

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA**

FILIPPE REZENDE MACHADO

**DESENVOLVIMENTO DE PADRÕES DE AÇO EUTETÓIDE PARA CALIBRAÇÃO
E AFERIÇÃO DE SISTEMA DE ANÁLISE POR IMAGEM: PERLITA FINA E
MARTENSITA**

Juiz de Fora

2018

FILIFE REZENDE MACHADO

**DESENVOLVIMENTO DE PADRÕES DE AÇO EUTETÓIDE PARA CALIBRAÇÃO
E AFERIÇÃO DE SISTEMA DE ANÁLISE POR IMAGEM: PERLITA FINA E
MARTENSITA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior

Juiz de Fora

2018

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

Machado, Filipe Rezende.

Desenvolvimento de padrões de aço eutetóide para calibração e aferição de sistema de análise por imagem : perlita fina e martensita / Filipe Rezende Machado. -- 2018.

68 f. : il.

Orientador: Moisés Luiz Lagares Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2018.

1. Microconstituintes. 2. Aço eutetóide. 3. Tratamento térmico. I. Lagares Júnior, Moisés Luiz , orient. II. Título.

FILIFE REZENDE MACHADO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 8 de Novembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

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

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que se fez presente em toda minha vida me dando tudo que fosse necessário para minha caminhada acadêmica.

Agradeço à minha família, em especial a minha mãe, que sempre esteve ao meu lado, me ajudando em tudo que pudesse ser feito para que essa etapa fosse concluída.

Agradeço à minha namorada Mariana pelo incentivo, entendimento e por ter passado todas as dificuldades ao meu lado. Te amo!

Agradeço aos meus amigos de república Felipe Souza, Vitor Monteiro e Marcos Duarte que se fizeram presentes ao longo dessa caminhada. Agradeço também os amigos Leonardo Siqueira, Daniel Torquato, Paula Mattos e Danielle Ribeiro pelas inúmeras ajudas concedidas.

Ao meu orientador Moisés Luiz Lagares Júnior que me confiou este trabalho e que sempre me ajudou e ensinou diante todas as dúvidas.

Agradeço ao Albert supervisor do SENAI pela ajuda prestada.

Agradeço a todos os professores (as) da UFJF pelos ensinamentos.

A melhor maneira de prever o futuro é cria-lo.

(Peter Drucker)

RESUMO

Os microconstituintes dos aços derivados de tratamentos térmicos são identificados visualmente seguindo critérios normalizados. Contudo, a determinação de tais microconstituintes tem grau de subjetividade em função da interpretação pessoal do avaliador. Assim, a variação de resultados pode ser alta, não sendo descartados erros de interpretação. O Laboratório para Otimização de Processos de Soldagem (LOPS) da UFJF está desenvolvendo um algoritmo para identificação via análise de imagens e inteligência artificial, dos microconstituintes dos aços. Este trabalho teve como objetivo fornecer amostras de aço eutetóide tratados termicamente para atuarem como padrões de calibração e aferição do sistema em desenvolvimento. As microestruturas obtidas nesse trabalho são a perlita fina e a martensita. O aço analisado tem em sua composição química 0,73% p C e foi obtido através do seccionamento de uma parte de roda ferroviária, onde já apresentava em sua microestrutura a perlita fina. As etapas deste trabalho consistiram em cortar as amostras e usina-las a fim de se obter corpos de prova com geometria adequada. Após prepará-los, uma das amostras foi submetida ao tratamento de têmpera para obtenção de martensita no aço eutetóide, com resfriamento rápido feito em óleo. O corpo de prova foi aquecido até 800° C e resfriado a um banho de 23,5° C. A outra amostra não foi submetida a tratamentos, pois já apresentava em sua microestrutura a perlita fina. O procedimento de análise microestrutural foi feito após as superfícies dos corpos de prova serem lixados, polidos e atacados quimicamente. O resultado visto ao microscópio foi comparado a imagens contidas nas literaturas e um ensaio de dureza foi feito de modo a reafirmar a microestrutura encontrada. Dentre os resultados obtidos, os aspectos visuais das microestruturas foram coerentes com imagens contidas em algumas referências, tendo uma perlita fina bem definida e uma martensita de granulação mista com certa quantidade de austenita retida, aproximadamente 6%. As durezas encontradas foram de 36 HRC para a perlita fina e de 65,75 HRC para a martensita, sendo ambas dentro dos valores teóricos estudados, reafirmando as microestruturas encontradas.

Palavras-chave: Microconstituintes. Tratamentos Térmicos. Aço Eutetóide. Perlita Fina. Martensita

ABSTRACT

The microconstituents of steels derived from heat treatments are visually identified following standardized criteria. However, the determination of such microconstituents has a degree of subjectivity in function of the personal interpretation of the evaluator. Thus, the variation of results can be high, and interpretation errors are not ruled out. The Laboratory for Optimization of Welding Processes (LOPS) of the UFJF is developing an algorithm for identification through image analysis and artificial intelligence, of the microconstituents of the steels. The objective of this work was to provide thermally treated Eutectoid steel samples to serve as calibration and calibration standards for the developing system. The microstructures obtained in this work are fine perlite and martensite. The analyzed steel has in its chemical composition 0.73% p C and was obtained through the sectioning of a part of railway wheel, where already had in its microstructure the fine perlite. The steps of this work consisted of cutting the samples and milling them in order to obtain specimens of suitable geometry. After preparation, one of the samples was submitted to the tempering treatment to obtain martensite in eutectoid steel, with fast cooling made in oil. The specimen was heated to 800 ° C and cooled to a 23.5 ° C bath. another sample was not submitted to treatments, since it already had in its microstructure the fine perlite. The procedure of microstructural analysis was done after the surfaces of the specimens were sanded, polished and chemically attacked. The result seen under the microscope was compared to images contained in the literature and a hardness test was done in order to reaffirm the microstructure found. Among the results obtained, the visual aspect of the microstructures was coherent with images contained in some references, having a well defined fine perlite and a mixed granulation martensite with a certain amount of retained austenite, approximately 6%. The hardness found was 36 HRC for fine perlite and 65.75 HRC for martensite, both of which were within the theoretical values studied, reaffirming the microstructures found.

Keywords: Microconstituents. Thermal Treatments. Eutectoid Steel. Fine Pearlite. Martensite

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados.....	18
Figura 2 – Representação das diferentes texturas devido as diferentes orientações cristalográficas após o ataque químico.....	21
Figura 3 – Estrutura cristalina dos aços, CCC e CFC.....	23
Figura 4 – Transformação alotrópica do ferro.....	23
Figura 5 – Diagrama de equilíbrio das ligas ferro-carbono.....	24
Figura 6 – Representação esquemática de aquecimento e resfriamento de tratamentos térmicos.....	26
Figura 7 – Superposição de curvas de resfriamento no diagrama de transformação para resfriamento contínuo.....	26
Figura 8 – Diagrama de transformação isotérmica de um aço eutetóide com valores de dureza.....	28
Figura 9 – Esquema de têmpera seguido do revenido.....	28
Figura 10 – Curva de transformação isotérmica da perlita.....	31
Figura 11 – Aspecto microscópico da perlita grossa	32
Figura 12 – Aspecto microscópico da perlita fina.	33
Figura 13 – Linha de transformação isotérmica da bainita.....	34
Figura 14 – Aspecto microscópico da bainita superior (formações escuras). Nital 4% ...	34
Figura 15 – Aspecto microscópico da bainita inferior (formações escuras). Nital 4%. ...	35
Figura 16 – Diagrama de transformação isotérmica para um aço eutetóide com linha de início da formação a martensita.....	36
Figura 17 – Aspecto microscópico da martensita (têmpera em óleo). Nital 2%.	38
Figura 18 – Aspecto microscópico da martensita (partes escuras) e austenita retida (partes claras). (têmpera em água). nital 4% + picral 4%.	38
Figura 19 – Aspecto microscópico da martensita com austenita retida (partes claras). Nital 2%.	39
Figura 20 – Cortadora metalográfica Fortel CF III.....	42
Figura 21 – Torno Romi T – 240.....	42
Figura 22 – Lixadeira manual de amostras metalográficas.....	43

Figura 23 – Politriz lixadeira metalográfica PL02 E.....	44
Figura 24 – Forno mufla Zezimaq – 2000F.....	44
Figura 25 – Microscópio ótico Olympus BX51M.....	45
Figura 26 – Durômetro Rockweel normal analógico Equilam.....	46
Figura 27 – Parte da roda sendo cortada.....	47
Figura 28 – Corpos de prova cortados e usinados.....	48
Figura 29 – Curva da têmpera experimental de um dos corpos de prova.....	49
Figura 30 – Forno mufla à temperatura constante de 800°C.....	49
Figura 31 – Recipiente usado para tratamento térmico e o óleo API SL SAE 20W50.....	50
Figura 32 – Procedimento de têmpera.....	50
Figura 33 – Processo de lixamento.....	51
Figura 34 – Processo de polimento.....	51
Figura 35 – Nital 3% e vidraria utilizada para o ataque químico.....	52
Figura 36 – Representação esquemática dos pontos onde foram medidas as durezas.....	53
Figura 37 – Superfície do material perlítico antes do ataque químico.....	55
Figura 38 – Perlita fina no aço eutetóide 1. Ataque: Nital 3%.	55
Figura 39 – Perlita fina no aço eutetóide 2. Ataque: Nital 3%.	56
Figura 40 – Perlita fina no aço eutetóide 3. Ataque: Nital 3%.	56
Figura 41 – Martensita no aço eutetóide 1. Ataque: Nital 3%.	58
Figura 42 – Martensita no aço eutetóide 2. Ataque: Nital 3%.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do material do corpo de prova.....	46
Tabela 2 – Perfil de durezas da perlita fina.....	59
Tabela 3 – Perfil de durezas da martensita.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS.

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TTT	Tempo, transformação e temperatura.
% p C	Porcentagem em peso de carbono
CFC	Cúbico de face centrada
CCC	Cúbico de corpo centrado
Mi	Início da transformação da martensita
Mf	Final da transformação da martensita
C	Carbono
Mn	Mânганês
Si	Silício
P	Fósforo
S	Enxofre
Cu	Cobre
Cr	Crômio
Ni	Níquel
Sn	Estanho
Nb	Nióbio
Mo	Molibdênio
Fe	Ferro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
1.3	ESCOPO DO TRABALHO.....	15
1.4	ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	MICROGRAFIA.....	17
2.1.1	Técnicas micrográficas.....	17
2.1.1.1	<i>Lixamento e polimento.....</i>	<i>18</i>
2.1.1.2	<i>Análise microscópica sem ataque.....</i>	<i>19</i>
2.1.1.3	<i>Ataque químico.....</i>	<i>19</i>
2.1.1.4	<i>Análises microscópicas.....</i>	<i>20</i>
2.1.1.4.1	Microscopia ótica.....	20
2.2	LIGAS FERRO CARBONO.....	21
2.2.1	Alotropia do ferro.....	22
2.2.2	Diagrama de equilíbrio ferro-carbono.....	24
2.2.3	Aços eutetóides.....	25
2.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS E ISOTÉMICOS.....	25
2.3.1	Transformação em resfriamento contínuo.....	26
2.3.2	Transformação isotérmica.....	27
2.3.3	Têmpera e revenido nos aços.....	28
2.3.4	Martêmpera.....	29
2.3.5	Austêmpera.....	30
2.3.6	Constituintes dos aços temperados.....	30
2.3.6.1	<i>Perlita.....</i>	<i>30</i>
2.3.6.1.1	<i>Perlita grossa.....</i>	<i>31</i>
2.3.6.1.2	<i>Perlita fina.....</i>	<i>32</i>
2.3.6.2	<i>Bainita.....</i>	<i>33</i>
2.3.6.2.1	<i>Bainita superior.....</i>	<i>34</i>

2.3.6.2.2	Bainita inferior.....	35
2.3.6.3	<i>Martensita</i>	35
2.4	PRÁTICAS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	39
2.4.1	Aquecimento	39
2.4.2	Esfriamento	40
2.5	ENSAIO DE DUREZA <i>ROCKWELL</i>	40
3	MÉTODOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	41
3.1	DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	41
3.1.1	Cortadora metalográfica	41
3.1.2	Torno	42
3.1.3	Lixadeira manual de amostras metalográficas	43
3.1.4	Politriz lixadeira metalográfica	43
3.1.5	Forno mufla digital microprocessado	44
3.1.6	Microscópio ótico	45
3.1.7	Durômetro <i>Rockwell</i> normal analógico	45
3.2	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	46
3.2.1	Material e dimensões	46
3.2.2	Corte e usinagem	47
3.2.3	Têmpera	48
3.2.4	Lixamento e polimento	51
3.2.5	Análise microscópica sem ataque	52
3.2.6	Ataque químico	52
3.3	ANÁLISE MICROSCÓPICA COM ATAQUE.....	53
3.4	ENSAIO DE DUREZA <i>ROCKWELL</i>	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MICROESTRUTURAS.....	54
4.1.1	Resultados e análise microestrutural da perlita fina	54
4.1.2	Resultados e análise microestrutural da martensita	57
4.2	RESULTADOS E ANÁLISES DAS DUREZAS.....	59
4.2.1	Dureza do material composto de perlita fina	59
4.2.2	Dureza do material composto de martensita	60

5	CONCLUSÃO.....	61
5.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE.....	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Para Chiaverini (2008), a aplicação das ligas metálicas nos diferentes setores da engenharia é baseada principalmente nas suas propriedades mecânicas; ou seja, na capacidade de suportar cargas quando solicitadas. Além das propriedades mecânicas requeridas nas aplicações, existem outras propriedades que também são de grande importância, tais como resistência à corrosão, resistência ao calor, propriedades elétricas e propriedades magnéticas, etc.

