



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SULDESTE DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Amanda Cristina Medeiros da Silva

**Tratamento térmico de têmpera no aço SAE 1040 em
diferentes meios de resfriamento**

MARABÁ-PA

2016

Amanda Cristina Medeiros da Silva

**Tratamento térmico de têmpera no aço SAE 1040 em
diferentes meios de resfriamento**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste Pará – Unifesspa, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais. Orientador: Prof. Jaiques de Santana Moura.

MARABÁ-PA

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Silva, Amanda Cristina Medeiros da

Tratamento térmico de têmpera no aço SAE 1040 em diferentes meios de resfriamento / Amanda Cristina Medeiros da Silva; orientador, Jailes Santana Moura. — 2016.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2016.

1. Aço - Tratamento térmico. 2. Aço - Metalurgia. I. Moura, Jailes Santana, orient. II. Título.

CDD: 23. ed.: 620.17

Amanda Cristina Medeiros da Silva

Título do Trabalho

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – Unifesspa, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Jailes de Santana Moura.

Data de aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

Bancada Examinadora:

Prof. Jailes de Santana Moura

ORIENTADOR–Unifesspa

Prof. Marcio Paulo de Araújo Mafra

EXAMINADOR–Unifesspa

Prof. Dr. Elias Fagury Neto

EXAMINADOR–Unifesspa

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, o Rei dos reis e Senhor dos senhores, e a Virgem de Nazaré.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e persistência.

Agradeço aos meus amigos, em especial aqueles que contribuíram para momentos inesquecíveis e alegres como Luanda Jabour (BEST), Edileide Alves dos Santos e Lorena Melo (LAS MAGNATAS), Mayron Saminez (GRILOMON) e Andressa Mascarenhas, além das minhas companheiras e cúmplices de trabalho que foram bastante compreensivas durante os momentos que precisei estudar: Gilsa Matos e Erica Queiroz, agradeço ao meu amigo, o Lorde Ernandes Monteiro (acreditava eu que ele parecia o Littlefinger, agora percebi que ele tem mais semelhança com o Jaime LANISTER, principalmente a beleza kkkkk), aos meus mestres que foram pacientes e de suma importância para meu aprendizado como engenheira, em especial ao ex-professor da faculdade de engenharia de matérias, Carlos Vinicius de Paes Santos, que apesar dos pesares contribuiu para o meu desenvolvimento profissional e por fim ,ao meu irmão Lucas, o cara mais insuportável que conheço e que amo incondicionalmente.

E agradeço a mãe Dilma, coração valente e todos os PETRALHAS que naufragaram a economia brasileira junto com meus planos como profissional...

EPÍGRAFE

“O bom humor é a única qualidade divina do homem.” (Arthur Schopenhauer)

“A certeza não existe, nem a perfeita verdade. Mas sempre nos resta a fé, que nos faz confiar no impossível. E o impossível, com frequência, se torna concreto.” (Livro- A Batalha do Apocalipse)

RESUMO

Este trabalho tem o propósito de avaliar a resistência mecânica obtida no aço SAE 1040, através do ensaio de dureza após tratamento térmico de têmpera e revenido, nas temperaturas 860°C e 200°C respectivamente, em três meios de resfriamento: salmoura, água e óleo. Dessa maneira, os dados obtidos também foram utilizados para extrapolação, com o objetivo de estimar o limite de resistência do material e compará-lo com outros aços de grandes solicitações na indústria metal-mecânica.

Palavras-chaves: Tratamento térmico, aço SAE 1040, resistência mecânica.

ABSTRACT

This paper has the purpose to evaluate the mechanical resistance obtained in SAE 1040 steel, through the hardness test after heat treatment quenching and tempering, at temperatures of 860°C and 200°C, respectively in three cooling means: brine, water and oil. Thus, the data obtained were also used paragraph extrapolation , with the objective of estimating the tensile strength of the material and to compare it with other great steels requests in metal industry - mechanics.

Key words: Heat treatment, SAE 1040 steel, strength mechanics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Tratamento térmico de normalização.....	19
Figura 2-Curvas de transformações perlíticas.....	20
Figura 3-Diagrama de fase ferro-caberto de ferro.....	21
Figura 4-Morfologias da Ferrita.....	22
Figura 5-Esquema de Têmpera seguido por revenido.....	23
Figura 6-Corpo de prova utilizados para realização dos tratamentos térmicos.....	25
Figura 7-Forno mufla utilizado para a normalização das peças.....	26
Figura 8-Forno usado para a realização dos tratamentos térmicos.....	26
Figura 9-Meios de arrefecimento utilizados.....	26
Figura 10-Espectrômetro de emissão ótica.....	27
Figura 11-Durometro usado para a obtenção qualitativa da dureza.....	27
Figura 12-Metalografia do aço AISI1040 como recebido. Aumento a)150x; b)300x; c)750x; d) 1500x.....	30
Figura 13-Microestrutura após a normalização. Aumento a)150x b) 300x; c) 750x; d)1500x.....	31
Figura 14-Microestrutura obtida após a têmpera em óleo seguida pelo revenido. Aumento a) 750x e b)1500x.....	32
Figura 15-A dureza da martensita aumenta com a quantidade de carbono porque a distorção da mesma também aumenta.....	33
Figura 16-Micrografia após a têmpera em água seguida pelo revenido. Aumento a)150x b) 300x; c) 750x; d)1500x.....	34
Figura 17-Microestrutura após a têmpera em salmoura seguida pelo revenido. Aumento a) 750x e b)1500x.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do aço SAE 1040	17
Tabela 2- Composição química do aço AISI 1040.	28
Tabela 3- Resultados do ensaio de Dureza.	35
Tabela 4- Tabela de conversões de durezas aproximada.....	36
Tabela 5- Dados teóricos de limite de resistência obtidos através da dureza.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

Unifesspa	Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
FEMAT	Faculdade de Engenharia de Materiais
SAE	Society Automotive Engineers
TTT	Tempo – Temperatura – Transformação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
Fe	Ferro (Elemento químico)
C	Carbono (Elemento químico)
P	Fósforo (elemento químico)
S	Enxofre (elemento químico)
Mn	Manganês (elemento químico)
W	Tungstênio (elemento químico)
Si	Silício (elemento químico)
Cr	Cromo (elemento químico)
Mo	Molibdênio (elemento químico)
Ni	Níquel (elemento químico)
V	Vanádio (elemento químico)
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de face centrada
TCC	Tetragonal de corpo centrado
α	Ferrita ou Ferro alfa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivos gerais	15
2.1.1 Objetivos específicos.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	16
3.1 Aços e sua aplicabilidade.....	16
3.1.1 Aços SAE 1040.....	17
3.2 Tratamentos térmicos	17
3.2.1 Normalização	18
3.2.2 Têmpera e revenido.....	22
4. MATERIAIS E METODOS	25
4.1 Materiais	25
4.2 Metodologia	25
4.3 Caracterização das amostras	27
5. RESULTADOS E DISCUSÕES	28
6. CONCLUSÃO	38
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	39
8. REFERENCIAS	40

1. INTRODUÇÃO

As ligas ferrosas possuem grande destaque quanto a utilização em construção mecânica, pois estas englobam uma série de propriedades como ductilidade, dureza, resistência e outras. Essas propriedades influenciam diretamente nas aplicações diversificadas dos aços, promovendo um melhor desempenho destes, ou não, o que justifica a preocupação dos engenheiros em conhecê-las e selecioná-las criteriosamente.

Para que se possa empregar um aço de modo coerente deve-se ter uma coleta de dados ampla, pois apenas desta maneira pode-se promover a maior vida útil possível para os componentes [1]. As propriedades mecânicas de um aço dependem intimamente da microestrutura e uma das formas de modificá-la é por intermédio de tratamentos térmicos, que envolve a aplicação de calor e resfriamento, para que o material obtenha as propriedades desejadas. Além de modificar a microestrutura, esse processo também produz mudanças cristalográficas [2].

