



ESTUDO DO PROCESSO METALÚRGICO DE FABRICAÇÃO DE RODETES DE MOENDA

STUDY OF METALLURGICAL PROCESS OF MILLING RODETES MANUFACTURE

Lucas Alessio Roncasalia¹

Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

RESUMO: Este trabalho apresenta um estudo do processo metalúrgico de tratamento térmico para fabricação de rodetes, que são engrenagens utilizadas para transmitir torque entre eixos de moendas de usinas sucroalcooleiras, com ênfase nos tratamentos de normalização, têmpera e revenimento. Diante disso, foi desenvolvida uma análise sobre a influência desses tratamentos nos rodetes, fabricados em aço fundido SAE 4340, no qual foram estudadas as mudanças ocorridas na microestrutura e propriedades mecânicas do material, através de ensaios de tração, dureza e metalografia, realizados em corpos de prova fornecidos pela empresa ZBN Indústria Mecânica Ltda. Como resultado, pode-se perceber que a estrutura do material muda drasticamente com os processos de tratamento, causando a diminuição do tamanho dos grãos, e aumento da dureza e resistência mecânica do material.

Palavras-chave: Ensaios mecânicos, fundição, metalografia, rodetes de moenda, tratamento térmico

ABSTRACT: This work presents a study of metallurgical processes of thermal treatment for the manufacture of rodetes, that are pinion gears used to transmit torque between axes of mills of sugar cane, with emphasis on thermal normalization treatment, quenching and tempering. Therefore it was developed an analysis on the influence of these treatments in pinion gears made of cast steel SAE 4340, where we studied the changes in the microstructure and mechanical properties of the material, It was made by traction tests, hardness and

¹ Graduado em Engenharia Mecânica, UNITOLEDO, 2015.

² Mestre em Engenharia Mecânica, UNESP, 2013.

metallography, made on pieces of specimen provided by the company ZBN Indústria Mecânica Ltda. Finally, we can realize the drastic change in the structure of the material with the treatment processes, causing a decrease in grain size, and increase in the severity and mechanical strength.

Keywords: casting, heat treatment, mechanical testing, metallography, pinion gears

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho surgiu através da fabricação de rodetes de moenda em material SAE 4340, pela ZBN Indústria Mecânica Ltda. Os materiais de fabricação de um rodete podem variar de acordo com a solicitação de trabalho desejada, onde os mais utilizados são: SAE 8640, SAE 1045 e A148 GRAU 105-85.

Segundo a Welding (s. d.), espera-se normalmente uma vida útil de cinco anos para os rodetes, porém existem fatores que podem abreviar esta estimativa, como o material utilizado na sua fabricação e os tipos de tratamentos térmicos realizados.

Os rodetes são grandes engrenagens utilizadas para transmitir torque entre os eixos de moendas de usinas sucroalcooleiras, se diferenciam da maioria, pois seus dentes não possuem usinagem, suas superfícies são brutas de fundição, conforme pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Rodete de Moenda.



Fonte: ZBN (2015).

Os processos metalúrgicos de fabricação são etapas que transformam as matérias primas, como aços, ferros e bronzes, para obtenção de um produto final, contemplando normas e aplicações diversas.

Os tratamentos térmicos também fazem parte dessas etapas de fabricação, sendo eles utilizados para a remoção das tensões internas, aumento da dureza e melhora da ductilidade,

podendo essas propriedades serem obtidas através dos tratamentos de normalização, têmpera e revenimento (CHIAVERINI, 2012):

- Normalização: consiste no tratamento térmico de aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica, e resfriado posteriormente ao ar tranquilo;
- Têmpera: consiste no tratamento térmico de aquecimento até a temperatura de austenização do aço, ou seja, entre 815°C e 870°C, seguindo posteriormente de um resfriamento rápido;
- Revenimento: é o tratamento térmico normalmente utilizado após o processo de têmpera, que consiste no reaquecimento da peça temperada a uma temperatura abaixo da zona crítica, eliminando os inconvenientes produzidos por esta, corrigindo as excessivas durezas, além de remover as tensões internas e aumentar a sua ductilidade e resistência ao choque.