Alguns processos de fabricação de peças metálicas podem alterar as propriedades mecânicas e conseqüentemente a microestrutura do material, sendo assim, é necessário um processo posterior para conferir propriedades adequadas ao material da peça fabricada. O processo utilizado para se obter as propriedades e microestruturas desejadas nos materiais de peças já prontas sem que haja mudança na composição química do material é o tratamento térmico. A técnica de tratamento térmico se baseia em um processo de aquecimento ou resfriamento controlado da peça que se deseja tratar termicamente.

O processo de têmpera parece ter sido desenvolvido pelos romanos, para endurecer e aumentar a resistência ao desgaste de ferramentas. O processo foi descoberto casualmente pelos antigos ferreiros, que após martelarem suas ferramentas a quente enfriavam-nas em água fria para que não ficassem quentes dentro de suas oficinas, e percebiam que após esse procedimento suas ferramentas ficavam mais duras (TSCHIPTSCHIN, 2016).

As alterações feitas nas propriedades mecânicas dos materiais após algum tratamento térmico, na verdade são provenientes de uma alteração microestrutural na liga metálica que compõe esse material. Cada variável envolvida no processo de tratamento térmico tais como velocidade de resfriamento ou banho a determinada temperatura por determinado tempo faz com que a organização dos constituintes da liga se organize de forma diferente, ocasionando diferentes microestruturas e propriedades mecânicas.

O reconhecimento das microestruturas formadas durante o tratamento térmico desses aços é muito importante e requer uma série de avaliações para que haja uma caracterização correta da estrutura do material. As diferentes composições químicas dos aços e as formas diferentes de se fazer tratamentos térmicos faz com que cada microconstituente se apresente

de diferentes formas em cada material, sendo assim, a análise microestrutural se faz muito importante.

1.2 JUSTIFICATIVA

O trabalho desenvolve padrões de aços eutetóides para calibração e aferição de um sistema de análise de microestrutura de aços por imagem. As fotomicrografias foram obtidas após análise de amostras de aços tratados termicamente sobe parâmetros que teoricamente garantiriam microestruturas puras.

Atualmente a técnica de um ensaio micrográfico é realizada toda por um avaliador. As etapas desse procedimento de análise visual são feitas de forma que facilite ao máximo a observação e classificação das microestruturas. A observação é feita através de um microscópio por um avaliador, podendo ter diferentes interpretações entre diferentes avaliadores. A escolha das peças a serem analisadas, o acabamento superficial e o ataque da superfície por um reagente químico adequado, serão sempre dependentes de um profissional apto para fazer tais escolhas, porém, a análise das microestruturas existentes no aço podem ser otimizadas através de meios de análise por imagem através de inteligência artificial.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O primeiro passo do trabalho foi desenvolver uma fundamentação teórica bem consistente e completa, para então avançar para a parte experimental. A parte experimental consistiu em cortar e usinar as amostras de aços, aplicar tratamento de têmpera sobe um dos corpos de provas, preparar as superfícies, leva-las ao microscópio para obtenção das fotomicrografias de perlita fina e martensita, e por último medir as durezas para comparar com valores teóricos descritos na fundamentação teórica.

1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

O trabalho tem por objetivo principal desenvolver padrões de aços eutetóides através de corpos de provas tratados termicamente e analisados. Os padrões serão fotomicrografias de amostras de aços analisadas e se validadas como perlita fina e martensita, poderão ser utilizadas como calibração de um sistema de análise por imagem de reconhecimento de microestruturas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MICROGRAFIA

A micrografia estuda e interpreta a estrutura interna de produtos metalúrgicos através de um microscópio, visando a determinação da sua microestrutura e composição química. (COLPAERT, 1974).

Através da micrografia dos materiais podem-se analisar os grãos do material, tipo de tratamento térmico ou termoquímico, o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões. Os estudos dessas microestruturas nos aços são feitas em amostras de material com superfícies planas e polidas submetidas a um ataque químico (ROHDE, 2010, PAVANATI, 2016).

2.1.1 Técnicas micrográficas

A técnica de um ensaio micrográfico pode ser dividida nas seguintes fases: (COLPAERT, 1974).

- a) Escolha e localização da secção a ser estudada.
- b) Realização de uma superfície plana e polida no lugar escolhido.
- c) Exame ao microscópio para a observação das ocorrências visíveis sem ataque.
- d) Ataque da superfície por um reagente químico adequado.
- e) Exame ao microscópio para a observação da textura.

A escolha da secção da peça para análise micrográfica de materiais obtidos através de fundição geralmente são simples, pois o aspecto visual é mais uniforme, com uma variação de aspecto entre a periferia e o centro. Essa variação se dá pelo tempo de resfriamento do metal fundido da peça e pode ser observada uma granulação mais fina na superfície da peça (COLPAERT, 1974).

2.1.1.1 Lixamento e polimento

As peças para análise micrográfica requerem um alto grau de perfeição na superfície a ser analisada, e o lixamento e polimento dessa superfície requer cautela e é um dos processos mais demorados na preparação de amostras metalográficas. Após o corte e preparação da amostra a ser analisada, a superfície é cuidadosamente lixada com lixas comuns de oficina mecânica (COLPAERT, 1974, ROHDE, 2010).

Segundo Rohde (2010) a técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) de acordo que a granulação da lixa for diminuindo, até desaparecerem os traços da lixa anterior.

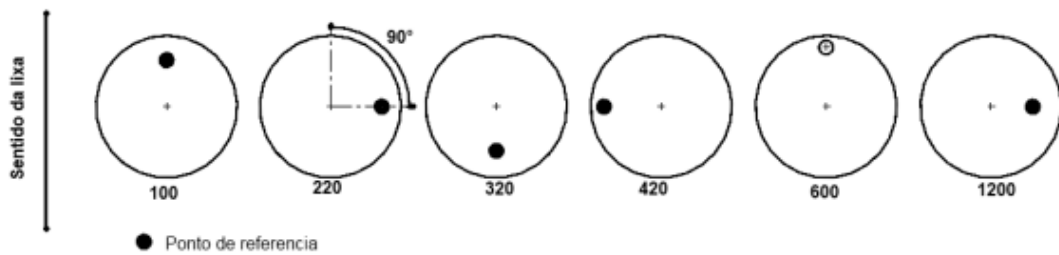


Figura 1: Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados
Fonte: (ROHDE, 2010)

A numeração das lixas para o lixamento metalográfico são 100, 220, 320, 400, 600 e 1200, podendo haver alterações. Para um lixamento eficaz é necessário que a superfície a ser lixada esteja limpa e isenta de óleo ou graxa. As lixas utilizadas em um determinado aço não devem ser reutilizadas para lixar outro tipo aço (ROHDE, 2010).

Durante o processo de lixamento deve-se evitar aplicar pressão excessiva da amostra sobre a lixa, de modo a evitar que o material sofra algum tipo de deformação ou que perca sua planicidade. A limpeza da peça no término de cada lixamento é muito importante, pois os abrasivos da lixa anterior podem riscar a superfície do material. (PAVANATI, 2016).

O polimento é a operação que se faz após o processo de lixamento e tem como objetivo a obtenção de uma superfície lisa e sem marcas. Para se obter uma superfície perfeitamente polida é utilizado abrasivo como pasta de diamante ou alumina e é necessário que a superfície a ser polida esteja limpa e sem riscos profundos resultantes do processo de lixamento. Define-se polimento por processo mecânico quando se é feito através de uma

politriz. No polimento por processo mecânico, as amostras podem ser polidas manualmente no disco de polimento e automática quando se tem equipamentos especiais. (ROHDE, 2010).

O diamante é o agente mais utilizado para o polimento mecânico, devido suas características quanto á granulometria, dureza, forma e poder de desbaste. A alumina também é muito utilizada como agente polidor e apresenta características muito eficazes no polimento de amostras de aço (ROHDE, 2010).

2.1.1.2 Análise microscópica sem ataque

Recomenda-se que antes do ataque químico a superfície polida seja observada ao microscópio para o exame das inclusões, trincas, porosidades, veios ou partículas de grafita, ou outras ocorrências (COLPAERT, 1974).

Após a observação menos aproximada da superfície polida no microscópio e a constatação de que a amostra está isenta de marcas ou inclusões indesejadas, se faz o ataque químico para que possibilite uma análise micrográfica.

2.1.1.3 Ataque químico

O ataque geralmente é feito por imersão do corpo de prova com a superfície polida mergulhada no reativo posto numa pequena cuba. A duração do ataque depende da concentração do reativo e da natureza e textura do material examinado. Para aços e ferros fundidos comuns, é indicada uma imersão da ordem de 5 a 15 segundos e após o ataque a amostra é lavada com álcool e secada com um secador e um chumaço de algodão. (COLPAERT, 1974).

Os reagentes mais comuns são nital, picral e o reagente de Vilella. (RAY & DHUA, 1996).

O nital 3% é reativo para micrografia de aço e ferro não ligado e de baixa liga, metal branco, ligas de magnésio, também para aços de alta liga com estrutura martensítica (ROHDE, 2010).

2.1.1.4 Análises microscópicas

Na maior parte dos materiais, os grãos constituintes possuem dimensões microscópicas, com diâmetros extremamente pequenos, com detalhes que só são possíveis de ser investigados se for utilizado algum tipo de microscópio. O tamanho e a forma dos grãos são aspectos da sua microestrutura (CALLISTER, 2008).

Para análise micrográfica geralmente são acoplados equipamentos fotográficos ao microscópio, a fim de se registrar fotografias da microestrutura denominadas “fotomicrografias”. O microscópio ótico é muito utilizado para análise microestrutural de ligas ferro-carbono. Dentre as aplicações importantes da microscopia de materiais estão: análise de microestruturas; análises de defeitos; prever as propriedades dos materiais; projetar ligas com novas propriedades; determinar se o material foi tratado térmicamente de maneira correta; verificar fraturas mecânicas (CALLISTER, 2008).

2.1.1.4.1 Microscopia óptica

Na microscopia óptica, o microscópio ótico é utilizado pra estudar a microestrutura; sistemas óticos e de iluminação são seus elementos básicos (CALLISTER, 2008).

A superfície plana e polida dos metais geralmente apresenta uma forma muito reflexiva, e se vistas ao microscópio retornam imagens totalmente amarelas, resultante dos feixes de luz refletidos de maneira unidirecional pelo material. O ataque químico faz a superfície perder um pouco da sua refletividade, se apresentando de forma opaca, resultante das diferentes orientações dos constituintes após serem atacados.

Os contrastes na imagem produzida são conseqüências das diferentes refletividades das diversas regiões da microestrutura (CALLISTER, 2008).

Quando a superfície do material a ser analisado é atacada quimicamente, o material revela detalhes da microestrutura, conforme mostra a figura 2. A diferença de reatividade química de cada material se dá devido às diferentes orientações cristalográficas. Em um material policristalino a característica do ataque químico varia de grão para grão (CALLISTER, 2008).

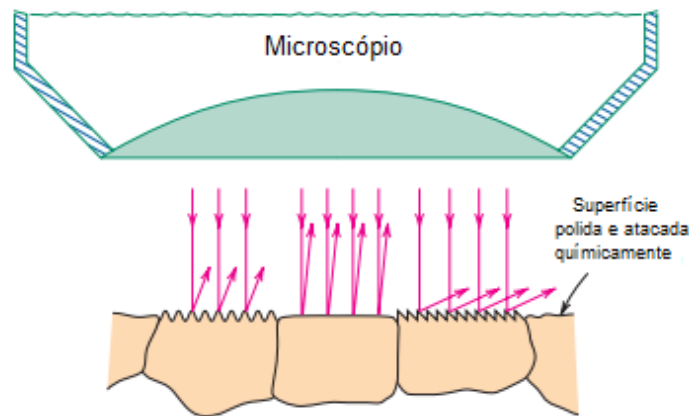


Figura 2: Representação das diferentes texturas devido as diferentes orientações cristalográficas após o ataque químico

Fonte: (CALLISTER, 2008)

2.2 LIGAS FERRO-CARBONO

Na natureza, o ferro se apresenta sob a forma de óxidos, nos minérios de ferro, dos quais é extraído por meio de um forte aquecimento em presença de coque ou carvão vegetal, em fornos, nos quais o óxido é reduzido e o ferro resultante ligado ao carbono, formando assim a liga ferro-carbono. (COLPAERT, 1974).

Segundo Vale (2011), a quantidade de ferro existente na natureza é aproximadamente vinte vezes maior que todos os outros materiais não ferrosos juntos, sendo assim, o ferro é o material mais importante e mais empregado nos setores industriais.

As ligas ferro-carbono apresentam uma ampla faixa de aplicação, pois através da porcentagem de carbono existente, elementos de liga, tratamentos térmicos ou termoquímicos e mecanismos de mudanças de propriedades mecânicas, se podem adequar o material aos diversos tipos de aplicação.