Os tratamentos térmicos mais comuns são a normalização, têmpera e revenido. Na normalização, o aço é aquecido até sua temperatura de solubilização e resfriado ao ar com o intuito de preparar a microestrutura para a têmpera. Em seguida, o mesmo é novamente aquecido até a temperatura desejada de solubilização e resfriada rapidamente (têmpera) para evitar formação perlítica e baianítica, obtendo-se deste modo, uma microestrutura martensítica metaestável. Essa microestrutura é frágil, e o tratamento de revenido é importante para recuperar parcialmente a tenacidade da estrutura, afim de aliviar tensões e melhorar a aplicabilidade do material [3].

No presente trabalho, utilizou-se um aço SAE 1040 para avaliar o comportamento microestrutural e mecânico após o tratamento de normalização, têmpera e revenido, em três diferentes meios de arrefecimento (óleo, água e salmoura), com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas do mesmo quando solicitado em serviço, devido sua variada gama de uso em componentes para a indústria agrícola, de máquinas e equipamentos e de construção estrutural.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Este trabalho possui a finalidade de avaliar as fases formadas durante o tratamento térmico nos três meios de resfriamento, utilizando as respectivas microestruturas e durezas das peças, para confirmar se este aço possui boas características de temperabilidade.

2.1.1 Objetivos específicos

- Realizar os tratamentos térmicos de normalização, têmpera em diferentes meios de arrefecimento (óleo, água e salmoura) e revenido;

- Avaliar as propriedades obtidas através de ensaio mecânico.

- Gerar tabelas com dados que sejam suportes para a aplicação do aço em diferentes solicitações de serviço.

- Extrapolar dados de resistência mecânica através dos dados obtidos pelo ensaio de dureza.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 Aços e sua aplicabilidade

Os aços, que são essencialmente ligas ferro-carbono, oferecem exemplos da maioria das reações e microestruturas disponíveis a fim de ajustar as propriedades dos materiais [3]; são de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples: a rigor os aços comerciais não são ligas binárias, apesar de seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, estes contêm sempre outros elementos secundários, presentes na estrutura devido aos processos de fabricação. Quando esses elementos não são adicionados deliberadamente, são chamados de residuais. Já para os elementos adicionados ao aço visando afetar seu comportamento são chamados de elementos de liga [4]. A adição desses elementos produz aços com diferentes níveis de resistência mecânica, soldabilidade, ductilidade, resistência à corrosão, entre outros. De maneira geral, os aços possuem excelentes propriedades mecânicas: elevada resistência à tração, à compressão, à flexão e pode ser laminado, forjado, estampado, estirado e suas propriedades podem ainda ser modificadas por tratamentos térmicos ou químicos.

Os aços-carbono podem ser subdivididos conforme o teor de carbono presente na estrutura:

- Aços de baixo teor de carbono (quantidade de carbono inferior a 0,25%);
- Aços de médio teor de carbono (quantidade de carbono entre 0,25% e 0,6%);
- Aços de alto teor de carbono (quantidade de carbono superior a 0,6%).

Já os aços-liga constituem outros elementos de liga ou apresentam os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais. E podem ser subdivididos em:

- Aços de baixo teor de ligas, com elementos de liga abaixo de 8%;
- Aços de alto teor de ligas, com elementos de liga acima de 8%;

Os aços-liga constituem o mais importante grupo de materiais utilizados na engenharia e na indústria. De fato, as propriedades mecânicas desses aços variam de acordo com os elementos constituintes, tornando importantes os estudos que identifiquem o efeito destes, para atender a maioria das aplicações práticas, que vão

desde a fabricação de peça por fundição, trilhos, tubos, arames e fios, a chapas para estruturas em geral.

3.1.1 Aços SAE 1040

O aço SAE 1040 é classificado como médio carbono, hipoeutetóide, que possui maior resistência e dureza e menor tenacidade e ductilidade do que o baixo carbono. Apresenta quantidade de carbono suficiente para receber tratamento térmico de têmpera e revenimento, embora o tratamento, para ser efetivo, exija taxas de resfriamento elevadas e em seções finas. Além disso, tem boa soldabilidade. Ele pode ser conformado de várias maneiras, como trefilação, laminação, forjamento e etc. E suas propriedades podem ser modificadas com a microestrutura e esta por sua vez, depende do tamanho de grão austenítico, composição química, homogeneidade da austenita e da velocidade de esfriamento. A composição química do aço SAE 1040 encontrada na literatura está na Tab. 01.

Tabela 1- Composição química do aço SAE 1040

% C	% Mn	% P	% S	% Si
0,38-0,44	0,3-0,6	Max 0,04	Max 0,05	0,15-0,35

Fonte: [5]

3.2 Tratamentos térmicos

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento, com parâmetros como temperatura, tempo, velocidade de esfriamento e atmosfera, controlados, a que os aços são submetidos. O aquecimento é geralmente realizado a uma temperatura acima da crítica, porque então tem-se completa austenitização do aço, ou seja, a total dissolução do carbeto de ferro no ferro gama. Nesta fase, devem ser consideradas as velocidades de aquecimento e a temperatura máxima de aquecimento. A velocidade de aquecimento é importante quando os aços estão em estado de tensão interna ou possuem tensões residuais devido ao encruamento prévio, o que nestas condições, um aquecimento muito rápido pode causar empeno da peça. Já a temperatura de aquecimento é mais ou menos um fator fixo, que depende das propriedades e das estruturas finais desejadas [3].

O tempo de permanência do aço à temperatura de aquecimento está relacionada ao tamanho de grão que será gerado na microestrutura, quanto maior o tempo na temperatura de austenitização, mais completa a dissolução do carbeto de

ferro ou outras fases presentes no ferro gama, entretanto maior o tamanho de grão gerado. Por isso o aço é mantido só o tempo estritamente necessário. Essas técnicas tem o objetivo de modificar ou conferir melhores propriedades mecânicas aos materiais, alterando suas microestruturas e seu arranjo atômico. O tratamento térmico não modifica a composição química do aço, apenas altera suas características mecânicas e remove tensões oriundas do tipo de conformação por qual a peça passou [3].

O resfriamento é o fator mais importante, pois ele que determinará efetivamente a estrutura e as propriedades finais do aço. Os meios de resfriamentos mais usuais são: ambiente do forno, ar e meios líquidos. O mais brando é aquele feito no interior do forno e ele se torna mais severo a medida que se passa para o ar ou para um meio líquido. Entre os vários tipos de tratamento térmico, a normalização, a têmpera e o revenimento serão abordados mais detalhadamente no decorrer do trabalho.

3.2.1 Normalização

A partir do diagrama TTT, que possui grande importância prática para o entendimento dos tratamentos térmicos, pode ser feito diversos ciclos de aquecimento e resfriamento, almejando obter determinados tipos de microestruturas. No caso da normalização o aço é aquecido acima da zona crítica, seguido do resfriamento ao ar tranquilo.

O objetivo deste tratamento é refinar a granulação grosseira das peças, muito utilizado como um tratamento preliminar da têmpera e do revenido, justamente para produzir estrutura mais uniforme do que a obtida em alguns processos de fabricação, como a laminação, por exemplo. Os constituintes desse tratamento térmico são geralmente, ferrita e perlita fina, ou cementita e perlita fina, e apenas perlita fina [3]. A Fig.01 mostra o esquema da normalização.

Figura 1-Tratamento térmico de normalização.



Fonte: [3].

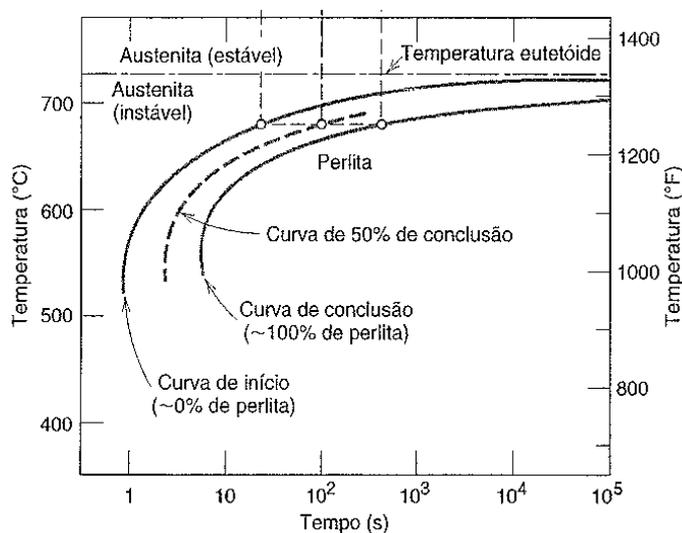
A Fig. 01 exemplifica a curva de resfriamento lento, onde a peça pode sair da linha Ac_m , para os aços hipereutetóides e a linha Ac_3 , para os hipoeutetóides, realizando a normalização. É perceptível que o centro demora mais tempo para se transformar que a superfície, isto acontece devido a menor taxa de perda de calor no núcleo, pois quando a superfície está totalmente transformada o núcleo ainda está resfriando de maneira mais lenta, portanto, ainda em transformação [3].

