



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ZAQUIEL ARAUJO DIAS**

**EFEITOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA DUREZA E MICROESTRUTURA  
DOS AÇOS SAE 4140 E SAE 4340**

SÃO LUÍS

2017

**ZAQUIEL ARAUJO DIAS**

**EFEITOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA DUREZA E MICROESTRUTURA  
DOS AÇOS SAE 4140 E SAE 4340**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade  
Cunha

SÃO LUÍS

2017

**ZAQUIEL ARAÚJO DIAS**

**EFEITOS DE TRATAMENTO TÉRMICOS NA DUREZA E MICROESTRUTURA  
DOS AÇOS SAE 4140 E SAE 4340**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 05/07/2017

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Adilto Pereira Cunha (Orientador)**

Departamento de Engenharia Mecânica e Produção  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**Prof. MSc. Francismar Rodrigues de Sousa**

Departamento de Engenharia Mecânica e Produção  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**Prof. Carlos Ronyhelton Santana de Oliveira**

Departamento de Engenharia Mecânica e Produção  
Universidade Estadual do Maranhão

## **AGRADECIMENTOS**

Eu quero externar meus agradecimentos primeiramente ao meu Deus e SENHOR Jesus Cristo. Por ter me concedido chegar até este momento, com a certeza de que ele sempre esteve comigo. Por seu amor tão perceptivo na minha vida durante todos esses anos.

Ao Professor Adilto Cunha por sua orientação e paciência, a quem eu devo todo esse trabalho, por sua colaboração e incrível compreensão durante a realização deste.

A grande amiga Thayara Kellen Tavares por todo apoio, seu esforço sem medidas e sua esperança imortal que me deram forças para chegar até o fim nessa realização.

Ao Professor Francismar Rodrigues, a Rodrigo Miranda e Amadeu Santos que foram fundamentais em alguma etapa deste trabalho sem os quais ficaria muito difícil a realização do mesmo.

A minha mãe Maria Telma por todos esses anos de confiança e apoio e irrestrito a todos os meus projetos, bem como toda a minha família e amigos que me deram a felicidades de estar com eles durante essa caminhada.

*“Dedico este trabalho a Deus e a minha família, bem como todos os meus amigos.”*

## RESUMO

Tendo em vista que as propriedades de um material podem ser alteradas por meio de tratamentos térmicos e adição de outras substâncias nos aços carbonos comuns, dando origem aos famosos aços ligas, que com adição desses elementos de liga melhoram as suas propriedades mecânicas, magnéticas, térmicas entre outros benefícios, como a resistências a corrosões. Este trabalho se propôs a estudar duas dessas ligas, a saber, os aços SAE 4140 e SAE 4340, dando ênfase à propriedade mecânica de dureza, e qual a sua relação com a microestrutura causada com os tratamentos térmicos de normalização, recozimento e têmpera. Para isso as duas ligas de aços foram, aquecidas a uma temperatura de austenitização de 850°C, e resfriado cada amostra das ligas com diferentes velocidades de resfriamento. Com base nos ensaios de dureza Rockwell C e nas observações das microestruturas das ligas, podemos comprovar a relação dessas, como é conhecido na literatura.

Palavras chaves: Microestrutura. Dureza. Aço. Tratamentos Térmicos.

## **ABSTRACT**

Since the properties of a material can be altered by means of heat treatments and addition of other substances in the common carbon steels. Giving origin to the famous alloy steels, which with the addition of these alloying elements, improve its mechanical, magnetic, thermal properties and other benefits, such as corrosion resistance. This paper proposes to study two of these alloys, SAE 4140 and SAE 4340, with emphasis on the mechanical properties of hardness and their relationship with the microstructure caused by the standard annealing, annealing and quenching treatments. The two alloys were then heated to an austenitization temperature of 850 ° C and each sample of the alloys was cooled with different cooling rates. Based on the Rockwell C hardness tests and the observations of the microstructure of the alloys, we can verify their relationship, as it is known in the literature.

**Keywords:** Microstructure. Hardness. Steel. Heat Treatments

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO RECOZIMENTO .....	16
FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA NORMALIZAÇÃO. ....	17
FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TÊMPERA. ....	18
FIGURA 4: DIAGRAMA DE FERRO-CARBETO DE FERRO (FE-FE <sub>3</sub> C).....	18
FIGURA 5 : CURVA DE TRANSFORMAÇÃO PARA AÇOS HIPOEUTETÓIDES .....	20
FIGURA 6: DIAGRAMA TTT AÇO SAE 4140.....	23
FIGURA 7: DIAGRAMAS TTT AÇO SAE 4340.....	24
FIGURA 8: MATERIAIS DE ESTUDO RECEBIDOS DO AÇO SAE 4140 E 4340.....	27
FIGURA 9: MAQUINA DE CORTE MAXI CUT.....	28
FIGURA 10: AMOSTRAS DE CORTADAS. ....	28
FIGURA 11: FORNO QUIMIS. ....	29
FIGURA 12: MÁQUINA DE DUREZA PANTEC RBS .....	32
FIGURA 13: MÁQUINA DE EMBUTIR AROTEC .....	33
FIGURA 14: AMOSTRA CORTADA E EMBUTIDA.....	33
FIGURA 15: MICROSCÓPIO ÓTICO NIKON.....	34
A FIGURA 16, MOSTRA O GRÁFICO DE VALORES INDIVIDUAIS DOS RESULTADOS ENCONTRADOS NA TABELA 6.....	36
FIGURA 17: DUREZA ROCKWELL C PARA O AÇO SAE 4140 RECEBIDO, RECOZIDO, NORMALIZADO E TEMPERADO. ....	36
FIGURA 18: DUREZA ROCKWELL C PARA O AÇO SAE 4140 RECEBIDO, RECOZIDO, NORMALIZADO E TEMPERADO EM ÁGUA.....	37
FIGURA 19: DUREZA ROCKWELL C PARA OS AÇOS SAE 4140 E SAE 4340 RECOZIDOS.....	38
FIGURA 20: DUREZA ROCKWELL C PARA O AÇO SAE 4140 E SAE 4340 NORMALIZADOS. ....	38
FIGURA 21: DUREZA ROCKWELL C PARA O AÇO SAE 4140 E SAE 4340 TEMPERADOS EM ÁGUA. ....	39
FIGURA 22: ESTADO BRUTO DE LAMINAÇÃO DOS AÇOS 4140(A) E 4340(B). ....	39

**LISTA DE TABELAS**

TABELA 1: SISTEMA SAE/AISI DE CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS. E FAIXA DE COMPOSIÇÕES PARA AÇO-CARBONO COMUM E VÁRIOS AÇOS DE BAIXA LIGA.....	14
TABELA 2: TÉCNICAS DE TESTE DE DUREZA.....	25
TABELA 3:ESCALA DE DUREZA ROCKWELL.....	26
TABELA 4: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS (%).....	27
TABELA 5: QUANTIDADE DE AMOSTRAS ANALISADAS .....	32
TABELA 6: MEDIDAS DE DUREZA DO AÇO SAE 4140.....	35
TABELA 7: MEDIDAS DE DUREZA DO AÇO SAE 4340.....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	- American Iron and Steel Institute
C	- Carbono
CCC	- Cúbica de corpo centrado
CFC	- Cúbica de face centrada
Cr	- Cromo
HRC	- Dureza Rockwell C
IFMA	- Instituto Federal de Educação, Ciência Tecnologia do Maranhão.
kgf	- Quilograma-força
Mo	- Molibdênio
MPa	- Megapascal
Ni	- Níquel
SAE	- Society of Automotive Engineers
TTT	- Gráfico: Tempo - Temperatura –Transformação
UEMA	- Universidade Estadual do Maranhão
Va	- Vanádio
W	- tungstênio
$\alpha$ (alfa)	- Representação de ferrita
$\gamma$ (gama)	- Representação da austenita

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 REVISAO DA LITERATURA</b> .....	13
2.1 Aços .....	13
2.2 Aços com médio teor de carbono .....	13
2.2.1 Aços SAE 4140 .....	14
2.2.2 Aços SAE 4340 .....	15
2.3 Tratamentos Térmicos .....	15
2.3.1 Recozimento .....	15
2.3.2 Normalização .....	16
2.3.3 Têmpera .....	17
2.4 Diagramas de ferro-carbeto de ferro (Fe-Fe <sub>3</sub> C) .....	18
2.5 Diagramas TTT .....	19
2.5.1 Diagramas TTT para aços hipoeutetóides .....	20
2.5.2 Diagramas TTT para aços SAE 4140 e SAE4340 .....	22
2.6 Ensaio mecânicos .....	24
2.7 Dureza e ensaios de dureza .....	24
<b>3 ANALISE EXPERIMENTAL</b> .....	27
3.1 Preparações das amostras a serem trabalhadas .....	27
3.2 Tratamentos térmicos .....	28
3.3 Ensaio mecânico de dureza .....	31
3.4 Analise Microestrutural .....	32
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	35
4.1 Ensaio mecânico de dureza .....	35
4.2 Ensaio mecânico de dureza Rockwell C do SAE 4140 .....	35
4.3 Ensaio mecânico de dureza Rockwell C do SAE 4340 .....	36
4.4 Comparações de dureza Rockwell C entre os aços SAE 4140 e SAE 4340 .....	37
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	45
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	46

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria mecânica tem por necessidade trabalhar com um rigoroso controle de suas propriedades mecânicas de suas peças, estas precisam ser bem definidas para que o engenheiro possa fazer uso delas no projeto, mas dificilmente o material encontra-se com todas as características desejadas.

Os aços-ligas são aqueles que têm um acréscimo nos seus constituintes, sendo ferro e carbono os principais elementos dos aços comuns; outros elementos como o silício, o vanádio, o cobalto, o níquel, o cromo, o tungstênio e o manganês são adicionados propositalmente e de uma maneira controlada para melhorar algumas propriedades desses aços-ligas que podem ter o aumento da resistência, à dureza, resistência ao impacto, às altas temperaturas, à temperabilidade, à resistência à abrasão e à corrosão, sendo estas características estabelecidas de acordo com a concentração deste elemento químico adicionado. (Chiaverini, 1986)

No caso dos aços, objeto de estudo do trabalho pretendido, eles devem passar por alguns processos para que o seu uso se adeque a função planejada, entre eles, o tratamento térmico. Os aços são um dos materiais mais comumente submetidos a tratamento térmico tendo em vista sua grande utilização na indústria.

Neste trabalho pretendemos realizar uma análise mecânica e microestrutural dos aços SAE 4140 e SAE4340, e descrever como este se comporta quando submetido a diferentes tipos de tratamento térmico, e como estes tratamentos alteram a propriedade mecânica de dureza, E qual a relação com sua microestrutura.

As ligas ferro – carbono antes de serem utilizadas na forma de peças, na maioria dos casos, principalmente quando aplicadas em construção mecânica, são submetidas a tratamentos térmicos, ou a tratamento termoquímicos. (Chiaverini, 1986) tais como: normalização, têmpera entre outros.

## **1.1 Objetivo geral**

Analisar os efeitos dos tratamentos térmicos na microestrutura dos aços SAE 4140 e SAE 430 bem como a relação dessas com a propriedade mecânica de dureza.