Dentre as ligas ferro-carbono têm-se os aços e os ferros fundidos e o que os diferem é a quantidade de carbono existente na liga. Define-se como aço uma liga com teor de carbono entre 0,008% até 2,14% de C e ferros fundidos entre 2,14% p C até 6,70% p C (CALLISTER, 2008).

A definição de um aço carbono pode ser feita como sendo uma liga binária com seus principais elementos o ferro e o carbono, porém os aços comerciais no geral contêm outros elementos secundários, devido aos processos de fabricação. (CHIVERINI, 1986).

Embora uma liga de aço possa conter até 2,14% p C, na prática, as concentrações de carbono raramente excedem 1,0% p C. (CHIAVERINI, 2008).

Segundo Chiaverini (2008), os aços são as ligas metálicas que mais são sujeitadas ao tratamento térmico, pois sua estrutura, durante essas operações, pode sofrer grandes mudanças, acarretando, em consequência, boas propriedades para suas aplicações na indústria e na engenharia em geral.

2.2.1 Alotropia do ferro

Os metais são constituídos por um aglomerado compacto de átomos, arranjados ordenadamente, denominado estrutura cristalina (TSCIPTSCHIN, 2016).

O ferro é um elemento cuja forma ou reticulado cristalino é cúbico (CHIVERINI, 2008).

O ferro tem como característica a capacidade de ter diferentes formas alotrópicas, ou seja, possui diferentes formas cristalinas cúbicas de acordo com a sua temperatura. As formas cristalinas são ferro cúbico de corpo centrado (CCC) e o ferro cúbico de face centrada (CFC) (CHIAVERNI, 2008).

A estrutura CCC se caracteriza por um cubo onde os átomos se localizam nos vértices e no centro da célula unitária, podendo ser chamada de “alfa” ou “delta”. A estrutura CFC também se apresenta como um cubo, porém a distribuição dos átomos são diferentes, sendo localizado nos vértices e no centro de cada face do cubo, podendo ser chamado de ferro “gama” (VALE, 2011, CHIAVERINI, 2011).

A figura 3 ilustra a estrutura CCC e CFC.

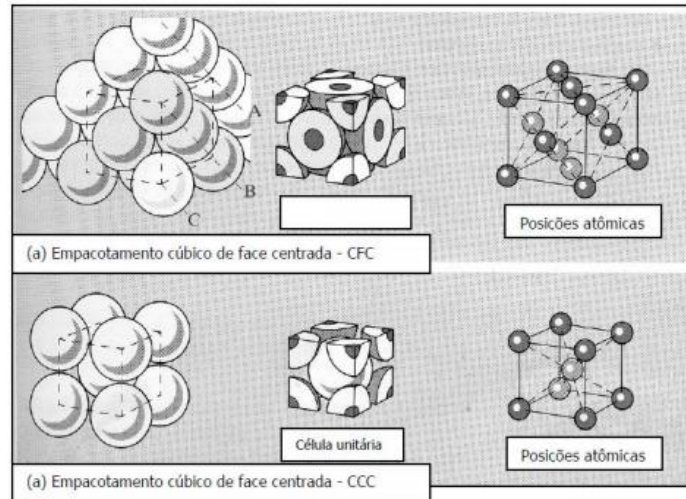


Figura 3: Estrutura cristalina dos aços, CCC e CFC.
Fonte: (TSCHIPTSCHIN, 2016)

Segundo David *et al* (2014), o ferro apresenta uma estrutura CCC em temperaturas que variam até 912°C , denominado ferrita alfa. Entre 912°C e 1394°C , o arranjo cúbico de face centrada (CFC) é o mais estável e esta forma é denominada austenita ou ferro gama. Acima desta temperatura até 1394°C , os átomos voltam a se arranjar na forma cúbica de corpo centrado (CCC), conhecida como ferrita delta e permanecem neste arranjo até a fusão do metal que se dá a uma temperatura de aproximadamente 1538°C , conforme a figura 4.

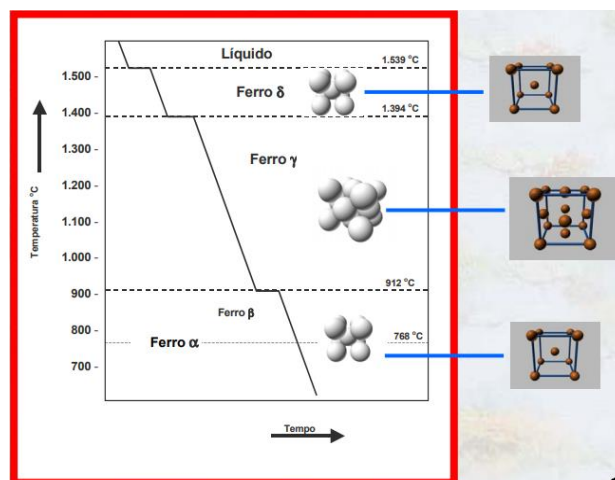


Figura 4: Transformação alotrópica do ferro
Fonte: (CARAM, 2015)

2.2.2 Diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono

De todos os sistemas de ligas binárias, o mais importante é o de equilíbrio do ferro-carbono. As diversas propriedades alcançadas nos aços através somente dos diferentes teores de carbono os tornam muito versáteis. Tanto os aços quanto os ferros fundidos que constituem os materiais mais utilizados nos diversos processos de fabricação, são essencialmente ligas ferro-carbono (CALLISTER, 2008).

O teor de carbono existente na liga faz com que os limites de temperatura em que são estáveis algumas formas estruturais se alterem. Se for associado a variação da temperatura com as diferentes porcentagens de carbono, pode-se através de pontos experimentais obter um digrama de transformações denominado diagrama de equilíbrio ferro-carbono (VALE, 2011).

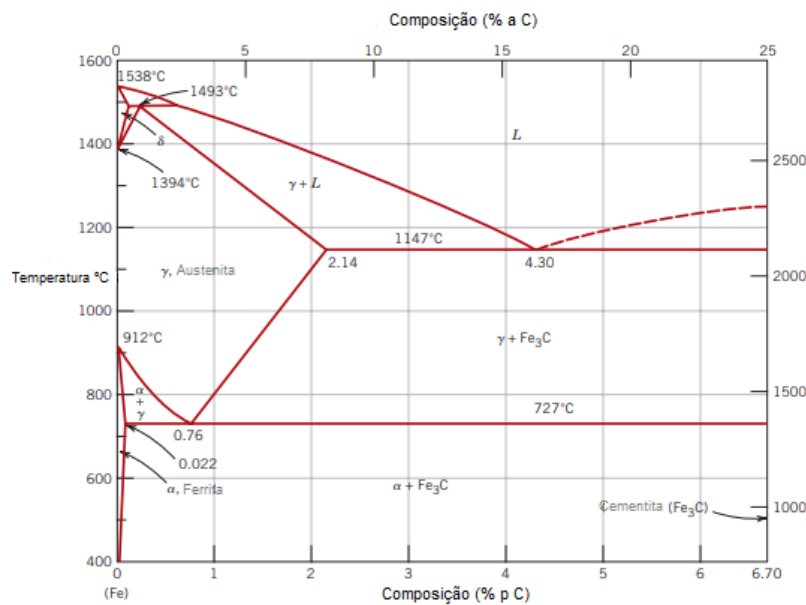


Figura 5: Diagrama de equilíbrio das ligas ferro-carbono.
Fonte: (CALLISTER, 2008)

A figura 5 mostra o diagrama completo, abrangendo o grupo dos aços e os ferros fundidos.

A parte do diagrama correspondente aos aços está entre 0,008% e 2,14% p C. Os aços hipoeutetóide (de 0,008% a 0,77% de C) se resfriados lentamente do campo austenítico, a austenita se transforma em “ferrita” e “perlita”. Nos aços eutetóides (0,77% de C), se resfriados lentamente, a austenita se transforma apenas em “perlita” e nos aços hipoeutetóides (de 0,77% a 2,14% de C) se transforma em “cementita” e “perlita” (CHIAVERINI, 2008).

2.2.3 Aços eutetóides

O aço eutetóide é um aço que possui em sua combinação ferro-carbono aproximadamente 0,76% em peso de carbono e recebe esse nome por ser proveniente de uma reação que se dá no ponto do diagrama de equilíbrio ferro-carbono denominado ponto eutetóide. A reação eutetóide é a reação na qual uma fase sólida se transforma em duas outras fases sólidas.

Os aços com concentração de carbono da ordem de 0,76% em peso são muito utilizados. Quando resfriados lentamente do campo austenítico, apresentam uma microestrutura de 100% de perlita. O ponto eutetóide é um ponto no diagrama no qual é denominado a menor temperatura de equilíbrio entre a perlita e a austenita, correspondente a 0,76% de carbono a temperatura de 727°C. Na transformação eutetóide a austenita γ se transforma em perlita que é a combinação de Ferrita α + Cementita β . (COLPAERT, 1974; CHIAVERINI, 2008; CALLISTER, 2008, DAVID *et al.*, 2014, , GAMBOGI *et al.*, 2014).

A quantidade dos constituintes que estão presentes nos aços pode ser estimada pela regra da alavanca. Em um aço eutetóide, a composição estrutural da perlita é de 88,5% de Ferrita e 11,5% de Cementita. (CHIAVERINI, 2008).

2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS E ISOTÉRMICOS

Tschiptschin (2016) define o tratamento térmico como sendo o aquecimento ou resfriamento controlado dos metais feito com a finalidade de alterar suas propriedades físicas e mecânicas sem alterar a forma do produto final.

Para realizar tratamentos térmicos e isotérmicos em peças é necessário se conhecer as curvas de transformação isotérmica e de resfriamento contínuo dos materiais (CHIAVERINI, 2008).

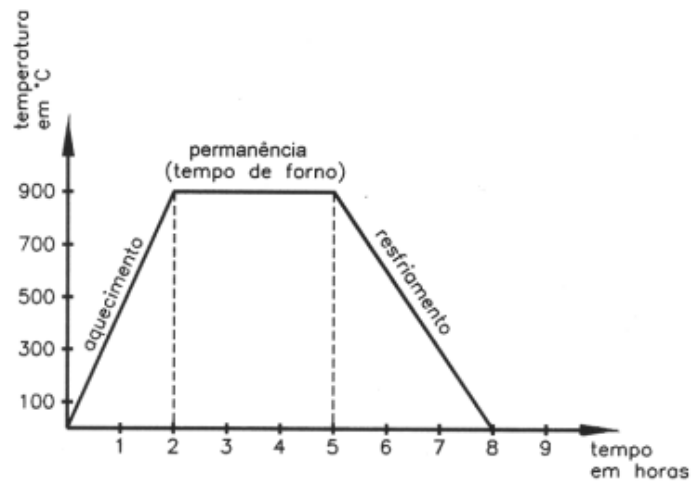


Figura 6: Representação esquemática de aquecimento e resfriamento de tratamentos térmicos
Fonte: (TSCHIPTSCHIN, 2016)

2.3.1 Transformação em resfriamento contínuo

Os tratamentos térmicos mais comuns são feitos por resfriamento contínuo, com diferentes velocidades de resfriamento desde a temperatura de austenitização, até a temperatura ambiente (COLPAERT, 1974).

Segundo Chiaverini (2008), o resfriamento contínuo feito sob altas velocidades é chamado de têmpera e produz estruturas bem definidas como a martensita. Se resfriados de modo mais lento se obtém a perlita grossa ou perlita fina conforme mostrado na figura 7. O tratamento utilizado para obtenção de perlita fina é chamado de normalização.

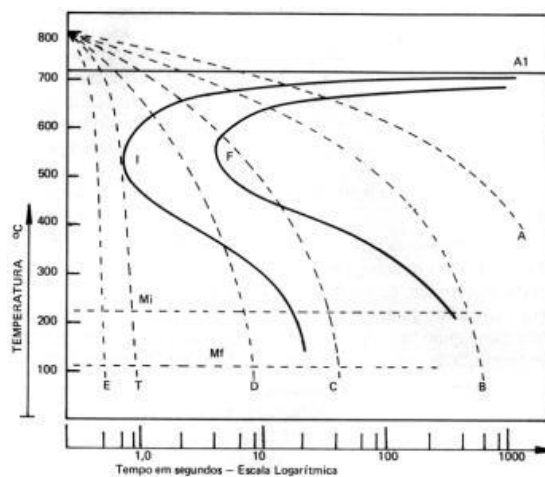


Figura 7: Superposição de curvas de resfriamento no diagrama de transformação para resfriamento contínuo
Fonte: (CHIAVERINI, 2008)

A figura 7 mostra as curvas de transformação no resfriamento contínuo, sendo: perlita grossa, curva A; perlita fina, curvas B e C; martensita, curvas E e T (CHIAVERINI, 2008).

2.3.2 Transformação isotérmica

A transformação isotérmica consiste na transformação da austenita quando o aço é resfriado rapidamente até determinadas temperaturas, abaixo da linha de transformação e ali mantido à temperaturas constantes (CHIAVERINI, 2008).

Determinadas microestruturas e propriedades nos materiais não são viáveis de serem obtidas pelo processo de resfriamento contínuo, sendo necessário o processo de transformação isotérmica do aço (VALE,2011).