A microestrutura formada nesse tratamento, possui perlita fina, fase que necessita de tempo e temperatura para se formar e que só ocorrerá se a austenita for super-resfriada abaixo da temperatura eutetóide [6] como indicado na Fig. 02, que mostra que o tempo necessário para que a transformação tenha seu início e então termine depende da temperatura. As curvas de início e término são paralelas e elas se aproximam da eutetóide. A esquerda da curva de início de transformação apenas a austenita instável está presente, enquanto a direita da curva de término só a perlita existirá. Entre as duas curvas a austenita encontra-se em processo de transformação em perlita, e dessa maneira, ambas as microestruturas estão presentes.

A espessura das lamelas de perlita depende também da temperatura. A perlita formada na normalização é aquela gerada em temperaturas mais baixas que as formadas logo abaixo do eutetóide, o que caracteriza uma menor taxa de difusão e conseqüentemente lamelas mais finas se comparadas as que são geradas com

taxas de difusão do carbono mais altas, onde esse átomo pode se difundir em distâncias mais longas [6].

Figura 2-Curvas de transformações perlíticas.

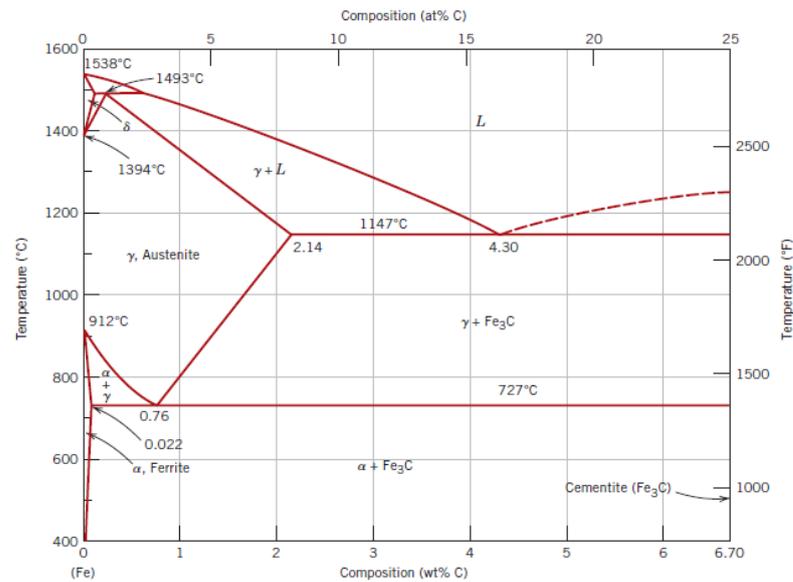


Fonte: [6].

O ferro puro, ao ser aquecido, experimenta duas transformações em sua estrutura cristalina antes de se fundir. Em temperatura ambiente, a fase ferrita, ou ferro α , possui uma estrutura cristalina CCC. A ferrita experimenta uma transformação polimórfica para austenita, com estrutura cristalina CFC, ou ferro gama, a temperatura de 912 C^o, na qual ocorre mais uma transformação para ferrita delta, CCC [6], [7], [8].

Se o aço for hipoeutetóide, a microestrutura formada depois da normalização será a perlita e ferrita. Durante o resfriamento de uma liga hipoeutetóide, depois de estar com a microestrutura completamente constituída de fase gama (austenita), o aço irá passar pelo campo que corresponde a cerca de 800 C^o do diagrama de fases da Fig. 03, onde coexistirá as fases gama e alfa, esta última se formará a partir dos contornos de grãos de austenita original (denominada ferrita pró-eutetóide, aquela que se forma antes da reação eutetóide), até por fim, está abaixo da temperatura eutetóide como uma fase matriz continua circundando as colônias isoladas de perlita, além da fase ferrita eutetóide que estará presente na perlita, devido a austenita ter sido transformada em uma microestrutura correspondente ao eutetóide [6]. A ferrita possui algumas morfologias, que podem ser:

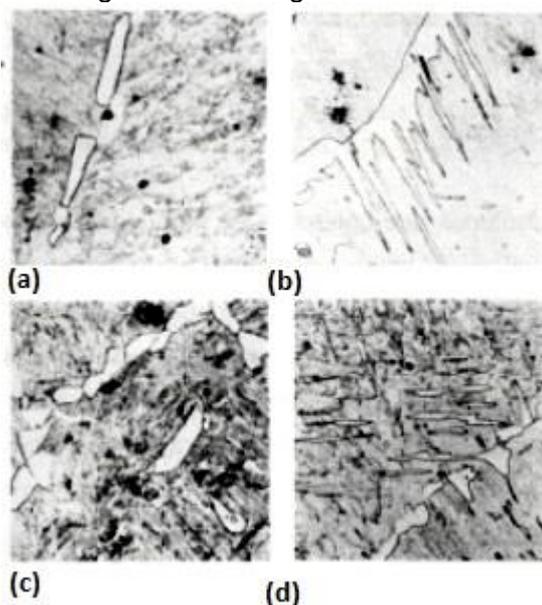
Figura 3-Diagrama de fase ferro-carbono de ferro.



Fonte: [6].

- Alotriomorfa de contorno de grão: nucleiam nos contornos de grão da austenita em temperaturas elevadas (800 – 850° C) e possuem contornos curvos com a austenita. Tem geralmente formato equiaxial ou lenticular, como na Fig. 04 a;
- Lamelas ou ripas de Widmanstätten: são lamelas que nucleiam nos contornos de grão da austenita, mas crescem ao longo de planos bem definidos da matriz, como na Fig. 04 b;
- Idiormorfos intragranular: são aproximadamente equiaxiais, nucleiam no interior dos grãos de austenita (Fig. 04 c) e possuem contornos curvos ou com características cristalográficas bem definidas;
- Lamelas intragranulares: são semelhantes às que crescem a partir dos contornos de grãos, mas nucleiam exclusivamente no interior dos grãos de austenita (Fig. 04 d) [9], [10].

Figura 4-Morfologias da Ferrita.



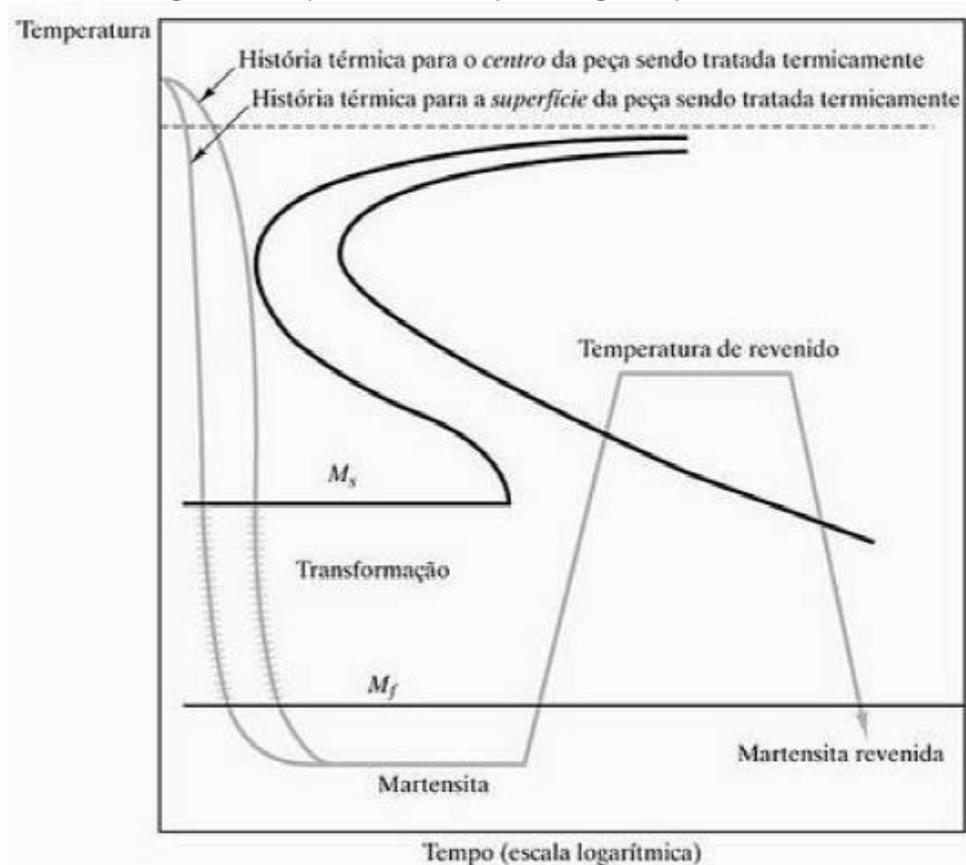
Fonte: [7].

