

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

**BRUNO DE OLIVEIRA SOUZA**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEMPO NO  
REVENIMENTO DO AÇO AISI 5150**

**BELO HORIZONTE  
2017**

**BRUNO DE OLIVEIRA SOUZA**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEMPO NO  
REVENIMENTO DO AÇO AISI 5150**

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

Orientador: Ivan J. de Santana

Coorientador: Victor Souza Esteves Lima

**Belo Horizonte**

**2017**

**BRUNO DE OLIVEIRA SOUZA**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEMPO NO  
REVENIMENTO DO AÇO AISI 5150**

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

Aprovado em     /     /

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ivan J. de Santana – Orientador

---

Prof. Victor Souza Esteves Lima – Coorientador

---

Prof. Aderci de Freitas Filho

---

Prof. Claudinei Alfredo do Nascimento

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu Orientador, Professor Dr. Ivan J. de Santana, pela oportunidade em realizar este trabalho em conjunto.

Ao meu Coorientador, Professor Victor Souza Esteves Lima, por todo suporte prestado nas etapas práticas deste projeto.

Ao CEFET-MG, na figura de seus professores e servidores, que foram fundamentais no auxílio e condução deste trabalho.

À minha família, pela paciência e suporte nos momentos mais complicados do curso.

Aos meus amigos, pela ausência e incentivo fundamentais para conclusão da minha graduação.

## RESUMO

O tratamento térmico de têmpera no aço AISI 5150 resulta na formação da martensita, microestrutura que causa grande distorção na rede cristalina deste aço, aumentando consideravelmente sua dureza e fragilidade. Esse comportamento se justifica pelo aumento das tensões residuais internas e, visando minimizá-las, realiza-se o revenimento como tratamento térmico complementar, diminuindo, por conseqüência, a sua dureza e aumentando a ductilidade do material. O aço AISI 5150 possui grande aplicabilidade no setor de molas, principalmente no ramo automotivo pois apresenta um conjunto de propriedades que quando trabalhadas atendem sua demanda. Assim, este trabalho buscou analisar a influência do tempo e da temperatura de revenimento no aço AISI 5150. Para tanto, foram confeccionados corpos de provas cilíndricos, os quais foram divididos em dois grupos: uma parte temperada em água e outra em óleo. Posteriormente, fez-se o revenimento em diferentes faixas de temperatura para os corpos de prova resfriados em água (300°C, 350°C e 400°C) e no óleo (300°C, 325°C, 350°C, 375°C e 400°C). Para cada temperatura, independente do meio de resfriamento utilizado na têmpera, utilizou-se três corpos de prova sendo que cada um foi retirado do forno nos tempos de 30, 45 e 60 minutos. Foram realizados ainda ensaios mecânicos (dureza, microdureza), micrografias dos corpos de provas submetidos às diferentes condições de tratamento térmico; além disso, foi traçada a curva de revenimento para posterior análise e o perfil de microdureza dos corpos de prova. Assim, foram obtidos dados que melhoraram a compreensão da influência destes parâmetros de tratamento térmico nas propriedades finais do aço em estudo. Portanto, os resultados mostraram que a faixa de tempo em estudo neste trabalho não afeta consideravelmente o valor de dureza do aço AISI 5150, podendo ser trabalhado o menor tempo de encharque para o revenimento, fato que industrialmente afeta os custos de produção.

**Palavras-chave:** revenimento, têmpera, dureza, microdureza, aço AISI 5150, curva de revenimento.

## ABSTRACT

The heat treatment of quench in AISI 5150 steel results in the formation of martensite, a microstructure that causes great distortion in the crystalline lattice of this steel, greatly increasing its hardness and brittleness. This behavior is justified by the increase of the internal residual stresses and to minimize them, the tempering is realized as a complementary thermal treatment that reduces its hardness and increases the ductility of the material. The steel AISI 5150 has great applicability in the sector of springs, mainly in the automotive sector because it presents a set of properties that when worked, meet its demand. Thus, this paper aims to analyze the influence of time and tempering temperature on AISI 5150 steel. For this purpose, cylindrical specimens were made, which were divided into two groups: one part tempered in water and another in oil. Subsequently, tempering was done in different temperature ranges for the water-cooled specimens (300°C, 350°C and 400°C) and in the oil (300°C, 325°C, 350°C, 375°C and 400°C). For each temperature, regardless of the cooling means used in the quench, three specimens were used, each one was removed from the oven at 30, 45 and 60 minutes. Mechanical tests (hardness, microhardness), micrographs of test specimens submitted to different heat treatment conditions were also performed; in addition, the tempering curve was drawn for further analysis and the microhardness profile of the specimens. Thus, data were obtained that improved the understanding of the influence of these heat treatment parameters on the final properties of the steel under study. Therefore, the results showed that the time range studied in this study does not significantly affect the hardness value of the AISI 5150 steel, and the less time of soaking for the tempering can be worked, which industrially affects the costs of production.

**Key-words:** tempering, quench operation, hardness, microhardness, AISI 5150 steel, tempering curve.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de fases ferro-carbono.....	16
Figura 2 - Diagrama TTT .....	17
Figura 3 - Curvas de dureza para aços carbono (SAE 1040): a) resfriamento em óleo; b) resfriamento em água.....	18
Figura 4 - Microscopia óptica da martensita .....	20
Figura 5 - Microestrutura óptica da bainita superior (a) e inferior (b) .....	21
Figura 6 – Equipamento para ensaios de dureza .....	25
Figura 7 -Fluxograma das etapas de trabalho.....	30
Figura 8 - Esquema do corpo de prova.....	31
Figura 9 – Torno mecânico e Serra de Fita .....	32
Figura 10 -Forno elétricoN1040, Magnus, para tratamentos térmicos.....	33
Figura 11 – Equipamento de corte de precisão AROCOR 80.....	35
Figura 12 - Corpo de prova cortado para medição da microdureza .....	37
Figura 13 - Trinca causada pela severidade da têmpera.....	38
Figura 14 - Coloração característica pelo tempo de revenimento .....	39
Figura 15 - Curva de revenimento do aço AISI 5150 resfriado no óleo .....	40
Figura 16 - Curva de revenimento do aço AISI 5150 resfriado na água.....	40
Figura 17 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 apenas temperado.....	42
Figura 18 – Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado em água à 300°C .....	42
Figura 19 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado em água à 350°C .....	43
Figura 20 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado em água à 400°C .....	43
Figura 21 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado no óleo à 300°C.....	44
Figura 22 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado no óleo à 325°C.....	44
Figura 23 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado no óleo à 350°C.....	45
Figura 24 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado no óleo à 375°C.....	45
Figura 25 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado no óleo à 400°C.....	46
Figura 26 - Micrografia corpo de prova temperado .....	47
Figura 27 - Micrografia corpo de prova resfriado em óleo e revenido em 400°C.....	47
Figura 28 - Micrografia corpo de prova resfriado em água e revenido em 350°C .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Identificação dos corpos de prova .....	32
Tabela 2 - Informações sobre o revenimento nas peças resfriadas no óleo.....	34
Tabela 3 - Informações sobre o revenimento nas peças resfriadas na água .....	35
Tabela 4 - Resultado das medidas de dureza para os corpos de prova.....	39
Tabela 5 - Resultado das medidas de microdureza para os corpos de prova resfriados no óleo .....	41
Tabela 6 - Resultado das medidas de microdureza para os corpos de prova resfriados na água .....	42



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	11
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
3.1 Definição de tratamento térmico.....	12
3.2 Objetivos e importância .....	12
3.3 Fatores que influenciam.....	13
3.4 Segurança.....	13
3.5 Fases presentes no aço .....	14
3.6 Diagramas de equilíbrio.....	14
3.7 Diagrama de fases Ferro-Carbono .....	15
3.8 Curvas TTT e TRC .....	16
3.8.1 Curva TTT .....	16
3.8.2 Curva TRC.....	17
3.9 Temperabilidade .....	17
3.9.1 Método de Grossmann.....	18
3.9.2 Método de Jominy .....	19
3.10 Martensita .....	19
3.11 Bainita .....	20
3.12 Tratamentos termoquímicos.....	21
3.13 Têmpera .....	22
3.14 Revenimento .....	23
3.15 Operacionalidade dos tratamentos térmicos .....	23
3.16 Aço AISI 5150.....	24

3.17	Ensaio Mecânico.....	24
3.18	Metalografia.....	27
3.18.1	Macrografia .....	27
3.18.2	Micrografia .....	27
4	ESTADO DA ARTE.....	28
4.1	Efeito das temperaturas de têmpera e de revenido na resistência à corrosão da camada martensítica de alto nitrogênio produzida por SHTPN sobre o aço AISI 409.....	28
4.2:	Estudo do comportamento do revenimento do aço inoxidável AISI 410.....	29
	(Study on tempering behaviour of AISI 410 stainless steel) .....	29
5	Metodologia .....	30
5.1	Material.....	31
5.2	Confecção dos corpos de prova .....	31
5.3	Usinagem dos corpos de prova .....	31
5.4	Identificação dos corpos de provas .....	32
5.5	Normalização .....	33
5.6	Têmpera .....	33
5.7	Revenimento .....	34
5.8	Preparação dos corpos de prova para ensaios mecânicos e metalografia .....	35
5.9	Medida de Dureza Rockwell C .....	36
5.10	Perfil de Microdureza Vickers .....	36
5.11	Polimento .....	37
5.12	Micrografia .....	37
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
6.1	Resultado da Têmpera e do Revenimento .....	38
6.2	Resultado do ensaio de Dureza Rockwell C .....	39
6.3	Resultado do ensaio de Microdureza .....	41
6.4	Resultado da micrografia .....	46

7 CONCLUSÕES .....	49
REFERÊNCIAS .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

Tratamentos térmicos são recursos utilizados, física e quimicamente, para aprimorar as propriedades finais de um material, sem alterar sua forma. Normalmente, esses recursos físicos são um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento enquanto os recursos químicos alteram a composição química local para determinada finalidade.

A têmpera visa aumentar drasticamente a dureza de um material através da formação da microestrutura martensítica enquanto o revenimento visa ajustar o valor de sua dureza, podendo aliviar as tensões residuais internas e melhorando sua ductilidade. Por esse motivo, normalmente, o tratamento térmico da têmpera é seguido de um revenimento, minimizando a fragilidade do material.

O aço AISI 5150 é um aço baixa liga que usualmente é tratado termicamente com a finalidade de reduzir suas tensões residuais uma vez que uma de suas principais aplicações é em molas, principalmente no setor automotivo. Assim, os requerimentos mecânicos exigidos para sua aplicação necessitam dessa intervenção para que atinjam as propriedades mecânicas finais necessárias.

Para tanto, o tratamento térmico de têmpera foi realizada em dois grupos: uma parte feita em água e outra feita em óleo. As temperaturas de revenimento, em água, foram de 300°C, 350°C e 400°C. Já para os corpos de prova temperados no óleo, as temperatura de revenimento foram: 300°C, 325°C, 350°C, 375°C e 400°C. Além disso, para cada faixa de temperatura, independente do meio de resfriamento da têmpera, foram utilizados 3 corpos de prova no forno e, retirou-se cada um nos tempos de 30, 45 e 60 minutos.

Em seguida, as amostras foram preparadas para realização de ensaio mecânico de dureza e microdureza, além da micrografia. Para tanto, realizou-se lixamento e polimento das mesmas.

