

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

EDUARDO LEONARDI DAL VESCO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO AÇO SAE 1045 TEMPERADO EM TRÊS
DIFERENTES MEIOS DE RESFRIAMENTO E REVENIDO**

**CASCADEL
2018**

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

EDUARDO LEONARDI DAL VESCO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO AÇO SAE 1045 TEMPERADO EM TRÊS
DIFERENTES MEIOS DE RESFRIAMENTO E REVENIDO**

Trabalho apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Professor (a) Orientador (a): José
Claudio Terra Silveira**

**CASCADEL
2018**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo o apoio e compreensão nesta fase muito importante de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Agradeço aos meus familiares por todo o apoio e incentivo nessa reta final, e ao meu professor orientador.

RESUMO

Este trabalho consiste em avaliar a mudança das propriedades mecânicas e estruturais do aço carbono SAE 1045 quando submetido aos tratamentos térmicos de normalização, têmpera em três meios de resfriamento sendo eles óleo, água e salmoura, e posterior revenimento. Foram realizados ensaios de dureza Rockwell e metalografia em 5 corpos de provas, sendo eles como recebido, normalizado e temperado em três diferentes meios de resfriamento com o objetivo de se verificar as durezas e microestruturas formadas. Desse modo foi possível analisar que um aço comum médio carbono como o SAE 1045 quando tratado termicamente pode atingir níveis de dureza satisfatórias.

Palavras-chaves: Tratamento Térmico. Aço Carbono. Dureza Rockwell.

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the changes of the mechanical properties and the structure in SAE 1040 carbon steel when subjected to heat treatment of normalization, quenching in three cooling methods like oil, water, brine and later tempering. Hardness Rockwell and metallography tests were carried out in five test bodies, as received, normalized and quenching in three cooling methods with the purpose of verifying the hardness and microstructures formed. This way it was possible to analyze that a common medium carbon steel such as the SAE 1045 when heat-treated can reach a satisfactory hardness level.

Keyword: Heat Treatment. Carbon Steel. Hardness Rockwell.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de equilíbrio ferro-carbono (acima) e detalhe a zona pertencente aos aços no diagrama ferro-carbono (abaixo).	18
Figura 2: Aço com 0,35% de carbono resfriado lentamente contendo textura granular.	20
Figura 3: Martensita, com agulhas sobre um fundo de austenita retida.	21
Figura 4: Aço com 0,5% de carbono, temperado em água e revenido a 200°C. Textura martensita revenida.	22
Figura 5: Tipo de Penetrador	23
Figura 6: Aplicação de Carga Rockwell.	24
Figura 7: Profundidade alcançada pelo penetrador.	25
Figura 8: Policorte Pantec utilizado para corte dos corpos de prova.	28
Figura 9: Corpos de prova utilizados nos tratamentos térmicos.	28
Figura 10: Forno JUNG utilizado nos tratamentos térmicos.	29
Figura 11: Lixadeira politriz utilizada para preparar os corpos de prova.	30
Figura 12: Microscópio invertido PanTec utilizado no ensaio metalografico.	30
Figura 13: Durômetro Mitutoyo utilizado para ensaio de dureza.	31
Figura 14: Metalografia aço como recebido	32
Figura 15: Metalografia aço Normalizado.	32
Figura 16: Metalografia Tempera em óleo.	33
Figura 17: Metalografia Tempera em água.	33
Figura 18: Metalografia Tempera em salmoura.	33
Figura 19: Dureza Brinell x Meio de resfriamento.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Conversão Dureza HRC para HB.....	25
Tabela 2: Resultado ensaio de Dureza	34
Tabela 3: Limite de resistência estimado.....	36

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Relação empírica entre dureza Brinell e o limite de resistência.....35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAE – Society Automotive Engineers

a.C – Antes de Cristo

CCC – Cúbica de corpo centrado

CFC – Cúbica de face centrada

TCC – Tetragonal de corpo centrado

HB – Hardness Brinell

HRC – Hardness Rockwell C

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	14
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	15
2.1 TRATAMENTO TÉRMICO.....	15
2.1.1 Tempera.....	16
2.1.2 Revenimento.....	17
2.2 AÇO CARBONO	18
2.4 DUREZA ROCKWELL.....	22
3. METODOLOGIA.....	27
3.1 MATERIAIS.....	27
3.2 MÉTODOS	27
3.2.1 Preparação corpos de prova.....	27
3.2.2 Tratamentos térmico	28
3.2.3 Preparação para metalografia e ensaio de dureza.....	29
3.2.4 Ensaio de metalografia e dureza	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1 ENSAIOS DE METALOGRAFIA	32
4.2 ENSAIOS DE DUREZA	34
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

De acordo com (Menezes do Vale, 2011) o aço está presente em diversos segmentos da indústria, desde a construção civil até a indústria mecânica. A sua aplicabilidade está diretamente ligada as suas propriedades mecânicas, que por sua vez estão ligadas à sua microestrutura, que influencia na ductibilidade, dureza, tenacidade e resistência mecânica desse aço.