## **1.2 Objetivos específicos**

- a) Identificar as fases formadas após a aplicação do tratamento térmico nos aços SAE 4140 e SAE 4340 Utilizando a microscopia ótica.
- b) Correlacionar às fases formadas, com as propriedades mecânicas obtidas.
- c) Analisar a dureza Rockwell C dos aços ligas na condição de recebido, recozido, normalizado e temperado.

## **2 REVISAO DA LITERATURA**

### **2.1 Aços**

O aço é um material que pode ser utilizado em diversas aplicações. Uma das características que permitem essa versatilidade é a possibilidade de adequação de suas propriedades através dos processos de tratamentos térmicos. São ligas de ferro-carbono que podem conter outros elementos de liga; existem milhares de ligas com diferentes composições. As propriedades mecânicas das ligas são altamente sensíveis ao teor de carbono. Sua classificação é baseada no teor carbônico, podendo ser baixo, médio e alto. (CALLISTER, 2016)

Os aços hipoeutetóides são aqueles com teor de carbono que não ultrapassa o valor de 0,77% e que quando resfriados lentamente até a temperatura ambiente tem ferrita e perlita como constituinte microestrutural. O teor de ferrita vai desde 0%, para o ferro puro, e vai até 100% para o aço eutetóide. Os aços com teor de carbono inferior ou igual a 0,3% são considerados de baixo carbono, enquanto que aqueles que ultrapassam esse limite e ficam abaixo de 0,5% são considerados de médio carbono. (Chiaverini, 1974)

### **2.2 Aços com médio teor de carbono**

São aços que apresentam concentrações de 0,25 a 0,60%. Essas ligas podem ser tratadas termicamente por meios de etapas que compreendem a austenitização, recozimento, normalização, têmpera e revenido. Os aços com médio teor de carbono tem baixa temperabilidade e podem ser tratados termicamente com sucesso apenas em seções muito finas e com taxas de resfriamento rápido. Adições de cromo, níquel e molibdênio melhoram a capacidade dessas ligas de serem tratadas termicamente. Dando origem a diversas combinações de resistência mecânica, ductilidade e dureza, conforme mostrado na tabela 1. (CALLISTER, 2016).

Os aços-ligas são, como pode se observar na tabela 1, aqueles que contêm elementos de liga acima da quantidade consideradas normais como Cr, Ni, Mo, Va, W, além de muitos outros. Para que possam alterar várias características do aço carbono, desde sua propriedade mecânica até resistência à corrosão e temperabilidade. Eles podem ser agrupados inicialmente em aços de baixa liga, quando contém entre 3% a 5% de elementos de liga em

sua composição, ou como aços alta liga, quando contém 10% a 12% de elementos de liga. A existência de aços com média liga pode ser considerada em grupo intermediário entre os aços de baixa e alta liga, (CALLISTER, 2016).

Tabela 1: Sistema SAE/AISI de classificação dos aços. E faixa de composições para aço-carbono comum e vários aços de baixa liga

<i>AISI/SAE Designation<sup>a</sup></i>	<i>UNS Designation</i>	<i>Composition Ranges (wt% of Alloying Elements in Addition to C)<sup>b</sup></i>			
		<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Other</i>
10xx, Plain carbon	G10xx0				
11xx, Free machining	G11xx0				0.08–0.33 S
12xx, Free machining	G12xx0				0.10–0.35 S, 0.04–0.12 P
13xx	G13xx0				1.60–1.90 Mn
40xx	G40xx0			0.20–0.30	
41xx	G41xx0		0.80–1.10	0.15–0.25	
43xx	G43xx0	1.65–2.00	0.40–0.90	0.20–0.30	
46xx	G46xx0	0.70–2.00		0.15–0.30	
48xx	G48xx0	3.25–3.75		0.20–0.30	
51xx	G51xx0		0.70–1.10		
61xx	G61xx0		0.50–1.10		0.10–0.15 V
86xx	G86xx0	0.40–0.70	0.40–0.60	0.15–0.25	
92xx	G92xx0				1.80–2.20 Si

Fonte :CALLISTER, 2016.

### 2.2.1 Aços SAE 4140

De uma forma geral, os aços encontram grande empregabilidade em uma série de aplicações, entre eles os aços de baixa liga da família SAE 41xx. Esses aços são ligados ao Cromo (1%) e ao Molibdênio (0,2%) e atingem alta resistência através de tratamentos térmicos de têmpera e revenido. São amplamente utilizados na indústria, não somente em equipamentos de baixo custo, mas também em equipamentos de alta responsabilidade que requerem tensão limite de escoamento entre 410 MPa e 965 MPa, podendo alcançar um limite de resistência à tração de até 1650 MPa, que pode ser obtido através de tratamentos convencionais de têmpera e revenido. O aço SAE 4140 pode assumir os teores de carbono entre 0,3% e 0,5%. Os principais aços da família são AISI/SAE 4130, 4140 e 4145, sendo os dois últimos os mais aplicados na indústria metal mecânica. O aço da série 4140, também

chamado de aço-cromo-molibdênio é classificado como aço médio carbono ligado para beneficiamento, podendo ser usado em temperaturas relativamente altas de até 480°C, pois acima disso sua resistência diminui rapidamente com o aumento da temperatura, (Rocha, 2004).

### 2.2.2 Aços SAE 4340

O aço SAE 4340 é um aço de elevada temperabilidade e boa forjabilidade, porém sua usinagem é relativamente pobre. Dependendo do teor de carbono, a dureza na condição temperada varia de 54 a 59 HRC. Devido à sua alta temperabilidade, não é aconselhável a sua aplicação em soldagem por métodos convencionais, somente em processos sofisticados. Devido às suas características ele é aplicado para fabricação de virabrequins para aviões, tratores, eixos com elevada solicitação mecânica e veículos em geral. Na indústria aeronáutica é muito utilizado devido sua grande resistência e tenacidade que são fundamentais em projetos aeronáuticos para diversas aplicações, desde peças utilizadas na montagem da aeronave como também em ferramentais que são utilizados para construção e montagem das aeronaves (TORRES, 2002)

## 2.3 Tratamentos Térmicos

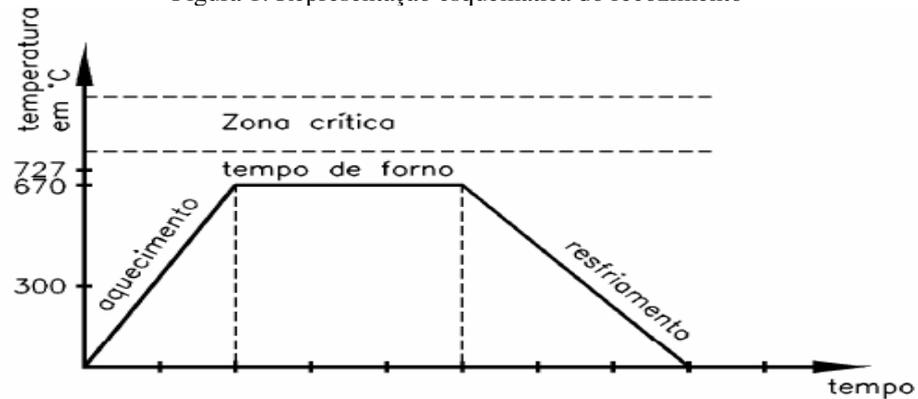
Os tratamentos térmicos podem ser descritos como o aquecimento e posterior resfriamento, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidades de aquecimento e resfriamento, com o objetivo de melhorar as propriedades de certos materiais metálicos, sendo que pode resultar em modificações das suas microestruturas sem que haja mudanças na forma do produto (Chiaverini, 1974).

### 2.3.1 Recozimento.

Recozimento é definido como o aquecimento de ligas metálicas a uma temperatura acima da zona crítica (a temperatura pode variar de 723°C a 910°C, de acordo com o teor de carbono da liga) com a permanência por certo tempo nesta temperatura para completar a homogeneização da microestrutura, seguido por um resfriamento lento, normalmente dentro do forno, conforme a figura 1. O recozimento objetiva reduzir a dureza, aliviando as tensões internas originadas durante os processos de fabricação, como a fundição,

a soldagem, as operações de conformação mecânica a frio ou a quente e, com isso, homogeneizar a microestrutura dos materiais, alterando as suas propriedades mecânicas, como o aumento da ductilidade, tornando os materiais mais deformáveis. (CALLISTER, 2016).

Figura 1: Representação esquemática do recozimento



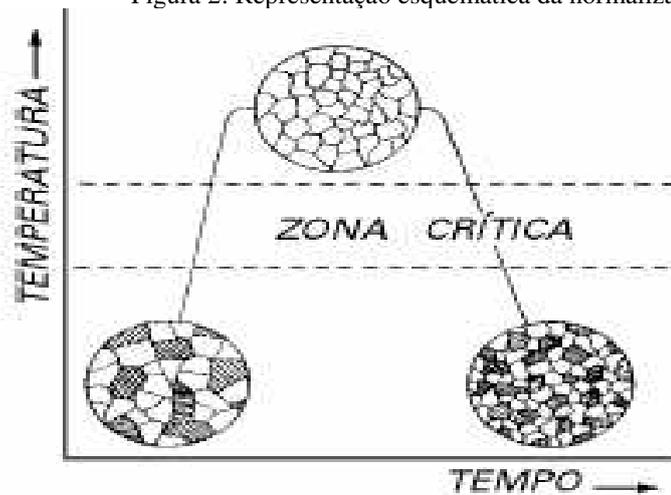
Fonte: Chiaverini, 1986

### 2.3.2 Normalização

Define-se normalização como um processo térmico a uma temperatura elevada acima da zona crítica (na faixa de 750°C a 950°C) onde ocorre a transformação da estrutura cristalina para a fase austenítica. Vê figura 2, A permanência nesta faixa de temperatura, durante certo tempo, garante a homogeneização da microestrutura com um resfriamento gradual subsequente, normalmente exposto ao ar. A normalização consiste em diminuir a granulação grosseira da peça, de modo que os grãos fiquem numa faixa de tamanho considerada normal, e reduzir as tensões residuais induzidas pelas operações de fabricação, como o forjamento, a solidificação, a soldagem e, com isso, assegurar uma uniformização da estrutura do material.

A diferença entre normalização e recozimento está na velocidade de resfriamento. Na normalização, o resfriamento é mais rápido, gerando uma estrutura mais refinada. Logo, com uma granulação mais fina. As propriedades como dureza, resistência à tração, resistência à compressão são mais elevadas. Por outro lado, as propriedades como o alongamento e a ductilidade sofrem uma diminuição. (CALLISTER, 2016)

Figura 2: Representação esquemática da normalização.



Fonte: (COLPAERT, 1974)

### 2.3.3 Têmpera

A figura 3 é uma representação esquemática da têmpera que consiste no resfriamento rápido do aço de uma temperatura superior à sua temperatura ambiente em um meio como óleo, água, salmoura ou mesmo ar. A velocidade de resfriamento, nessas condições, dependerá do tipo de aço, da forma e das dimensões das peças. Como na têmpera o constituinte final desejado é a martensita, no momento em que ocorre a transformação martensítica, a estrutura do material CFC é transformada em CCC por um processo de cisalhamento brusco.