O diagrama de transformação isotérmica também é chamado de diagrama TTT, e para uma composição eutetóide do aço está representado na figura 8.

A curva I marca o início da transformação da austenita e a curva F marca o fim. A fase microestrutural entre essas duas linhas da curva C é intermediária entre a austenita e a microestrutura correspondente a transformação. As linhas Mi e Mf horizontais marcam o início e o fim de formação da martensita (CHIAVERINI, 2008).

Através das transformações isotérmicas nos aços eutetóides se podem obter a perlita fina, perlita grossa, bainita superior, bainita inferior e a martensita, porém a transformação da martensita só depende da temperatura, e após iniciada a transformação da austenita em martensita o tempo não influenciará na transformação (VALE, 2011, CHIAVERINI, 2008).

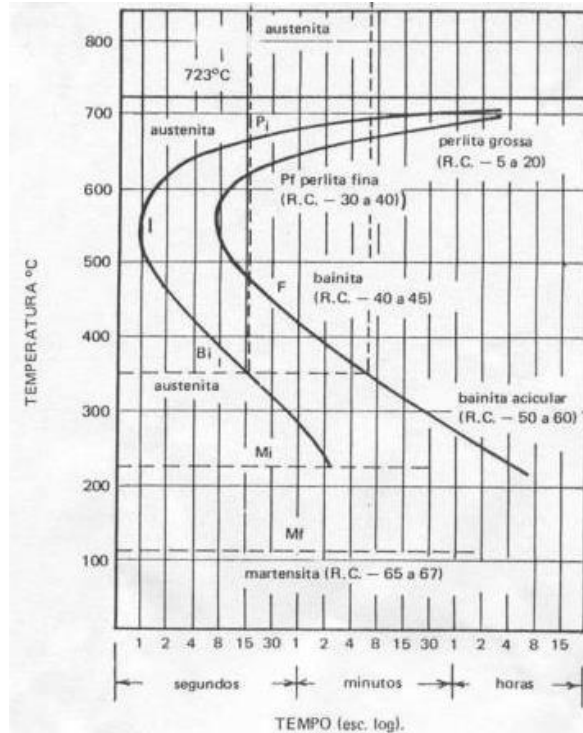


Figura 8: Diagrama de transformação isotérmica de um aço eutetóide com valores de dureza
Fonte: (CHIAVERINI, 2008)

2.3.3 Têmpera e revenido dos aços

A têmpera é uma operação de tratamento térmico por resfriamento contínuo aplicado principalmente nas ligas ferrosas e tem por objetivo o aumento da dureza do aço e melhorar a sua resistência ao desgaste. (VALE, 2011).

O processo de têmpera é considerado o tratamento térmico mais importante, pois é a partir da sua aplicação que se é possível obter propriedades mecânicas aos aços para atuarem em diversas aplicações. (CHIAVERINI, 2008).

A têmpera tem por objetivo se obter martensita (constituente metaestável endurecido do aço-carbono). A formação da martensita se dá de acordo com que a temperatura cai, começando assim que a transformação passe pela temperatura de aproximadamente 200°C, que se dá na linha Mi. O processo de formação da martensita será discutido nos próximos subcapítulos. Durante o tratamento para obtenção da martensita, se for mantida uma temperatura constante, a martensita não continua se transformando e só há transformação se a temperatura for decrescente até que seja ultrapassada a linha Mf, conforme a figura 9. A

operação de têmpera consiste em resfriamento drástico, partindo da temperatura de austenitização até um meio de resfriamento, como água, salmoura, óleo (CHIAVERINI, 2008, VALE, 2011).

Para fazer o revenimento, a peça após passar pelo processo de têmpera é aquecida até determinada temperatura e resfriada, de modo a se obter uma diminuição das tensões internas do material causada pela têmpera.

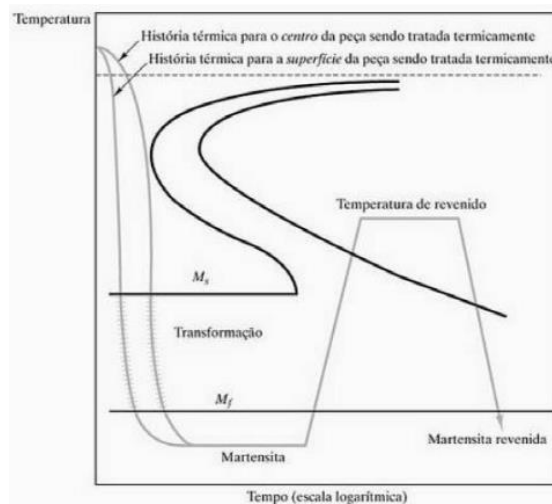


Figura 9: Esquema de têmpera seguido do revenido
Fonte: (SHACKELFORD, 2008)

2.3.4 Martêmpera

Martêmpera é um tratamento denominado isotérmico que também visa à obtenção da martensita, porém em condições diferentes da têmpera normal. Esse tipo de tratamento é baseado na transformação isotérmica e consiste na transformação lenta da austenita em martensita (CHIAVERINI, 2008).

Na operação de martêmpera o resfriamento é rápido até a linha de início de transformação da martensita. A partir da linha de transformação da martensita o resfriamento se dá em uma velocidade reduzida, de modo a ter-se uniformização da temperatura em toda a secção da peça. Como a permanência na fase de transformação da austenita em martensita é mais longa, a transformação na superfície e no centro das peças se realiza praticamente de modo simultâneo, o que reduz as tensões internas e a probabilidade de empenamento (CHIAVERINI, 2008, VALE, 2011).

2.3.5 Austêmpera

O procedimento de austêmpera provoca uma transformação isotérmica da austenita em bainita. Essa transformação se dá na linha abaixo da parte mais acentuada da curva “C” do diagrama TTT. O procedimento consiste em elevar a peça a uma temperatura acima da austenitização por determinado tempo e se fazer um resfriamento rápido até uma temperatura entre 260°C e 400°C, mantendo a peça em um banho de chumbo derretido ou sal fundido nessa faixa de temperatura. Após a completa transformação da austenita em bainita a peça é resfriada rapidamente até a temperatura ambiente (CHIAVERINI, 2008).

A dureza da bainita se comparada a da martensita é um pouco inferior, porém a bainita não precisa passar pelo procedimento de revenido após a sua obtenção. Em alguns casos que se deseja um material um pouco mais tenaz e com uma dureza mais alta a bainita é desejada.

2.3.6 Constituintes dos aços temperados

2.3.6.1 *Perlita*

A reação eutetóide, em aços, produz uma microestrutura característica chamada perlita (CALLISTER, 2008).

A perlita é o constituinte micrográfico formado por finas lamelas justapostas de ferrita e cementita e que ocorre abaixo de 723° C nas ligas ferro-carbono. As lamelas são mais ou menos paralelas podendo ser planas, curvas, ondeadas, etc. (COLPAERT, 1974).

Na perlita, as lamelas de ferrita se apresentam mais espessas e claras e as lamelas de cementita se apresentam mais finas e escuras (VALE, 2011).

À medida que a temperatura vai diminuindo durante o tratamento de resfriamento contínuo conforme mostrado na figura 7, ou em temperatura constante durante o processo de transformação isotérmica mostrado na figura 10, a austenita vai se transformando em perlita.

A perlita não é uma fase e sim uma mistura de fases e a razão entre as espessuras das camadas de ferrita e de cementita na perlita é de aproximadamente 8 para 1, entretanto, a espessura absoluta da camada depende da temperatura na qual a transformação isotérmica ocorre. Como a perlita provém da austenita de composição eutetóide, a quantidade de perlita presente é igual à da austenita eutetóide transformada. A dureza da perlita é intermediária

entre a ferrita e a cementita. Essa microestrutura quando vista ao microscópio, sob pequenas ampliações, apresenta-se como grãos pretos (CALLISTER, 2008).

Entre a temperatura de austenitização e a temperatura de transformação de outro microconstituente, a perlita apresenta duas formações diferentes que se dão a partir do tempo da transformação, sendo elas perlita grossa e perlita fina.

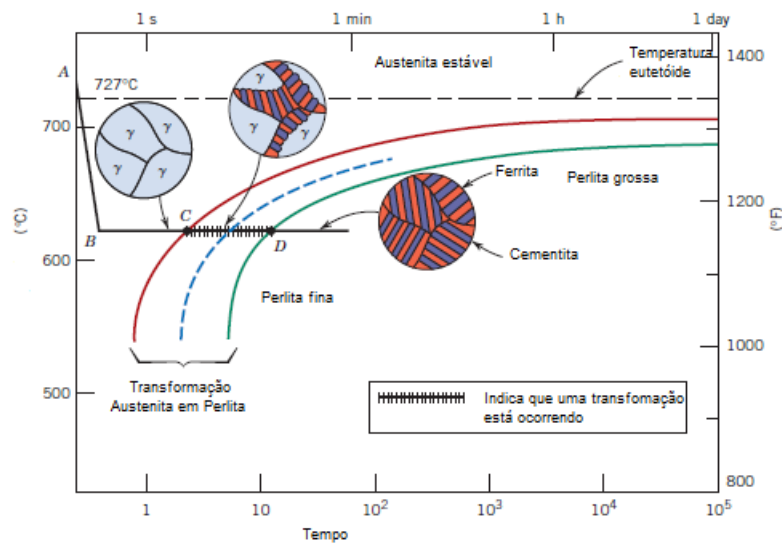


Figura 10: Curva de transformação isotérmica da perlita
Fonte: (CALLISTER, 2008)

2.3.6.1.1 Perlita grossa

A perlita grossa é a primeira microestrutura encontrada no tratamento isotérmico abaixo da temperatura de austenitização.

Em temperaturas abaixo da eutetóide são produzidas camadas relativamente grosseiras, tanto na fase da ferrita como na fase da cementita (CALLISTER, 2008).

A perlita grossa se dá devido ao fato de ser transformada a altas temperaturas, nas quais o início da transformação é mais demorado, resultando em perlita com uma granulação grosseira conforme a figuras 11. A sua obtenção é tida quando se mantém um banho a uma temperatura elevada na faixa de 650°C por determinado tempo (CALLISTER, 2008).

A faixa de dureza para a perlita grossa está entre 5 a 20 *Rockwell C* (CHIAVERINI, 2008).

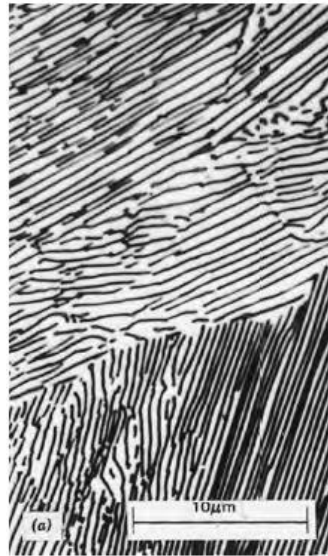


Figura 11: Aspecto microscópico da perlita grossa
Fonte: (CALLISTER, 2008)

2.3.6.1.2 Perlita fina

A estrutura com camadas finas que é produzida em tratamento isotérmico com temperatura constante acerca de 540°C é denominada perlita fina (CALLISTER, 2008).

Com a diminuição da temperatura durante a transformação isotérmica da perlita, o tempo para transformação e a taxa de difusão vai ficando menor, isto é, a demora entre o início e o final da transformação faz com que a granulação da perlita vá diminuindo, obtendo assim uma perlita com granulação mais fina, conforme mostrado na figura 12 (CALLISTER, 2008).

A dureza da perlita fina é um pouco superior se comparada a perlita grosseira, para os aços eutetóides ela está na faixa de 30 e 40 *Rockwell C* (CHIAVERINI, 2008).



Figura 12: Aspecto microscópico da perlita fina.
Fonte: (CALLISTER, 2008)

2.3.6.2 Bainita

A bainita é um microconstituente que nos aços eutetóides é formado através de uma transformação isotérmica da austenita em um procedimento de austêmpera conforme descrito no subcapítulo 2.3.5. A bainita é obtida do mesmo modo que a perlita, porém com uma temperatura constante mais baixa, conforme mostrado na figura 13. A forma da bainita se apresenta diferente da perlita, sendo uma estrutura de placas finas e compridas. (CHIAVERINI, 2008).

A microestrutura da bainita consiste nas fases ferrita e cementita, e, portanto, processos de difusão estão envolvidos na sua formação (CALLISTER, 2008).

Na obtenção da bainita, dependendo da temperatura em que o aço é mantido, ela pode se dar em duas formas, sendo bainita superior e bainita inferior.

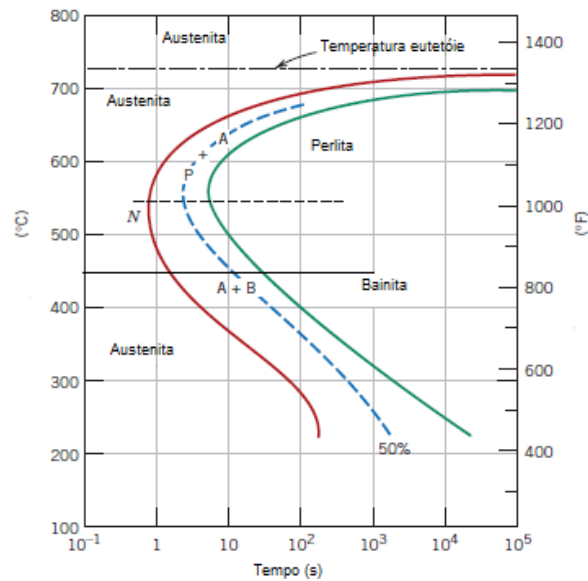


Figura 13: Linha de transformação isotérmica da bainita
Fonte: (CALLISTER, 2008)

2.3.6.2.1 Bainita superior

A bainita superior é obtida com o banho a temperatura constante na faixa de 500°C. Sua formação é um pouco abaixo da linha de transformação da perlita e as placas de ferrita apresentam-se em feixes com forma de penas conforme a figura 14. As partículas de carboneto da bainita superior se formam entre as placas de ferrita e tendem ser alongadas (CHIAVERINI, 2008).