As diversas aplicações de um aço implicam em uma necessidade de se obter diferentes características mecânicas, para suas devidas aplicações na indústria. Tratamentos térmicos são aplicados visando alterar as microestruturas e conseqüentemente as propriedades do aço para a sua específica aplicação.

Ainda segundo o autor (Menezes do Vale, 2011) os tratamentos térmicos mais comumente usados são a normalização, têmpera e revenido. A normalização objetiva refinar e homogeneizar a estrutura do aço, preparando-o para o tratamento térmico de têmpera. A têmpera objetiva obter-se uma microestrutura martensita, a qual implica em um endurecimento do aço, o deixando frágil. O tratamento de revenimento é importante para recuperar parcialmente a tenacidade da estrutura, afim de aliviar as tensões provenientes da têmpera, melhorando a aplicabilidade do material na indústria.

Neste trabalho, foi utilizado um aço SAE 1045 para avaliar as mudanças microestruturais e mecânicas após o tratamento térmico de normalização, têmpera em três diferentes meios de resfriamento (óleo, água e salmoura) e revenimento. O intuito era de melhorar as propriedades mecânicas de um aço reconhecido, o qual é amplamente utilizado na indústria mecânica, para as mais diversas solicitações de trabalho.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho possui a finalidade de avaliar através de ensaios de dureza e metalografia o comportamento do aço SAE 1045 submetido a tratamento térmico de normalização, têmpera em três diferentes meios de resfriamento e revenido, para verificar as transformações causadas por estes processos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar tratamentos térmicos de normalização, têmpera em três diferentes meios de resfriamento e revenimento.
- Verificar as microestruturas formadas através de ensaio metalográfico das amostras.
- Avaliar as respectivas durezas através do ensaio de dureza.
- Gerar tabelas comparativas das propriedades obtidas.

1.3 JUSTIFICATIVA

O homem desde a sua existência utilizou de metais para suprir suas necessidades cotidianas. Nos tempos mais remotos os metais serviam para a fabricação de utensílios de caça, de uso doméstico e vestuário. Os materiais eram extraídos da natureza e utilizados quase que diretamente em suas aplicações, com pouco ou nenhum processamento.

Nesse contexto, segundo o autor (Menezes do Vale, 2011), a preocupação do homem em se obter metais de maior resistência e qualidade para satisfazer suas necessidades é antiga. Em 55 a.C. o imperador romano Júlio César, relatou que os guerreiros bretões se defrontavam com problemas de suas armas e acessórios entortarem em meio as batalhas após certo tempo de uso.

Os romanos, por sua vez, já obtinham o conhecimento que ao se aquecer o aço durante um longo período de tempo e resfriado, em seguida, em salmoura obtinha-se um material de maior resistência e durabilidade. Esse procedimento já pode ser considerado uma forma rudimentar de tratamento térmico, pois permitia a fabricação de armas mais duras e resistentes.

Sob esse prisma, foram necessárias várias gerações para o homem aprender a lidar de maneira mais eficiente com o calor e com processos de resfriamento e aquecimento, dessa forma, conseguiu obter características diferenciadas, como a elevada resistência do material. Desse modo, conclui-se que esses fatores são decisivos nas modificações das propriedades do aço.

De modo geral, o tratamento térmico trata-se de uma conjuntura de processos em que se objetiva modificar as propriedades mecânicas, influenciando na dureza, ductilidade, resistência mecânica e na tenacidade de um material conferindo-lhe determinadas características.

Deste modo, as mais diversas aplicações de ligas de ferro e carbono na indústria metal-mecânica requerem diferentes combinações de características, as quais são possíveis obter através de tratamentos térmicos.

Os tratamentos térmicos mais comuns são a têmpera e revenido. Na tempera, o aço é aquecido até a temperatura desejada de solubilização e resfriada rapidamente para evitar a formação perlítica e bainítica, 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, a fim de aliviar tensões e melhorar a aplicabilidade do material.

A obtenção das características desejadas depende da velocidade de aquecimento e temperatura máxima de aquecimento na fase da tempera, e da velocidade de resfriamento e meio de resfriamento na fase de revenimento.

Estes procedimentos podem ser utilizados tanto para oferecer uma maior dureza, quanto para oferecer resistência ao desgaste de peças. Os dentes da engrenagem, o engate do trem, o amortecedor do carro, os eixos, as esferas de rolamentos devem ser fabricados com aço endurecido, para suportar os esforços a que são submetidos. Essas características podem ser obtidas através de tratamentos térmicos de aços, tais como tempera e revenido.