A partir dos dados obtidos, foi possível compreender melhor a influência dos parâmetros de tratamentos térmicos nas propriedades finais do aço em estudo. Os resultados também mostraram que a faixa de tempo em estudo neste trabalho não afeta consideravelmente o valor de dureza do aço AISI 5150. Tal fato sugere a conclusão de que, industrialmente, visando minimizar os custos de produção, pode-se trabalhar com o menor tempo de encharque aqui estudado, maximizando a quantidade de produtos tratados termicamente (aumentando a produção).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVOS GERAIS**

Analisar a influência da temperatura e do tempo de encharque no revenimento do aço AISI 5150 e correlacioná-los com os valores de dureza obtidos.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a influência de diferentes temperaturas de revenimento em meio de resfriamento aquoso (300°C, 350°C e 400°C) e no óleo (300°C, 325°C, 350°C, 375°C e 400°C);
- Avaliar a influência de diferentes tempos de revenimento: 30, 45 e 60 minutos para cada faixa de temperatura analisada;
- Construir as curvas de revimentos para as diferentes condições analisadas;
- Avaliar a influência dos meios de resfriamento estudados (água e óleo) no valor de dureza e microdureza e, conseqüentemente, na propriedade final do aço.
- Obter o perfil de microdureza da seção transversal dos corpos de prova

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Definição de tratamento térmico**

De maneira geral, tratamento térmico é um processo no qual submete-se um determinado material a um ciclo térmico (aquecimento e resfriamento), com o intuito de se obter determinadas propriedades mecânicas.

Chiaverini (2008) define o tema como “um conjunto de operações de aquecimento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas”.

Já Colpaert (2008) define como “o modo mais comum de alterar as propriedades mecânicas, físicas e mesmo químicas dos aços; [...]os tratamentos térmicos convencionais envolvem aquecimento e resfriamento”.

Os tratamentos térmicos mais comuns são o recozimento, normalização, têmpera e revenimento (COLPAERT, 2008). No entanto, existem os tratamentos termoquímicos, que são aqueles que promovem mudanças químicas nas superfícies dos aços em questão, como: cementação, nitretação e carbonitretação.

Chiaverini (2008) cita, além destes mencionados anteriormente, mais alguns, como austêmpera, martêmpera, endurecimento por precipitação, dentre outros.

#### **3.2 Objetivos e importância**

Muitos são os objetivos ao se realizar um determinado tratamento térmico. Pode-se destacar alguns listados por Chiaverini (2008): remoção de tensões internas, aumento ou diminuição da dureza e da resistência mecânica, melhora da ductilidade, da usinabilidade, da resistência ao desgaste, das propriedades de corte, da resistência à corrosão e ao calor e modificação das propriedades elétricas e magnéticas. Ele ainda lembra que a obtenção de uma ou mais das propriedades mencionadas pode ser obtida em detrimento de outras. Portanto é necessário escolher criteriosamente qual o tipo de tratamento melhor atende seu objetivo, de forma que se obtenha um equilíbrio nas propriedades desejadas.

### 3.3 Fatores que influenciam

Alguns fatores influenciam, de maneira geral, os tratamentos térmicos. Dentre eles, pode-se destacar o aquecimento, o tempo de permanência à temperatura, o resfriamento e a atmosfera do recinto de aquecimento (CHIAVERINI,2008). O aquecimento influi na garantia da completa austenitização, ou seja, dissolução completa das fases no ferro gama ( $\gamma$ ). O tempo de permanência à temperatura influi no tamanho do grão formado, ou seja, quanto mais tempo ficar na temperatura máxima de aquecimento, maior a dissolução das fases no ferro gama (maior a garantia de que ocorreu completa austenitização), maior o grão de austenita formado. O resfriamento, é considerado por muitos autores como o fator mais importante que influencia no tratamento térmico pois, normalmente, ele (associado à fatores como composição química do aço e dimensões da peça, por exemplo) é quem vai definir a estrutura final da sua célula unitária, implicando diretamente nas propriedades finais da sua peça tratada. Ele pode ser feito de três maneiras: resfriamento dentro do forno, ao ar e em meios líquidos sendo que cada um implicará em propriedades finais distintas. Por fim, a atmosfera do forno deve evitar que ocorra a oxidação ou a decarbonetação da peça tratada. Ambas causam efeitos normalmente indesejáveis nas propriedades finais.

### 3.4 Segurança

É imprescindível que a segurança na realização de um tratamento térmico seja levada em consideração. Chiaverini (2008) afirma que é preciso subdividi-la em dois grupos: segurança dos equipamentos e segurança dos operadores.

Para o primeiro caso, temos fornos aquecidos com combustíveis e fornos elétricos. Nos aquecidos com combustíveis, o projeto de segurança deve contar com ventiladores, ventoinhas do ar de combustão, interruptores de pressão de gás (para interromper o processo em caso de pane) e verificadores visuais que orientam os operadores na verificação de combustível. Em outras palavras, o referido autor diz “... em todas as situações, deve-se prever a instalação de instrumentação adequada para identificar, controlar mudanças e desvios que permitam eliminar as causas de panes e atingir os resultados desejados.”. Nos aquecidos por energia elétrica, normalmente, eles já vem de fábrica com dispositivos que protegem e regulamentam os processos, garantindo segurança ao operador. Chiaverini (2008) defende ainda a ideia de manutenção preventiva dos fornos que, além de ser mais barato para a

empresa do que a manutenção corretiva, garante segurança ao operador e produtividade, uma vez que muitas empresas não possuem fornos reservas.

Para o segundo caso (segurança dos operadores), o referido autor lança a ideia da importância de treinamento adequado para os operadores. Para ele, o treinamento deverá “...incluir instruções sobre as misturas ar/gás de combustão, riscos de explosões, finalidade e princípios básicos dos geradores de gás, análise do gás, manuseio de gases inflamáveis e tóxicos, etc.”. (CHIAVERINI. 2008)

### 3.5 Fases presentes no aço

De acordo com Callister (2007), entende-se por fase como “... a porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes.”. O ferro é um dos elementos químicos que sofrem transformações alotrópicas, ou seja, transformações de fase que ocorrem no mesmo estado termodinâmico da matéria, por exemplo, no estado sólido. As fases presentes no aço são: líquida, ferrita, austenita e cementita, sendo que as três últimas são de interesse para este trabalho.

A ferrita, também chamada de ferro  $\alpha$ , possui estrutura cristalina do tipo cúbica de corpo centrado (CCC), possui concentração máxima de carbono de 0,02% à 727° C e caracteriza-se por ser extremamente macia e dúctil.

A austenita, também conhecida como ferro  $\gamma$ , possui estrutura cristalina do tipo cúbica de face centrada (CFC), possui concentração máxima de 2,11% de carbono à 1147°C e caracteriza-se por apresentar baixa dureza e ductilidade.

Já a cementita, também conhecida como  $Fe_3C$ , possui estrutura cristalina do tipo ortorrômbica, possui concentração de carbono de 6,67% e caracteriza-se por ser resistente (muito dura, cerca de 67 HRC) e muito frágil.

### 3.6 Diagramas de equilíbrio

Por diagramas de equilíbrio entende-se como:

*“gráficos que mostram as fases presentes num material em equilíbrio com o seu ambiente. Corretamente interpretado, um diagrama de equilíbrio indica o número de fases presentes, suas composições e a percentagem de cada fase, em função da temperatura, da pressão e da composição global do material.”* (CETEC, 2007).



Grande parte dos materiais existentes apresentam uma característica em comum, que é serem metaestáveis, ou seja, não apresentam-se na forma mais estável. Apesar disso, qualquer alteração termodinâmica tenderá a levá-lo à sua forma mais estável (também chamada de equilíbrio). Assim, muitas informações úteis sobre mudança de fases são obtidas a partir dos chamados diagramas de equilíbrio (COLPAERT, 2008).

### 3.7 Diagrama de fases Ferro-Carbono

O diagrama de fases ferro-carbono é do tipo binário (presença de dois componentes) no qual a temperatura e composição são os parâmetros variáveis, enquanto a pressão é mantida constante (CALLISTER, 2007).

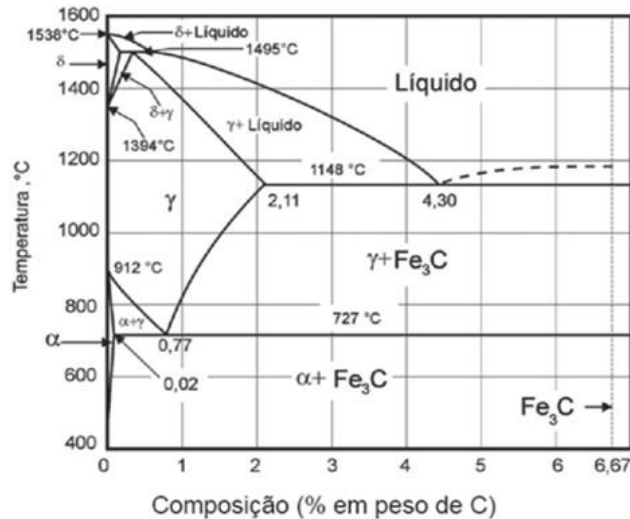
A microestrutura do material, associada à fatores como elementos de liga presente, suas concentrações e o tratamento térmico da liga, vai definir as propriedades físicas e a resposta mecânica do material quando submetido a um esforço. Ela se caracteriza pelo número de fases presentes, suas proporções e a maneira pela qual elas estão arranjadas. As fases podem ser observadas quando a peça em questão é devidamente polida, atacada quimicamente e levada ao microscópio eletrônico. As diferentes fases aparecem de maneira distinta na imagem obtida. Em uma liga binária, por exemplo, as fases se diferenciam na imagem formada em partes mais claras e partes mais escuras (CALLISTER, 2007).

A figura 1, apresenta o diagrama de fases ferro-carbono. Percebe-se que nele não se observa a grafita e sim a cementita ( $Fe_3C$ ), uma vez que o diagrama apresentado é metaestável. Outra observação importante é que ao se atingir a linha que separa dois campos, a energia das fases em equilíbrio é a mesma. Isso implica que ambas as fases coexistem naquele ponto. Ao caminhar pelo diagrama para um ponto em que uma fase é mais estável que outra, observa-se que passa a existir uma diferença de energia entre as duas. Essa diferença de energia é chamada de força motriz para causar a mudança de fase. Assim, é necessário gastar energia para formar os núcleos da nova fase e, garantir a movimentação atômica (difusão) para que esta cresça (COLPAERT, 2008).

Na temperatura de aproximadamente 1538°C, ocorre a chamada reação peritética, que não é interessante comercialmente por representar o ponto de fusão do ferro puro. Na faixa de temperatura de 1148°C, a 4,3% de carbono, ocorre a chamada reação eutética no qual o ferro líquido se transforma em dois sólidos, a austenita ( $\gamma$ ) e cementita ( $Fe_3C$ ). Já no ponto de

0,77% de carbono à 727°C, ocorre a reação eutetóide, na qual a austenita se transforma em dois sólidos, a ferrita ( $\alpha$ ) e cementita ( $Fe_3C$ ) (CHIAVERINI,2008).

**Figura 1 - Diagrama de fases ferro-carbono**



Fonte: CALLISTER, 2007.

A partir do diagrama, pode-se determinar também a quantidade relativa de uma fase ou constituinte para uma dada condição. Determina-se essa proporção de fases a partir da regra da alavanca, que de modo geral pode ser calculada como segmento de reta oposto à fase ou constituinte que se deseja saber dividido pelo segmento de reta total. Esse raciocínio é muito válido para interpretação de dados nos diagramas de fases.

### 3.8 Curvas TTT e TRC

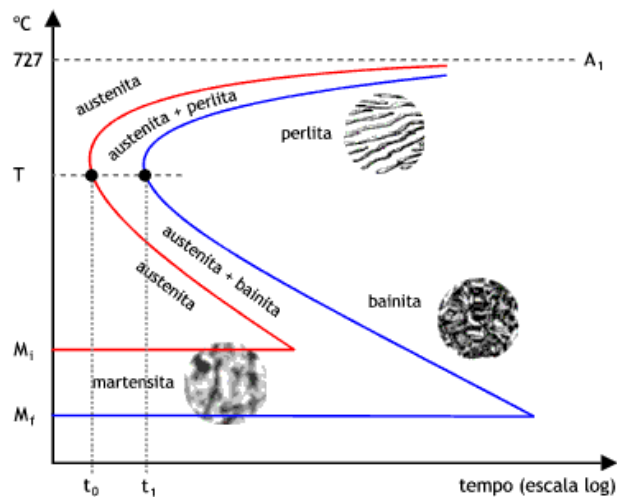
#### 3.8.1 Curva TTT

Curva TTT (tempo, temperatura, transformação) é o estudo da transformação isotérmica da austenita em perlita (ferrita e cementita), a diferentes velocidades resfriamento abaixo de 727° C (CHIAVERINI, 2008).