Este trabalho tem por objetivo analisar a influência dos tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenimento nos rodetes fundidos em aço SAE 4340. Devido os rodetes normalmente serem fabricados em outros materiais, propôs-se estudar as mudanças ocorridas na microestrutura e propriedades mecânicas do material, através das análises dos corpos de prova fornecidos pela empresa ZBN Indústria Mecânica Ltda., no qual serão realizados os ensaios de tração, dureza e metalografia, avaliando como ele se modifica com os tratamentos térmicos empregados.

2 DESENVOLVIMENTO

O material analisado neste trabalho consiste no aço SAE 4340. Para análise das influencias dos tratamentos térmicos, foram utilizados 6 CPs (Corpos de provas), retirados do rodetes em três diferentes etapas:

- Bruto: após resfriamento do aço fundido;
- Normalização e têmpera: no processo de normalização o material é resfriado até uma temperatura de 300°C, e posteriormente já entra em processo de têmpera, não sendo possível, assim, a retirada dos corpos de prova no tratamento de normalização;
- Revenimento: após etapa de têmpera, o rodete é resfriado e entra no processo de revenimento.

Foram utilizados dois corpos de prova para cada etapa, realizando os ensaios no laboratório da empresa ZBN Indústria Mecânica Ltda.

Os corpos de prova foram identificados através do tipo de tratamento térmico, conforme pode ser observado na Tabela 1, onde mostram suas temperaturas e velocidades de aquecimento, assim como o tipo de resfriamento utilizado.

Tabela 1 - Identificação das amostras.

Tratamento Térmico	CPs	Temperatura de Aquecimento	Tempo de Permanência	Velocidade de Aquecimento	Resfriamento
----	CP1	----	----	----	Ar Calmo
----	CP2	----	----	----	Ar Calmo
Normalização/ Têmpera	CP3	910°C	8	80 °C / hora	Ar Forçado
	CP4	910°C	8	80 °C / hora	Ar Forçado
Revenimento	CP5	670°C	8	80 °C / hora	Ar Calmo
	CP6	670°C	8	80 °C / hora	Ar Calmo

Fonte: Próprio autor.

2.1 Ensaio de tração

Foram realizados ensaios de tração para a caracterização das propriedades mecânicas obtidas nas etapas de tratamento térmico, que consiste em submeter um material a um esforço até que ocorra sua ruptura (CHIAVERINI, 1986). Para realização desses ensaios, os corpos de prova retirados dos rodets foram usinados conforme norma ASTM A 370, resultando no corpo de prova ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Corpo de prova usinado.



Fonte: Próprio autor.

Os ensaios foram realizados na máquina de ensaios mecânicos EMIC DL30000N, de acordo com a norma ASTM E8/E8M-08, onde foram utilizados dois corpos de prova para cada etapa

A partir das curvas geradas no *software* de ensaios TESC versão 3.04, pode ser identificado o limite de escoamento e de resistência do material, e através da deformação dos corpos de prova (Figura 3) foi calculada a estrição (redução de área) e o alongamento.

Figura 3 - Medição do corpo de prova com paquímetro.



Fonte: Próprio autor.

2.2 Ensaio de dureza Brinell

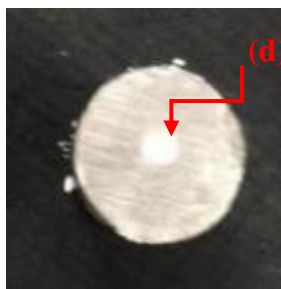
Para realização dos ensaios de dureza, foi utilizado o durômetro de bancada modelo KING. As amostras para análise de dureza foram obtidas a partir dos corpos de prova utilizados para o ensaio de tração, como representa a Figura 4. Essas amostras foram comprimidas com carga de 3000 kgf, e a partir do diâmetro (d) obtido (Figura 5), foram determinadas as durezas.

Figura 4 - Corpo de prova.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5 - Amostra do corpo de prova para ensaio de dureza.



Fonte: Próprio autor.