1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Usualmente, aços são elementos utilizados em muitos projetos de engenharia, fazendo com que vários estudos sejam realizados para que se conheçam cada vez mais as suas características.

Com a utilização dos tratamentos térmicos é possível modificar as propriedades mecânicas, às adequando ao que for solicitado em um possível projeto. Estes processos impõem uma dada microestrutura ao material, a qual será responsável pelas propriedades finais do mesmo.

Por este motivo o desenvolvimento deste trabalho será utilizando um aço médio carbono SAE 1045, que é vastamente utilizado na indústria metal-mecânica, a fim de avaliar as alterações nas propriedades mecânicas, onde serão realizados tratamentos térmicos com tempo e temperatura controlada, objetivando avaliar o quanto cada tratamento influenciará no comportamento de dureza e dos seus microconstituintes.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 TRATAMENTO TÉRMICO

Há milhares de anos a humanidade se preocupa em possuir metais de alta qualidade e resistência. Diante disso, aprendeu que ao se aquecer e resfriar um metal, suas características mecânicas poderiam ser alteradas. Em guerras medievais os exércitos que possuíam suas espadas e outros armamentos metálicos tratados termicamente conseguiam vantagens sob seus adversários, pois não necessitavam de reparos contínuos em seu arsenal. Visto isso, em Roma, antes de Cristo, Júlio César já detinha o conhecimento do tratamento térmico, onde desfrutava de vantagens do seu arsenal bélico sobre os demais adversários, segundo autor (MENEZES DO VALE, 2011).

De acordo com o autor (Chiaverini, 1996) o tratamento térmico pode ser definido como o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aço, sob condições controladas de temperatura, tempo de permanência e velocidade de resfriamento, de modo a produzir as propriedades desejadas. Dessa forma, ele pode ser executado a partir de três etapas: aquecimento, tempo de permanência em determinada temperatura e resfriamento.

Segundo o autor (Chiaverini, 1996) a importância do tratamento térmico é visível após a listagem de alguns objetivos pretendidos no processo: Remoção de tensões internas, aumento da dureza, aumento da resistência ao desgaste, aumento da resistência à tração, aumento da ductilidade, aumento da usinabilidade, melhora das propriedades de corte, melhora da resistência à corrosão, melhora da resistência ao calor e modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

Em geral, o tratamento térmico é utilizado para melhorar uma ou mais propriedades do material. A obtenção dessas propriedades é atingida mediante o prejuízo de outras. Por exemplo, o aumento da dureza e resistência à tração provoca quedas nos valores de ductilidade. Por este motivo é necessário que o tratamento térmico escolhido seja adequado ao tipo de materiais e objetivos a serem alcançados (CHIAVERINI, 1996).

Sobre essa análise, a obtenção de determinadas propriedades através de tratamentos térmicos é diretamente ligada às modificações estruturais que o aço sofre quando aquecido até a temperatura pretendida e depois resfriado no meio correto (MENEZES DO VALE, 2011).

Nesse sentido um fator de grande importância é o tempo de permanência à temperatura de aquecimento, o qual dependerá das dimensões da peça que receberá o tratamento, sendo que, quanto mais tempo permanecida, maior será a dissolução do carboneto de ferro (MENEZES DO VALE, 2011).

Entretanto, o fator velocidade de resfriamento é o de maior importância dentre as citadas, pois ela determinará a microestrutura da peça tratada e as propriedades finais do aço. Essa velocidade de resfriamento será escolhida de acordo com a estrutura e as propriedades que se deseja obter. (MENEZES DO VALE, 2011).

2.1.1 TÊMPERA

A Têmpera é um processo de tratamento térmico de aços, o qual tem como objetivo a obtenção de uma microestrutura martensítica que proporcione ao aço propriedades elevadas de dureza e resistência mecânica, resultando também na baixa ductilidade, além de elevadas tensões internas. Estes inconvenientes serão eliminados pelo tratamento de revenimento posteriormente (MENEZES DO VALE, 2011).

Nesse sentido, o processo consiste no aquecimento de um aço até a temperatura de austenitização, mantendo-o nessa temperatura para a completa homogeneização com posterior resfriamento brusco em meios severos, que resultaria em uma microestrutura martensítica (MENEZES DO VALE, 2011).

Segundo (Chiaverini, 1996) os meios de resfriamento mais comumente utilizados na tempera são óleo, água e salmoura. Um fator a ser levado em consideração é a agitação desse meio, pois nessas condições, o resfriamento é mais rápido e eficiente, melhorando o contato entre toda a superfície da peça e o meio de resfriamento.