A dureza da bainita superior está na faixa de 40 a 45 *Rockwell C* (CHIAVERINI, 2008).

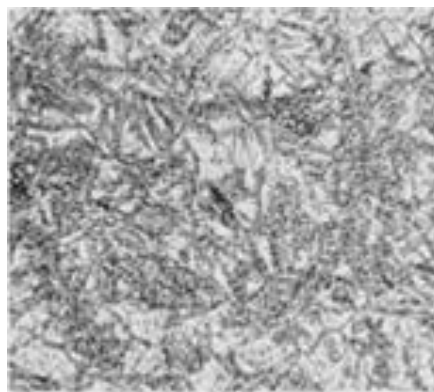


Figura 14: Aspecto microscópico da bainita superior (formações escuras). Nital 4%.
Fonte: (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1992)

2.3.6.2.2 Bainita inferior

A bainita inferior é obtida próxima às temperaturas de formação da martensita, aproximadamente a 350°C. Ao microscópio apresenta coloração escura e é composta de grandes placas (CHIAVERINI, 2008).

A figura 15 mostra o aspecto microscópico da bainita inferior, onde se pode observar uma granulação um pouco mais grosseira se comparada a bainita superior.

Os carbonetos da bainita inferior formam-se no interior das placas e se apresentam muito mais finos que os da bainita superior (CHIAVERINI, 2008).

A dureza da bainita inferior é alta, próxima da dureza da martensita, 50 a 60 *Rockwell C* (CHIAVERINI, 2008).



Figura 15: Aspecto microscópico da bainita inferior (formações escuras). Nital 4%.
Fonte: (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1992)

2.3.6.3 Martensita

A martensita é um microconstituente que é formado na faixa de 100°C a 200°C e não depende do tempo de resfriamento conforme mostrado na figura 16, porém algumas considerações devem ser tomadas para sua obtenção (CHIAVERINI, 2008).

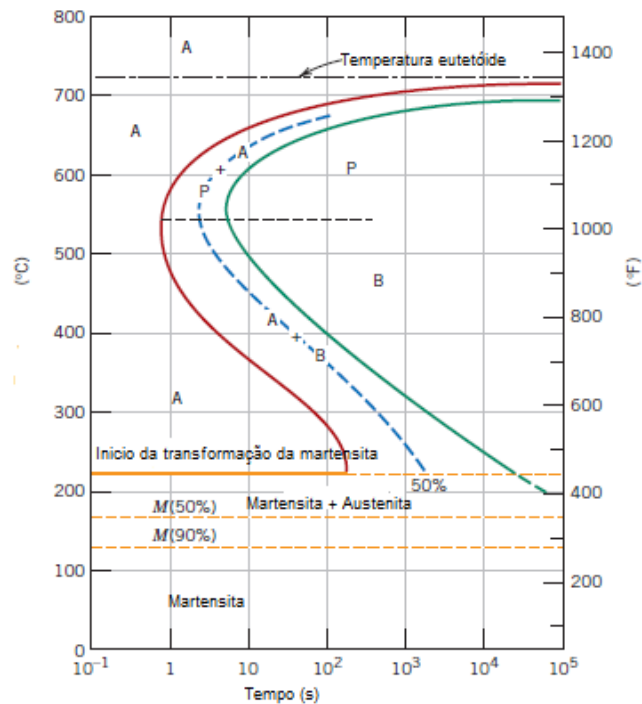


Figura 16: Diagrama de transformação isotérmica para um aço eutetóide com linha de início da formação a martensita

Fonte: (CALLISTER, 2008)

A formação da martensita acontece em um mecanismo de cisalhamento e não de difusão, conforme o da formação da perlita. A inexistência de difusão se deve ao fato da martensita se formar somente quando, no resfriamento, uma determinada temperatura é atingida (CHIAVERINI, 2008).

A martensita se apresenta em forma de agulhas cruzadas, os átomos de ferro estão nos vértices e os átomos de carbono estão nas faces e nas arestas conforme mostra a figura 17. Essas distorções na estrutura martensítica é que confere a grande dureza e resistência mecânica (COLPAERT, 1974).

A maneira em que a martensita se apresenta está ligada ao teor e carbono do aço, nos aços com um teor de carbono mais baixo, as placas de martensita são mais finas, denominadas martensita em “ripas”. Nos aços com teor de carbono mais alto, a formação da martensita se dá em placas e são denominadas martensita em “placas”. (CHIAVERINI, 2008).

Entre 0,6% p C e 1,0 %p C a martensita apresenta uma granulação mista (CHIAVERINI, 2008).

As linhas de início e fim da transformação da martensita são alteradas de acordo com a composição química do material (PEREIRA, 2012).

Os aços com teores de carbono mais altos tendem a ter suas curvas C deslocadas para a direita e suas linhas M_i e M_f deslocadas para baixo. Aços com baixos teores de carbono apresentam suas curvas C muito a esquerda do diagrama TTT, sendo assim, a obtenção de martensita em resfriamento rápido se torna praticamente impossível, o que é esperado, pois com pouco carbono, não ocorrerá movimentação atômica, que produz a estrutura típica da martensita (CHIAVERINI, 2008).

Além do carbono, todos os outros elementos de liga adicionados aos aços, com exceção do cobalto, deslocam as curvas C para a direita e rebaixam as linhas M_i e M_f (PEREIRA, 2012).

Segundo Pereira (2012), quando os aços são aquecidos acima do limite superior da zona crítica, praticamente todos os elementos encontram-se dissolvidos na austenita. No resfriamento, ao passar pela zona crítica, alguns elementos tendem a ficar dissolvidos na ferrita e outros a formar carbonetos. As reações que ocorrem são complexas e tanto mais numerosas quanto maior o número de elementos de liga e seu teor (até um certo limite). O início e término dessas reações ocorrem após um determinado tempo, o qual é função dos elementos de liga presentes, isto explica o deslocamento das linhas de início e de fim de transformação da austenita que ocorrem para os aços, mais intensamente para alguns, facilitando a obtenção da estrutura martensítica. Os elementos de liga deslocam também as linhas de início (M_i) e fim de transformação (M_f) da martensita, abaixando-as. Alguns aços ligados têm a linha M_f localizada abaixo da temperatura ambiente, apresentando então uma certa quantidade de austenita não transformada ("austenita retida" ou "austenita residual"). De todos os elementos, o carbono tem maior influência na temperatura M_s . Entre 0,3 e 0,4% p C já existe uma pequena quantidade de austenita retida. A maioria dos aços contendo mais do que 0,5% p C tem o M_f abaixo da temperatura ambiente.

Segundo Chiaverini (2008), em processo de têmpera dos aços para ferramentas e matrizes, utilizam-se além dos meios de resfriamento usuais como água, salmoura e banhos de sal, usam-se também meios de resfriamento subzero. A utilização de meio para tratamento subzero é feita a fim de se reduzir a quantidade de austenita retida, devido aos altos teores de carbono e elementos de liga presentes neste tipo de aço, os quais rebaixam as linhas M_i e M_f , essa última podendo estar abaixo de zero grau. O resfriamento subzero é feito logo a seguir ao resfriamento à temperatura ambiente (ao ar, óleo ou água). Um aço com 1,0 % p C, 1,5 % p Cr e 0,2% p V resfriado em óleo a 20° C, é comum uma estrutura martensítica com aproximadamente 7,0% de austenita retida.

Os aços rápidos constituem um dos grupos mais importantes dos aços para ferramentas. Esses aços também apresentam alto teor de carbono e elementos de liga. Quando temperados apresentam certa quantidade de austenita retida. A estrutura dos aços rápidos temperados consiste de uma martensita altamente ligada (58% a 80%), austenita retida altamente ligada (15% a 30%) e carbonetos não dissolvidos.

A dureza da martensita em um aço eutetóide esta na faixa de 65 a 67 Rockwell C (CHIAVERINI, 2008).

As figuras 17, 18, e 19 mostram a formação da martensita em diferentes situações.

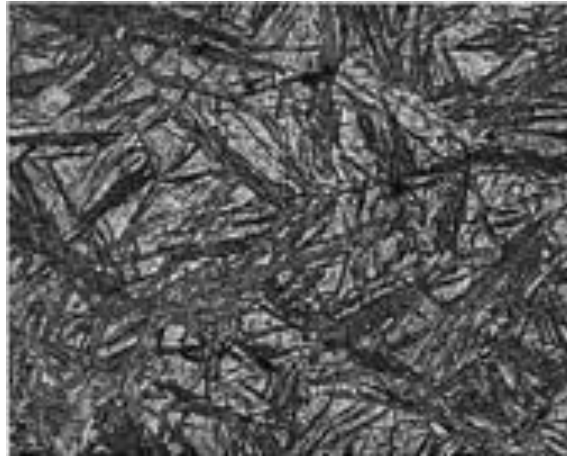


Figura 17: Aspecto microscópico da martensita (temperada em óleo). nital 2%.
Fonte: (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1992)

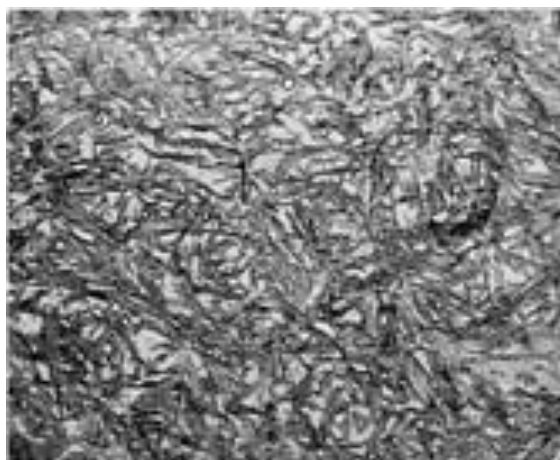


Figura 18: Aspecto microscópico da martensita (partes escuras) e austenita retida (partes claras) (têmpera em água). nital 4% + picral 4%.
Fonte: (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1992)



Figura 19: Aspecto microscópico da martensita com 20% da austenita retida (partes claras). Nital 2%.
Fonte: (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1992)

2.4 PRÁTICAS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

2.4.1 Aquecimento

A forma de aquecimento das peças nos tratamentos térmicos é de grande importância e necessitam de cuidados para que não ocorram fenômenos indesejados. As peças devem ser aquecidas uniformemente de modo a prevenir a descarbonetação, a oxidação e a deformação das peças (COLPAERT, 1974).

O aquecimento das peças exige cuidadoso controle da velocidade de aquecimento, para evitar choque térmico e para permitir quando for o caso, total austenitização, evitando-se ao mesmo tempo, sempre que possível excessivo crescimento de grão (CHIAVERINI, 2008).

Para pesquisa é recomendado o uso de corpos de prova de seção circular para que o aquecimento seja uniforme.

A experiência do operador se faz muito importante no aquecimento, pois é através dele que é feito o controle da velocidade de aquecimento, distribuição da temperatura na carga e o tempo de permanência à determinada temperatura. Para um aquecimento total de uma peça uniforme, admite-se que seja necessário pelo menos um minuto por milímetro de espessura para obter uniformização de temperatura da peça (CHIAVERINI, 2008).

O aquecimento das peças a serem temperadas pode ser feito em fornos de mufla, ou em banhos de chumbo, ou de sais. Para cada teor de carbono existe uma temperatura mais adequada, que é da ordem de 50°C acima do limite superior da zona crítica (COLPAERT, 1974).

2.4.2 Esfriamento

O esfriamento das peças nos tratamentos térmicos deve ser controlado de maneira que se obtenham estruturas e propriedades desejadas.

A escolha do banho depende da têmpera que se quer dar e da qualidade do aço a ser tratado, porque certos aços trincam e empenam quando temperados em água e s  suportam têmpera branda (COLPAERT, 1974).

Corpos de prova de formatos cilíndricos garantem também um resfriamento uniforme e diâmetros menores garantem uma maior área da sec o tratada térmicamente e conseqentemente transformada.

A  gua é um meio de têmpera bastante eficiente e econ mico, sendo um meio de resfriamento rápido, porém em peças pequenas podem acarretar problemas tais como a não transforma o completa da austenita em martensita, devido ao rápido esfriamento. Os  leos são meios de têmpera em geral brandos, empregados quando há perigo de empenamentos, trincas, tensões internas excessivas (COLPAERT, 1974).

Nos  leos, a transi o do estágio de transporte de vapor ao estágio de resfriamento do líquido é menos acentuada, de onde o choque térmico no resfriamento   menor (CHIAVERINI, 2008).