A cementita, a outra fase possível em um tratamento de normalização, é formada quando o limite de solubilidade do carbono na ferrita é excedido, a temperaturas abaixo de 727°C , para faixas de composição entre ferrita e cementita; já na faixa de temperaturas entre 727°C e 1147°C a cementita coexiste com a austenita. Mecanicamente a cementita é dura e frágil, o que contribui para o aumento na resistência de aços quando presente [6], [7].

3.2.2 Têmpera e revenido

A têmpera consiste no aquecimento do aço até sua temperatura de austenitização, cerca de 815°C a 870°C , seguido de resfriamento rápido. O objetivo deste tratamento é a obtenção de martensita, o que requer uma velocidade rápida o suficiente de resfriamento, para a austenita não ultrapassar o lado direito do joelho da curva da Fig. 02 e se transformar em seus outros produtos, como perlita e bainita, por exemplo. Os meios mais comuns de resfriamento deste tratamento térmico são salmoura, água e óleo, sendo o primeiro mais severo que os demais e assim sucessivamente [3]. A Fig. 05 representa o esquema da têmpera.

Figura 5-Esquema de Têmpera seguido por revenido.



Fonte: [11]

Para que a operação de têmpera seja bem sucedida, vários fatores devem ser levados em conta. Inicialmente, a velocidade de arrefecimento deve ser tal que impeça a transformação da austenita em altas temperaturas. De fato, essas transformações, se ocorrerem, resultam em estruturas mistas, as quais ocasionam o aparecimento de pontos moles, além de conferirem baixos valores para o limite de escoamento e para a resistência ao choque. Portanto, a secção da peça constitui outro fator importante porque pode determinar diferenças de esfriamento entre a superfície e o centro [3].

O nome martensita, foi originalmente utilizado para designar o constituinte resultante da decomposição da austenita durante a têmpera dos aços comuns. A observação posterior de que algumas ligas não ferrosas também sofriam este tipo de reação fez com que o termo se estendesse à denominação a qualquer produto de uma transformação adifusional assistida por tensão [12]. Essa microestrutura nos aços comuns é formada através da deformação da célula CCC que possui baixo limite de solubilidade de carbono no ferro em uma estrutura cristalina tetragonal de

corpo centrado, TCC, que pode ser vista no microscópio como pequenos grãos em forma de agulhas, bastante finos e resistentes. Em virtude disso, o aço torna-se mais resistente, porém menos dúctil e muitas vezes, quebradiço, o que requer um outro tratamento térmico para alívio de tensões, aumento de ductilidade e poucas perdas de resistência mecânica, conhecido como revenido.

Ele consiste no reaquecimento do material temperado por um curto período de tempo, até uma zona do diagrama da Fig. 05, correspondente ao campo das fases de equilíbrio, α e Fe_3C (cementita), obtendo uma microestrutura conhecida como martensita revenida, que possui uma dureza considerável e uma melhor ductilidade, se comparada a martensita. Além disso, a martensita revenida possui estrutura interna cúbica centrada, menor intensidade de tensões internas e é produzida para evitar fissuras e empenos que podem ocorrer no material apenas temperado [11], [3].

4. MATERIAIS E METODOS

4.1 Materiais

- O aço utilizado no trabalho foi um SAE 1040 proveniente de uma empresa local;
- Lixas d'água de granulometria de 80 até 1200;
- Serra utilizada para o corte do aço;
- Lixadeira politriz motorizada (baixa rotação-125 rpm e alta rotação-250 rpm)
- Paquímetro digital;
- Fornos mufla e JUNG;
- Espectrômetro de Emissão ótica (marca PANalytical Epsilon 3-XL)
- Nital (3%);
- Pastas diamantadas (granulometria 6,3 e 1 μ m);
- Durômetro da marca PANTEC;
- Microscópio ótico Olympic.

4.2 Metodologia

As amostras de aço SAE 1040 foram cortadas mediante a utilização de uma serra e os corpos-de-prova obtidos eram dotados de geometria cilíndrica, com diâmetro de 2,5cm e 1cm de altura, como na Fig. 06.

Figura 6-Corpo de prova utilizados para realização dos tratamentos térmicos.



Fonte: Autor.

Em seguida, houve a normalização em um forno mufla, apresentado na Fig. 07, a temperatura de 900°C durante 1h e 50min. O objetivo desse tratamento foi produzir nas peças uma microestrutura perlítica que é tipicamente obtida quando aços carbono são submetidos a essas condições.

Figura 7-Forno mufla utilizado para a normalização das peças.



Fonte: Autor.

Após a normalização foi realizado a têmpera em 860°C em um forno JUNG, como na Fig. 08, por 1h e 50min. Após essa etapa, cada peça foi segregada em um meio de arrefecimento diferenciado (óleo, água e salmoura), como na Fig. 09.

Figura 8-Forno usado para a realização dos tratamentos térmicos.



Fonte: Autor.

Figura 9-Meios de arrefecimento utilizados.



Fonte: Autor.

Seguido a têmpera foi realizado o tratamento de revenimento no forno mufla da Fig.07, a temperatura de 200°C durante 50 minutos. O objetivo desta etapa foi aliviar as tensões causadas durante a têmpera, tomando cuidado para que a resistência obtida na mesma não fosse perdida.

4.3 Caracterização das amostras

A técnica de emissão ótica fornece determinações rápidas de muitos elementos em uma amostra, além de ser bastante utilizada em indústrias metalúrgicas e de fundições para controle de qualidade. O aparelho responsável pela análise química do material está na Fig. 10.

Figura 10-Espectrômetro de emissão ótica.



Fonte: Autor.

Além da análise química, os corpos-de-prova foram preparados para a análise metalográfica após os tratamentos térmicos, onde eles foram lixados a partir da granulometria 80 até a 1200, polidos com pastas diamantadas de 6,3 e 1 μ m, posteriormente atacados com nital.

As peças foram levadas ao microscópio ótico Olympus, onde foram obtidas as imagens das respectivas microestruturas e em seguida foram realizados os ensaios de dureza, em escala Rockwell C, no equipamento da marca PANTEC, indentador de diamante, apresentado na Fig. 11.

Figura 11-Durometro usado para a obtenção qualitativa da dureza.



Fonte: Autor

5. RESULTADOS E DISCUSÕES

A Tab.02 apresenta a análise da composição química do aço utilizado.

Tabela 2- Composição química do aço AISI 1040.

Elemento	Wt(%)	Elemento	Wt(%)
C	0,399	S	0,019
Si	0,189	Cu	0,339
Mn	0,845	Mo	0,008
P	0,016	Ni	0,063
V	0,033	Sn	0,015
Nb	0,030	Cr	0,058

Fonte: Autor.

O carbono é o elemento primordial para a resistência dos aços comuns, pois durante o processo de tratamento térmico é o principal responsável pelo endurecimento do aço através da transformação martensítica. O fósforo e o enxofre em grandes quantidades conferem fragilidade ao aço, porém o enxofre em particular quando ligado ao manganês melhora a usinabilidade e prejudica a resistência a corrosão, pois deixa a peça mais suscetível a corrosão localizada [13].