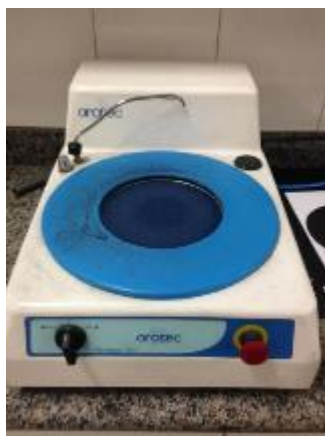
2.3 Análise metalográfica

O ensaio metalográfico tem grande importância nos processos metalúrgicos, pois oferece dados do material produzido, estabelecendo uma análise entre as composições químicas, propriedades físicas e mecânicas do material (FERNANDES, 2011).

Para a análise metalográfica, as amostras retiradas dos copos de prova passaram por alguns processos de preparação, tais como: lixamento, polimento e ataque químico.

No processo de lixamento, foi utilizada a máquina semiautomática mostrada na Figura 6, com lixas d'água de 180, 400 e 1200, eliminando assim as imperfeições da superfície da amostra.

Figura 6 - Máquina de lixamento.



Fonte: Próprio autor.

As amostras, por fim, são atacadas com reagente Nital (2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico) para realização da observação microscópica, podendo assim, observar as microestruturas presentes e a granulometria do material.

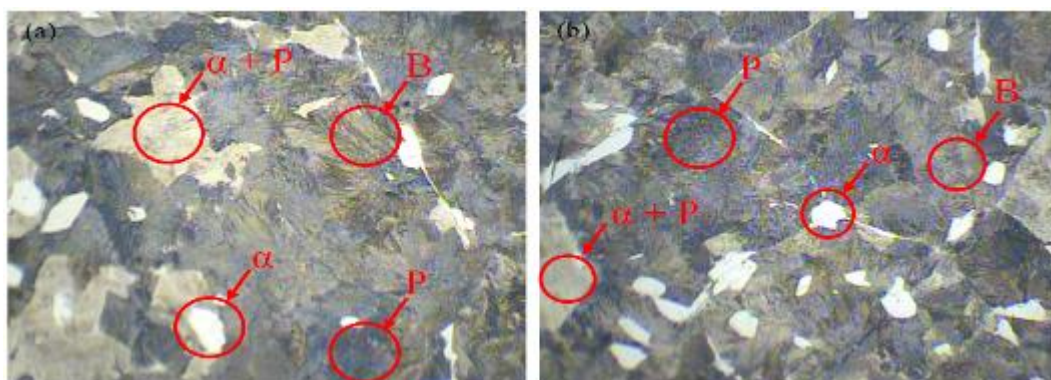
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Microestruturas

As micrografias das amostras atacadas com Nital 2%, podem ser observadas com um aumento de 100x, as quais seguem nas Figuras 7, 8 e 9.

Figura 7 - Micrografias com aumento de 100x obtidas das amostras brutas.

(a) Amostra do corpo de prova 1. (b) Amostra do corpo de prova 2.



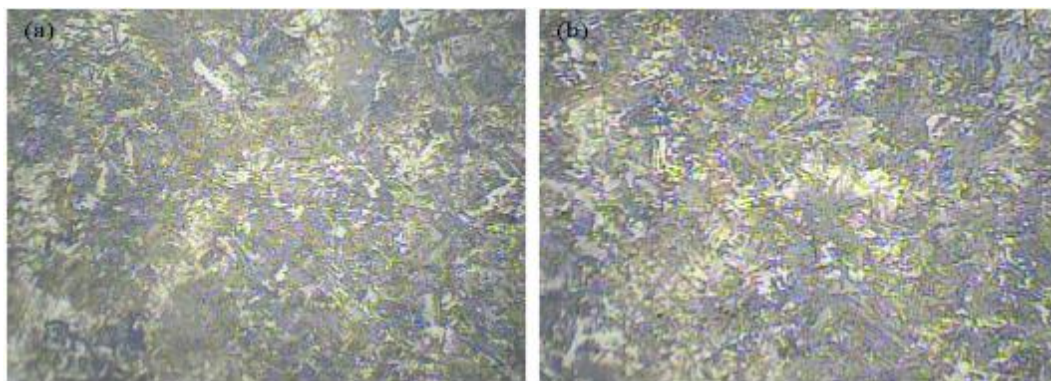
Fonte: Próprio autor.