Diante disso, a escolha do meio de resfriamento depende diretamente da composição do aço e da espessura da peça utilizada no tratamento, podendo variar o meio de resfriamento (água, salmoura, óleo) para a obtenção das características desejadas no material (MENEZES DO VALE, 2011).

Sob esse prisma, vários fatores devem ser levados em consideração para obter-se uma têmpera satisfatória, tal como a composição do aço, o tempo de aquecimento, meios de resfriamento e tempo de resfriamento. O tempo de resfriamento deve ser escolhido para que impeça a transformação da austenina, a qual pode resultar em estruturas mistas que ocasionam

o aparecimento de pontos moles além de baixos valores para o limite de escoamento do aço e para a resiliência (CHIAVERINI, 1996).

2.1.2 REVENIMENTO

De acordo com o autor (Menezes do Vale, 2011), o tratamento térmico de têmpera provoca severas mudanças nas propriedades do aço, criando uma concentração de tensões internas decorrentes do cisalhamento da estrutura austenitizada. Esse processo acaba por comprometer o aço dependendo da aplicação devido à baixa resistência ao choque e o alongamento que lhes conferem.

Nesse sentido, o tratamento térmico de revenimento é aplicado posteriormente a tempera, a fim de aliviar ou remover tensões internas e conferir-lhe ao aço maior ductibilidade, tenacidade e diminuição da dureza.

O processo de revenimento consiste na elevação da temperatura da peça inferior à crítica, contudo, esta temperatura é relativamente baixa, de tal forma que evite que as propriedades obtidas pelo tratamento térmico de tempera não sejam significativamente alteradas e perdidas, e por fim ocorre um resfriamento lento, efetivando o alívio de tensões (CALLISTER, 2002).

Segundo (Chiaverini, 1996) a variação da temperatura de revenido confere as seguintes transformações:

- Entre 150°C e 230°C, o reticulado tetragonal torna-se cúbico, a austenita residual transforma-se, verifica-se certa precipitação de carbonetos, o que produz uma estrutura que, atacada, aparece escura. Essa estrutura é chamada de martensita revenida, a dureza cai ligeiramente de 65 HRC a 60-63 HRC.

- Entre 230°C e 400°C a precipitação de carbonetos e seu crescimento se dá em forma globular. Tais glóbulos são ainda imperceptíveis ao microscópio. A estrutura perceptível ao microscópio é uma massa escura, chamada troostita. A dureza continua a cair cerca de 62 HRC a cerca de 50 HRC.

- Entre 400°C e 650°C, confere-se o crescimento dos carbonetos em forma globular, tornando-se agora os glóbulos perceptíveis ao microscópio com grandes aumentos. As estruturas resultantes denominam-se sorbita e apresentam durezas variando de 20 a 45 HRC.

- Entre 650°C e 723°C, os carbonetos continuam a crescer e aparecem na forma de partículas globulares perfeitamente perceptíveis distribuídas num fundo ou matriz ferrítica

contínua. A estrutura resultante é chamada de esferoidita e sua dureza é muito baixa, variando de 5 a 20 HRC.

Segundo (Menezes do Vale, 2011), após o tratamento térmico de revenimento, o material pode apresentar certa fragilidade, a qual pode ser dividida em tipos:

- O primeiro tipo é denominado Fragilidade Azul, que por sua vez ocorre na faixa de temperatura de 230° a 370°. É chamado assim em decorrência da coloração azul de oxidação que os aços formam nesta faixa de temperatura. Esta fragilização aumenta a tensão de escoamento e diminui a ductilidade do material. O fenômeno acontece devido a precipitação da cementita em contornos de grão e entre as agulhas de martensita.