Os átomos de carbono, nitrogênio e demais elementos de liga são impedidos de se difundirem para seus lugares ficando em solução. Que pode ser observados pela falta das faixas brancas, observadas nos tratamentos de recozimento.

No entanto, a presença destes elementos intersticiais em teores acima do limite de solubilidade da fase CC. Que é 0,25 por cento de carbono, abaixo desse teor. Todas as estruturas mesmo as causadas por têmpera são CCC, determina-se uma estrutura TCC, por distorção, o objetivo dessa operação, sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, é o aumento da dureza deve verificar-se até uma determinada profundidade. Resultam também da têmpera redução da ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição), da tenacidade e o aparecimento de apreciáveis tensões internas. Tais inconvenientes são atenuados ou eliminados pelo revenido. Para que a têmpera seja bem sucedida vários fatores devem ser levados em conta. Inicialmente, a velocidade de esfriamento deve ser tal que impeça a transformação da austenita nas temperaturas mais elevadas, em qualquer parte da peça que se deseja endurecer. (CALLISTER, 2016).



Onde:

Abscissa – Representa a escala horizontal, com a porcentagem de carbono - por exemplo: 1% de C (99% Fe).

Ordenada – Representa as várias temperaturas.

Linhas A3 – Indica início da passagem da estrutura CFC para CCC durante o resfriamento.

Linha A1 – Indica o limite da existência de austenita; abaixo dessa linha, não temos austenita.

ACM – Indica o limite da quantidade de carbono dissolvido na austenita;

Fe<sub>3</sub>C – É a fórmula do carboneto de ferro, chamado cementita.

Letras gregas:  $\gamma$  (gama) – Símbolo de austenita.  $\alpha$  (alfa) – Símbolo de ferrita.

A temperatura ambiente a forma estável é o ferro  $\alpha$ , também chamada de ferrita, que apresenta uma estrutura CCC, a 912°C sofre uma transformação polimórfica para CFC, que é a austenita, que é a zona do gráfico de grande importância para os tratamentos térmicos. (COLPAERT, 1974)

O eixo das composições de teor de carbono se estende até 6,7%p C; nessa concentração se forma o composto intermediário carbeto de ferro, Fe<sub>3</sub>C, ou cementita. (CALLISTER, 2016).

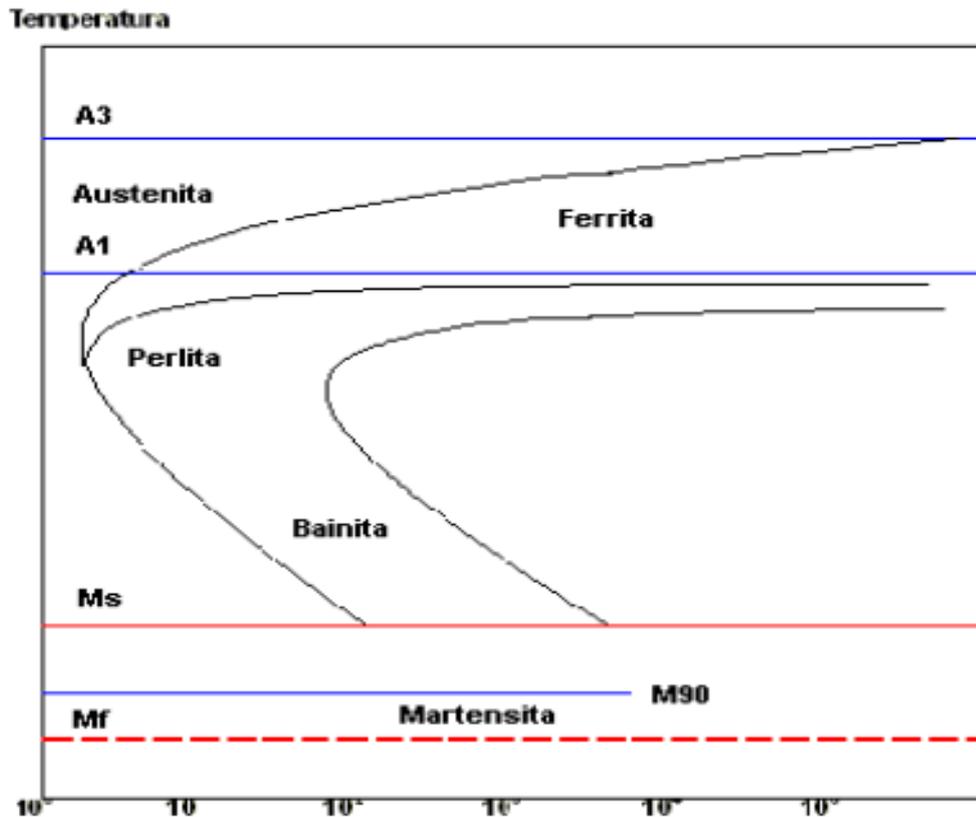
## 2.5 Diagramas TTT

As curvas TTT descrevem o comportamento de uma liga ferrosa durante o resfriamento a partir da fase austenita (solução sólida de carbono no ferro). Neste resfriamento, após a passagem pela temperatura em que toda a austenita é transformada em ferrita, pode-se manter a peça numa temperatura constante por um determinado tempo, na qual a austenita transformam-se em outras fases tais como ferrita ou perlita, e depois resfriá-la até a temperatura ambiente. Os tratamentos isotérmicos são na indústria, principalmente em peças com microestrutura de bainita ou martensita. (SMITH, 2012)

### 2.5.1 Diagramas TTT para aços hipoeutetóides

A figura 5 mostra uma representação esquemática de uma curva de transformação para aços hipoeutetóides.

Figura 5 : Curva de transformação para aços hipoeutetóides



Fonte: (COLPAERT, 1974)

Onde:

EIXO X: Tempo em escala logarítmica.

EIXO Y: esquerda (Temperatura °C) e a direita (dureza HRC do constituinte obtido isotermicamente).

LINHAS A1 e A3: Temperaturas correspondentes, dos aços hipoeutetóides, no diagrama Ferro Carbono.

LINHA Ms ou Mi : Temperatura de início de transformação da Martensita.

LINHA M90: corresponde a 90% de transformação da austenita em Martensita.

LINHA Mf: Temperatura de fim de transformação da austenita em Martensita.

Quanto maior o teor de carbono e elementos de liga esta temperatura pode estar abaixo da

temperatura ambiente, levando a formação indesejável da austenita retida. Normalmente a linha Mf não é indicada nas curvas T.T.T., (COLPAERT, 1974)

**Austenita:** É uma solução sólida de carbono em ferro gama. Somente é estável a temperaturas superiores a 723 °C, em temperaturas inferiores, em ferrita e cementita. Somente pode aparecer austenita a temperatura ambiente nos aços austeníticos; nesse caso, a austenita é estável a temperatura ambiente. É deformável como o ferro gama, pouco dura, apresenta grande resistência ao desgaste, é magnética, e é o constituinte mais denso dos aços e não é atacada por reagentes. (CALLISTER, 2016)

**Perlita:** Formada por uma mistura eutetóide de duas fases: ferrita e cementita, produzida a uma temperatura de 723 °C quando a composição é de 0,8 %. Sua estrutura está constituída por lâminas alternadas de ferrita e cementita. A perlita é mais dura e resistente que a ferrita, porém mais branda e maleável que a cementita. Apresenta-se em forma laminar, reticular e globular. (CALLISTER, 2016)

**Cementita:** É o constituinte que aparece em fundições e aços. É o carboneto de ferro, de fórmula Fe<sub>3</sub>C. É muito frágil e duro, muito resistente ao cisalhamento. Em baixas temperaturas é ferromagnético e perde esta propriedade a 212 °C (ponto de Curie). O ponto de fundição acima de 1950 °C, e é termodinamicamente instável a temperaturas inferiores a 1200 °C. (CALLISTER, 2016)

**Bainita:** É o constituinte que se obtém na transformação isotérmica da austenita quando a temperatura do banho de resfriamento é de 250 a 500 °C. Apresenta dois tipos de estrutura que são:

A bainita superior de aspecto arborescente formada a 500 – 580°C, composta por uma matriz ferrítica contendo carbonetos. E a bainita inferior, formada a 250 – 400 °C tem um aspecto similar a martensita e está constituída por agulhas alargadas de ferrita que contém placas finas de carboneto. (CALLISTER, 2016).

**Martensita:** É uma solução supersaturada de carbono em ferro alfa, É o constituinte estrutural da têmpera dos aços e sua microestrutura apresenta-se em forma de agulhas cruzadas. Os átomos de ferro estão como na ferrita, nos vértices. Os átomos de carbono estão nas faces e nas arestas, apresenta por isso uma rede distorcida. Esta distorção da rede é a responsável pela dureza da martensita. Apresenta uma rede tetragonal. (CALLISTER, 2016).

### 2.5.2 Diagramas TTT para aços SAE 4140 e SAE4340

As curvas TTT que descrevem o comportamento de uma liga ferrosa de uma liga muda sua forma e linhas conforme a variação da composição de carbono e elementos de ligas que são adicionados, sendo que cada aço forma um gráfico TTT específico. (SILVA, 2012).

Os aços SAE 4140 e 4340 e apresentam respectivamente os seguintes diagramas TTT mostrado na figura 6 e 7.