Percebeu-se, portanto, que o diagrama de fases ferro carbono não fornecia informações da transformação austenítica fora das condições de equilíbrio, ou seja, fora do resfriamento lento. Assim, foi possível prever a presença de novos constituintes, como a bainita e a martensita. (CHIAVERINI,2008).

A figura 2 apresenta um exemplo de diagrama TTT.

**Figura 2 - Diagrama TTT**



Fonte: MSPC INFORMAÇÕES TÉCNICAS, 2015.

### 3.8.2 Curva TRC

Para Colpaert (2008), processos nos quais se aplicam resfriamento contínuo à austenita devem ser representados por curvas de resfriamento contínuo e seu levantamento experimental é feito por técnicas dilatométricas. O diagrama TRC (Transformação com Resfriamento Contínuo) traz informações para temperaturas menores e tempos maiores. Deve-se observar com atenção o que representa cada eixo nesse diagrama. Em alguns, o eixo das abcissas representa o tempo e em outros representa a taxa de resfriamento.

### 3.9 Temperabilidade

Colpaert (2008) define temperabilidade como sendo a “característica que define a variação de dureza da superfície até o núcleo da peça quando temperada”. Também chamada de profundidade de penetração à têmpera, está relacionada com a capacidade do aço em formar a estrutura martensítica, logo, relaciona-se também à velocidade resfriamento. O autor define ainda que os principais fatores que influenciam a temperabilidade de um aço são o tamanho do grão austenítico e a homogeneidade da microestrutura inicial austenítica.

Dessa forma, é necessário diferenciar que o teor de carbono influi diretamente na dureza da martensita enquanto os elementos de liga atrasam as transformações de decomposição difusional da austenita, melhorando a temperabilidade desse aço. Sendo assim, a velocidade de resfriamento para formar martensita é menor nos aços alta liga (exceto quando o elemento de liga é o cobalto, que reduz a temperabilidade). (COLPAERT,2008)

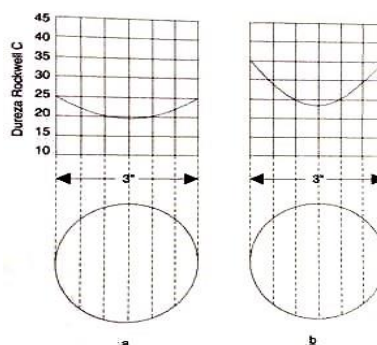
Segundo Chiaverini (2008), chama-se velocidade crítica de resfriamento a velocidade de resfriamento necessária para obter-se a estrutura martensítica sem nenhuma transformação anterior da austenita. Tanto ele quanto Colpaert (2008) definem dois métodos de determinação da temperabilidade de um aço, são eles: método Jominy e o método de Grossmann.

### 3.9.1 Método de Grossmann

De acordo com Chiaverini (2008), o Método de Grossmann consiste no resfriamento, em condições controladas, de uma série de barras cilíndricas a partir do estado austenítico. Seu objetivo consiste em analisar a profundidade de endurecimento do aço. Terminada essa etapa de resfriamento, quebra-se cada uma das barras e mede-se a dureza por toda sua seção transversal. Além disso, é possível observar a mudança das estruturas resultantes.

A figura 3 apresenta o gráfico da seção transversal de duas barras por dureza (na escala Rockwell C). Denomina-se Diâmetro Crítico,  $D_c$ , como o diâmetro da barra cujo centro terá 50% de martensita. Diâmetros acima deste apresentarão um centro com menor teor de martensita, enquanto diâmetros abaixo dele apresentarão maior teor de martensita, podendo estar completamente endurecido (CHIAVERINI,2008).

**Figura 3 - Curvas de dureza para aços carbono (SAE 1040): a) resfriamento em óleo; b) resfriamento em água.**



Fonte: CHIAVERINI,2008.

### 3.9.2 Método de Jominy

Este método também é conhecido como ensaio do resfriamento da extremidade e é muito utilizado atualmente. Consiste em aquecer até a temperatura austenítica um corpo de prova de 1" de diâmetro por 4" de comprimento e aplicar, em condições controladas de pressão, temperatura e quantidade, um jato de água em uma das duas extremidades. Após o resfriamento total, corta-se longitudinalmente o corpo de prova e mede-se a dureza em vários pontos a partir da parte que recebeu o jato de água a distâncias regulares de aproximadamente  $\frac{1}{16}$ " (CHIAVERINI,2008). Pega-se os valores obtidos e plota-se um gráfico de dureza Rockwell C por distância da extremidade resfriada do corpo de prova.

### 3.10 Martensita

Costa & Mei (1988) definem a martensita como “uma fase metaestável que surge com o resfriamento brusco da austenita (...) assim a transformação ocorre por cisalhamento da estrutura, sem difusão”. Colpaert (2008) reforça que mesmo que não exista condições termodinâmicas favoráveis à ocorrência da difusão e dos movimentos de átomos através de uma interface, é comum que os aços se reorganizem em estruturas de menor nível de energia do que a austenita. Essas mudanças ocorrem praticamente na ausência do fenômeno da difusão, com a mudança apenas da estrutura cristalina. Por esse motivo, a transformação martensítica também é chamada de displaciva, ou seja, pelo movimento coordenado de deslocamento de átomos.

Costa & Mei (1988) tratam a martensita como uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro tetragonal de corpo centrado, TCC. Colpaert (2008) diz que esta fase possui estrutura cristalina TCC, que é uma distorção da estrutura cúbica de corpo centrado, CCC. Seus parâmetros de rede dependem diretamente do teor de carbono do aço uma vez que o carbono é o elemento responsável pela distorção da rede cristalina por estar em solução sólida intersticial. Três importantes observações são feitas pelo autor a respeito da martensita:

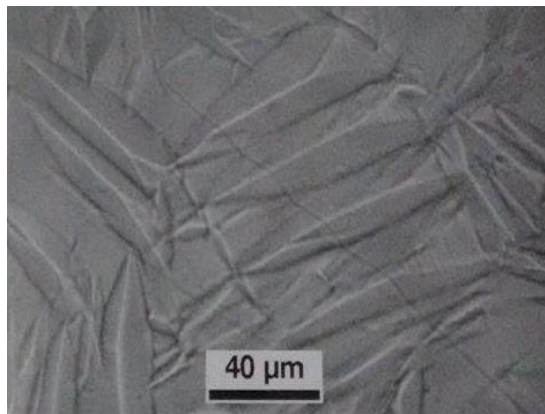
- Ela possui a mesma composição química da matriz que a origina (no caso, a austenita);
- A transformação martensítica dependerá da temperatura atingida e não do tempo em que o corpo de prova permanece sob a mesma;

- Tensões residuais são observadas ao fim do processo de transformação martensítica devido à distorção da rede cristalina pelo movimento displacivo.

A martensita se forma normalmente em velocidades muito rápidas, em formas de ripas, alongadas ou aciculadas. Elas tendem mais a crescer alongando-se do que aumentando sua espessura. Esse crescimento termina quando as ripas encontram um obstáculo, normalmente a fase austenita ou outro grão de martensita já formado. Além disso, ela não se forma em uma orientação qualquer dentro do grão da austenita; ela se forma em direções e planos cristalográficos de interface adequados. (COLPAERT, 2008)

A figura 4, a seguir, apresenta uma microscopia óptica da martensita em uma liga à base de ferro com teor de carbono igual a 0,91% e de níquel igual a 30,5%.

**Figura 4 - Microscopia óptica da martensita**



Fonte: COLPAERT,2008.

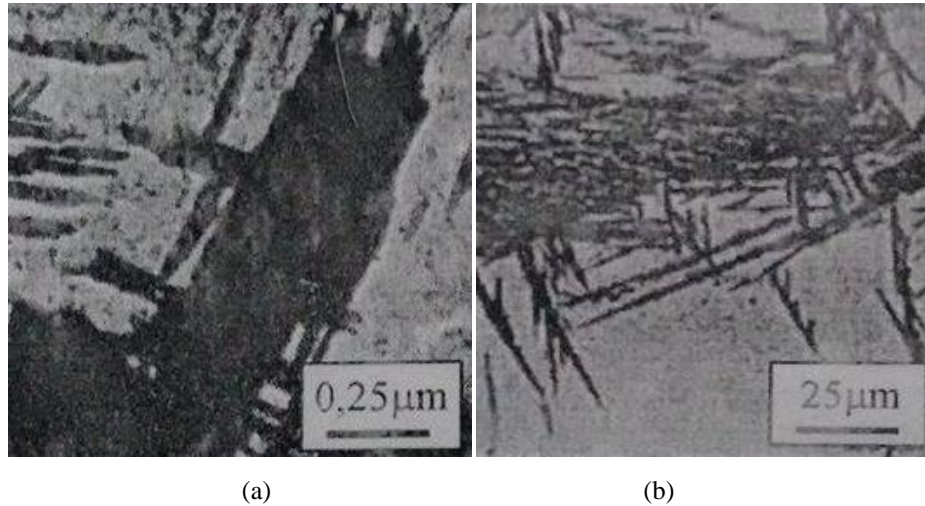
### 3.11 Bainita

“Quando um aço carbono é resfriado rapidamente para temperaturas abaixo do nariz da curva TTT e mantido nessa temperatura, ocorre a formação de uma estrutura denominada bainita”(COSTA & MEI, 1988). A bainita pode ser dividida em superior e inferior, o que diferencia, em um primeiro momento, uma da outra é a temperatura na qual ela foi formada.

A bainita superior possui ripas finas de ferrita com cementita precipitada no contorno dessas ripas. Já a bainita inferior é formada nas regiões próximas das de formação da martensita e apresenta morfologia parecida com esta, ou seja, em forma de agulhas ou lenticular (COSTA & MEI, 1988). Para Colpaert (2008) a principal diferença entre os tipos de bainitas está na forma como os carbonetos se precipitam. Além disso, deve-se atentar para a semelhança entre a microestrutura da bainita e da martensita, embora esta última apresente aparência mais fina e com cristais menores quando vistos no microscópio.

A figura 5 (a) apresenta a morfologia da bainita superior de um aço 0,8%C transformado após 20s a 400°C enquanto a figura 5 (b) traz a morfologia da bainita inferior de um aço 0,8%C transformado a 300°C.

**Figura 5 - Microestrutura óptica da bainita superior (a) e inferior (b)**



Fonte: BHASDESHA & HONEYCOMBE, 2006 .

### 3.12 Tratamentos termoquímicos

Para se alterar propriedades superficiais, têm-se uma infinidade de tratamentos termoquímicos à disposição. Estes são de grande utilidade quando se deseja obter uma superfície com elevada resistência ao desgaste aliada a um núcleo tenaz, por exemplo. (COLPAERT, 2008).

Esses tipos de tratamentos térmicos envolvem, normalmente, a adição de carbono e nitrogênio; estes são capazes de difundir-se rapidamente pelo aço por estarem nele em solução sólida intersticial. Essa característica viabiliza a utilização deste tipo de tratamento térmico. Muitas peças passam por este tipo de tratamento, como eixos de comando, rodas dentadas e pinos móveis. (COLPAERT, 2008).

Os exemplos mais comuns de tratamentos termoquímicos, segundo Chiaverini (2008), são: cementação, nitretação, cianetação, carbonitretação e boretação. Todos eles tem em comum o fato de alterar a composição química da superfície do aço e submetê-la a um tratamento térmico, a fim de se obter determinadas propriedades.