O silício é utilizado para atenuar a formação de bolhas nos lingotes, mas não atuam diretamente na resistência mecânica do aço, pois encontram-se em pequenas quantidades, além disso esse elemento é utilizado na siderurgia como um acalmador, em outras palavras, promove a remoção do excesso de gases que são abundantes durante o refino primário do aço e que podem provocar porosidades durante a etapa de solidificação dos lingotes, além disso, promove a inibição da formação de aluminatos que podem obstruir os tubos utilizados para escoar o metal líquido durante a solidificação. O manganês aumenta a forjabilidade, a temperabilidade e a resistência ao impacto, porém tende a ligar-se ao enxofre formando sulfeto que contribui para a fragilização do material. O cobre pode causar inclusões e em pequenas quantidades melhorar a resistência a corrosão atmosférica, assim como a adição de vanádio e nióbio, que melhora a resistência a corrosão e mecânica sem prejudicar a tenacidade durante a etapa de têmpera e revenimento [14], [15], [16].

Já que é importante maximizar a temperabilidade de um aço que deve ser temperado, devem-se conhecer as temperaturas de início (M_i) e de fim (M_f) da transformação martensítica para cada aço. A temperatura M_i reflete a intensidade da força termodinâmica necessária para iniciar a transformação austenita /martensita. Elementos de liga do aço também influenciam a temperatura M_i diminuindo-a, com exceção do cobalto. Vários pesquisadores desenvolveram, ao longo dos anos, equações que possibilitassem o conhecimento de M_i em função da composição química do aço. A equação 01 foi proposta por Andrews e aplica-se para teor de carbono até 0,60% [17].

$$M_i = 539 - 423 * C - 30,4 * Mn - 12,1 * Cr - 17,7 * Ni - 7,5 * Mo \quad Eq.01$$

Onde:

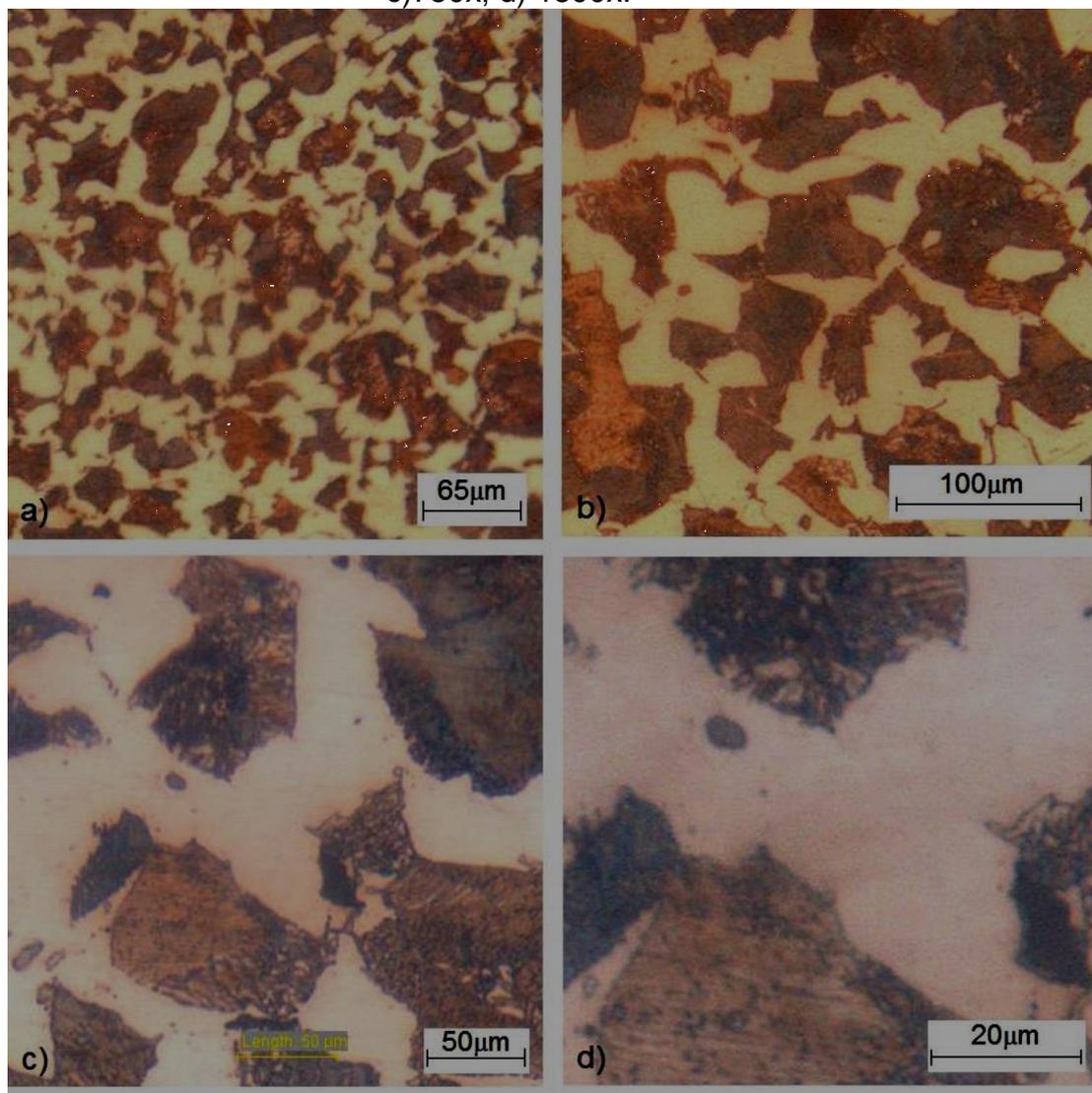
M_i é a temperatura de início de formação da martensita, em C;

C, Mn, Cr, Ni e Mo são dados em percentuais em peso no aço.

Através da Eq. 01 de Andrews, obtém-se que a temperatura para o aço ABNT 1040 é em torno de 365°C.

A Fig.12 mostra a metalografia da amostra como recebido. Pode-se afirmar que há perlita em uma matriz ferrítica.

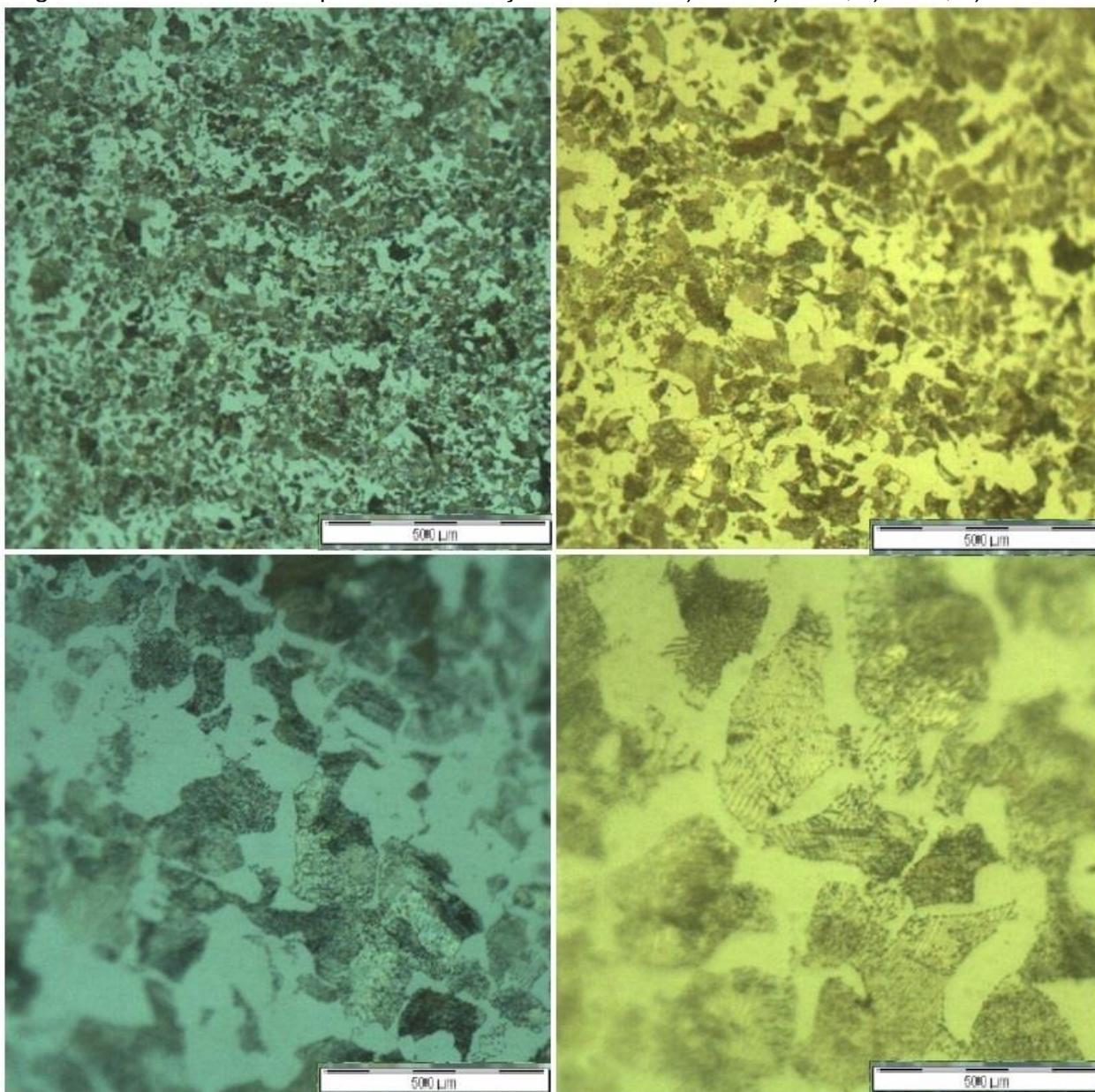
Figura 12-Metalografia do aço AISI1040 como recebido. Aumento a)150x; b)300x; c)750x; d) 1500x.