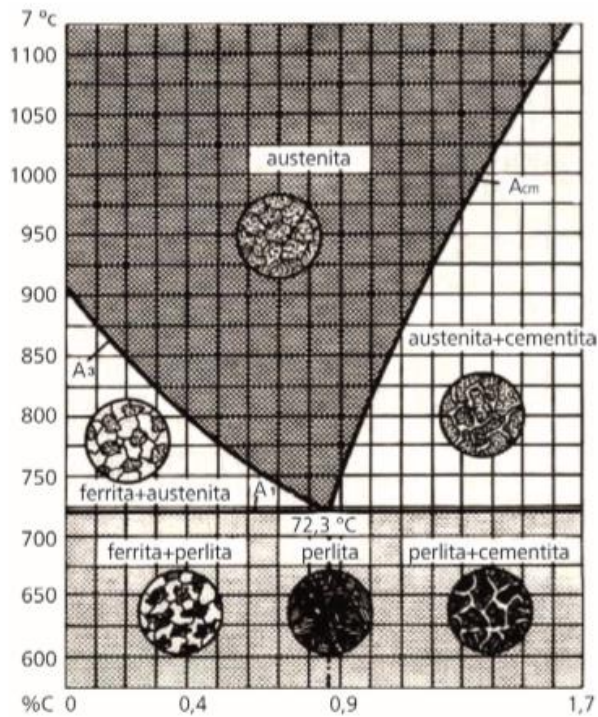
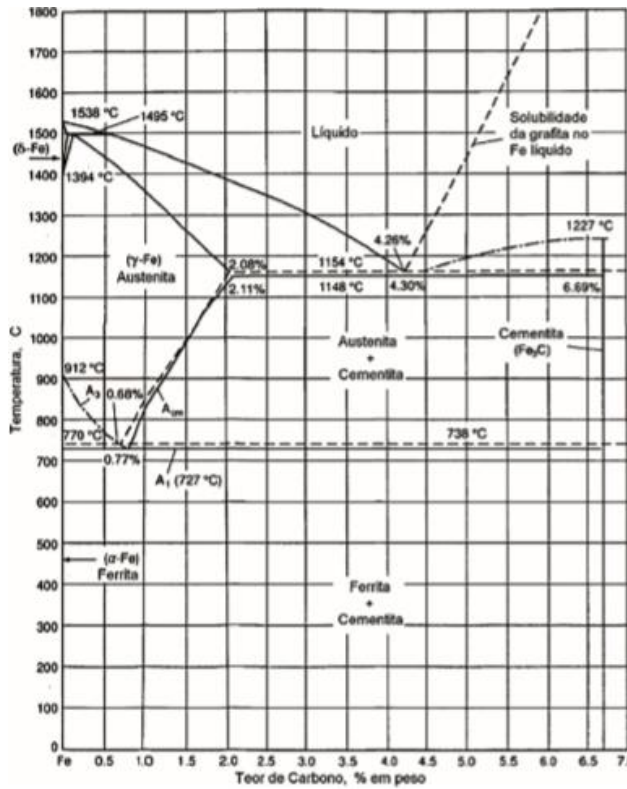
- Outro tipo de fragilidade é verificado na faixa de temperatura de 375/400°C à 550/575°C, a qual se dá o nome de Fragilidade Krupp, que por sua vez ocorre quando o aço é mantido nessa faixa de temperatura ou resfriado lentamente, e está relacionado com a presença de impurezas segregadas próximas ao contorno de grão da austenitização. A correção em geral desse tipo de fragilidade ocorre com a aplicação de um novo revenimento ou sub-resfriamento.

2.2 AÇO CARBONO

As ligas ferro-carbono constituem os materiais de maior aplicação na indústria. Isso se dá ao fato de que apresentam uma grande variedade em suas aplicações devido a vasta gama de diferentes propriedades mecânicas que podem ser obtidas, as quais são possíveis alterar com uma pequena variação na quantidade de carbono ou através de algum tratamento térmico do metal, segundo (MENEZES DO VALE, 2011).

Conforme (Menezes do Vale, 2011), o que influencia basicamente as transformações de um ferro-carbono, é a temperatura e o teor de carbono. Quando esses dois fatores são considerados, pode-se traçar um mapa das transformações denominado diagrama de equilíbrio, mostrado na Figura 1, o qual pode ser utilizado para interpretação das microestruturas formadas.

Figura 1: Diagrama de equilíbrio ferro-carbono (acima) e detalhe a zona pertencente aos aços no diagrama ferro-carbono (abaixo).



Fonte: (Menezes do Vale, 2011).

De acordo com o autor (Menezes do Vale, 2011), para o estudo do tratamento térmico de aços, a análise deve limitar-se na região do diagrama metaestável compreendida entre 0 e 2% de Carbono, e também basta considerar unicamente a reação eutetoide.

Segundo (Menezes do Vale, 2011), os aços quando em temperatura ambiente constituem uma estrutura de equilíbrio constituída por ferrita + cementita. Para a eutetoide obtém-se normalmente uma microestrutura formada por lamelas alternadas de ferrita e cementita, resultantes da reação eutetoide. De acordo com a composição da eutetoide, os aços podem classificar-se em hipoeutetoides, com carbono menor que 0,8% ou hipereutetoides, com carbono maior que 0,8%.

Conforme (Menezes do Vale, 2011), um aço com menor teor de carbono afasta-se da composição eutetoide, causando uma mudança na microestrutura o que se traduz em uma variação contínua da quantidade relativos de nódulos de perlita e de grãos de ferrita.