### 3.13 Têmpera

Chiaverini (2008) define a têmpera como um tratamento térmico que consiste no aquecimento do aço até a faixa de temperatura entre 815° e 870°C (que é a temperatura de austenitização) seguido de resfriamento rápido.

Já Colpaert (2008) define o procedimento como um tratamento que visa formar martensita a partir de três princípios básicos: aquecer até a temperatura que se obtenha estrutura austenítica, manter a peça nessa temperatura por um determinado tempo e resfriá-la em meio que possibilite formar a martensita com velocidade adequada. A propriedade final desejada, ou seja, a profundidade de endurecimento e sua conseqüente distribuição de dureza vão depender dos seguintes fatores:

- tamanho e forma da peça;
- temperatura de austenitização;
- meio de têmpera;
- e da temperabilidade do aço.

É muito importante especificar os meios de têmpera. Normalmente eles podem ser líquidos ou gasosos. Os meios líquidos utilizados com frequência são: água, água contendo sal ou aditivos cáusticos, óleos e soluções aquosas de polímeros. Já os meios gasosos mais comuns são: ar ou gases inertes, como nitrogênio, argônio e hélio. (CHIAVERINI, 2008)

Embora o principal objetivo deste tratamento térmico seja o aumento da dureza e resistência à tração, observa-se uma diminuição da ductilidade, da tenacidade e surgimento de tensões internas que podem trazer graves conseqüências para a peça em questão. Além das tensões internas (residuais), o aço poderá apresentar tensões térmicas, oriundas pela diferença de contração volumétrica das camadas mais internas e externas, ou seja, como o aço é resfriado rapidamente, a superfície atinge a temperatura ambiente mais rapidamente do que as regiões internas; logo a superfície contrai mais rápido do que as regiões internas, sendo que na parte central predomina o efeito de compressão enquanto que as partes mais externas (superficiais) estão sob efeito da tração, podendo gerar as trincas de têmpera. (CHIAVERINI, 2008).



### 3.14 Revenimento

Também conhecido como revenido, este tipo de tratamento térmico é subsequente à têmpera e tem como objetivo produzir alterações microestruturais para aliviar as tensões decorrentes da têmpera, a fim de garantir que as peças em questão tenham utilidade e possam ser empregadas, pois o alto nível de tensões residuais aliado à baixa ductilidade limitam a empregabilidade das peças pós têmpera. (COLPAERT, 2008).

Chiaverini (2008) completa esta definição dizendo que este tratamento térmico, além de aliviar ou eliminar as tensões internas, corrige a excessiva dureza e fragilidade da peça, melhorando sua resistência ao choque e ductilidade.

Esta técnica é descrita por Chiaverini (2008) como: “o aquecimento da martensita permite a reversão do reticulado instável para o estável cúbico centrado, produz reajustamentos internos que aliviam as tensões e, além disso, uma precipitação de partículas de carbonetos que crescem e se aglomeram, de acordo com a temperatura e o tempo”.

Normalmente a temperatura de revenimento não ultrapassa 700°C. Assim, de acordo com as propriedades finais desejadas, é que escolhe-se a temperatura adequada de revenimento. Além disso, o tempo de permanência na temperatura previamente definida é de suma importância para o processo.

### 3.15 Operacionalidade dos tratamentos térmicos

Muitos são os recursos disponíveis para execução eficiente de um processo de tratamento térmico. A lista vai de instrumentos simples à equipamentos complexos e sofisticados. Os procedimentos são normatizados e os operadores devem segui-los para evitar imprevistos e acidentes de trabalho. (CHIAVERINI, 2008).

Na categoria ferramentas, incluem-se as tenazes e ganchos. Tenaz é uma ferramenta utilizada para pegar objetos metálicos em altas ou baixas temperaturas, à certa distância do operador, garantindo-lhe segurança durante o manuseio destes. Costuma-se ter à disposição tenazes de vários tipos e tamanhos, a serem escolhidos conforme melhor adequação à cada caso. Elas são projetadas de modo a ter mínimo contato com a peça. Outra ferramenta de grande importância é o gancho. Ele permite a movimentação eficiente das peças dentro dos fornos e nos banhos, sejam eles de resfriamento ou de sal (CHIAVERINI, 2008).

Existem dois tipos principais de fornos utilizados em tratamentos térmicos, são eles: fornos intermitentes e fornos contínuos (CHIAVERINI, 2008).

Os fornos intermitentes geralmente são usados para tratar peças pequenas ou peças que não se adaptam aos fornos contínuos. Podem ser do tipo caixa, de fundo móvel, de elevador, fornos sino, fornos poço, dentre outros. Já os fornos contínuos são utilizados em série e diferem dos fornos intermitentes por serem usados de modo contínuo mas ambos normalmente são constituídos dos mesmo elementos básicos. São usados para tratar grandes volumes de peças e podem ser do tipo com correia transportadora, de soleira móvel com roletes, com vigas moveáveis, munidos de empurradores e com soleira giratória (CHIAVERINI, 2008).

São três os tipos de combustíveis para aquecimento dos fornos utilizados em tratamentos térmicos: combustíveis gasosos (gás natural, propano), líquidos (que são atomizados com ar pressurizado; exigem sistema adequado de ventilação, bem como cuidados redobrados) e energia elétrica (permite melhor controle da temperatura, ausência de poluição e maior uniformidade no aquecimento, por exemplo). (CHIAVERINI, 2008)

### **3.16 Aço AISI 5150**

O aço AISI 5150 é um aço ao cromo utilizado em molas semielípticas e helicoidais para automóveis, caminhões e tratores. Além disso, ele também é empregado em peças submetidas a beneficiamento, como alavancas, eixos, pinos, parafusos resistentes ao calor, dentre outros. Para sua melhor aplicação e utilização, esse tipo de aço é geralmente submetido à tratamento térmico para adequação de suas propriedades, como elevada resistência à tração, à fadiga e boa ductilidade (CALLISTER, 2007).

A composição química deste aço é basicamente: carbono (0,48 – 0,53%), manganês (0,70 – 0,90%), silício (0,15 – 0,35%) e cromo (0,70- 0,90%) (ABNT, 2000).

### **3.17 Ensaios Mecânicos**

A dureza não tem um único conceito, ou seja, ela depende do tipo de aplicação para o qual esta propriedade servirá. Normalmente, dureza é uma propriedade mecânica que mede a resistência de um material à deformação plástica localizada, ao risco ou ainda resistência ao corte (SOUZA, 1982). Para o ensaio de penetração foram desenvolvidas ao longo dos anos

algumas técnicas, nas quais um penetrador de ponta previamente definida é forçado sobre a superfície de um material, controlando-se a taxa de aplicação e a carga. Assim, mede-se a profundidade impressa no material. Esta profundidade é relacionada à um valor de dureza. O ensaio de dureza é comumente utilizado por ser simples, barato, não destrutivo e capaz de estimar outras propriedades mecânicas, como o limite de resistência à tração. Os métodos mais comuns para se medir dureza são: Rockwell, Brinell e Vickers (CALLISTER, 2007).

Um equipamento utilizado para a realização dos ensaios de dureza é mostrado na figura 6.

As normas que regem cada tipo de ensaio de dureza são:

- Rockwell: NBR ISSO 6508-1 (2008) – Materiais Metálicos – Dureza Rockwell.
- Brinell: NBR NM 187-1: 1999 - Dureza Brinell.
- Vickers: ABNT NBR ISSO 6507-1:2008 – Materiais Metálicos – Dureza Vickers.

**Figura 6 – Equipamento para ensaios de dureza**



Fonte: Próprio autor.

A Dureza Rockwell é um método para medição de dureza mais utilizado devido à sua simplicidade. Atingem praticamente todas as ligas metálicas devido à ampla combinação de penetradores com várias cargas. Os penetradores mais comuns são os de esfera de aço e cônico de diamante. Os diâmetros dos penetradores mais comuns são 1/16", 1/8", 1/4" e 1/2". O valor de dureza é determinado pela diferença de profundidade entre a pré-carga inicial aplicada, que é de menor valor, e a carga principal, de maior valor. Esse ensaio se divide em dois: Dureza Rockwell e Dureza Rockwell Superficial. No primeiro, a pré carga menor é de

10 kgf, enquanto que a principal varia entre 60, 100 e 150 kgf; a nomenclatura deste ensaio é a carga aplicada seguida das letras HR A, B ou C que indicam Dureza Rockwell A, Dureza Rockwell B e Dureza Rockwell C, respectivamente. Já para o outro ensaio, a carga menor é de 3 kgf e os valores da carga principal variam entre 15, 30 e 45 kgf; a nomenclatura utilizada é a carga aplicada com HR, seguida das letras N, T, W, X e Y.. Valores de dureza abaixo de 20 ou maiores que 100 causam imprecisão, o que implica em mudança de escala de dureza (CALLISTER, 2007).

Na Dureza Brinell um penetrador esférico é forçado sobre a superfície do material. O diâmetro do penetrador é de 10,0mm. As cargas padrão variam de 500 a 3000 kgf, variando de 500 em 500 kgf. O teste consiste na aplicação constante da carga por um tempo específico, de 10 a 30 segundos. O valor da dureza Brinell é em função tanto do diâmetro da profundidade de penetração quanto da carga aplicada. O diâmetro da impressão é medido por um microscópio de baixo aumento, convertido na dureza HB apropriado com a ajuda de um gráfico. Esta técnica apresenta apenas um tipo de escala (CALLISTER, 2007).

Já para a Dureza Vickers, o penetrador possui geometria piramidal, com ângulo de 136° e é de diamante. Força-se este aplicador sobre o corpo de prova com uma carga menor que a dos outros ensaios, em torno de 1 gf e 1 kgf. Como na dureza Brinell, a dureza Vickers consiste na medida do diâmetro da impressão por um microscópio e convertido em um valor de dureza. Em alguns casos, pode ser necessário algum tipo de acabamento superficial para garantir uma impressão bem definida. A impressão obtida na leitura de dureza é um losango cuja dureza é obtida através da média das diagonais. A nomenclatura para este ensaio consiste no valor da carga seguido de HV (CALLISTER, 2007).

A microdureza Vickers utiliza um penetrador de diamante e carga de até 1 Kgf para fazer uma impressão microscópica no seu material em análise. Os cuidados básicos a serem tomados são: deve-se fazer o polimento eletrolítico da sua superfície a fim de se evitar o encruamento do material; estar atento a um possível retorno elástico e impressões pequenas demais, o que pode provocar erros de medição; tempo de manutenção da carga deve ser de cerca de 18 segundos enquanto a velocidade de aplicação da carga deve estar entre 1 e 20 microssegundos; a máquina deve estar sempre com manutenção (calibração) em dia, a fim de se evitar erros na medida das diagonais e, conseqüentemente, no valor da microdureza. Este será dado pelo próprio equipamento a partir da marcação manual das diagonais na impressão piramidal registrada pelo microdurômetro (SOUZA, 1982).

### **3.18 Metalografia**

#### **3.18.1 Macrografia**

A análise macrográfica é aquela que pode ser feita, após preparo da superfície e ataque adequado, a olho nu ou com auxílio de lente com ampliação máxima de dez vezes. A preparação da superfície se dá pelo corte ou desbaste seguido de lixamento. O lixamento ocorre através do atrito entre a superfície em contato com a lixa. Já o ataque da face em questão pode ser por imersão ( a face é imersa em um recipiente contendo reagente), por aplicação ( quando uma camada de reativo é aplicada sobre a face em estudo) ou por impressão direta de Baumann (a face é envolvida por uma folha de papel fotográfico umedecido por reagente) (COLPAERT, 2008).

