTDA pelo apoio do fornecimento dos recursos disponíveis para elaboração do trabalho.

À empresa Mubea de realizar os ensaios de microdureza.

À UNIVAP (Universidade do Vale Paraiba) pela disponibilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

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

ALVES, L. H. D. Mecanismo de desgaste de rodas ferroviárias. São Paulo, 2000. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ASTM Standard E 23 – 07a, “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”. American Society for Testing and Materials, 2007.

Callister, William D. Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Rio de Janeiro, RJ. Editora LTC. 2002. 589 p.

Clarke, Martin, Wheel rolling contact fatigue (RCF) and rim defects investigation to further knowledge of the causes of RCF and to determine control measures, 2008, USA. Disponível em http://www.rssb.co.uk/sitecollectiondocuments/pdf/reports/research/T672_Wheel_Steel_Handbook_final.pdf, acessado em 11/10/2010.

EUROPEAN STANDARD. Railway Applications – Wheelsets and Bogies – Wheels – Product Requirement, EN 13262. Brussels, 2004. 52p.

Hirakawa, K; Effects of Chemical Composition and Microstructure on Wear Properties of Steels for Railroads Wheel, Heavy Haul Conference, 1984, Colorado Springs, USA.

Livro: Chiaverini, Vicente Aços e Ferro Fundido, 6º edição, São Paulo, ABM Associação Brasileira de Metais (1988), 576 p.

Minicucci, D. J; Tratado de Estradas de Ferro – Material Rodante, 1 ed. Rio de Janeiro: Reflexus, 2000, Parte IV, item 1.3, Rodeiros.

Railway Applications – Wheelsets and Bogies – Wheels – Product Requirement, EN 13262, 2006.

Sahay, S. Satyans, Mohapatra, Goutam, Totten E. George, *Journal of ASTM International*, Vol. 6, No. 7 Paper ID JAI102021, . Overview of Pearlitic Rail Steel: Accelerated Cooling, Quenching, Microstructure, and Mechanical Properties, Copyright © 2009 by ASTM International, Disponível em http://www.tcs-trddc.com/trddc_website/pdf/PE/sahay_oop_2009.pdf, acessado em 15/10/2010.

Silva, André Luiz V. da Costa e; Mei, Paulo Roberto. Aços e Ligas Especiais. São Paulo, SP. Editora Edgard Blucher. 2006.

Union Internationale des Chemins de Fer – UIC Code (International Union of Railways) 813-3-O, 5 ed. 1984.

Villas Bôas, Renato Lyra, Desenvolvimento de aço microligado para rodas ferroviárias (Mestrado em Engenharia Mecânica) 121p Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas-Campinas, SP:[s.n.], 2010.