Nas amostras do material bruto (Figura 7), pode ser observado um tamanho de grão mais elevado, contemplando diferentes microestruturas, como ferrita, perlita e bainita, onde foram indicadas com as siglas:

- α : ferrita;
- B: bainita;
- $\alpha + P$: ferrita e perlita
- P: perlita.

Figura 8 - Micrografias com aumento de 100x obtidas das amostras normalizadas e temperadas.

(a) Amostra do corpo de prova 3. (b) Amostra do corpo de prova 4.

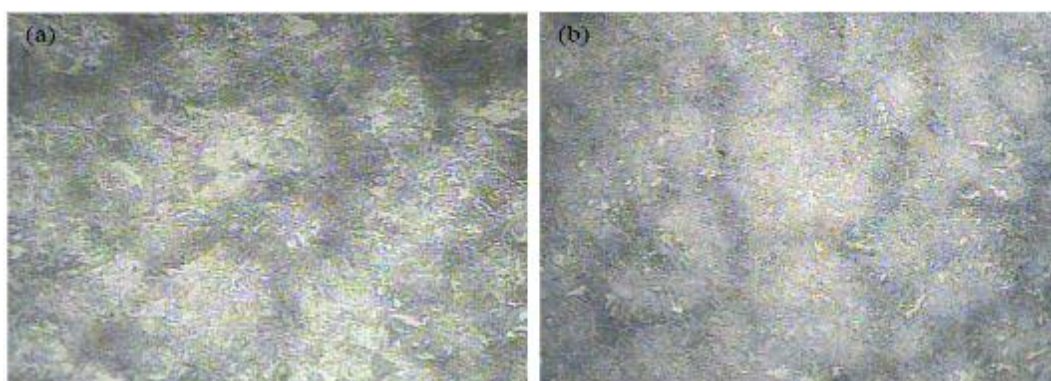


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 8, é possível visualizar uma microestrutura mais fina e mais distorcida, em formato de agulhas, sendo esta, característica da martensita. Ao fundo, em branco, mostra-se austenita retida, que não se modificou com o resfriamento forçado.

Figura 9- Micrografias com aumento de 100x obtidas das amostras revenidas.

(a) Amostra do corpo de prova 5. (b) Amostra do corpo de prova 6.



Fonte: Próprio autor.

Pode-se ver na Figura 9, a estrutura resultante da martensita, visto que apresenta um aspecto agulhado, no qual é denominada como martensita revenida. As regiões mais escuras, são formadas por perlita fina, conhecidas como troostita.

3.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas obtidas a partir dos ensaios de tração estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas das amostras ensaiadas.

Amostra	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de Área (%)
CP1	797	570	3,6	6,3
CP2	814	661	1,2	2,4
CP3	1244	838	8,4	15,4
CP4	1220	794	7,2	9,4
CP5	814	623	18,6	36,5
CP6	790	600	20	42,2

Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado nas tabelas acima, as propriedades mecânicas sofrem alterações significativas com os tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenimento. Essa diferença ocorre devido às mudanças estruturais ocorrida no material, assim como a alteração do tamanho do grão, onde:

- Nas amostras brutas (CP1 e CP2): devido o material apresentar estruturas não dissolvidas, como ferrita, perlita, bainita e martensita, com tamanho de grão maiores, ocorre pouco alongamento e redução de área.
- Nas amostras normalizadas e temperadas (CP3 e CP4): o aumento da resistência é resultante das distorções da estrutura martensítica, que bloqueiam o deslocamento dos constituintes do material em sua deformação plástica.
- Nas amostras revenidas (CP5 e CP6): o material apresentou maiores ductilidade e tenacidade, obtendo maiores alongamentos e redução de área.

3.3 Dureza

Conforme realizados os ensaios no equipamento KING, se obteve as seguintes durezas mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Dureza das amostras.

Amostra	Diâmetro (D_i / mm)	Dureza (Brinell)
CP1	3,30	341
CP2	3,30	341
CP3	2,90	444

CP4	2,90	444
CP5	3,80	254
CP6	3,80	254

Fonte: Próprio autor.