2.5 ENSAIO DE DUREZA *ROCKWELL*

Os ensaios *Rockwell* constituem o método mais comumente utilizado para medir a dureza, pois são muito simples e não exigem habilidades especiais. O ensaio é feito a partir de um penetrador que pode ter diferentes formas e materiais. Várias escalas diferentes podem ser utilizadas a partir de combina es possíveis de vários penetradores e diferentes cargas, que permite ensaio de todas as ligas metálicas. O número de dureza é determinado pela diferença na profundidade de penetra o resultante da aplica o de uma carga inicial menor seguido por uma carga principal maior ensaio (CALLSITER, 2008).

Para o ensaio *Rockwell*, a carga menor   de 10 Kgf, enquanto as cargas principais podem ser de 60, 100 e 150 Kgf.

O dispositivo para medir dureza *Rockwell* pode ser automatizado ou analógico. O número de dureza *Rockwell* deve ser seguido de HR que indica ser dureza *Rockwell* e um sufixo que pode ser (A,B,C, etc) que indica a escala.

3 MÉTODOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como objetivo descrever os equipamentos, materiais, métodos e planejamentos adotados para extrair imagens padrões de perlita fina e martensita através de corpos de provas de aços eutetóide analisados microscopicamente. A estrutura original do material dos corpos de prova sem tratamento é perlita fina, sendo necessário o tratamento térmico em somente um corpo de prova. Durante esse capítulo será mostrado como foi feita a preparação dos corpos de prova, processo de têmpera para a obtenção de martensita pura, análises metalográficas e o ensaio de durezas.

3.1 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Os equipamentos descritos neste subcapítulo foram utilizados para produzir, preparar e analisar os corpos de prova do experimento. As formas de utilização destes equipamentos estão descritas no subcapítulo 3.2.

3.1.1 Cortadora metalográfica

- Marca: Fortel
- Modelo: CF III de 0 a 80 mm
- Altura: 540 mm
- Largura: 620 mm
- Profundidade: 650 mm
- Peso: 60 Kg
- Diâmetro de Corte: 80 mm ou 100 mm
- Medidas do Disco: 305 x 2,0 x 31,75 mm
- Motor de 2,0 CV com alto torque, blindado e aterrado - 220 v/380 v/440 v – Trifásico (60 Hz) - Rotação 3380 RPM, [nível de ruído: 65 dB(A)]



Figura 20: Cortadora metalográfica Fortel CF III
Fonte: o autor

3.1.2 Torno

- Marca: ROMI
- Modelo: T-240
- Cabeçote 20 velocidades, máx 2000 rpm
- Eixo-árvore nariz ASA LO, com passagem de \varnothing 52mm
- Motor principal 7,5 cv/5,6 Kw



Figura 21: Torno Romi T – 240
Fonte: o autor

3.1.3 Lixadeira manual de amostras metalográficas

- Marca: Fortel
- Modelo: LMF
- Largura: 380 mm
- Profundidade: 360 mm
- Altura: 90 mm
- Peso: 6,5 Kg



Figura 22: Lixadeira manual de amostras metalográficas
Fonte: o autor

3.1.4 Politriz lixadeira metalográfica

- Marca: Teclago
- Modelo: PL02E
- Largura: 400 mm
- Profundidade: 540 mm
- Altura: 300 mm
- Peso: 20 kg
- Tensão: 220 V Monofásico
- Potência: 1/3 CV
- Diâmetro do prato: 203 mm



Figura 23: Politriz lixadeira metalográfica PL02 E
Fonte: o autor

3.1.5 Forno mufla digital microprocessado

- Marca: Zezimaq
- Modelo: 2000F
- Largura: 630 mm
- Profundidade: 580 mm
- Altura: 480 mm
- Faixa: 100° C a 1100° C
- Potência: 3500 W
- Tensão: 220 V



Figura 24: Forno mufla Zezimaq – 2000F
Fonte: o autor

3.1.6 Microscópio ótico

- Marca: Olympus
- Modelo: BX51M
- Lentes: 10 x, 20 x, 50 x, 100 x



Figura 25: Microscópio ótico Olympus BX51M
Fonte: o autor

3.1.7 Durômetro *Rockweel* normal analógico

- Marca: Equilam
- Pré-carga: 10 Kgf
- Carga de ensaio: 60 – 100 – 150 Kgf
- Controle de aplicação de carga e pré-carga automático
- Escalas HRA, HRC e HRD na escala preta do display
- Outras escalas na parte vermelha do display



Figura 26: Durômetro Rockweel normal analógico Equilam
Fonte: o autor

3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.2.1 Material e dimensões

Para a obtenção de fotomicrografias dos microconstituintes desejados foi necessário a obtenção de corpos de provas de aço com aproximadamente 0,76% p C. O corpo de prova foi extraído a partir de um pedaço de uma roda ferroviária disponível na UFJF.

Segundo Alves (2010), a microestrutura desejada em uma roda ferroviária é a perlita fina, que melhor se comporta face à efeitos combinados de cargas térmicas e mecânicas. Partindo dessa afirmação, foi escolhido o material da roda para os corpos de provas, pois inicialmente já apresentaria uma microestrutura desejada para análise, sendo necessário somente um único tratamento para obtenção da outra microestrutura desejada. A composição química (% em massa) do aço é:

Tabela 1: Composição química do material do corpo de prova (%)

C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Sn	Nb	Mo
0,7230	0,7500	0,6900	0,0176	0,0189	0,0190	0,0624	0,0168	0,0025	0,0020	0,0241

Fonte: (ALVES, 2010)

Os corpos de prova foram dimensionados de modo que fosse possível o manuseio para o tratamento térmico e que suas dimensões não excedessem a distância entre a base do microscópio e a lente. O formato escolhido para os corpos de prova foi o cilíndrico com 20 mm de diâmetro e altura de 30 mm, de modo que garantissem um aquecimento e resfriamento uniforme entre as extremidades e o centro como foi mostrado na subcapítulo 2.4.1 e subcapítulo 2.4.2.

3.2.2 Corte e usinagem

A figura 27 mostra a parte da roda usada como corpo de prova que foi cortada na cortadora metalográfica no laboratório de metalografia da UFJF. A parte da roda em que está circulada mostra a região exata da peça que foi destinada á confecção dos corpos de prova.



Figura 27: Parte da roda sendo cortada
Fonte: o autor

Após o corte, a parte destinada ao corpo de prova foi levada ao SENAI de Juiz de Fora para usinagem no formato cilíndrico e posteriormente seccionado em duas partes conforme mostra a figura 28. A usinagem foi feita em torno convencional com ferramenta de metal duro (carboneto metálico) e as medidas foram efetuadas com paquímetro.



Figura 28: Corpos de prova cortados e usinados
Fonte: o autor

3.2.3 Têmpera

Após o corte e a usinagem, um dos corpos de prova vai submetido a um tratamento térmico de têmpera para que fosse obtida a estrutura martensítica em uma das amostras.

O forno mufla descrito no subcapítulo 3.1.5 foi utilizado para o aquecimento do corpo de prova, garantindo a completa austenitização. A temperatura inicial do forno quando foi colocado o corpo de prova era de 500° C. O forno foi programado para manter a temperatura constante de 800° C assim que ela fosse atingida.

A temperatura de 800°C foi escolhida através de parâmetros discutidos no subcapítulo 2.4.1. O forno foi se aquecendo gradativamente de 500°C até 800° C e quando atingiu a temperatura desejada, foi mantido o corpo de prova por 6 minutos a 800° C, conforme mostra a figura 30.

A escolha do tempo em que o corpo de prova foi mantido a 800°C foi através dos conceitos discutidos no subcapítulo 2.4.1, que afirma que é necessário que a peça fique por aproximadamente 1 minuto por 1 mm de secção, porém o processo de têmpera no corpo de prova visou a obtenção de uma boa imagem da microestrutura e se fosse deixado um tempo de vinte minutos que seria o teórico indicado, o corpo de prova poderia ter um crescimento de grão indesejado na superfície onde posteriormente seria feita a análise micrográfica (CHIAVERINI, 2008).

O resfriamento foi feito em óleo de uso automotivo mineral 20W50. O resfriamento em óleo foi escolhido segundo análises feitas no subcapítulo 2.4.2. A temperatura do óleo quando o corpo de prova foi colocado era de 23,5° C e a curva de transformação do experimento está descrita na figura 29.

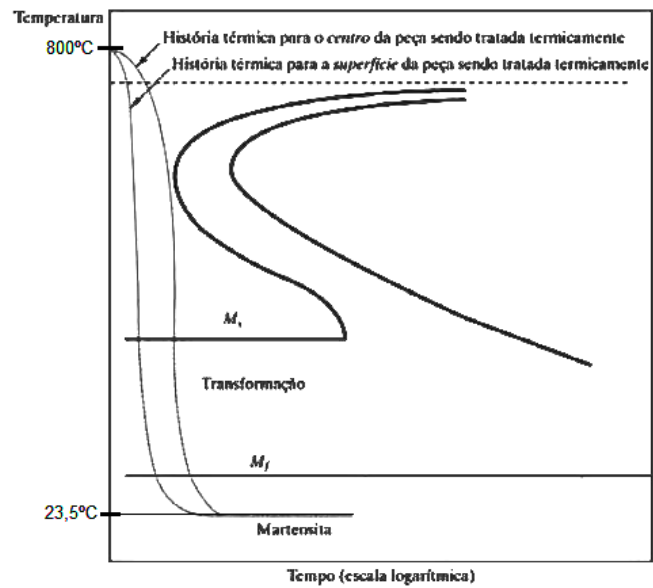


Figura 29: Curva da temperatura experimental de um dos corpos de prova
 Fonte: (ADAPTADA DE SHACKELFORD, 2008)



Figura 30: Forno mufla à temperatura constante de 800°C
 Fonte: o autor

O resfriamento foi feito em óleo de uso automotivo mineral API SL, SAE 20W50 conforme mostra a figura 31. O resfriamento em óleo foi escolhido segundo análises feitas no

subcapítulo 2.3.6.3 e subcapítulo 2.4.2. O corpo de prova foi retirado do forno à 800°C e colocado rapidamente no recipiente com um litro de óleo, conforme mostra a figura 32.



Figura 31: Recipiente usado para tratamento térmico e o óleo API SL SAE 20W50
Fonte: o autor



Figura 32: Procedimento de têmpera
Fonte: o autor

3.2.4 Lixamento e polimento

O lixamento dos corpos de prova foi feito na lixadeira descrita no subcapítulo 3.1.3 e a técnica utilizada para lixar foi adotada segundo a teoria abordada no subcapítulo 2.1.1.1. O lixamento foi feito conforme a figura 33.

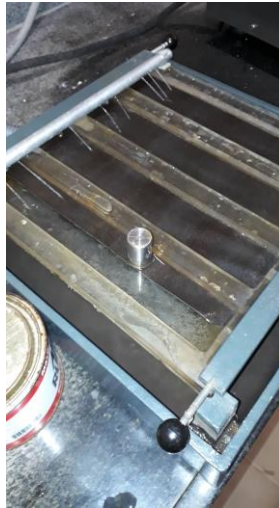


Figura 33: Processo de lixamento
Fonte: o autor

A sequência de lixas utilizadas no lixamento foi 150, 220, 320, 400, 500, 600, 1200 e 2000.

O polimento foi feito na politriz descrita no subcapítulo 2.1.1.1 e o agente polidor usado foi à alumina em suspensão - N° 4 – azul – 1 μm da marca Teclago. A figura 34 mostra a politriz com o corpo de prova e a alumina.



Figura 34: Processo de polimento
Fonte: o autor

3.2.5 Análise microscópica sem ataque

Após o lixamento e polimento dos corpos de prova é necessário que seja feita uma análise microscópica conforme descrito no subcapítulo 2.1.1.2. A análise foi feita com o microscópio especificado no subcapítulo 3.1.6. Foi observado que as superfícies a serem analisadas estavam bem polidas e isenta de marcas de lixa. Foram detectadas algumas inclusões nas amostras, porém estas não causariam dificuldades na análise micrográfica das amostras.

3.2.6 Ataque químico

Após a análise microscópica sem ataque foi feito o ataque químico. O reagente utilizado para revelar a microestrutura da região dos corpos de prova foi o nital. A escolha do reagente químico e o tempo de banho foram baseados em conceitos discutidos no subcapítulo 2.1.1.3. O nital é um agente químico composto por ácido nítrico e álcool etílico. A solução usada foi de nital 3%, sendo 97 ml de álcool etílico e 3 ml de ácido nítrico e o método de ataque foi o de imersão. O procedimento por imersão baseou em colocar a amostra a ser atacada quimicamente em um recipiente apropriado conforme mostra a figura 35 com o nital e manter a superfície da peça em imersão por cinco segundos. Após o ataque as peças foram lavadas, secadas e examinadas no microscópio.