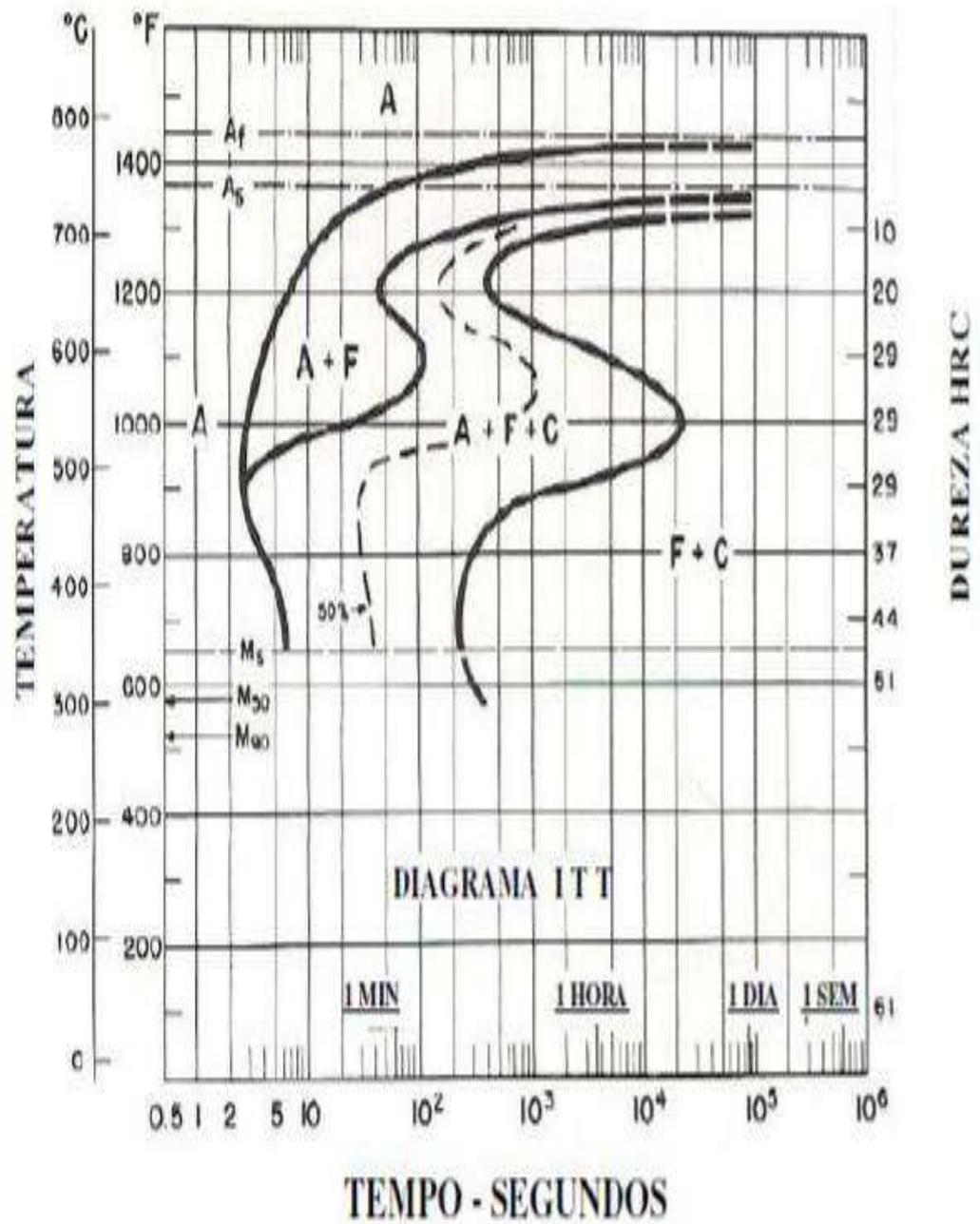
Para o aço SAE 4140, figura 6, que são ligados ao Cromo e ao Molibdênio e o aço SAE 440 que contem Cromo, Níquel e o Molibdênio, apresentam respectivamente os seguintes efeitos.

O Níquel e o manganês reduzem a temperatura eutetóide. A temperatura de transição é reduzida progressivamente com o aumento do teor de níquel (aproximadamente 10 °C para 1% de níquel), mas a redução da temperatura de transformação no resfriamento é maior e irregular. A temperatura de transformação é mostrada na figura para um aço de baixo carbono (0,2%). A mudança ocorre neste caso para um teor de níquel de 8%. Já um aço com 12% de níquel, a transformação começa abaixo de 300 °C no resfriamento. . (NOVIKOV, 1994)

O Cromo aumenta a temperabilidade do aço e contribui para a resistência ao desgaste e dureza. Quando o cromo excede 11% em aços de baixo carbono, um filme inerte é formado na superfície, criando resistência ao ataque por reagentes oxidantes. Percentagens mais altas de cromo são encontradas em aços resistentes a altas temperaturas. Aços com cromo são mais fáceis de usinar do que aços com níquel de resistência mecânica similar. Os aços com maiores teores de cromo são suscetíveis à fragilização quando resfriados lentamente na faixa de 550/4500C, a partir da temperatura de têmpera. Os aços com cromo são usados quando durezas elevadas são requeridas, como em matrizes, rolamentos, limas e ferramentas. . (NOVIKOV, 1994)

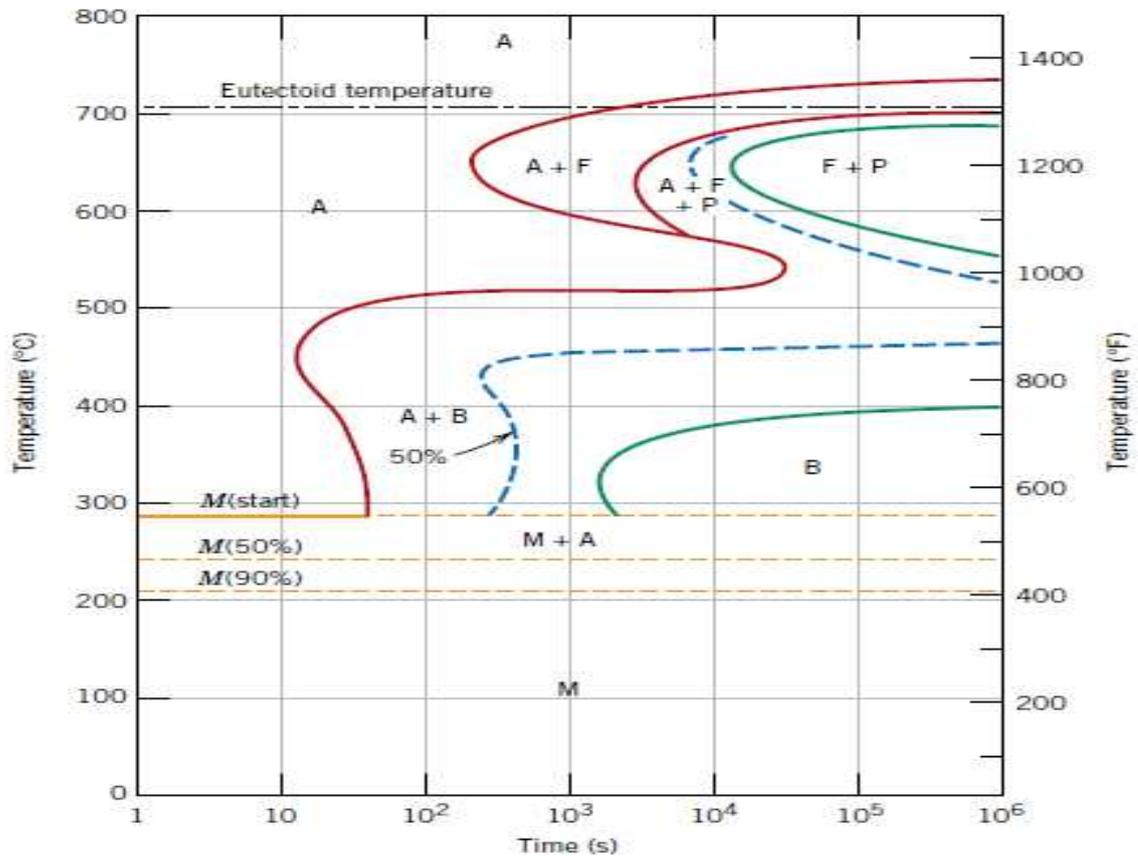
O molibdênio pode formar carbonetos complexos no ferro alfa e no ferro gama como  $(FeMo)_6C$ ,  $Fe_{21}Mo_2C_6$ , e  $Mo_2C$  na presença de carbono. O efeito do molibdênio na forma da curva TTT é similar ao do cromo. O Molibdênio aumenta a temperabilidade e reduz as temperaturas de têmpera. Também ajuda a aumentar a dureza ao rubro e a resistência ao desgaste. O molibdênio é um dos constituintes de alguns aços rápidos, aços resistentes à corrosão e altas temperaturas. (NOVIKOV, 1994)

Figura 6: Diagrama TTT aço SAE 4140.



Fonte: (Voort, 1991).

Figura 7: Diagramas TTT aço SAE 4340.



Fonte: Adaptado de H. Boyer (Editor), *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, 1977. Reproduced by permission of ASM International, Materials Park, OH.

## 2.6 Ensaios mecânicos

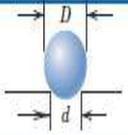
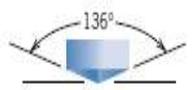
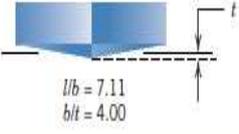
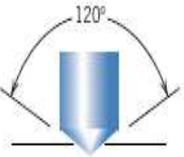
Os ensaios dos materiais têm uma ampla finalidade para os estudos dos materiais tanto profissionais quanto acadêmicos. Sendo que se têm duas finalidades principais: permitir a obtenção de informações rotineiras do produto e desenvolver novas informações dos materiais. (Garcia, 2015)

## 2.7 Dureza e ensaios de dureza

Dureza é medida da resistência de um material a deformação permanente, dependendo diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, do escorregamento de planos atômicos, assim como da resistência mecânica. A tabela 2 mostras os principais ensaios para conhecer a medida das durezas são risco, rebote e penetração. No ensaio por penetração os métodos mais usados para detectar a dureza dos materiais são

conhecidos como: Brinell, Rockwell, Vickers e Knoop. Conforme figura abaixo (Garcia, 2015).

Tabela 2: Técnicas de teste de dureza

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number <sup>a</sup>
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/t^2$
Rockwell and superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> <li>{ Diamond</li> <li>cone:</li> <li><math>\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}</math> in.</li> <li>diameter</li> <li>steel spheres</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg } Rockwell</li> <li>100 kg }</li> <li>150 kg }</li> <li>15 kg } Superficial Rockwell</li> <li>30 kg }</li> <li>45 kg }</li> </ul>	

Fonte: Adaptado de H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York.

Ensaio de dureza Rockwell o ensaio é chamado assim por ter sido feito pela indústria Rockwell, dos estados unidos por volta de 1922, deste então ganhou grande notoriedade e se tornou o método mais utilizado internacionalmente. Utiliza-se da profundidade da impressão causada por um penetrador sob a ação de uma carga em dois estágios, pré-carga e carga suplementar, como sendo indicador da medida da dureza. (ADALBERTO, 2009).

A profundidade de penetração é correlacionada, a um numero qualquer, que pode ser lido diretamente na escala da maquina de ensaio de dureza, logo após é retirado a carga principal, mas mantendo a pré-carga. (Garcia, 2015).

Como o método usa vários tipos de penetradores e cargas, é dividido em escalas. Conforme a tabela 3.

Tabela 3: Escala de dureza Rockwell

<b>Símbolo da escala</b>	<b>Indentador</b>	<b>Carga principal</b>
A	Diamante	60
B	Esfera com 1/16 in	100
C	Diamante	150
D	Diamante	100
E	Esfera com 1/8 in	100
F	Esfera com 1/16 in	60
G	Esfera com 1/16 in	150
H	Esfera com 1/8 in	60
K	Esfera com 1/8 in	150

Fonte: adaptado de Callister 2016

### 3 ANALISE EXPERIMENTAL

#### 3.1 Preparações das amostras a serem trabalhadas

Os materiais de estudo deste trabalho foram amostras de aços SAE 4140 e SAE 4340 que são ligas ferro carbono com 0,4% de carbono, e alguns elementos de liga como se pode ver na tabela 4. E a figura 8 mostra os aços SAE que foram estudados neste trabalho

Tabela 4: Composição química dos aços (%)

SAE	C	Mn	P / máx	S / máx	Si	Ni	Cr	Mo
1020	0,18/0,23	0,30/0,60	0,030	0,050	-	-	-	-
1045	0,43/0,50	0,60/0,90	0,030	0,050	-	-	-	-
4140	0,38/0,43	0,75/1,00	0,030	0,040	0,15/0,35	-	0,80/1,10	0,15/0,25
4340	0,38/0,43	0,60/0,80	0,030	0,040	0,15/0,35	1,65/2,00	0,70/0,90	0,20/0,30

Fonte: Sistema de codificação SAE/AISI

Figura 8: Materiais de estudo recebidos do aço SAE 4140 e 4340.