Assim, algumas regiões da superfície são atacadas com maior intensidade se comparadas a outras. Essa diferença se dá pela variedade de composição química e estrutura cristalina. Como resultado da análise macrográfica, obtém-se um contraste entre regiões (umas mais escuras que outras) de diferentes composições químicas (COLPAERT, 2008).

#### **3.18.2 Micrografia**

A micrografia baseia-se no princípio da incidência de luz visível sobre uma amostra e sua reflexão até o observador. É um dos processos mais comuns de análise da microestrutura de aços e ferros fundidos. Além das etapas de preparação citadas na macrografia, acrescenta-se o embutimento em resina, lixamento em um conjunto de lixadeiras resfriadas com água ( lixas 120, 240, 320, 400 e 600) seguido de polimento com pasta abrasiva. Vale ressaltar que ao mudar de lixa ou disco de polimento, é necessário girar o corpo de prova em 90° para eliminar os riscos da etapa de lixamento anterior. Em seguida, realiza-se ataque químico para posterior análise no microscópio; os reagentes mais utilizados são Nital e Picral (COLPAERT, 2008).

## 4 ESTADO DA ARTE

### 4.1 Efeito das temperaturas de têmpera e de revenido na resistência à corrosão da camada martensítica de alto nitrogênio produzida por SHTPN sobre o aço AISI 409

O referido trabalho baseia-se na ideia de que processos de corrosão estão diretamente associados à perdas econômicas. Assim, procura-se por determinados tipos de tratamentos que melhore as propriedades dos materiais e aumente sua vida útil.

Elisiane (2014) informa que o cromo é o principal elemento de liga que atua no aumento da resistência à corrosão, ou seja, quanto maior seu teor maior a resistência à corrosão do material. Esse fato se justifica pela camada passiva superficial formada pelo contato do ferro-cromo com o oxigênio do ambiente. Além disso, os aços martensíticos utilizados no estudo deste trabalho, após a têmpera, tornam-se mais resistente à corrosão e a tenacidade, ductilidade e resistência mecânica são recuperadas sensivelmente após a realização do revenimento.

Os aços com nitrogênio em solução sólida possuem maior vantagem porque este elemento químico possui maior tendência de formar solução sólida que o carbono, aprimorando propriedades desejadas como: menor tendência à formação de precipitados, aumento da resistência à corrosão e aumento da resistência mecânica através do refino dos grãos.

O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito do SHTPN ( Tratamento Térmico de Solubilização após Nitretação à Plasma), da têmpera e do revenimento na resistência à corrosão. Os procedimentos utilizados pela autora foram: escolha e aquisição de materiais, preparação das amostras, SHTPN, têmpera, revenimento, caracterização mecânica e microestrutural aliadas a ensaio de corrosão em todas essas três etapas.

De maneira geral, os resultados obtidos foram o aparecimento da estrutura martensítica e seu maior refinamento; com a têmpera, ocorre homogeneização da distribuição do nitrogênio, estabilizando a austenita; o revenimento aumentou a resistência mecânica devido à formação de pequenos e dispersos precipitados; a dureza na maior parte das amostras diminui com o aumento da profundidade analisada e para os ensaios de corrosão, as amostras nitretadas apresentam potencial de corrosão menos nobres.

## **4.2: Estudo do comportamento do revenimento do aço inoxidável AISI 410** *(Study on tempering behaviour of AISI 410 stainless steel)*

O aço inoxidável martensítico AISI 410 possui aplicabilidade em pás de turbinas marítimas, roda dentada e lâminas de compressores, por exemplo, devido à combinação de algumas propriedades, entre as quais se destacam dureza, resistência ao desgaste e corrosão.

De acordo com Chakraborty et al (2014), porém, para que essas propriedades sejam alcançadas, este aço é submetido ao tratamento térmico de têmpera, seguido de normalização. Apesar disso, foi observado que este aço apresenta queda na resistência ao impacto por fratura intergranular. A causa para essa fragilização foi identificada pelos autores, através da espectroscopia eletrônica, pelo endurecimento secundário no contorno de grão causado pela precipitação de carbonetos e segregação de impurezas, como fósforo e estanho.

Porém, neste estudo foi observado que enquanto alguns elementos de liga contribuem para segregação e fragilização intergranular nos aços inoxidáveis, outros como o Molibdênio possuem efeito contrário se não vinculado a carbonetos. Assim, o objetivo deste trabalho foi alcançar as propriedades desejadas (elevada dureza, resistência mecânica) sem fragilização e trincas após a têmpera em diferentes temperaturas em rodas dentadas.

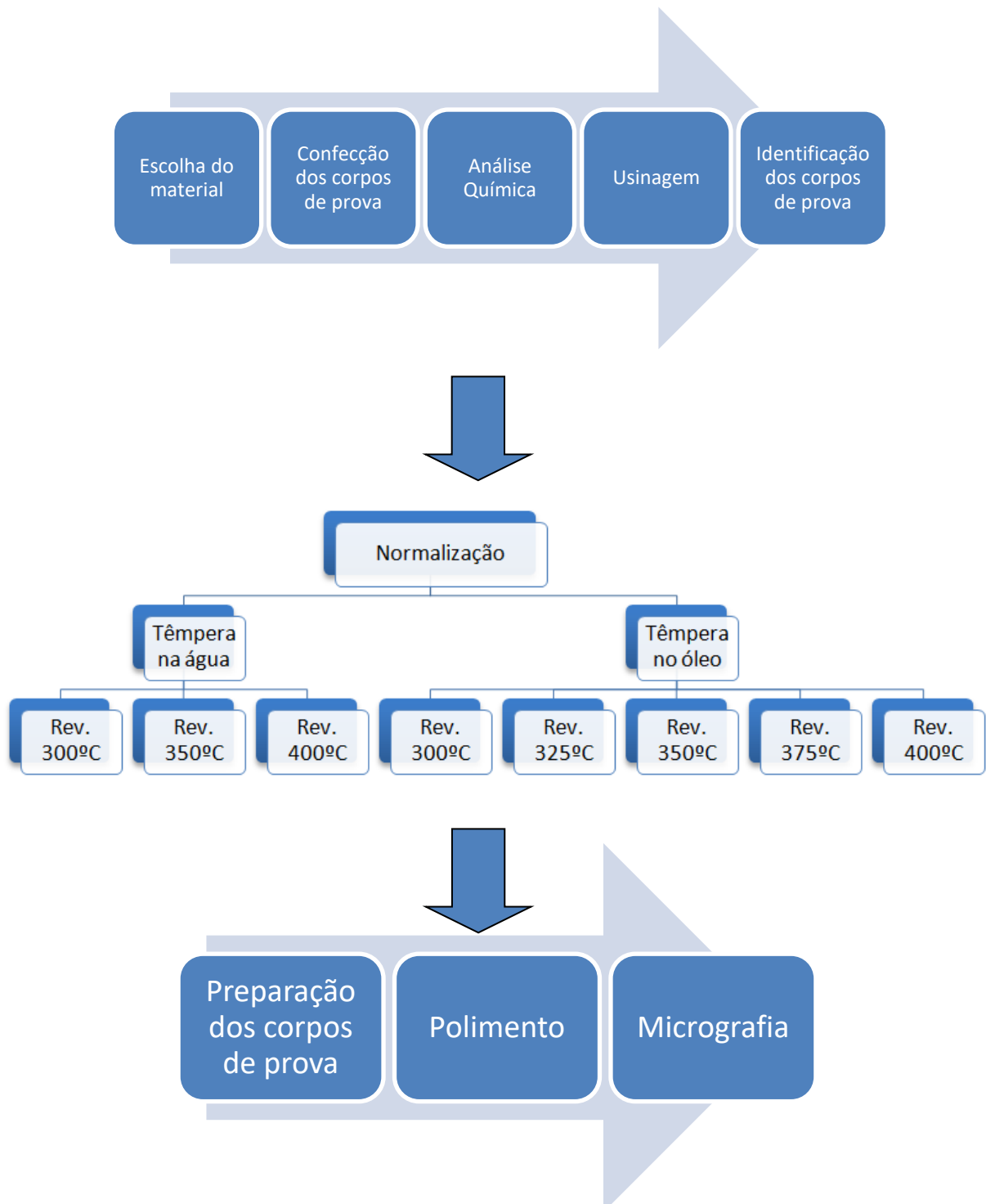
Placas do aço inoxidável AISI 410 foram temperadas e submetidas ao Ensaio de Impacto do tipo Charpy, Ensaio de Dureza Vickers e Microscopia Eletrônica de Varredura. Para identificar os precipitados formados, utilizou-se a técnica de Difração de Raio X (DRX).

Percebeu-se um aumento gradual na resistência ao impacto com o aumento da temperatura de têmpera. Para que os objetivos fossem alcançados, algumas especificações no tratamento de têmpera e outros tratamentos subsequentes foram sugeridas de modo que obtivessem um valor mínimo de dureza aceitável e que não ocorressem trincas nas rodas dentadas.

## 5 Metodologia

A figura 7 apresenta um fluxograma das etapas de trabalho realizadas no desenvolvimento deste estudo.

**Figura 7 -Fluxograma das etapas de trabalho**



Fonte: Próprio autor.



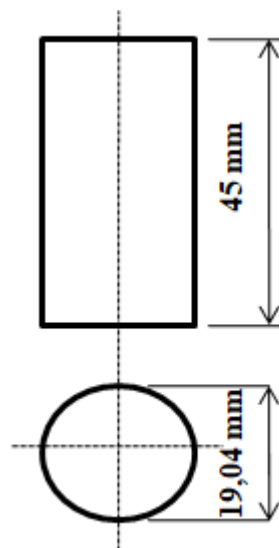
## 5.1 Material

Os corpos de prova foram obtidos a partir de uma barra cilíndrica de AÇO AISI 5150, com diâmetro médio de 19,04mm. O tamanho inicial para cada corpo de prova foi de 45 milímetros. Foram confeccionados 25 corpos de provas para este estudo.

## 5.2 Confeção dos corpos de prova

A barra de aço foi cortada em uma serra de fita, com tamanho de 45mm e os corpos de prova foram faceados no torno mecânico. O equipamento de Serra de Fita, modelo FM 1600 da marca FRANCHO, conta com refrigeração para evitar aumento exagerado de temperatura, evitando as conseqüências deste aumento (mudança de microestrutura, por exemplo). A figura 8 representa o corpo de prova obtido neste processo.

**Figura 8 - Esquema do corpo de prova**



Fonte: Próprio autor.

## 5.3 Usinagem dos corpos de prova

Após a etapa de corte na Serra de Fita, para o ajuste de medidas, paralelismo e rugosidade, os corpos de prova foram levados ao torno mecânico MICRO NARDINI 500 II, conforme figura 9 a. Nesta mesma figura está apresentada a Serra de Fita (9 b). O faceamento serviu para melhorar a rugosidade e para diminuir o comprimento das amostras, deixando-as com 40 mm.

**Figura 9 – Torno mecânico e Serra de Fita**

(a) Torno MICRO NARDINI 500 II

(b) Serra de fita FRANCHO FM 1600

Fonte: Próprio autor.

#### 5.4 Identificação dos corpos de provas

A identificação dos corpos de prova foi realizada manualmente com o Tipo numérico, na qual a numeração da temperatura de revenimento foi prensada com a ajuda de um martelo sobre a face de cada CP. As identificações bem como suas quantidades estão listadas na tabela 1.

Dos vinte e cinco CP's, um foi apenas temperado e os outros vinte e quatro foram temperados e revenidos, variando a temperatura. Para cada temperatura, foram separados três corpos de prova para análise.

**Tabela 1 – Identificação dos corpos de prova**

Meio de resfriamento	Identificação	Tratamento Térmico Submetido	Quantidade (peças)
Óleo	1	Temperado	1
Óleo	300	Têmpera e revenimento	3
Óleo	325	Têmpera e revenimento	3
Óleo	350	Têmpera e revenimento	3
Óleo	375	Têmpera e revenimento	3
Óleo	400	Têmpera e revenimento	3
Água	300	Têmpera e revenimento	3
Água	350	Têmpera e revenimento	3
Água	400	Têmpera e revenimento	3

Fonte: Próprio autor.