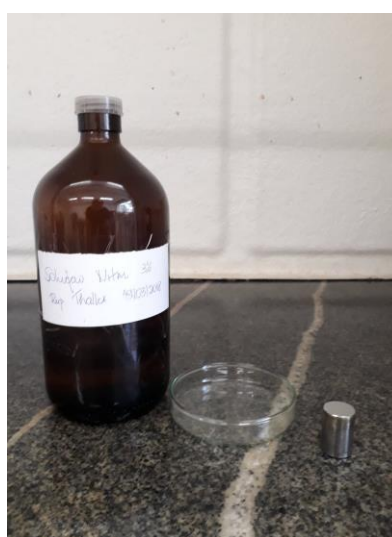


Figura 35: Nital 3% e vidraria utilizada para o ataque químico

Fonte: o autor

3.3 ANÁLISE MICROSCÓPICA COM ATAQUE

Após o todas as etapas de preparação dos corpos de prova foi feito a análise micrográfica da superfície preparada. A análise micrográfica teve por finalidade uma caracterização detalhada da microestrutura das amostras. O microscópio utilizado para essa análise foi o especificado no subcapítulo 3.1.6 e os conceitos aplicados na microscopia foram os apresentados nos subcapítulos 2.1.1.4 e 2.1.1.4.1 As aproximações foram de 100x, 200x, 500x e 1000x e foi obtido foto micrografias das microestruturas encontradas.

3.4 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL

Os ensaios de dureza foram feitos com o durômetro *Rockwell* normal analógico descrito nos subcapítulos 2.5 e 3.1.7. A dureza foi medida em seis pontos distintos de cada corpo de prova a fim de se tirar uma média e aproximar ao máximo do valor exato. Os pontos escolhidos foram nas laterais do corpo de prova conforme mostra a figura 36, defasando-os aproximadamente 60° entre cada ponto. O penetrador utilizado foi o de cone de diamante e a carga de ensaio foi de 150 kgf.

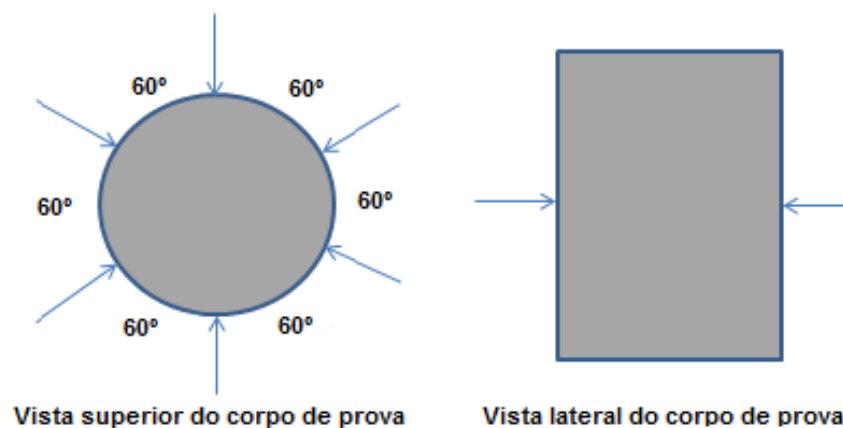


Figura 36: Representação esquemática dos pontos onde foram medidas as durezas
Fonte: o autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados em duas análises micrográficas e dois ensaios de dureza em amostras de aço eutetóide. Uma amostra analisada e ensaiada possui em sua microestrutura a martensita pura e na outra a perlita fina. Primeiramente foi feita a análise da microestrutura das amostras e posteriormente o ensaio de dureza, a fim de se reafirmar a microestrutura baseada nas durezas descritas na figura 8 e citadas nas teorias referentes as microestruturas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA

A identificação microestrutural é muito subjetiva e requer uma análise micrográfica baseada em conceitos discutidos no subcapítulos 2.3.6.1, 2.3.6.1.2 e 2.3.6.3.

4.1.1 Resultados e análise microestrutural da perlita fina

Neste tópico será discutida e analisada a microestrutura da perlita fina encontrada no corpo de prova preparado, atacado quimicamente e analisado.

A figura 37 mostra a aproximação da superfície do corpo de prova após ser preparado, porém sem o ataque químico. Os pontos escuros na imagem são inclusões de alumina, presentes na superfície do material. A presença de alumina se dá pelo seu uso como agente polidor durante a operação com a politriz.

A perlita fina sobe pequenas ampliações apresenta uma forma de pequenas esferas escuras descritas no subcapitulo 2.3.6.1.2. Na figura 38 é possível reconhecer as regiões mais escuras onde a perlita fina é formada. A região circulada desta figura mostra a formação de algumas “esferas” mais escuras de perlita e grãos mais claros de ferrita que envolve os grãos de perlita. Nos aços pouco abaixo de 0,8% de carbono, os grãos de perlita são envolvidos ou quase envolvidos por uma rede de ferrita (COPAERT, 1974).

A parte circulada da figura 39 mostra claramente a formação da perlita fina com uma estrutura de lamelas paralelas e um pouco ondeadas, conforme descrito subcapitulo 2.3.6.1. As lamelas mais claras são de ferrita e as mais escuras são cementita. Comparando-se a figura 40 com a figura 12 é possível observar que a perlita obtida no corpo de prova analisado

também apresenta lamelas de perlita muito finas. A região demarcada da figura 40 apresenta nitidamente a formação da perlita fina, com indicação das lamelas de ferrita e cementita.

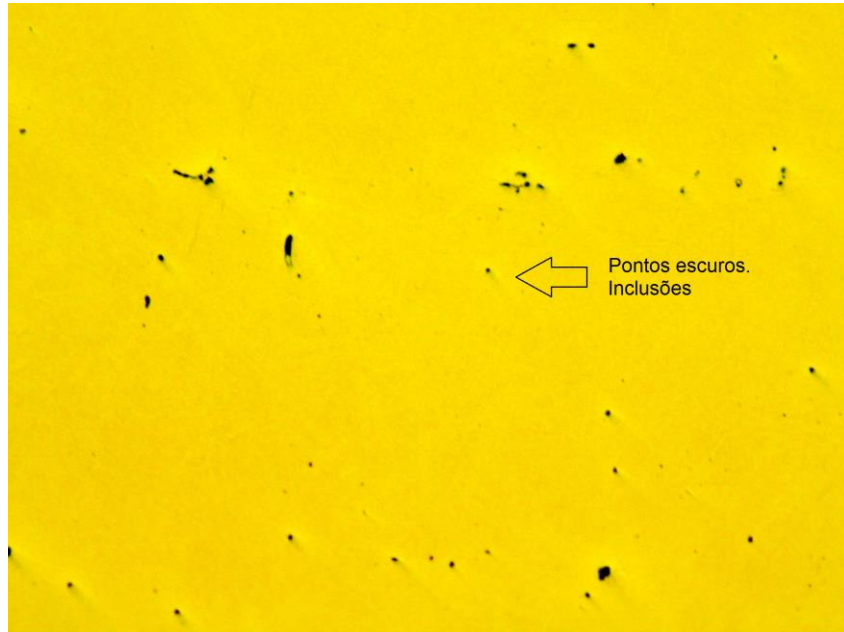


Figura 37: Superfície do material perlítico antes do ataque químico
Fonte: o autor

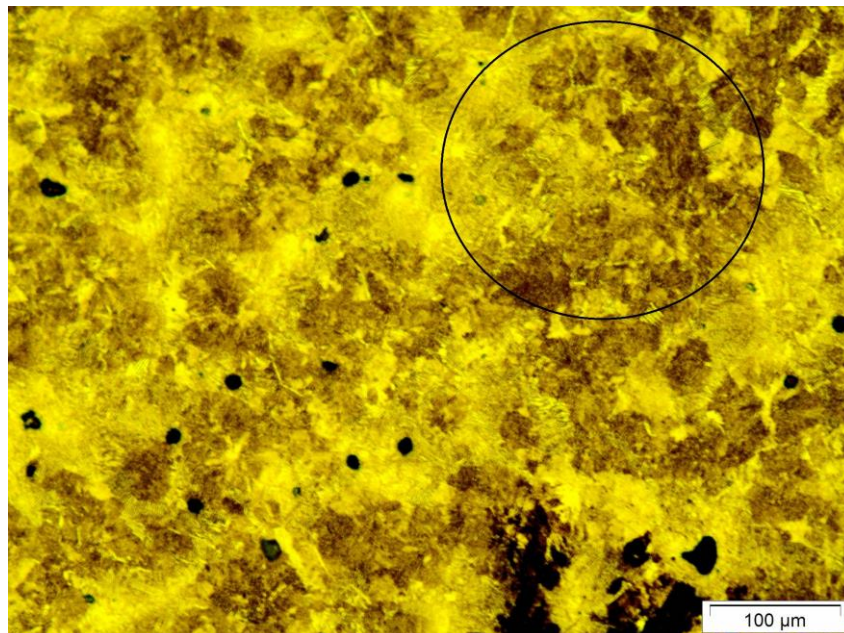


Figura 38: Perlita fina no aço eutetóide 1. Ataque: Nital 3%.
Fonte: o autor

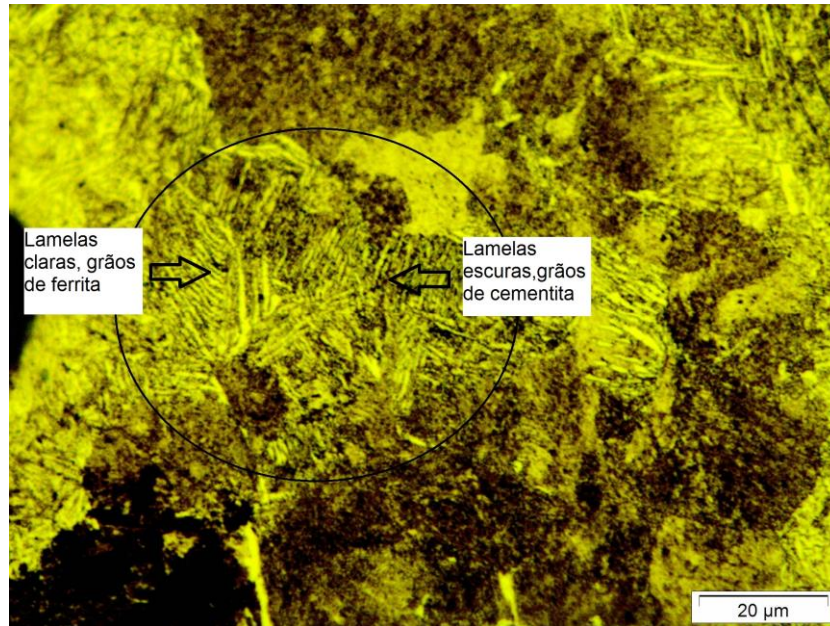


Figura 39: Perlita fina no aço eutetóide 2. Ataque: Nital 3%.
Fonte: o autor

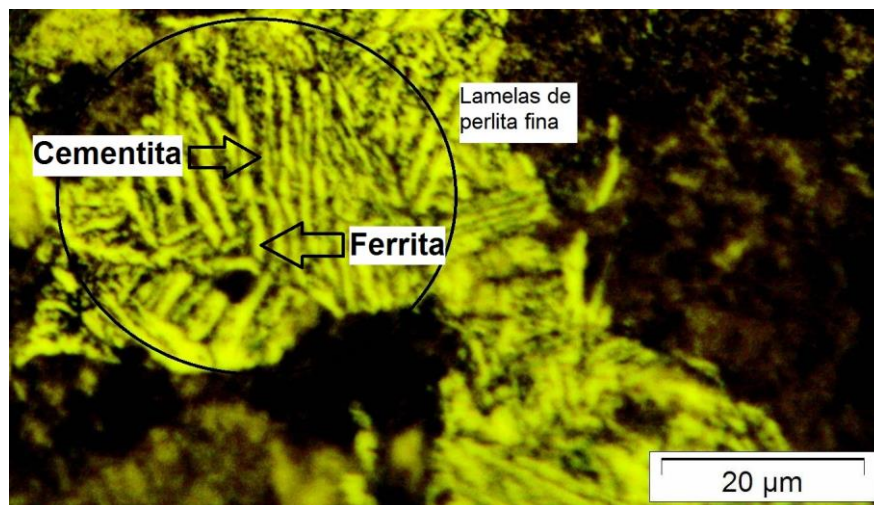


Figura 40: Perlita fina no aço eutetóide 3. Ataque: Nital 3%.
Fonte: o autor

4.1.2 Resultados e análise microestrutural da martensita

Neste tópico será discutida e analisada a microestrutura da martensita encontrada no corpo de prova após o processo de têmpera, preparo de superfície, ataque químico e análise microestrutural.

A figura 41 mostra a orientação da martensita e já é possível visualizar a forma alongada dessa microestrutura.

Na figura 41, pode-se observar a martensita com grãos na forma de agulhas cruzadas, e se comparadas com a da figura 17, pode-se notar algumas semelhanças e diferenças. Entre as semelhanças, está a forma alongada da martensita presente e a granulação em forma de ripas e uma estrutura bem homogênea da martensita. A martensita mostrada na figura 17 também é proveniente de um tratamento térmico de têmpera em óleo, podendo ser um material com bastante semelhança para uma comparação. A martensita da figura 17 difere da martensita da figura 41 com relação a sua granulação, que na figura 17 se mostra um pouco mais alongada, com as agulhas um pouco mais largas, essas diferenças são causadas pela composição química do aço.