Fonte: Autor, 2017

Depois de recebidas, esses aços foram cortados em amostras pequenas retangulares na máquina de corte MAXI CUT, figura 9, no laboratório de ensaio mecânicos e

metalógraficos da UEMA, A figura 10 mostra como ficaram os aços cortados em pedaços para a realização dos tratamentos e ensaios.

Figura 9: Máquina de corte MAXI CUT.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 10: Amostras de cortadas.



Fonte: Autor, 2017

### 3.2 Tratamentos térmicos.

Foram confeccionadas oito amostras para a realização dos tratamentos térmicos e ensaio mecânico, sendo quatro delas do aço SAE 4140 e as outras quatro do aço SAE 4340.

Os tratamentos térmicos realizados foram os de recozimento, normalização e têmpera em água. Esses foram realizados no forno QUIMIS, figura 11, laboratório de ensaio mecânicos e metalográficos da UEMA.

Figura 11: forno QUIMIS.



Fonte: Autor, 2017

Calculo do tempo total de tratamento: O tempo que um aço leva dentro do forno para garantir que o tratamento térmico completo da sua estrutura depende de alguns fatores, como a geometria, meio de aquecimento neste caso no meio gasoso, se o aço é comum ou uma liga, tamanhos das amostras e de quantos lados estão sendo aquecidos ao mesmo tempo.

É importante salientar que o tempo total de será dado pelo tempo, para que se aqueça completamente a peça a ser tratada, somado com o tempo de permanência na temperatura de transformação (tempo de encharque ou tempo de permanência ou tempo de repouso).

Neste trabalho foi realizado o calculo do tempo conforme os passos seguintes que foram repetidos do trabalho de tratamento térmicos realizado por (Tavares, 2016).

1ª Etapa – verificar o perfil geométrico da peça, ou seja, se a mesma é uma lâmina, um paralelepípedo, um cilindro ou uma esfera, e adotar, para fins de cálculo a menor dimensão da peça. Neste trabalho o perfil adotado foi o de paralelepípedo ver figura 3.3.

2ª Etapa – adotar, como tempo de encharque o *TENCHARQUE* = 3 minutos a cada milímetro de espessura, para os aços-liga.

3ª Etapa – calcular o tempo de aquecimento conforme expressão a seguir:

$$TAQUECIMENTO = 0,1.D1.K1.K2.K3 \text{ (minutos)} \quad (1)$$

Sendo:

D1 = características dimensionais (menor dimensão da peça, em mm). Para uma lâmina ou chapa – D1 será constituída pela espessura (menor dimensão). Para um cilindro – D1 será o valor mínimo entre o diâmetro e a espessura. (D1= 10 mm para todas as amostras deste trabalho).

K1 é o coeficiente do forno e valerá 1 para os sais, 2 para os meios gasosos e 0,5 para os metais fundidos. (O forno QUIMIS trabalha com o meio gasoso, sendo assim o K1=2).

K2 é coeficiente que dá forma as peça, sendo 1 para esféricas, 2 para cilíndricas, 2,5 para paralelepípedos e 4 para lâminas. (Como mencionado anteriormente foi adotado o paralelepípedo como forma geométrica, sendo então K2= 2,5).

K3 é o coeficiente de regularidade de aquecimento da peça no forno, sendo 1 para aquecimento em todos os lados, 1,5 para todas as faces menos a repousada no forno e 4 para um só dos lados a ser aquecido. (Adotado 1, aquecimento em todos os lados)

Cálculo do tempo de austenização dos aços SAE 4140 e SAE 4340.

$$TENCHARQUE = \quad (2)$$

$$3 \text{ minutos a cada milímetro } \times 10 \text{ mm de cada amostra} = 30 \text{ minutos}$$

$$TENCHARQUE = 30 \text{ minutos}$$

$$TAQUECIMENTO = 0,1.D1.K1.K2.K3 = 0,1 \times 10 \times 2 \times 2,5 \times 1 = 5 \text{ minutos} \quad (3)$$

$$TTOTAL = TENCHARQUE + TAQUECIMENTO = 35 \text{ minutos}$$

Após a obtenção do tempo desejado, deve se observa a temperatura de austenização através dos gráficos TTT dos aços SAE 4140 e 4340, ver figuras 6 e 7. A

temperatura de austenização para este trabalho foi escolhida com base nos gráficos TTT, e no artigo de Cássio Becker Sapper, EFEITOS DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO DO AÇO 4140, que observou melhores resultados a 850°C, como o presente trabalho tem por objetivo comparar os efeitos dos tratamentos térmicos nessas duas ligas, adotaremos a temperatura de austenitização de 850°C, também para a liga SAE 4340, para melhor efeito de comparação.

Logo, para os tratamentos térmicos de recozimento, normalização e têmpera dos aços ligas 4140 e 4340, usou-se a temperatura de 850°C para ambos, que se encontra na faixa de temperatura obtida nos gráfico representado na figura .6 e 7, a um tempo de permanência no forno de 35 minutos e em seguida as amostras que sofreram recozimento pleno permanecem no forno para resfriamento lento, tirou-se as amostras a serem normalizadas dentro do forno a fim de serem resfriadas ao ar, e as do tratamento térmico de têmpera, tiradas do forno e resfriadas rapidamente na água.

### **3.3 Ensaio mecânico de dureza.**

Realizou-se o ensaio de dureza Rockwell o qual foi efetuado na escala C para os aços SAE 4140 e 4310 na condição de recebido, recozido, normalizado e temperado. Utilizou-se o penetrador do tipo cone esférico de diamante, com pré-carga de 10 kgf e com uma carga total de 150kgf. A leitura do grau de dureza, Rocwell C, foi feito na máquina de dureza Pantec RBS mostrado na figura 3.4 e para cada amostra analisou-se dez pontos a fim de se obter a média e o desvio padrão do ensaio desenvolvido o que oferece uma maior confiabilidade nos ensaios realizados.

Figura 12: Máquina de dureza Pantec RBS



Fonte: Autor, 2017

### 3.4 Analise Microestrutural.

Para conhecer o efeito interno que os tratamentos térmicos causam na estrutura dos aços estudados foi realizada uma análise microestrutural das amostras de uma maneira a se observar os constituintes de cada amostra tais como, perlita, ferrita, cementita entre outras, e diferencia os constituintes que são característicos em cada tratamento.

Foi feito para cada aço uma amostra e cada tipo específico de tratamento, uma amostra para ser analisada.

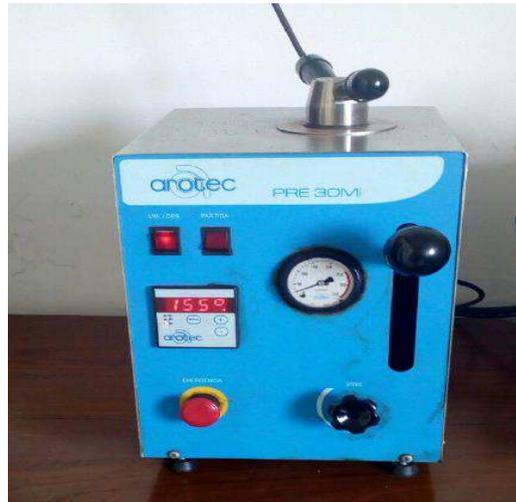
Tabela 5: quantidade de Amostras analisadas

AÇO SAE	Recebido	Recozido	Normalizado	Temperado
4140	1	1	1	1
4340	1	1	1	1

Fonte: Autor, 2017.

Essas amostras foram embutidas no laboratório de materiais do IFMA. As próximas figuras são da máquina de embutir, figura 13, e de uma amostra embutidas, figura 14.

Figura 13: Máquina de embutir arottec



Fonte: Autor, 2017.

Figura 14: Amostra cortada e embutida



Fonte: Autor, 2017.

Depois de cortadas e embutidas, o próximo procedimento foi lixar as ligas de aço com lixas d'água de granulometria que variam de 100 a 1200 mesh e em seguida polidas com pasta de alumina  $1\mu\text{m}$ . As microestruturas dos aços foram reveladas e atacadas com solução de Nital 2%, após o ataque as amostras foram fotografadas por microscopia ótica, através do microscópio óptico Nikon, figura 15.

Figura 15: Microscópio ótico Nikon.



Fonte: Autor, 2017.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção será apresentado o resultado dos ensaios mecânico de dureza, bem como as microestruturas obtidas antes e depois dos tratamentos térmicos de recozimento, normalização e têmpera para as seções longitudinal dos aços SAE 4140 e 4340 que serão comparadas.

### 4.1 Ensaio mecânico de dureza.

Os Resultados do ensaio de dureza Rockwell C, obtidos no estado em que o aço foi recebido, assim como dos respectivos tratamentos térmicos de normalização, recozimento e têmpera. Estão na tabela 6 para o SAE 4140 e na tabela 7 para o SAE 4340, sendo que foram realizadas para cada estado do aço dez medidas.

### 4.2 Ensaio mecânico de dureza Rockwell C do SAE 4140

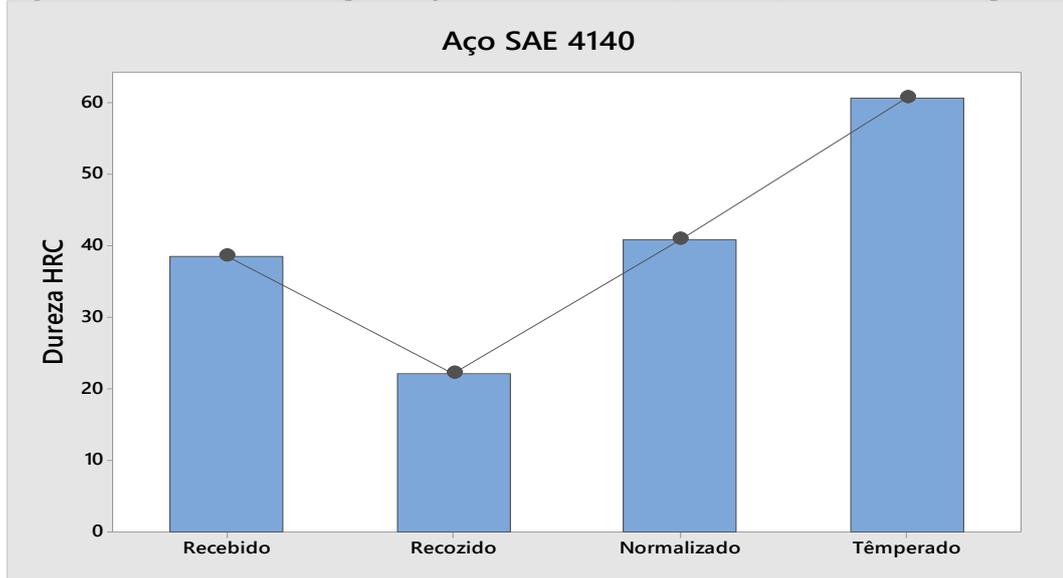
Tabela 6: Medidas de dureza do aço SAE 4140

Dureza Rockwell C do aço SAE 4140				
Aço SAE 4140	Recebido	Recozido	Normalizado	Temperado
1ª Medida	34	19	37	65
2ª Medida	39	23	43	59
3ª Medida	40	18	45	61
4ª Medida	36	21	44	59
5ª Medida	37	25	42	63
6ª Medida	39	18	40	60
7ª Medida	38	29	37	65
8ª Medida	41	21	38	57
9ª Medida	40	23	41	55
10ª Medida	42	25	42	63
Média	38,6	22,2	40,9	60,7
Desvio padrão	2,41293	3,52136	2,84605	3,335

Fonte: Autor, 2017

A Figura 16, mostra o gráfico de valores individuais dos resultados encontrados na tabela 6.