## 5.5 Normalização

Todos os corpos de prova, após o processo de usinagem, foram inseridos em um recipiente metálico sem tampa, recobertos com carvão vegetal e colocados no forno assim que este atingiu a temperatura de 900°C, permanecendo por quarenta e cinco minutos. A figura 10 apresenta o forno utilizado no experimento, da marca Magnus, modelo N1040.

**Figura 10 -Forno elétricoN1040, Magnus, para tratamentos térmicos**



Fonte: Próprio autor.

O objetivo deste tratamento térmico é para desfazer as mudanças microestruturais causadas pela etapa de usinagem. Já a utilização do carvão vegetal serviu para evitar a descarbonetação e oxidação dos corpos de prova.

Assim que o tempo de permanência no forno foi atingido, as peças foram retiradas do forno e resfriado ao ar, esperando sempre a temperatura estabilizar nos 900°C para a retirada da próxima.

## 5.6 Têmpera

Neste tratamento, os corpos de provas foram colocados no forno a uma temperatura de 900°C durante um tempo de encharque de 45 minutos.

Realizou-se dois procedimentos de resfriamento distintos: dezesseis peças foram resfriadas em óleo e nove peças foram resfriadas em água.

Logo após o tratamento de têmpera, mediu-se os valores de dureza de um corpo de prova para cada meio de resfriamento com o intuito de analisar se o tratamento foi realizado adequadamente.

Do total de peças temperadas, apenas uma não será revenida para efeito de comparação de dureza.

## 5.7 Revenimento

As peças temperadas, já separadas em dois grupos, foram subdivididas novamente em grupos de acordo com a faixa de temperatura e tempo de revenimento. As informações estão apresentadas nas tabela 2 e 3.

**Tabela 2 - Informações sobre o revenimento nas peças resfriadas no óleo**

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Quantidade (peça)</b>	<b>Tempo (minutos)</b>
300	1	30
300	1	45
300	1	60
325	1	30
325	1	45
325	1	60
350	1	30
350	1	45
350	1	60
375	1	30
375	1	45
375	1	60
400	1	30
400	1	45
400	1	60

Fonte: Próprio autor.

**Tabela 3 - Informações sobre o revenimento nas peças resfriadas na água**

Temperatura (°C)	Quantidade (peça)	Tempo (minutos)
300	1	30
300	1	45
300	1	60
350	1	30
350	1	45
350	1	60
400	1	30
400	1	45
400	1	60

Fonte: Próprio autor.

Para cada temperatura de revenimento foram utilizados três corpos de prova, sendo que cada peça foi retirada em um tempo distinto para posterior análise da influência deste parâmetro nas propriedades do material.

### 5.8 Preparação dos corpos de prova para ensaios mecânicos e metalografia

Nesta etapa as peças foram cortadas ao meio com disco abrasivo refrigerado o suficiente para evitar modificação em sua microestrutura, no equipamento de corte de precisão AROCOR 80, da marca AROTEC. O comprimento final dos corpos de prova foi de 20 milímetros. A figura 11 apresenta o equipamento de corte de precisão.

**Figura 11 – Equipamento de corte de precisão AROCOR 80**

Fonte: Próprio autor.

O embutimento das amostras se fez necessário para evitar danos nos panos da etapa de polimento, assim como dificultar que as lixas rasgassem. Por serem vinte e cinco amostras de

vinte milímetros de comprimento, o embutimento foi realizado até o comprimento médio de cada uma. O grande objetivo nesta fase é formar superfícies planas e paralelas, adequadas para os processos de lixamento, polimento, análise micrográfica e de microdureza.

Em seguida, os corpos de prova revenidos no tempo de quarenta e cinco minutos passaram pelas seguintes lixas, das mais grossas para as mais finas: #120, #240, #320, #400 e #600. Já os demais passaram apenas pela lixa de #600. Ao se passar de uma lixa para outra, alguns cuidados foram tomados, como:

- Lubrificação constante da lixa com água;
- Limpeza da peça embutida com álcool etílico e secar com ar quente no secador;
- Girar 90° para eliminar os riscos da etapa anterior.

### **5.9 Medida de Dureza Rockwell C**

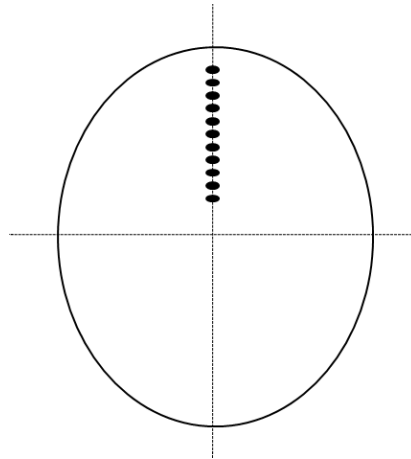
O penetrador utilizado no ensaio é do tipo cone de diamante de 120°, a pré-carga foi de 10Kgf, a carga de 150 Kgf e o tempo de aplicação desta foi de cerca de vinte segundos.

Foram medidos três valores de dureza para cada um dos vinte e cinco corpos de prova, seguindo a linha radial de cada um, ou seja, uma medida próxima ao valor do raio, uma intermediária e outra próxima ao centro da peça. A partir desses valores, foi possível calcular a dureza média e o desvio padrão; além disso, o gráfico de dureza versus temperatura de revenimento para cada tempo analisado foi traçado.

### **5.10 Perfil de Microdureza Vickers**

A carga utilizada neste ensaio foi de 9,807 N (HV1), com penetrador piramidal de diamante de base quadrada e tempo de aplicação da carga de quinze segundos. O equipamento realizou a impressão no corpo de prova cortado e com a ajuda do microscópio, desmarcou-se o tamanho  $L_1$  e  $L_2$  das diagonais para que ele calculasse o valor da microdureza. Foram medidos onze valores de microdureza a partir da parte mais externa do raio dos vinte e cinco corpos de provas (limite entre a peça e o embutimento) em direção ao centro. Deste limite, moveu-se meio milímetro no raio em direção ao centro para iniciar as medições. A figura 12 apresenta um desenho esquemático do modo como foram feitos os deslocamentos para medidas de microdureza.

**Figura 12 - Corpo de prova cortado para medição da microdureza**



Fonte: Próprio autor.

### **5.11 Polimento**

O polimento, assim como o lixamento, foi realizado em uma sequência dos panos mais grossos para os mais finos, ou seja, 9 $\mu$ m, 3 $\mu$ m e 1 $\mu$ m.. Neles estavam depositados um pouco de pasta de diamante, material abrasivo responsável em polir as amostras. A lubrificação foi feita com álcool etílico e a superfície dos corpos de prova foi lavada com detergente seguido de álcool e secagem com jato de ar quente antes de passar de um pano mais grosso para um mais fino.

### **5.12 Micrografia**

Antes de levar os corpos de prova para análise no microscópio, eles foram atacados quimicamente. Com um algodão devidamente embebido de Nital 3%, umedeceu-se a superfície dos corpos de prova por aproximadamente 5 segundos. Em seguida, lavou-se as amostras com detergente, passou-se álcool e secou-se com jato de ar quente. Posteriormente, eles foram ao microscópio eletrônico para análise de sua microestrutura.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Resultado da Têmpera e do Revenimento

Na figura 13 apresenta-se o corpo de prova revenido em água à 300°C, que trincou devido à severidade do processo, ou seja, as tensões associadas à formação da martensita deformam bastante a estrutura cristalina que podem culminar em formação de trincas.

**Figura 13 - Trinca causada pela severidade da têmpera**



Fonte: Próprio autor.

Já na figura 13, apresenta-se corpos de prova após revenimento nos tempos de trinta, quarenta e cinco e sessenta minutos, respectivamente. A escolha da faixa de temperatura em questão (325°C como pode-se ver tipado na imagem) foi meramente ilustrativa, uma vez que esses corpos de prova apresentaram melhor resultado visual no quesito coloração pós-revenimento. Porém, observou-se as mesmas características para todas as amostras estudadas, em diferentes qualidades visuais.

Observa-se entre eles uma diferença de coloração, cada grupo de tempo na sua faixa de temperatura. As cores que apareceram foram azul e dourado e, no geral, caracterizam uma temperatura aplicada mais baixa (para o aço, o vermelho alaranjado só aparece em temperaturas acima dos 600°C, 700°C; o azul e dourado na faixa dos 250°C, 320°C).

O tempo de exposição à temperatura foi diferente, interferindo na cor da superfície. Os corpos de prova que foram submetidos a um tempo de forno maior apresentaram coloração azulada em sua superfície. Já os de menores tempos apresentaram uma cor mais amarelo dourado. O tempo intermediário apresentou uma coloração intermediária, com azul e dourado.



Isso significa que no caso dos corpos de prova com maior tempo de encharque, houve mais formação de óxidos na superfície. Tal camada de óxido mais espessa absorve mais luz, refletindo apenas comprimentos de ondas mais escuros, como o azul na faixa de temperatura mais alta. Tal fato era o esperado pela literatura.

**Figura 14 - Coloração característica pelo tempo de revenimento**



Fonte: Próprio autor.

## 6.2 Resultado do ensaio de Dureza Rockwell C

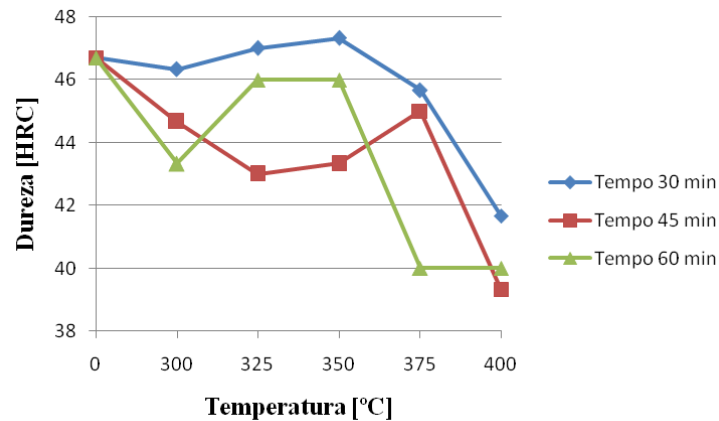
Os dados obtidos no ensaio de Dureza Rockwell C estão apresentados na tabela 4, a seguir. Posteriormente, na figura 15, têm-se a curva de revenimento para esses corpos de provas resfriados no óleo nos tempos de 30, 45 e 60 minutos. Já na figura 16, têm-se a curva de revenimento para o resfriamento na água nos mesmos tempos mencionados. Vale ressaltar que, no gráfico, o primeiro valor de dureza corresponde ao corpo de prova apenas temperado, para fins de comparação.

**Tabela 4 - Resultado das medidas de dureza para os corpos de prova**

Situação do CP	Meio de resfriamento	Média das medidas de Dureza Rockwell C (HRC)			Média das médias das Durezas	Desvio-padrão
		Tempo (min) 30	Tempo (min) 45	Tempo (min) 60		
Temperado	Óleo	46.7	46.7	46.7	46.7	0.0
Rev. 300°C	Óleo	46.33	44.66	43.33	44.8	1.2
Rev. 325°C	Óleo	47	43	46	45.3	1.7
Rev. 350°C	Óleo	47.33	43.33	46	45.6	1.7
Rev. 375°C	Óleo	45.67	45	40	43.6	2.5
Rev. 400°C	Óleo	41.67	39.33	40	40.3	1.0
Rev. 300°C	Água	46.67	45.67	40	44.1	2.9
Rev. 350°C	Água	43.33	43	45.33	43.9	1.0
Rev. 400°C	Água	39.67	43.67	39.33	40.9	2.0

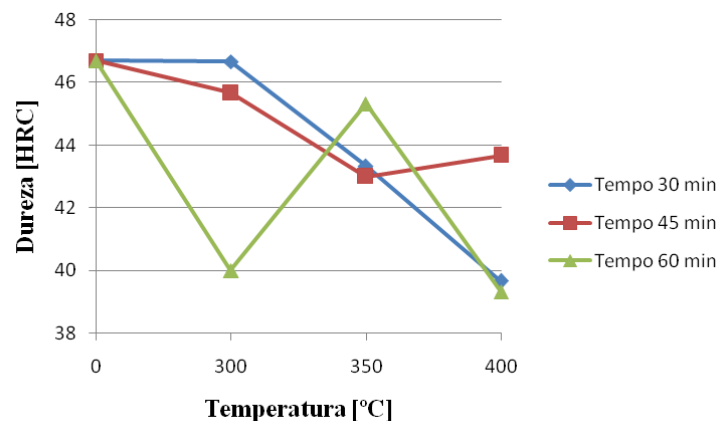
Fonte: Próprio autor.