Fonte: [15].

A normalização foi feita para refinar e homogeneizar a microestrutura, preparando-a para posterior têmpera e revenido. A Fig. 13 representa a micrografia após a normalização.

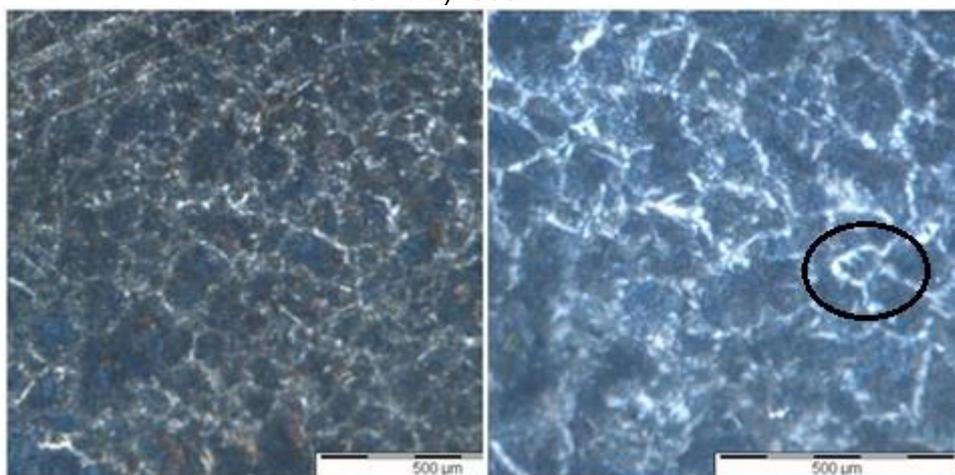
Figura 13-Microestrutura após a normalização. Aumento a)150x b) 300x; c) 750x; d)1500x.



Fonte: Autor.

Na Fig. 13 é apresentado grãos de perlita em uma matriz ferrítica grosseira, típicos de aços médio carbono normalizados. Após a normalização a têmpera foi feita em três meios de arrefecimento, como indica a Fig. 14, Fig. 15 e a Fig. 17.

Figura 14-Microestrutura obtida após a têmpera em óleo seguida pelo revenido. Aumento a) 750x e b)1500x.



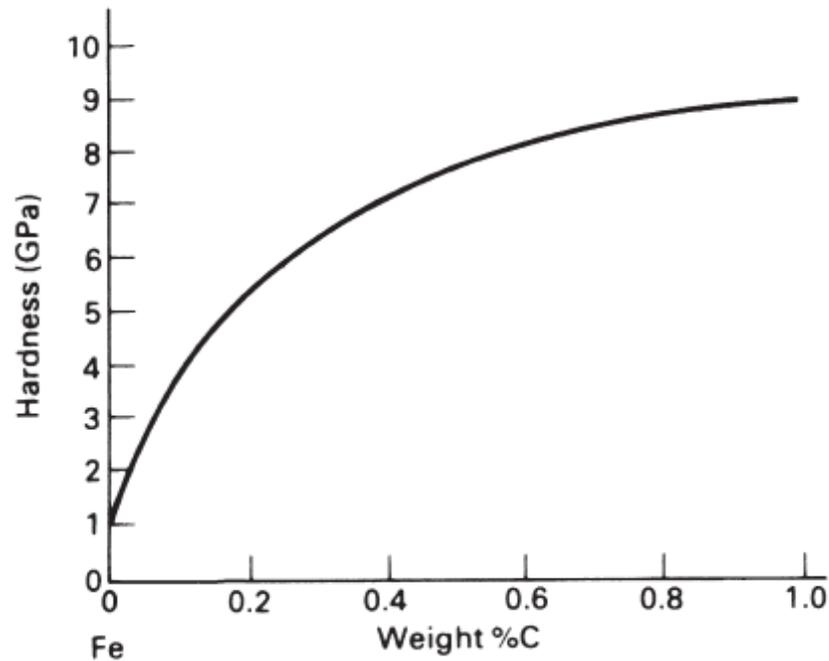
Fonte: Autor.

Na Fig. 14, a têmpera realizada em óleo formou alguns grãos agulhares de martensita dispersos em uma matriz de grãos ferríticos macios, como indica o círculo preto na imagem. Como esse meio de arrefecimento é menos severo se comparado com água ou salmoura, por exemplo, é normal que a presença de martensita seja em menor quantidade, corolário uma menor dureza [16].

A martensita é uma solução sólida supersaturada de carbono no ferro, de estrutura ordenada TCC, resultante de distorções da célula unitária CCC, que são responsáveis pela dureza da fase, de maneira que as mesmas aumentam linearmente com a quantidade de carbono dissolvido [16], como mostra a Fig. 15. Essencialmente, cada átomo de ferro da rede CFC tenta transladar de um espaçamento da rede para a posição correspondente na rede CCC, porém os átomos de carbono interferem, por isso a estrutura TCC da martensita é tão parecida com a rede CCC [17]. Esse fenômeno acontece pelo excesso de carbono na solução sólida, ou seja, pela supersaturação desse elemento.

A quantidade de martensita formada com a diminuição da temperatura não é linear, inicialmente a quantidade de agulhas formadas é pequena, então esse número aumenta, e finalmente, próximo ao fim, volta a diminuir. A temperatura de início da formação da martensita de uma determinada liga não pode ser modificada se a taxa de resfriamento mudar, pois esta não é dependente da taxa de resfriamento e sim da composição química da liga. [18]

Figura 15-A dureza da martensita aumenta com a quantidade de carbono porque a distorção da mesma também aumenta.