De acordo com (Menezes do Vale, 2011), aços com teor de carbono entre 0,4% e 0,6%, tem suas microestruturas constituídas por nódulos de perlita envolvidos por grãos ferríticos, permitindo delimitar claramente os limites de grão da austenita, como na Figura 2. As partes claras são compostas de ferrita e a parte escura é composta por perlita.

Figura 2: Aço com 0,35% de carbono resfriado lentamente contendo textura granular.



Fonte: (Callister, 2002).

Os aços etetoides, oriundos de um resfriamento lento, tem como constituintes a férrita mais a cementita, que também é conhecida como perlita, originários da austenita. Quando ocorre uma pequena variação de temperatura com o tempo, ocorre uma difusão dos átomos nos arredores da austenita, onde os átomos de ferro se transformam em uma estrutura CCC, essa reação ocorre por meio da nucleação e crescimento onde há grande difusão de carbono na rede cristalina do aço, conforme (MENEZES DO VALE, 2011).

Segundo o autor (Menezes do Vale, 2011), quando há um resfriamento mais rápido, o carbono não tem tempo suficiente para a difusão, o qual fica em solução. O decréscimo da temperatura na austenita a uma temperatura menor que a eutetoide, o ferro irá mudar de estrutura, de CFC para CCC.

O autor (Menezes do Vale, 2011) afirma que, durante a modificação na microestrutura do aço, o excesso de carbono produzirá uma deformação ou cisalhamento na rede cristalina. Esse excesso de carbono levará o ferro a apresentar uma estrutura deformada do tipo TCC. Quando analisado microscopicamente, a estrutura do aço passa de lamelas decorrentes do resfriamento lento, para agulhas.

Ainda segundo o autor (Menezes do Vale, 2011) essa deformação causada por um resfriamento brusco e excesso de carbono na rede cristalina, implica em um aço com maior resistência mecânica e dureza elevadas quando comparado com um aço resfriado lentamente. Esse processo de aquecimento e resfriamento brusco é denominado têmpera, e a formação de martensita é a consequência desse processo.

De acordo com (Menezes do Vale, 2011), a martensita é uma solução sólida supersaturada em carbono que fica preso à rede, distorcendo um de seus eixos, o que leva a um aumento da dureza da martensita, vide Figura 3.

Figura 3: Martensita, com agulhas sobre um fundo de austenita retida.

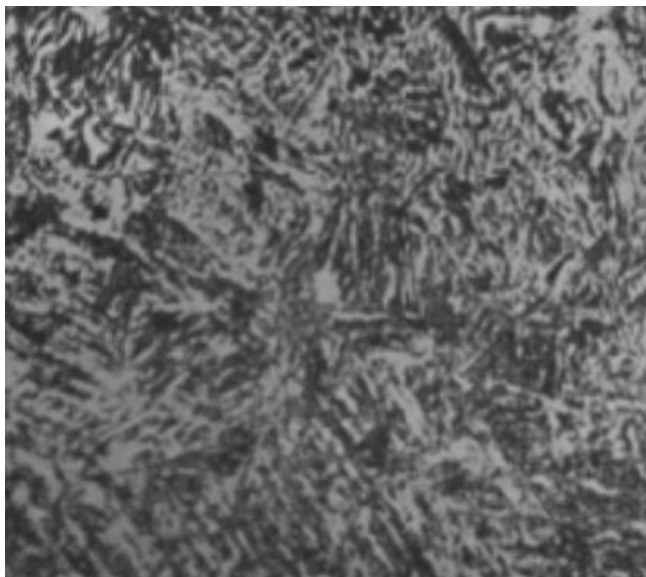


Fonte: (Hume-Rothery, 1968)

Nesse sentido, segundo o autor (Menezes do Vale, 2011), quando um aço é submetido ao tratamento térmico de tempera, suas propriedades mecânicas são alteradas, criando uma

concentração de tensões internas decorrentes do cisalhamento da estrutura austenitizada, o que causa uma fragilidade no material. Isso leva à realização de um tratamento térmico de revenimento, o qual varia de 150 até 738°C, dependendo do que se objetiva atingir.

Figura 4: Aço com 0,5% de carbono, temperado em água e revenido à 200°C. Textura martensita revenida.



Fonte: (Colpaert, 1974).

2.4 DUREZA ROCKWELL

Os primeiros registros de ensaio de dureza se deram no século XVII, apesar de arcaico já se avaliava a dureza de pedras preciosas, esfregando-as com uma lima.

No século XVIII, desenvolveu-se um método para determinar a dureza do aço, riscando-o com minerais diferentes.

Nesse sentido, segundo o autor (Rodrigues L. E., 2018), o primeiro método a ter uma padronização do ensaio de dureza do qual se tem registro, é o método desenvolvido por Mohs, em 1822. Esse método não trazia precisão, pois era baseado no método de riscagem, o que implica em uma grande margem de erro. Esse método originou a escala de dureza Mohs, que apresenta dez minérios padronizados, ordenados numa escala crescente de 1 ao 10, de acordo com a capacidade de riscar ou ser riscado.