**Figura 15 - Curva de revenimento do aço AISI 5150 resfriado no óleo**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 16 - Curva de revenimento do aço AISI 5150 resfriado na água**



Fonte: Próprio autor.

Todos os corpos de prova tiveram sua dureza analisada. A dureza média da barra do aço AISI 5150 antes de ser submetida aos tratamentos térmicos propostos neste trabalho foi de 35 HRC. Os corpos de prova resfriados em água apresentaram um valor médio de dureza de 50 HRC enquanto os resfriados no óleo apresentaram um valor médio de 48 HRC.

Como o interesse maior de estudo deste trabalho é a influência do tempo no revenimento, foram traçados dois gráficos: um para os corpos de prova resfriados na água e outro para os resfriados em óleo.

O resultado observado para os corpos de prova temperados na água é uma redução final da dureza média, conforme esperado pela diminuição das tensões residuais internas. Já no caso das amostras temperadas em óleo, houve um aumento na dureza nas faixas de temperatura de 325°C e 350°C. Esse pequeno aumento pode ser justificado pela formação de

Carboneto de Cromo devido à movimentação de Cromo propiciada por energia térmica suficiente para tal fato. Assim, ao encontrar com um carbono livre, forma-se este composto que eleva a dureza conforme observado. Comparando o aumento de dureza com a dureza média da temperatura de revenimento mais elevada, percebe-se que ele é pouco significativo devido ao seu baixo valor. Apesar disso, ainda no resfriamento no óleo, pode-se observar de maneira geral que com o aumento do tempo de revenimento, ocorre uma pequena redução na dureza média final, devido ao processo de recristalização e recuperação dos cristais, salvo os casos mencionados anteriormente.

### 6.3 Resultado do ensaio de Microdureza

Os dados obtidos no ensaio de Microdureza estão apresentados nas tabelas 5 e 6 nos diferentes meios de resfriamento da têmpera. Posteriormente, das figuras 17 à 25 têm-se o perfil de microdureza para cada temperatura de revenimento e meio de resfriamento.

**Tabela 5 - Resultado das medidas de microdureza para os corpos de prova resfriados no óleo**

Temperatura de revenimento	Tempo de revenimento	Valor de microdureza nas medições										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperado	*****	806	816	824	822	813	815	793	803	772	819	803
300	30	669	659	640	639	650	640	632	640	634	627	632
300	45	607	615	613	618	627	614	608	618	591	607	597
300	60	620	606	609	606	596	594	608	615	595	612	580
325	30	446	476	570	505	547	562	543	587	591	611	627
325	45	593	613	608	593	597	603	597	609	609	610	589
325	60	597	600	589	597	623	581	565	570	608	603	592
350	30	606	587	613	579	593	585	577	582	579	601	598
350	45	565	535	564	566	565	564	585	570	557	560	536
350	60	549	573	547	561	563	573	535	573	549	564	567
375	30	559	584	574	566	570	562	578	570	577	572	576
375	45	565	522	558	547	553	559	557	543	555	539	545
375	60	511	526	529	535	527	544	533	506	531	531	529
400	30	521	526	523	532	534	511	541	517	496	529	536
400	45	484	514	499	521	510	502	520	516	522	498	493
400	60	467	473	488	469	473	476	490	479	482	476	463

Fonte: Próprio autor.

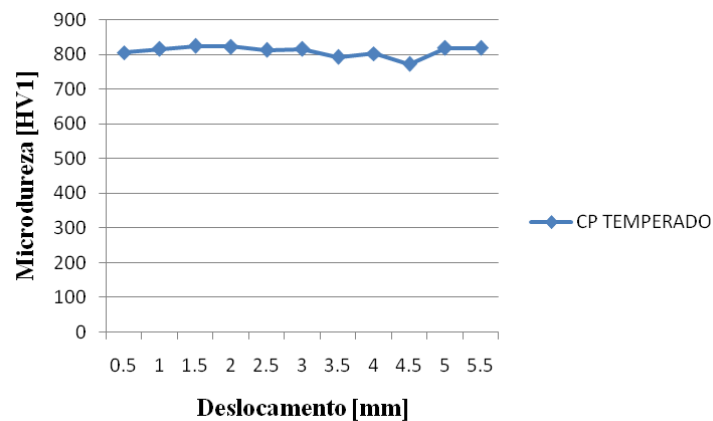
De acordo com a figura 17, percebe-se uma variação no valor da microdureza ao longo do raio de medição. O corpo de prova em questão, somente temperado, apresenta os maiores valores para este ensaio como era esperado, uma vez que ele não passou pelo alívio de tensões causado no tratamento térmico de revenimento.

**Tabela 6 - Resultado das medidas de microdureza para os corpos de prova resfriados na água**

Temperatura de revenimento (°C)	Tempo de revenimento (minutos)	Valor de microdureza nas medições										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
300	30	619	615	613	618	611	664	617	661	608	623	632
300	45	616	629	626	656	627	616	557	590	611	600	602
300	60	593	589	609	600	628	617	621	607	594	604	615
350	30	600	604	609	597	588	579	577	589	587	578	576
350	45	554	568	563	576	557	551	563	570	596	551	558
350	60	583	564	567	553	562	559	552	566	562	558	580
400	30	516	538	528	526	528	520	536	500	523	506	498
400	45	535	508	522	528	526	522	505	519	512	526	523
400	60	524	536	512	528	507	504	497	520	504	506	504

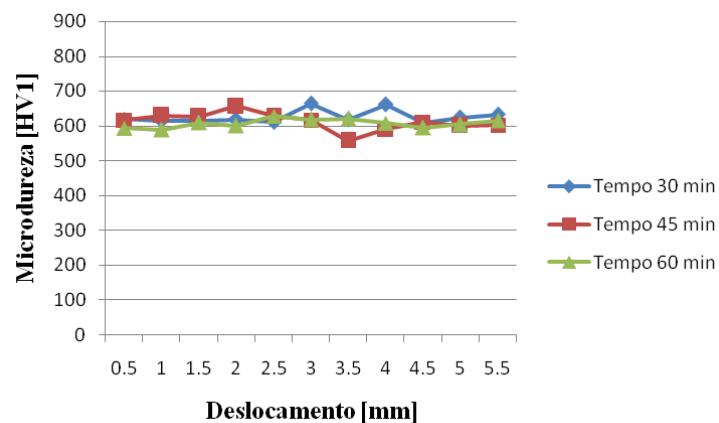
Fonte: Próprio autor.

**Figura 17 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 apenas temperado**



Fonte: Próprio autor.

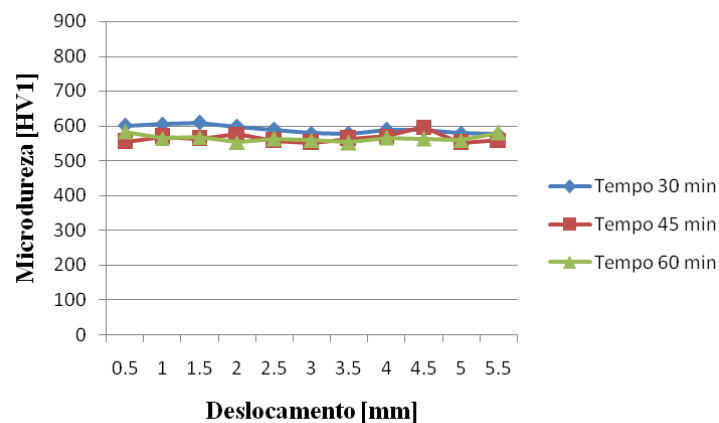
**Figura 18 – Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado em água à 300°C**



Fonte: Próprio autor.

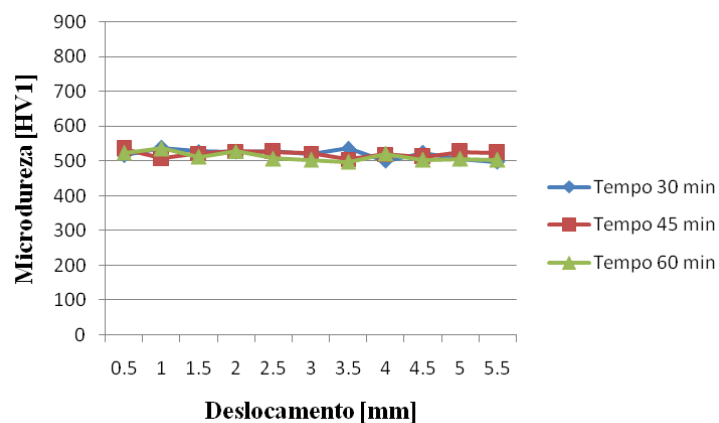
Analisando os perfis de microdureza para a temperatura de 300°C do corpos de prova resfriados em água (figura 18), percebe-se que de maneira geral o valor médio de microdureza diminuiu com o aumento do tempo, conforme esperado. Apesar disso, é possível observar alguns valores discrepantes em algumas medições de cada tempo de encharque, especialmente no corpo de prova no tempo de revenimento 45 minutos, o que não era esperado. Tal irregularidade pode ser explicada pelo fato da parte mais interna da amostra ter mais dificuldade para endurecer e eliminar as tensões residuais (realizar trocas térmicas), necessitando de mais tempo para conseguir tal fato. Além disso, não se percebe uma grande influência do tempo de 15 minutos de diferença no encharque de um corpo de prova para outro.

**Figura 19 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado em água à 350°C**



Fonte: Próprio autor.

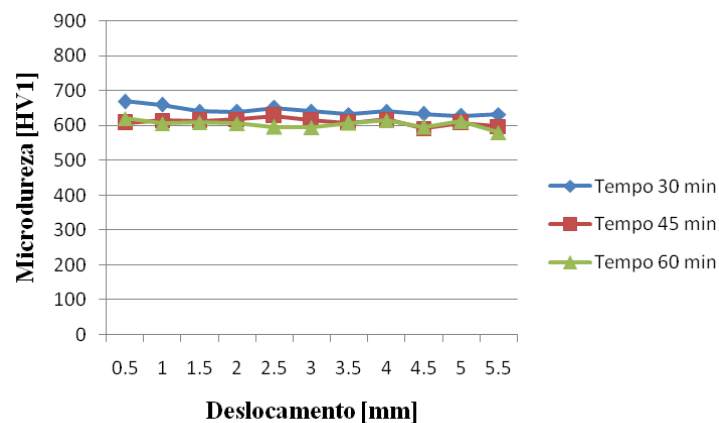
**Figura 20 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado em água à 400°C**



Fonte: Próprio autor.

Para as temperaturas de 350°C (figura 19) e 400°C (figura 20) também foi possível perceber uma queda gradativa no valor de microdureza média, sendo maior na temperatura e tempo de encharque mais altos. De maneira geral, com a temperatura um pouco mais alta percebeu-se uma menor discrepância no perfil de microdureza nos três diferentes tempos de encharque, além de uma baixa influência do tempo no valor de dureza e microdureza para esses intervalos de tempo de forno.