Figura 17: Dureza Rockwell C para o aço SAE 4140 recebido, recozido, normalizado e temperado.



Fonte: Autor, 2017

### 4.3 Ensaios mecânico de dureza Rockwell C do SAE 4340

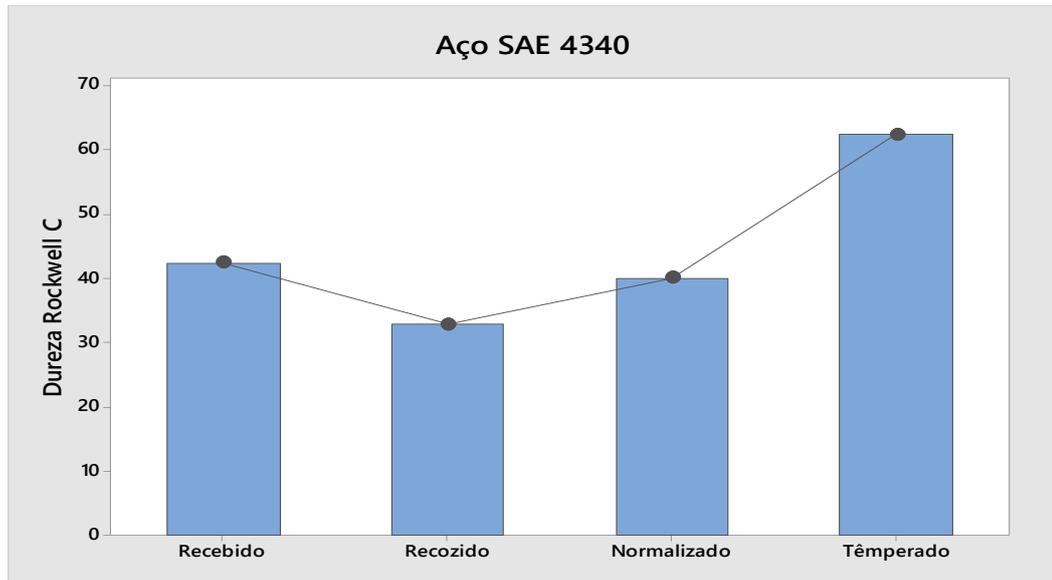
A tabela 7 mostra os resultados de dez medidas feitas em cada amostra de dos aços recebido, recozido, normalizado e temperado em água. E a figura 18 mostra o gráfico de valores individuais dos resultados da tabela 6.

Tabela 7: Medidas de dureza do aço SAE 4340

Dureza Rockwell C do aço SAE 4340				
Aço SAE 4340	Recebido	Recozido	Normalizado	Temperado
1ª Medida	38	31	38	55
2ª Medida	44	35	42	65
3ª Medida	46	35	39	65
4ª Medida	45	32	41	57
5ª Medida	41	33	43	64
6ª Medida	44	34	36	59
7ª Medida	42	29	41	66
8ª Medida	44	31	39	64
9ª Medida	39	29	42	65
10ª Medida	41	39	40	63
Média	42,4	32,8	40,1	62,3
Desvio padrão	2,63	3,08	2,13177	2,86005

Fonte: Autor, 2017

Figura 18: Dureza Rockwell C para o aço SAE 4140 recebido, recozido, normalizado e temperado em água.



Fonte: Autor, 2017

Os resultados tanto obtidos na liga SAE 4140 como na SAE 4340 são os esperados, após o recozimento a sua dureza tende a uma diminuição, por causa da sua microestrutura formada por perlita grosseira, pois essa possui excelente propriedade dúctil.

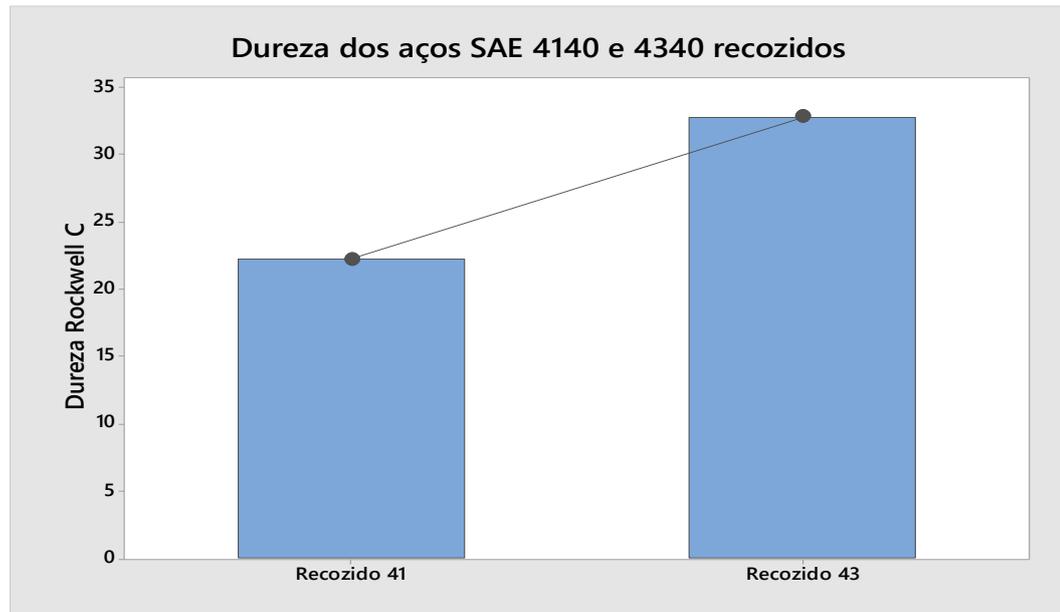
Os aços normalizados apresentaram um ganho na dureza em relação ao recozido pois a maioria dos seus constituintes são perlita fina que possui um grão mais refinado e um menor espaçamento interlamelar, que o torna menos dúctil, conseqüentemente mais duro.

O aço que foi submetido ao tratamento térmico de têmpera, temperado o qual tem um ganho considerado de aumento de sua dureza, pois o constituinte chamado martensita que proporciona uma dureza elevada ao material devido a não ocorrência de difusão, ou seja, o carbono fica retido na martensita, durante a alotropia do aço.

#### 4.4 Comparações de dureza Rockwell C entre os aços SAE 4140 e SAE 4340

A figura 18 mostra um gráfico comparativo da media dos valores dos ensaios de dureza Rockwell C nos estado recozido dos aços SAE 4140 e 4340.

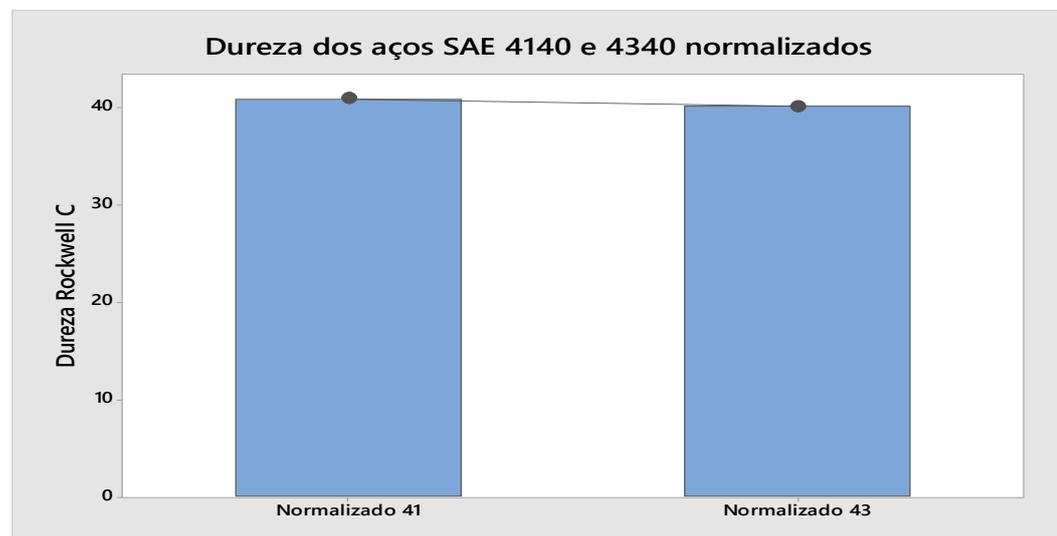
Figura 19: Dureza Rockwell C para os aços SAE 4140 e SAE 4340 recozidos.



Fonte: Autor, 2017

A figura 19 mostra um gráfico comparativo da média dos valores dos ensaios de dureza Rockwell C nos estado normalizado dos aços SAE 4140 e 4340.

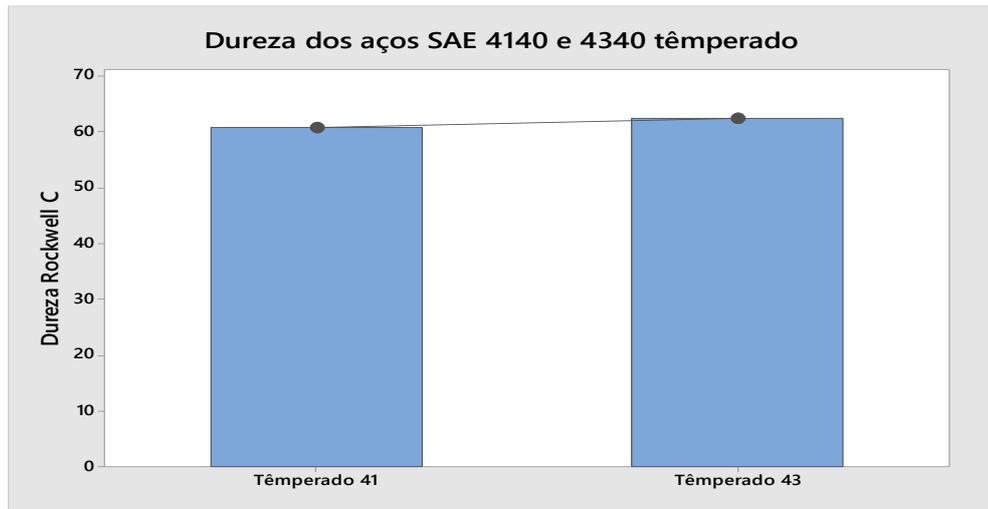
Figura 20: Dureza Rockwell C para o aço SAE 4140 e SAE 4340 normalizados.