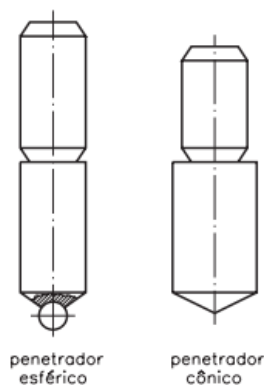
Esta escala não era conveniente para os metais, pois pequenas diferenças de dureza não são acusadas por este método. Essa limitação levou ao desenvolvimento de outros métodos de medição de dureza, com escalas mais amplas e métodos mais precisos de medição.

De acordo com (Rodrigues L. E., 2018), em 1922, Rockwell desenvolveu um método de ensaio de dureza que utilizava um sistema de pré-carga. Este método apresenta algumas vantagens perante os já existentes na época, pois permite avaliar a dureza de metais diversos, desde os mais moles até os mais duros. Entretanto esse método também apresenta algumas limitações, as suas escalas não têm continuidade, ou seja, materiais que apresentam sua dureza próxima ao limite de uma escala e no início de outra não podem ser comparadas em si quanto à dureza.

O ensaio Rockwell é altamente difundido e é o processo mais utilizado na atualidade quando o assunto é ensaio de dureza, apresenta rapidez e facilidade de execução, isento de falhas humanas, facilidade em detectar pequenas diferenças de durezas e pequenos tamanhos de impressão.

Este método apresenta dois tipos de penetrador, os quais são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (cone de diamante com 120° de conicidade), como na Figura 5. Cada tipo de penetrador contém a sua própria escala, nos equipamentos de medição digital, uma vez fixada a escala a ser usado, o valor é dado diretamente na escala determinada, segundo (RODRIGUES L. E., 2018).

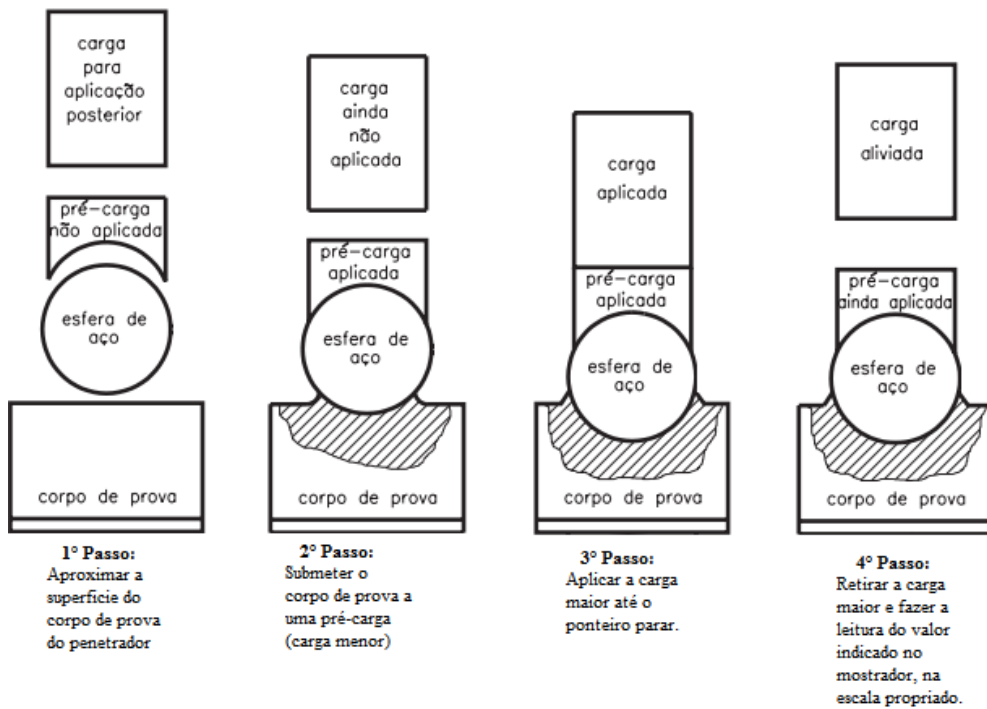
Figura 5: Tipo de Penetrador



Fonte: (Rodrigues L. E., 2018).

O método de ensaio Rockwell consiste na aplicação de cargas por etapas, por primeiro é aplicado uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e amostra de material, e depois aplica-se a carga do ensaio propriamente dita, como na Figura 6.