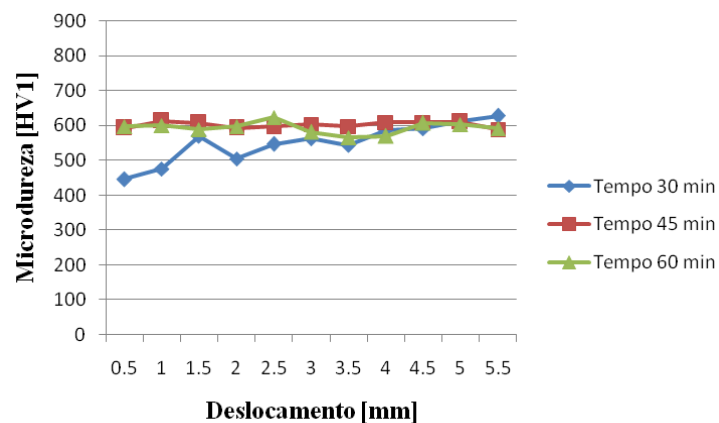
**Figura 21 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado no óleo à 300°C**



Fonte: Próprio autor.

Mantendo a análise para os corpos de prova resfriados em óleo, percebe-se que na temperatura de 300°C (figura 21) há um padrão de queda gradual no perfil de microdureza analisado, além de uma queda no valor médio de microdureza para cada tempo de encharque. Observa-se a mesma característica das amostras resfriadas em água, da baixa influência do tempo nos valores de dureza e microdureza.

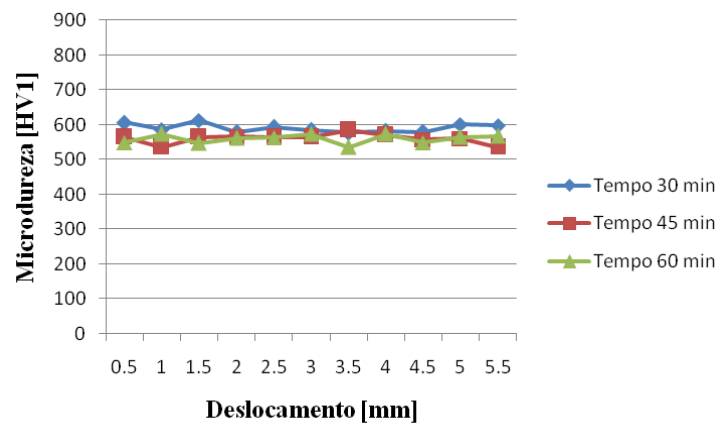
**Figura 22 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado no óleo à 325°C**



Fonte: Próprio autor.

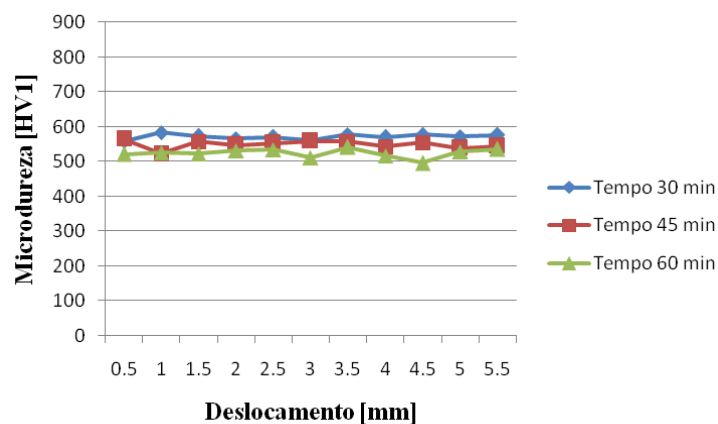
Já para a temperatura de 325°C, observa-se um comportamento anômalo no tempo de encharque de trinta minutos, com o aumento do valor de microdureza visto na figura 22. Tal fato justifica-se pela baixa temperatura associada ao baixo tempo de encharque, pois seria necessário mais tempo para que o tratamento térmico atinja regiões mais internas do corpo de prova, diminuindo e sua dureza Já as amostras para o tempo de 45 e 60 apresentaram queda no valor da microdureza e um perfil característico como o esperado. Também pode ser concluído que a variação no tempo de encharque foi insuficiente para causar impacto nos valores de dureza e microdureza.

**Figura 23 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado no óleo à 350°C**



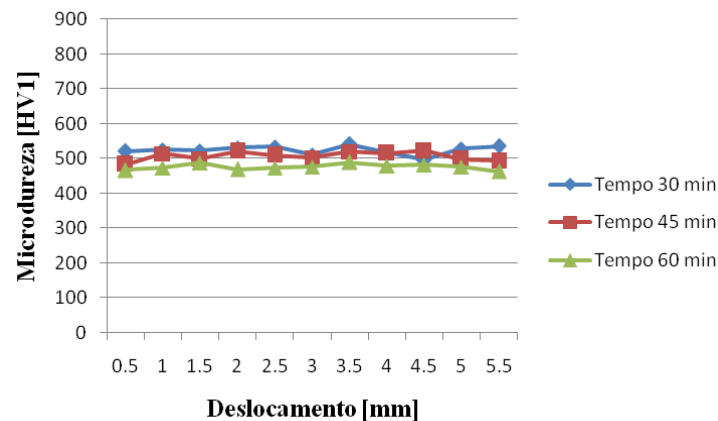
Fonte: Próprio autor.

**Figura 24 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado no óleo à 375°C**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 25 - Perfil de microdureza do aço AISI 5150 resfriado no óleo à 400°C**



Fonte: Próprio autor.

As amostras revenidas na temperatura de 350°C (figura 23), 375°C (figura 24) e 400°C (figura 25) também apresentaram diminuição no valor médio de microdureza assim como um perfil desta mais próximo com um padrão decrescente, sem grande influência do tempo no valor da variação da dureza e microdureza final..

De maneira geral, os corpos de prova resfriados em água apresentaram maiores valores médios de microdureza quando comparados com as amostras resfriadas em óleo. Esse comportamento era esperado uma vez que o resfriamento em água é mais brusco, causando maior distorção na rede cristalina, aumentando as tensões internas e consequentemente o valor da microdureza. Além disso, a pequena variação nos tempos de encharque para todos os casos não foi suficiente para causar modificação considerável nos valores de dureza e microdureza.

#### 6.4 Resultado da micrografia

As micrografias foram feitas em três corpos de prova: a amostra apenas temperada, o resfriado em óleo e revenido na temperatura de 400°C e o resfriado em água e revenido na temperatura de 350°C. Elas estão apresentadas nas figuras 26, 27 e 28 respectivamente.

A partir das imagens, pode-se observar a presença da microestrutura martensita na amostra apenas temperada (figura 26), cujo formato é em forma de agulhas. A martensita distorce a rede cristalina violentamente (supersaturação de carbono nela), por esse motivo ela é muito dura. Sua fragilidade vem do seu formato de ponta, o que contribui para concentração e dispersão de tensão. Já nas figuras 27 e 28, a martensita revenida não é muito nítida devido ao tratamento térmico de alívio de tensões, que alivia esse formato da microestrutura



martensítica, diminuindo a distorção na rede cristalina, as tensões residuais e consequentemente a sua dureza. Além disso, os contornos de grãos são pouco definidos. O aço 5150 possui elementos de liga alfacêneos, como cromo e silício, que vão ser responsáveis por estabilizar a martensita revenida.

**Figura 26 - Micrografia corpo de prova temperado**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 27 - Micrografia corpo de prova resfriado em óleo e revenido em 400°C**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 28 - Micrografia corpo de prova resfriado em água e revenido em 350°C**



Fonte: Próprio autor.

Não foi feita micrografia em todos os corpos de provas porque a faixa de temperatura estudada é muito próxima uma da outra e, conseqüentemente, a martensita revenida aparecerá em todas as amostras analisadas. Por esse motivo, selecionou-se o corpo de prova apenas temperado (para ver a martensita), um resfriado em água e outro resfriado no óleo.

## 7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos foi possível supor que quanto maior a temperatura de revenimento, maior será o alívio de tensões internas causadas pela formação da martensita; porém há um limite de temperatura para se realizar o revenimento, uma vez que se ela for muito alta ou próxima da temperatura de normalização, corre-se o risco de perder as propriedades obtidas na operação de têmpera. Dessa forma, podemos dizer que quanto maior a temperatura de revenimento deste trabalho, menor o valor de dureza obtida (melhor o ajuste de dureza).

A dureza e microdureza média, de modo geral, diminuíram com o aumento do tempo e da temperatura, exceto em alguns casos específicos. Porém, nesses episódios, apesar do resultado obtido ter sido o contrário (aumento de dureza média), esse aumento não foi suficiente a ponto de alterar a curva de revenimento significativamente sendo considerado normal em virtude da formação de carboneto de cromo.

A martensita formada no procedimento de têmpera foi observada na micrografia e a martensita revenida (martensita pós revenimento), apareceu nas demais amostras conforme esperado.

O tempo de revenimento utilizado neste trabalho não é relevante para o estudo em questão. Conforme foi observado, a variação nos valores de dureza e microdureza foram baixas, podendo ser desconsideradas em alguns casos. Em escala industrial, com o intuito de diminuir custos operacionais, pode-se, então, trabalhar com o menor tempo de encharque aqui estudado, maximizando a quantidade de produtos tratados termicamente, ampliando a produção da empresa.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 87: **Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química**. Rio de Janeiro, 2000.

BERTON, Elisiane Maria. **Efeitos das temperaturas de têmpera e de revenido na resistência à corrosão da camada martensítica de alto nitrogênio produzida por SHTPN sobre o aço AISI 409**. 2014. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Curitiba.

BHADESHA, H.K.D.H.; HONEYCOMBE, R.W.K. *Steels – microstructure and properties*. 3rd edition. Oxford: Elsevier, 2006. 344p.

CALLISTER, William D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 7ª edição. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro – RJ, 2007.

CETEC; **Ciência dos Materiais Multimídia**. 2007. Disponível em <<http://www.cienciadosmateriais.org/>>. Acesso em: 20 out. 2015, 14h45.

CHAKRABORTY, Gopa; DAS, C. R.; ALBERT, S.K.; BHADURI, A.K.; PAUL, Thomas V; PANNEERSELVAM, G.; DASGUPTA, Arup. Study on tempering behaviour of AISI 410 stainlesssteel. **Materials Characterization**, Índia, v. 100, p. 81-87, dezembro. 2014.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 7ª edição 2008.

CIMM. **Tratamento de têmpera e suas variações: têmpera, austêmpera e martêmpera**. 2014. Disponível em <[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6443-principios-tratamento-de-tempera-e-suas-variacoes-tempera-austempera-martempera#.Vi9FK\\_mrTIU](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6443-principios-tratamento-de-tempera-e-suas-variacoes-tempera-austempera-martempera#.Vi9FK_mrTIU)>. Acesso em: 22 out. 2015, 16h20.

COLPAERT, Hubertus. *Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns*. 4ª edição. São Paulo: Blucher, 2008.

D'OLIVEIRA, A.S. **Cinética das transformações de fases: curvas TTT e TRC**. Disponível em <<http://demec.ufpr.br/pesquisas/superficie/material%20didatico/Curvas%20TTT.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2015, 15h30.

MSPC – Informações Técnicas. **Ferros & aços I-30: Tratamentos térmicos**. 2009. Disponível em <<http://www.mspc.eng.br/ciemat/aco130.shtml>>. Acesso em: 20 out. 2015, 21h.

REED-HILL. R. E.; *Princípios de Metalurgia Física*, 2ª edição. São Paulo: Guanabara Dois, 1982.

SILVA, A.L.C.; MEI, P.R. *Aços e Ligas especiais*. 2ª edição. Sumaré, SP: Eletrometal AS Metais Especiais, 1988.