Pode ser visualizado um grande aumento da dureza após o tratamento térmico de têmpera (CP3 e CP4), esse aumento está relacionado com a microestrutura martensítica, cuja alta dureza está associada à distorção do reticulado, causado pela sua supersaturação de carbono; conforme mostrado na Figura 8.

No revenimento, ocorre uma diminuição da dureza devido a recristalização (CP5 e CP6), que produz um reajuste interno permitindo a estabilização do reticulado, e com isso aumentando a tenacidade e ductilidade do material.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi feita uma análise da influência dos tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenimento nos rodetes de moenda fundido em material SAE 4340, através de ensaios metalográfico e mecânicos.

Após a realização dos ensaios, pode-se concluir que todos os objetivos determinados foram atingidos, visto que, durante as etapas de tratamento térmico foi possível perceber plenamente as mudanças microestruturais e mecânicas ocorridas no material.

Para o CP1 e CP2, foram encontradas microestruturas típicas de um aço bruto, apresentando um tamanho de grão elevado e variadas microestruturas, como ferrita, perlita e bainita. Com os resultados encontrados nos ensaios mecânicos, foi possível avaliar que apresentaram limite de resistência (797 e 814 MPa) e limite de escoamento (570 e 661 MPa) parecidos com as amostras revenidas, porém o alongamento (3,6 e 1,2%) e estrição (6,3 e 2,4%) resultaram em valores muito baixos, que ocorreu, pois, o material com grão avantajado tende a escoar menos, apresentando maiores durezas (341 HB), e se rompendo sem ocorrer muita deformação.

Para o CP3 e CP4, pode-se perceber grandes alterações microestruturais, no qual ocorreu a nucleação das microestruturas presentes e a diminuição do tamanho de grão, formando assim, a estrutura martensítica. Obteve-se, nos ensaios mecânicos, o aumento excessivo do limite de resistência (1244 e 1220 MPa) e dureza (444 HB), resultados já esperados, devido a microestrutura apresentar grandes distorções, bloqueando o deslocamento

dos constituintes do material. O limite de escoamento (838 e 794 MPa), alongamento (8,4 e 7,2%) e estrição (15,4 e 9,4%) também aumentam, visto que, após o tratamento o material apresentou uma estrutura mais refinada.

Para o CP5 e CP6, as microestruturas não sofreram muitas alterações, uma vez que, se formou a martensita revenida apresentando também aspectos agulhados. Com o revenimento, as propriedades mecânicas diminuíram (Limite de resistência: 814 e 790 MPa; Limite de escoamento: 623 e 620 MPa; Dureza: 254 HB), devido à recristalização do material, reajuste interno de tensões e estabilização do reticulado centrado, aumentando assim, à ductilidade e tenacidade, podendo ser explicadas com o aumento do alongamento (18,6 e 20%) e estrição (36,5 e 42,2%).

Comparando os resultados obtidos nos processos de tratamentos térmicos de normalização/têmpera e revenimento, foi possível visualizar uma diminuição de aproximadamente 35% do limite de resistência, 25% do limite de escoamento, e aumento de 147% do alongamento e 220% estrição para o aço SAE 4340

Por fim, se conclui que os tratamentos térmicos são de grande importância para os processos metalúrgico, transformando completamente as microestruturas dos aços e disponibilizando-os variadas propriedades mecânicas

REFERÊNCIAS

CALLISTER. W. D. Jr. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 702 p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986. 266 p.

FERNANDES, P. J. ENSAIOS METALOGRAFICOS. **ProfPaulofj**, 2011. Disponível em: <<http://profpaulofj.webs.com/>>. Acesso em: 05 novembro 2015.

WELDING. RECONDICIONAMENTO DE RODETE. **Welding**. Disponível em: <<http://www.welding.com.br/site/recondicionamento-de-rodetes>>. Acesso em: 15 setembro 2015.

ZBN INDÚSTRIA MECÂNICA LTDA. Rodetes. **ZBN**. 2015. Disponível em: <<http://zbn.com.br/produtos-view/rodete/>>. Acesso em: 8 setembro 2015.