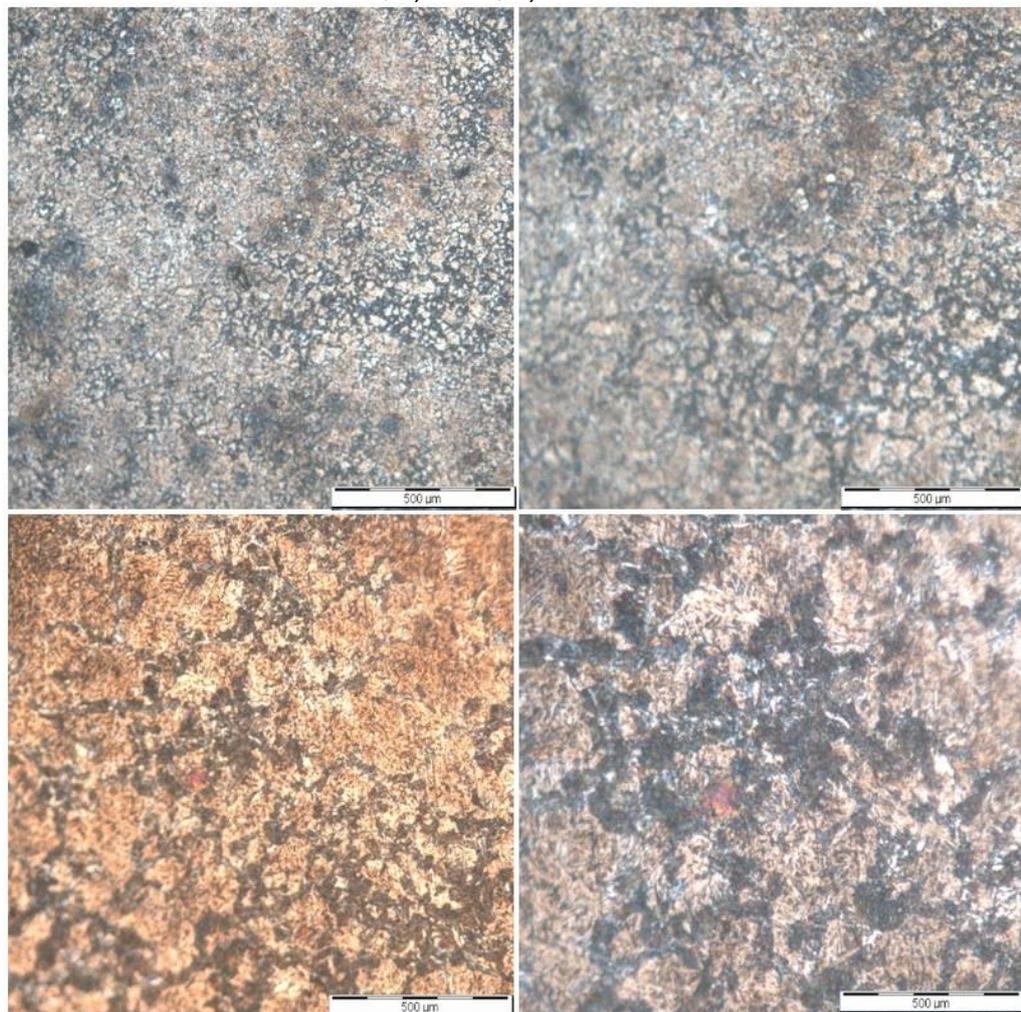
Fonte: [16]

Assim, a martensita forma-se por um mecanismo de corte, movimentando os átomos de um modo coordenado e quase simultâneo, processo bem diferente do que ocorre durante as transformações com difusão. Com essa formação há o aumento da dureza e por conseguinte, da resistência mecânica, que fica evidente na Fig. 15 onde essas propriedades se comportam de maneira semelhante, ou seja, aumentam com o acréscimo de carbono. Visto que o tratamento térmico de têmpera refina a microestrutura, aumentando a região total de contorno de grão e a quantidade de barreiras capazes de impedir o deslizamento de discordâncias, o limite de escoamento do material também se eleva [6], [19].

Quanto ao aspecto morfológico, a martensita pode ser em ripas ou em placas, dependendo do teor de carbono no material, abaixo de 0,6% em peso de carbono ela se encontra na forma de ripas, acima desse valor, em placas, além disso, o teor de carbono dissolvido na austenita também influencia proporcionalmente a dureza da martensita que será formada, visto que essa será maior, quanto maior a quantidade de carbono [18]. A formação de martensita em ripas, se dá por ripas que crescem muitas vezes paralelas uma as outras e de forma cooperativa e outras vezes crescem de maneira sucessiva por nucleação, podendo ser separadas por contornos de baixo ou alto ângulo [19]. Já na martensita em placa, as primeiras

placas formadas crescem através dos primeiros grãos de austenita completos. As placas adicionais vão se formando por nucleação através da austenita restante, entre o limite de grão da mesma e das primeiras placas formadas, assim, quanto menor a região de austenita, menor a placa de martensita formada e conseqüentemente maior a variação de tamanho entre essa morfologia martensítica. Por outro lado, a martensita em forma de ripa são relativamente uniformes, além de paralelas entre si [20], [21], [22].

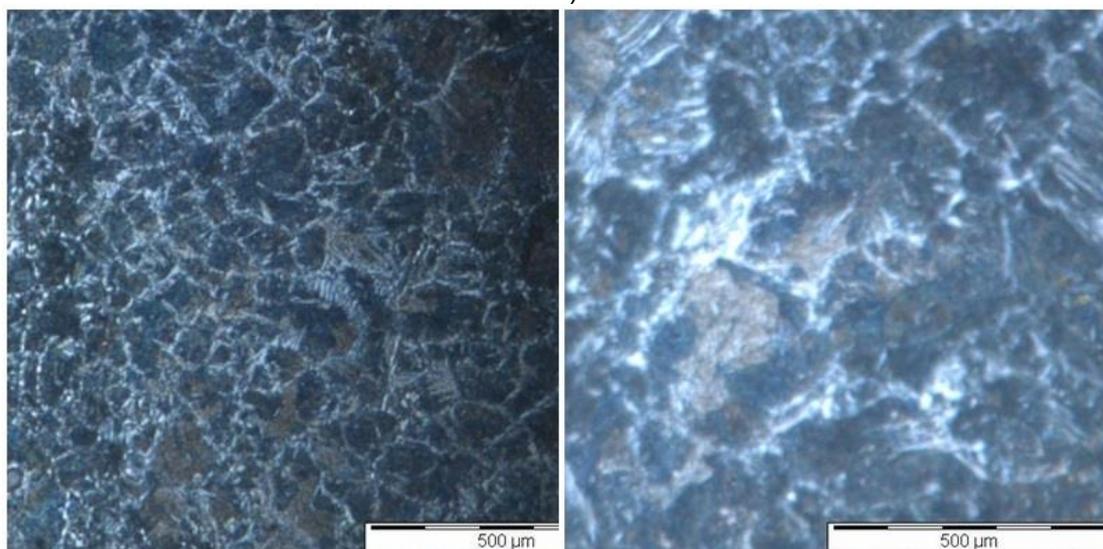
Figura 16-Micrografia após a têmpera em água seguida pelo revenido. Aumento a)150x b) 300x; c) 750x; d)1500x



Fonte: Autor.

Tanto na Fig. 16 quanto na Fig. 17 a presença de martensita faz-se mais forte, em detrimento da maior quantidade de grãos agulhares formados devido a forma de arrefecimento ser mais severa, água e salmoura.

Figura 17-Microestrutura após a têmpera em salmoura seguida pelo revenido. Aumento a) 750x e b)1500x.



Fonte; Autor.

A Tab. 03 está com os valores de dureza Rockwell C e os mesmos extrapolados para dureza Brinell, através da Tab. 04, onde foi feito a interpolação dos valores. [23]

Tabela 3-Resultados do ensaio de Dureza.

Tipo de Tratamento térmico	Dureza Rockwell C	Dureza Brinell
Normalização	29,28	280,96
Têmpera/Óleo	36,67	341,36
Têmpera/H ₂ O	43,10	400,90
Têmpera/Salmoura	57,92	613,51

Fonte: Autor.

A dureza da peça aumentou substancialmente com os tratamentos realizados, aliando-se as micrografias, verifica-se o sucesso obtido de aumento de resistência mecânica através do refino dos microconstituintes formados. O meio que houve um maior aumento foi o resfriamento mais rígido, salmoura, o que já era esperado, visto a maior quantidade de martensita obtida na microestrutura da Fig. 17. [15]

A velocidade de resfriamento de um corpo de prova depende da taxa de extração de calor que é uma característica do meio de resfriamento durante o contato com a superfície do metal, bem como do seu tamanho e sua geometria. A velocidade de resfriamento é conhecida também como “severidade de têmpera”.

Dos três meios de têmpera mais comumente empregados (salmoura, água e óleo), a salmoura é a que produz a têmpera mais severa, seguida pela água e óleo [1].