Fonte: Autor, 2017.

A figura 20 mostra um gráfico comparativo da média dos valores dos ensaios de dureza Rockwell C nos estado temperado em água dos aços SAE 4140 e 4340.

Figura 21: Dureza Rockwell C para o aço SAE 4140 e SAE 4340 temperados em água.

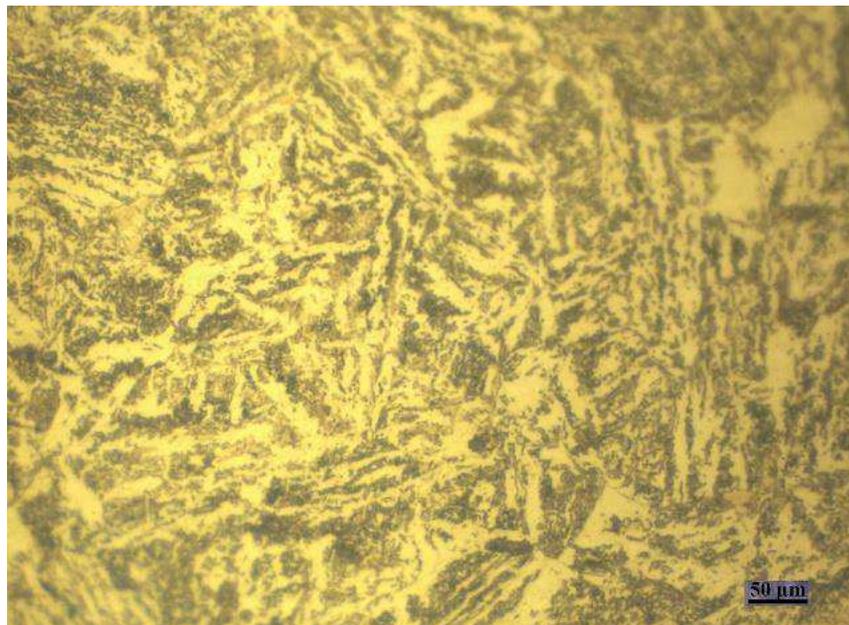


Fonte: Autor, 2017.

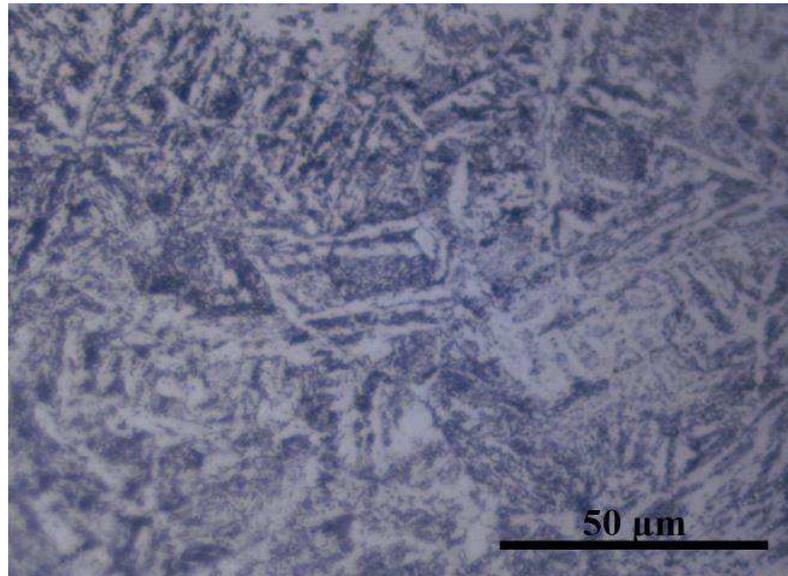
#### 4.5 Microestruturas obtidas.

As fotos das microestruturas, tanto dos aços SAE 4140 como SAE 4340, são das seções longitudinais. Na figura 21, estão mostradas as microestruturas do estado bruto de laminação dos aços SAE 4140, foto (a) e 4340 fotos (b).

Figura 22: Estado bruto de laminação dos aços 4140(a) e 4340(b).



(a)100x

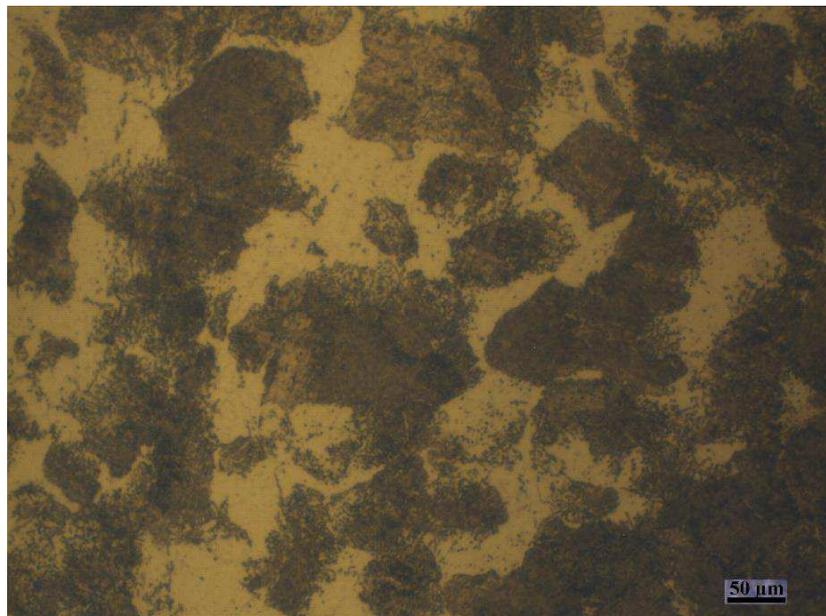


(b) 1000x

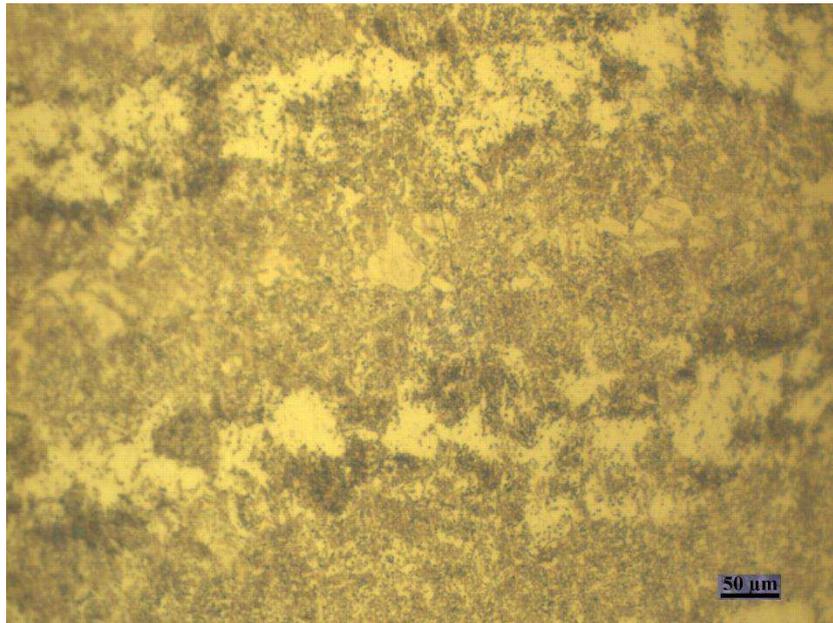
Fonte: Autor, 2017.

Na figura 22, estão mostradas as microestruturas do estado recozido dos aços SAE 4140 foto (a) e 4340 fotos (b).

Figura 22: Aço SAE 4140(a) e 4340(b) recozidos.



(a) Ampliação 100x

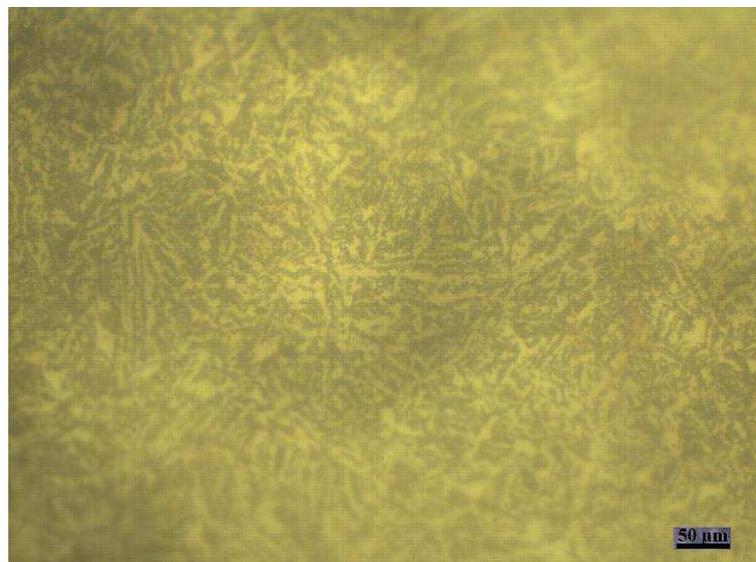


(b) Ampliação 100x

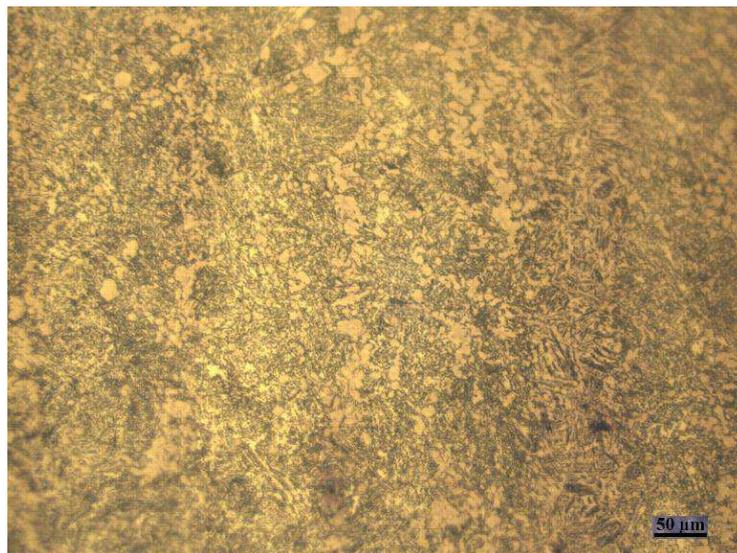
Fonte: Autor, 2017.

A figura 22 mostra a microestruturas dos aços 4340 e 4140 na condição recozida, atacada com nital. As microestruturas apresentam-se bastante complexas com diversos microconstituintes. As regiões mais escuras (cinza e preto) são constituídas de ferrita, as fases brancas e perlita que são as fases mais escuras e carbonetos. Também notamos os tamanhos de grãos maiores mais bem definidos, que proporcionam uma menor dureza. Nas tabelas 6 e 7 podemos perceber uma diminuição da dureza em relação ao estado recebido.