A análise microestrutural da martensita obtida no experimento foi feita na superfície da peça, ou seja, na parte em que o resfriamento é mais drástico, ocasionando em uma boa transformação de austenita em martensita. Se for comparada a figura 42 com a figura 18 e figura 19 nota-se que a martensita obtida no experimento aparentemente apresenta partes mais claras que se assemelham aos casos de martensita com grãos de austenita retida. A presença de austenita retida, segundo o subcapítulo 2.3.6.3, é normal em aços com teores de carbono mais altos e com elementos de liga secundários. O subcapítulo 2.3.6.3 também explica o porquê dessa retenção de austenita. Contudo, para o aço em questão e os parâmetros adotados neste processo de obtenção de martensita, a microestrutura gerada se apresenta de forma esperada, sendo ela de uma granulação mista e com uma porcentagem de aproximadamente 6% de austenita retida.

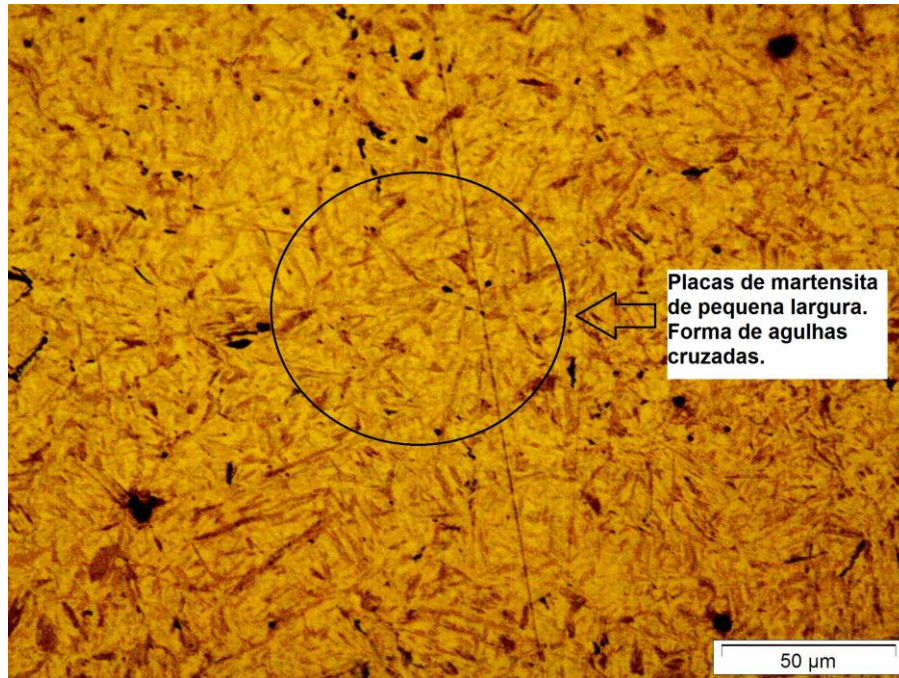


Figura 41: Martensita no aço eutetóide 1. Ataque: Nital 3%
Fonte: o autor

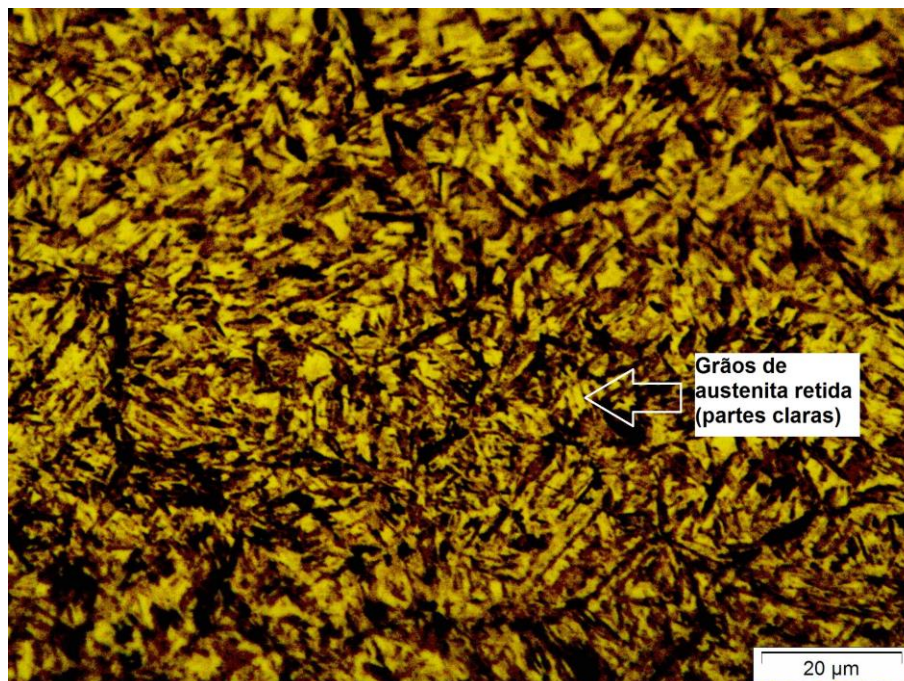


Figura 42: Martensita no aço eutetóide 2. Ataque: Nital 3%
Fonte: o autor

4.2 RESULTADOS E ANÁLISES DAS DUREZAS

O ensaio de dureza foi feito em diferentes pontos dos corpos de prova e uma media foi tirada e comparada aos valores descritos nos subcapítulos 2.3.6.1.2 e 2.3.6.3.

4.2.1 Dureza do material composto de perlita fina

A dureza da perlita fina foi mostrada no subcapitulo 2.3.6.1.2. A perlita fina em um aço eutetóide apresenta a dureza entre 30 e 40 HRC. A subjetividade na interpretação visual das microestruturas é grande, porém, um ensaio de dureza comprovando que o material apresenta uma dureza equivalente as literaturas pesquisadas pode ser mais uma ferramenta na caracterização das microestruturas. O ensaio de dureza no corpo de prova que apresentou a perlita fina quando analisado visualmente foi satisfatório e com valores dentro do que estava descrito no subcapitulo 2.3.6.1.2. A média entre as durezas medidas foi de 36 HRC, caracterizando que o corpo de prova apresenta a dureza equivalente a perlita fina.

Tabela 2: Perfil de durezas da perlita fina

Medidas	HRC
1	36,50
2	36,00
3	35,50
4	34,50
5	36,50
6	37,00
Média	36,00

Fonte: o autor

4.2.2 Dureza do material composto de martensita

A dureza da martensita foi apresentada no subcapítulo 2.3.6.3. A martensita, embora seja uma microestrutura relativamente fácil de ser obtida nos aços eutetóides através do processo de têmpera, ela apresenta um aspecto muito parecido com a bainita sob determinadas condições. Um aspecto que diferencia a bainita da martensita sem levar em conta a análise visual é a dureza. A bainita inferior visualmente apresenta características muito próximas da martensita, porém a dureza da bainita inferior esta entre 50 e 60 HRC e a dureza da martensita está entre 65 e 67 HRC. O ensaio de dureza no corpo de prova após a observação da microestrutura serviu para que fosse feita a confirmação de uma microestrutura martensítica. A média dos ensaios foi de 65,75 HRC, confirmando uma dureza dentro do esperado para martensita no aço eutetóide.

Tabela 3: Perfil de durezas da martensita

Medidas	HRC
1	65,50
2	66,00
3	65,50
4	66,00
5	65,50
6	65,50
Média	65,75

Fonte: o autor

5 CONCLUSÃO

Ao final deste trabalho foi possível observar diversos fatores que podem ser mantidos para essa linha de pesquisa e alguns que podem ser alterados.

A preparação da superfície das amostras é uma etapa extremamente importante na caracterização de microestruturas dos aços, pois as variáveis desse processo influenciam ativamente no resultado observado no microscópio, sendo assim, é necessário que seja feita sempre com cautela.

O processo de tratamento térmico produz um material com microestruturas e propriedades mecânicas completamente diferentes, conforme a mudança de processo.

A microestrutura da perlita se apresentou muito fina e com certa quantidade de ferrita devido ao teor de carbono um pouco menor que 0,76 % p C, porém a dureza encontrada foi compatível com a dureza descrita na literatura referente ao aço eutetóide com estrutura composta de perlita fina.

A microestrutura da martensita se apresentou muito coerente com o esperado, apresentando uma quantidade de austenita retida que segundo a teoria seria normal de ser encontrada. O resultado da dureza foi satisfatório se comparado aos valores teóricos para uma composição martensítica no aço eutetóide.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a superfície do material em um microscópio eletrônico de varredura, para minimizar erros devido a distorções de imagens causadas pela grande sensibilidade de um microscópio ótico quando usado para análises muito aproximadas.
- Utilizar um aço com uma porcentagem mais próxima de 0,76% p C.
- Após o tratamento térmico, usinar pelo menos 2 mm da superfície do material para que evite fotomicrografias da parte exposta ao banho durante o tratamento.
- Para se desenvolver padrões de aços eutetóides tratados térmicamente é necessário também se leve em consideração á temperatura utilizada para austenitização e tempo mantido a essa temperatura, pois esses fatores alteram as características das microestruturas mesmo se tratando do mesmo processo e mesmo material.

REFERÊNCIAS

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 3ª Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1974.

ROHDE, R. **Metalografia. Preparação de Amostras**. Santo Ângelo: URI, 2010.

PAVANATI, H. C. **Noções Básicas de Preparação Metalográfica**. Florianópolis: IFSC, 2016.

RAY, A.; DHUA, S. K. **Microstructural manifestations in color: same applications for steels**. *Materials Characterization*, v. 37, p. 1-8, 1996

CALLISTER JR, W.D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. 7ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais ABM, 1996

CHIAVERINI, V. **Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais ABM, 2008

TSCHIPTSHIN, A. P. **Tratamento Térmico de Aços**. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2016.

VALE, A. R. M. **Tratamento Térmico**, Pará: IFPA, 2011

OLIVEIRA, A. R. **Tratamento Térmico**. Pará: IFPA, 2007

GAMBOGI, P. B.; REIS JR, T. A.; ANDRADE, M. S.; **Estudo da Microestrutura de um Aço Eutetóide Laminado a Quente Utilizando Microscopia de Força Atômica: 15º Encontro Nacional dos Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas / ABM Week, 2015, Rio de Janeiro. Anais do 15º Enemet, 2015.**

DAVID, F. H. S. *et al.* **Efeito da Taxa de Resfriamento na Constituição da Perlita e nas Propriedades Mecânicas de Aços Comuns.** Disponível em: <<http://npa.newtonpaiva.br/iniciacaocientifica/?p=261>>. Acesso em: 6 set. 2018.

MAIA, F. S.; MELLO, R. S. H.; CARDOSO, K. R; VILLAS BOAS, R. L. **Análise Microestrutural da Variação da Têmpera na Pista de Rolamento das Rodas Ferroviárias.** Disponível em: <<http://biblioteca.univap.br/dados/000003/00000380.pdf>>. Acesso em 10 set. 2018.

VUROBI JR, S.; CINTHO, O. M. **Técnicas Metalográficas para Caracterização Microestrutural dos Aços.** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267821373_TECNICAS_METALOGRAFICAS_PARA_CHARACTERIZACAO_MICROESTRUTURAL_DOS_ACOS>. Acesso em 11 set. 2018.

CIÊNCIA DOS MATERIAIS MULTIMÍDIA. **Mudança de estruturas.** Disponível em: <<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=21&top=140>>. Acesso em 12 set. 2018.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **Princípios: Tratamento de Têmpera e suas variações - Têmpera, Austêmpera, Martêmpera.** Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6443#.W8ojUHtKg1J>. Acesso em 19 set. 2018.

VAN VLACK, L.H. **Princípio de Ciência dos Materiais.** São Paulo: Edgard Blucher, 1970.

CARAM, R. Estrutura Cristalina. **Estrutura e Propriedades dos Materiais.** Campinas: Unicamp, 2006

SILVA, Amanda Cristina Medeiros Da. **Tratamento Térmico de Têmpera no Aço SAE 1040 em Diferentes Meios de Resfriamento.** 2016. 43f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – Unifesspa, Marabá, Brasil.

ALVES, Luiz. Henrique. Dias. **Mecanismo de Desgaste de Rodas Ferroviárias**. 2000. 125f
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São
Paulo – USP, São Paulo, Brasil.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

METALS HANDBOOK. **Metallography and Microstructures**. ASM International, v.9
1992.

FORTEL. **Cortadora Metalográfica (80mm ou 100mm) “CFIII”**. Disponível em:
<<https://fortel.com.br/produtos/detalhes-produtos/cortadora-metalografica-80mm-ou-100mm>>. Acesso: 8 out. 2018.

ROMI. **Torno T – 240**. Disponível em: < <http://www.romi.com/produtos/linha-romi-t/> >.
Acesso: 8 out. 2018.

FORTEL. **Lixadeira Manual de 4 pistas “LMF”**. Disponível em:
<<https://fortel.com.br/produtos/detalhes-produtos/lixadeira-manual-de-4-pistas>>. Acesso em:
8 out. 2018.

TECLAGO. **Politriz Lixadeira Metalográfica PL02E**. Disponível em: <
<https://www.teclago.com.br/wp-content/uploads/2016/09/PL02E-Monof%C3%A1sica.pdf> >.
Acesso: 9 out. 2018.

EQUILAM. **Rockwell analógico**. Disponível em: < <http://equilam.com.br/produtos/rockwell-analogico> >. Acesso: 10 out. 2018.

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, audiovisual 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 autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, _____ de _____ de 20____.

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

Matrícula

ASSINATURA

CPF

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

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