Através da Equação 02, utilizando dados da dureza Brinell na Tab. 03, foi calculado por meio da relação que permite converter dureza em tensão, o limite da resistência do aço estudado, essa relação experimental não é necessariamente precisa, mas constitui uma ferramenta útil quando não existe a possibilidade de um ensaio de tração.

$$\sigma = \alpha * HB$$

Eq.02

Onde:

α é uma constante do aço-carbono tratado termicamente 3,4;

HB é a dureza Brinell

Tabela 4-Tabela de conversões de durezas aproximada.

Rockel C	Brinell	Vickers	Shore
60	654	697	81
59	634	674	80
58	615	653	78
57	595	633	76
56	577	613	75
55	560	595	74
54	543	577	72
53	525	560	71
52	512	544	69
51	496	528	68
50	481	513	67
49	469	498	66
48	455	484	64
47	443	471	63
46	432	458	62
45	421	446	60
44	409	434	58
43	400	423	57
42	390	412	56
41	381	402	55
40	371	392	54
39	362	382	52
38	353	372	51
37	344	363	50
36	336	354	49
35	327	345	48
34	319	336	47

33	311	327	46
32	301	318	44
31	294	310	43
30	286	302	42
29	279	294	41
28	271	286	41
27	264	279	40
26	258	272	38

Fonte: [23] Adaptado.

A Tab.05 representa os dados obtidos de limite de resistência do material.

Tabela 5-Dados teóricos de limite de resistência obtidos através da dureza.

Tipo de Tratamento térmico	Limite de Resistência estimado(MPa)
Normalização	955,26
Têmpera/Óleo	1160,62
Têmpera/H ₂ O	1363,06
Têmpera/Salmoura	2085,93

Fonte: Autor.

Os dados da Tab. 05, são apenas valores aproximados, é possível fazer uma estimativa de algumas propriedades mecânicas de aços carbono em função das propriedades dos microconstituintes, admitindo-se que a dureza seja uma propriedade aditiva, o que na realidade não ocorre, servindo apenas como abordagem estimativa. Para durezas Brinell acima de 380, a relação não deve ser aplicada, pois a dureza passa a crescer mais rapidamente que o limite de resistência a tração. [6], [29]

Ao se comparar a dureza de um aço SAE 4140 - também conhecido como aço-cromo-molibdênio, classificado como médio carbono ligado para beneficiamento, com teores de carbono entre 0,3% e 0,5% em sua estrutura, sendo um dos de maior aplicação na indústria metal-mecânica - com o aço SAE 1040 do presente trabalho, tem-se valores de dureza próximos, onde o SAE 4140 temperado varia entre 54HRc a 59HRc [30], [31], enquanto que o SAE 1040 após a têmpera em salmoura alcançou 57,92HRc, o que demonstra um grande aumento de resistência do mesmo.

6. CONCLUSÃO

A aplicação de aços comuns em solicitações que requer maior resistência mecânica, substituindo materiais mais elaborados e diminuindo custos, pode ser feita através do aumento da resistência dos aços por meio de tratamentos térmicos, como os realizados nesse trabalho. A maior dureza obtida foi na peça resfriada em salmoura, além do maior limite de resistência estimado, pois nesse meio de arrefecimento a severidade de têmpera e a taxa de extração de calor são maiores, o que leva a não ocorrer difusão e evitar microestruturas como a perlita ou a bainita, por exemplo.

7. SUSGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Um tratamento termoquímico no aço SAE 1040 e caracterização mecânica e microestrutural com uso de recursos como MEV e EDS;
- Ensaio de microdureza para avaliar as microestruturas formadas.

8. REFERENCIAS

1. MARTINS, M. **Temperabilidade jominy e influência do revenido sobre a dureza um estudo em aços estruturais nacionais**. 2002. Dissertação (mestrado) - Programa de pós-graduação em ciência e engenharia de materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
2. DARAMOLA, O. O.; ADEWUYI, B. O.; OLADELE, I.O. Efects of heat treatment in the mechanical properties of rolled medium carbon steel. **journal of minerals & Materials Characterization & Engineering**, v. 9, p. 693-708, 2010.
3. CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: ABM, 2008.
4. COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo: Blucher, 2008.
5. HANDBOOK:, A. S. F. M. A. **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. Ohio: ASM International, 1993.
6. CALLISTER JR, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. São Paulo: LTC, 2000.
7. CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica- Materiais de construção mecânica**. São Paulo: McGraw-Hill, v. 3, 1986.
8. ASKELAND, D.R.; FULAY, P.P.; WRIGHT, W.J. **The Science and Engineering of Materials**. Stamford: Cengage Learning, 2010.
9. TAVARE, C. S. **Estudo do processo de têmpera em aço 15b28 aplicado em lâminas de motoniveladoras**. 2009. Dissertação (mestrado) - Programa de pós-graduação em ciência e engenharia de materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,2009.
10. HONEYCOMBE, R. W. K. **Aços – Microestrutura e Propriedades**. Lisboa: Fundação Calobre, 1982.

11. SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
12. SANTOS, N. C. **Aspectos cristalográficos da transformação martensítica de uma liga Fe-27%Ni**. 2008. Tese (Doutorado) - Instituto Militar de Engenharia - tese de doutorado, Rio de Janeiro, 2008.
13. SHAMA, P.; ROY, H. Pitting corrosion failure of an AISI stainless steel pointer rod. **Engineering Failure Analysis**, v. 44, p. 400, 2014.
14. OLUYEMIA, D. O.; OLUWOLEB, O. I.; ADEWUYIB, B. Studies of the properties of heat treated rolled medium carbon steel. **Materials Research**, v. 14, p. 135-141, 2011.
15. CANAAN, G.L. **Influência da adição de vanádio nas propriedades mecânicas de aço médio teor de carbono para beneficiamento**. 2007. Dissertação (mestrado) - Programa de pós graduação em engenharia metalúrgica e de minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
16. REVISTA ELETRÔNICA DE CIÊNCIAS. O aço na construção civil. Disponível em: < http://www.cdcc.sc.usp.br/ciencia/artigos/art_22/aco.html >. Acesso em: 20 dez. 2015.
17. DINIZ, E. O. **Influência do Nióbio na microestrutura e propriedades mecânicas da barra chata temperada e revenida para a aplicação em feixes de mola**. 2005. Dissertação (mestrado) - Programa de pós graduação em engenharia metalúrgica e de minas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.
18. SILVA, A. C. M. ; JABOUR, L. Z. M. ; SANTOS, E. A. ; MARINS, L. F. B. ; OLIVEIRA, J. C. M. ; FERREIRA, L. F. M. ; SANTOS, C. V. P. . Estudo da Temperabilidade do Aço SAE 1040. In: 15º Encontro Nacional dos Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas / ABM Week, 2015, Rio de Janeiro. Anais do 15º Enemet, 2015.
19. JONES, D. R. H.; ASHBY, M. F. **An Introduction to Microstructures**,

- Processing and Design.** Oxorford: Elsevier, 2006.
20. GUY, A. G. **Ciência dos materiais.** São Paulo: LTC/EDUSP, 1980.
 21. AVNER, H. S. **Introducion to physical metallurgy.** 2°. ed. New York: McGraw-Hill, 1997.
 22. VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência dos Materiais.** São Paulo: Edgard Blücher, 1970.
 23. ALBERTIN, E.; BENEDUCE NETO, F.; TEXEIRA, I. O. Adequação da composição química e do tratamento térmico de ferros fundidos de alto cromo utilizando termodinâmica computacional. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 8, p. 223-229, 2011.
 24. HANDBOOK. **Metallography e microstruct.** Ohio: ASM International, 2004.
 25. VERHOEVEN, J. D. **Fundamentos de Metalurgia Física.** México: Limusa, 1987.
 26. GUIMARÃES, J. R. C. Conceituação, cinética e morfologia da transformação martensítica em aços. **Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales**, v. 1, p. 3-9, 1981.
 27. HUALLPA, E. A. **Caracterização da transformação martensítica em temperaturas criogênicas.** 2011. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.
 28. HANDBOOK. **Nondestructive Inspection and Quality Control.**Ohio: ASM International, 1976.
 29. GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaio dos Materiais.**Rio de Janeiro: LTC, 2000.
 30. RASMA, E. T. **Caracterização estrutural e mecânica do aço AISI/SAE 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos.** 2015. 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, 2015.

31. 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.