Figura 23: Aços SAE 4140(a) e 4340(b) normalizados.



Ampliação 100x



(a) Ampliação 100x

Fonte: Autor, 2017.

Podemos observar grãos menores na estrutura normalizada em comparação com a recozida, e a normalizada com uma estrutura mais homogênea, que a recozida. Essas estruturas conferem uma dureza maior para a normalizada, conforme tabela 7.

Comparando as figuras 23, ligas de aços normalizados e 22 recozidos, podemos observar, que na figura da amostra recozida, existem faixas brancas e pretas que são causadas pelos elementos de liga que são cromo, níquel e molibdênio, assim como um maior crescimento de grão, que proporciona uma menor dureza no recozido, do que no normalizado, as maiores quantidades de faixas no recozido, aconteceram por causa do tempo a mais de resfriamento o que deu tempo suficiente para os elementos de liga se rearranjarem na estrutura.

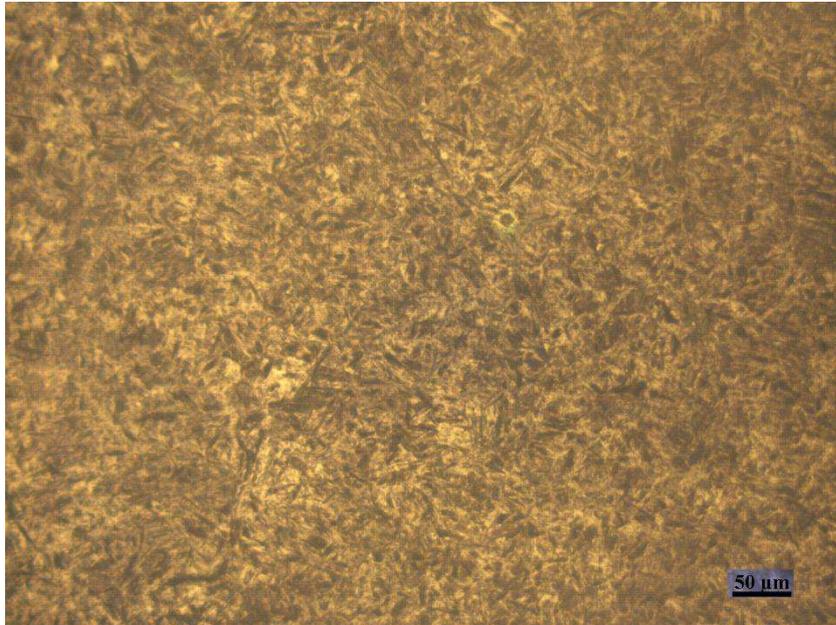
Na figura 23, normalizado, existem uma homogeneização maior dos grãos se comparados ao recozido, o que também contribuem para a maior dureza da liga normalizada, como a tabela 6 nos mostra, e percebe-se a obtenção de ferrita acircula que também contribui para o aumento da dureza. Como constituinte dessas microestruturas tem-se a perlita em preto e a ferrita em branco.

No estado normalizado, a dureza é mais elevada que o estado recozido a causa dessas alterações, é causada por não ocorrer a separação da ferrita na zona crítica, a austenita transforma-se em uma perlita lamelar fina. (HUBERTUS, 1974).

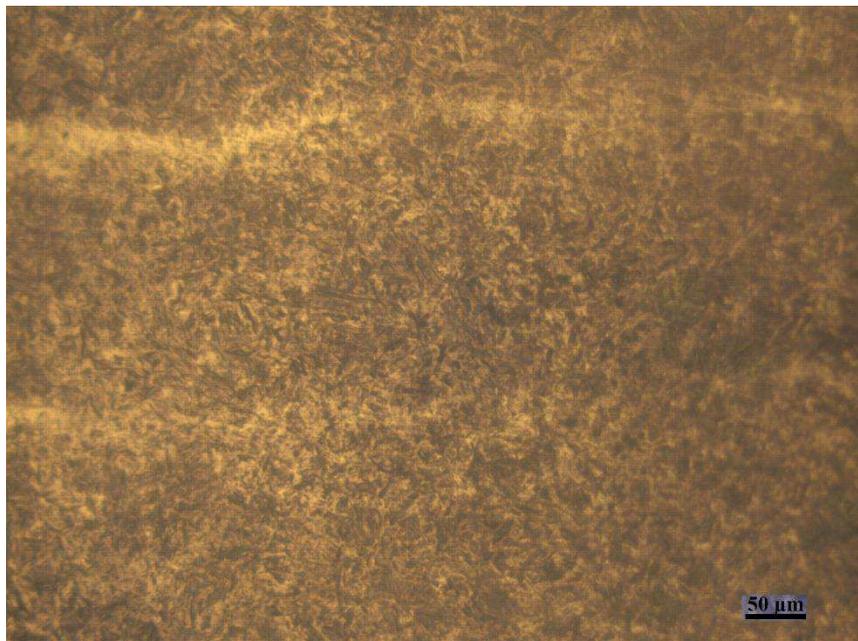
Na figura 21, aço no estado recebido observamos algumas semelhanças com o estado normalizado da figura 23, que são perlita a fase preta, e ferrita acircula, também tanto no aço 4140 como no 4340 foi obtido resultados semelhantes em relação a dureza Rockweel

C, uma explicação possível seria que no estado recebido depois do processo de formação do perfil cilíndrico dos aços a peça é esfriado ao ar, que é semelhante ao processo de normalização realizado neste trabalho.

**Figura 24: Aços SAE 4140(a) e 4340(b) temperados.**



(a) Ampliação 50x



(b) Ampliação 50x

Fonte: Autor, 2017.

Na figura 24 observa-se a micrografia dos aços após o tratamento de têmpera onde se obtém a martensita e a bainita e nessa a microestrutura os grãos não estão mais organizados se comparados com os tratamentos anteriores. Tudo acontece porque no momento em que ocorre a transformação martensítica, a estrutura do material CFC é transformada em CCC por um processo de cisalhamento brusco.

Os átomos de carbono, nitrogênio e demais elementos de liga são impedidos de se difundirem para seus lugares ficando em solução. Que pode ser observados pela falta das faixas brancas, observadas nos tratamentos de recozimento.

No entanto, a presença destes elementos intersticiais em teores acima do limite de solubilidade da fase CC. Que é 0,25 por cento de carbono, abaixo desse teor. Todas as estruturas mesmo as causadas por tempera são CCC, determina-se uma estrutura TCC, por distorção. Posteriormente a transformação a composição química e a vizinhança atômica permanecem inalteradas e essa microestrutura fornece elevada dureza se comparada com os aços recozidos ou normalizados o que na maioria das vezes faz com que essa microestrutura seja indesejável por ser bastante frágil (Tavares, 2016).

Na têmpera a velocidade de resfriamento ocorre em uma taxa elevada, e por isso não ocorre à transformação em perlita, que é considerada uma solução sólida supersaturada (Hubertus, 1974), a dureza do aço SAE 4140 temperado é 62,3 HRC, bem maior que as amostras recozidas e normalizadas. Na Amostra temperada do Aço SAE 4340, se comparada com a do 4140. Da pra se supor agulhas de martensita, isso se dá pela melhor temperabilidade do aço 4340, porem as durezas HRC, se assemelham muito.

## 5 CONCLUSÃO

O estudo das ligas de aço SAE 4140 e SAE 4340 realizados neste trabalho, que teve por objetivo estudar e comparar os comportamentos dessas ligas, quando submetidas aos tratamentos térmicos de normalização, recozimento e têmpera com ênfase na sua microestrutura e principalmente na propriedade mecânica de dureza, medida pelo ensaio Rockwell C.

Os resultados foram os esperados, apesar das microestruturas variarem um pouco a sua semelhança em razão do aço 4140 ser uma liga que contém cromo e molibdênio, e o aço 4340, conter cromo, molibdênio e níquel como os principais elementos de ligas desses aços. A dureza do aço ficou muito próxima, em cada tratamento realizado.

Os aços ligas recozidos que tiveram uma maior variação se comparado as duas ligas, figura 18, com uma dureza Rockwell C, que teve uma variação de média de mais ou menos 10 HRC. Provavelmente em razão do maior tempo dos elementos de liga se rearranjar na estrutura dos aços, sendo que os dois aços possuem tanto elementos de ligas diferentes como a concentração deles. Mas se comparadas com os outros tratamentos térmicos realizados em ambos os aços, o comportamento é o esperado, dureza das amostras recozidas, bem menor, que das amostras normalizadas e temperadas.

A dureza máxima que se pode obter em peças pequenas de aço pela têmpera, depende somente do teor de carbono. O que está de acordo com os nossos resultados, visto na figura 20.

A dureza foi aumentando gradativamente, conforme a taxa de velocidade de resfriamento diminuía as amostras temperadas, resfriadas a água, mostraram uma dureza muito maior que as normalizadas, resfriadas ao ar, que apresentaram maior dureza que as recozidas, resfriadas dentro do forno. Quanto menor a velocidade de resfriamento, mais tempo para a austenita formar o constituinte chamado ferrita, que é bastante dúctil, a amostra recebida se assemelhou a normalizada na dureza.

## REFERÊNCIAS

- ADALBERTO, V.C; JURANDIR, G.JR; RICARDO, M.R; VIDAL, D.P.S. **Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos**. Universidade de Mogi das Cruzes, São Paulo, 2009.
- CALLISTER, W.D.J (2016) **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 7ª ed Utah: John Wiley e Sons, 2016.
- CHIAVERINI, Vicent. **Aços e Ferros Fundidos**, 7 ed. ABM, São Paulo. COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974.
- COLPAERT, Hubertus, **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 3ª Ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1974.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- NOVIKOV, I. (1994) **Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais**. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1994.
- R.M. Anazawa; A.J. Abdalla1; T.M. Hashimoto; M.S. Pereira, **CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DOS AÇOS 4340 E 300M APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS ISOTÉRMICOS E INTERCRÍTICOS**. VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico. , Atibaia, SP 2012.
- ROCHA, Marcos Antônio de Carvalho. **Análise das Propriedades Mecânicas do Aço SAE 4140 com estrutura Bifásica**. Dissertação de Mestrado, 2004.
- SAPPER Cássio Becker et al. **Efeitos da Temperatura de Austenitização do Aço 4140** (2009)
- SILVA, E. T. P. **Análise das Propriedades Mecânicas e Estruturais do Aço SAE 4140 Submetido a Tratamento Criogênico**. 2012. Dissertação (mestrado) - programa de pós graduação em engenharia e ciências dos materiais do centro de ciência e tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2012.
- SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo, SP: E. Blücher, c1982. 286.
- TAVARES, Thayara Kellen Almeida. **A influência dos Tratamentos Térmicos na Microestrutura e Propriedades Mecânicas do Aço 1045** / Thayara Kellen Almeida Tavares. – São Luís, 2016.
- TORRES, M.A.S.; VOORWALD, H.J.C. **Anevaluation of Shot Peening, Residual Stress Andstress Relaxation on the Fatigue Life of AISI 4340steel**. International Journal of Fatigue 2002.