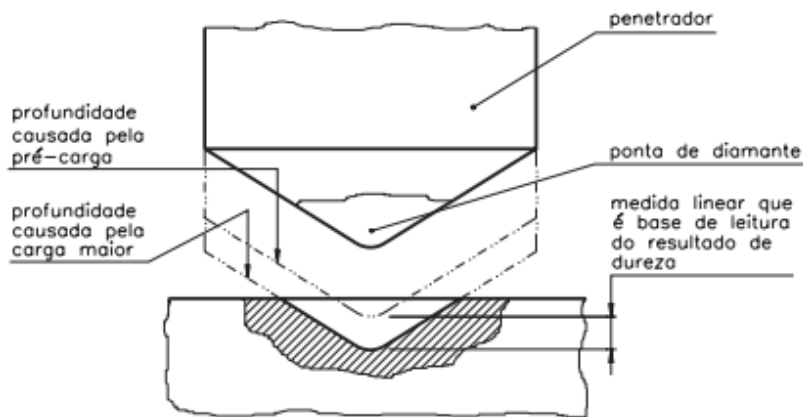
Figura 6: Aplicação de Carga Rockwell.



Fonte: (Rodrigues L. E., 2018).

O valor indicado na escala do ensaio Rockwell corresponde à profundidade alcançada pelo penetrador, subtraída a recuperação elástica do material, e a profundidade decorrente da aplicação de pré-carga. De modo geral, a espessura mínima do corpo de prova deve ser 17 vezes a profundidade atingida pelo penetrador, como na Figura 7.

Figura 7: Profundidade alcançada pelo penetrador.



Fonte: (Rodrigues L. E., 2018).

Segundo (Rodrigues L. E., 2018), as escalas de dureza Rockwell são determinadas em função do tipo de penetrador e do calor da maior carga aplicada. Existem escalas Rockwell normal e superficial, onde na primeira utiliza-se inicialmente uma pré-carga de 10 kgf e a carga maior aplicada posteriormente pode ser de 60 kgf, 100 kgf ou 150 kgf. Na escala superficial, a pré-carga é de 3kgf e carga maior pode ser de 15 kgf, 30 kgf ou 45 kgf. Como estas escalas não tem relação entre si, não é possível comparar a dureza de materiais submetidos a ensaios de dureza Rockwell em escalas distintas, só podendo ser comparado ensaiado na mesma escala.

Tabela 1: Conversão Dureza HRC para HB

HRC	HB	HRC	HB
60	654	38	353
59	634	37	344
58	615	36	336
57	595	35	327
56	577	34	319
55	560	33	311
54	543	32	301
53	525	31	294
52	512	30	286
51	496	29	279

50	481	28	271
49	469	27	264
48	455	26	258
47	443	25	253
46	432	24	247
45	421	23	243
44	409	22	237
43	400	21	236
42	390	20	236
41	381	18	219
40	371	16	212
39	362	14	203

Fonte: (Vera, 2018, Adaptado).

Segundo o autor (Bayer, 2013) a resistência de um metal à deformação plástica pode ser estimada tanto pelo limite de resistência à tração como pela dureza. Assim, existe uma relação de proporção entre os valores de dureza e do limite de resistência à tração para materiais metálicos. Para os aços a relação de proporção é dada pela expressão:

$$\sigma = k * HB \left[\frac{Kgf}{mm^2} \right] \quad (1)$$

Onde:

k : É uma constante, a qual deve-se utilizar o valor de 3,6 para aços carbono e 3,4 para aços carbono tratados termicamente.

HB: Dureza Brinell.

3. METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Para a realização deste trabalho foram obtidos cinco corpos de prova do aço SAE 1045 mediante o uso de um policorte.

Foram utilizados também um forno JUNG para a realização dos tratamentos térmicos, um durômetro para ensaio de dureza, uma lixadeira politriz para preparação dos corpos de prova e um microscópio invertido para ensaio metalográfico, estes disponíveis no laboratório de metalografia do Centro Universitário Assis Gurgacz.

Para se obter o resultado desejado no ensaio metalográfico foram utilizadas lixas d'água com granulometria de grão de 120 até 1200, alumina em suspensão 1 um, lubrificante Diapol, e Nital 2% para ataque químico nos corpos de prova.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 PREPARAÇÃO CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova do aço SAE 1045 foram cortados mediante o uso de um policorte PanTec, sempre tomando cuidado para não queimar a peça, como na Figura 8, os quais eram dotados de formato cilíndrico com dimensões de 25,4 mm de diâmetro e 25,4 mm de altura, objetivando facilitar o manuseio dos corpos de prova durante a preparação. Cada corpo de prova foi enumerado, para seu respectivo meio de resfriamento, sendo 1 para óleo, 2 para água e 3 para salmoura, como na Figura 9.

Figura 8: Policorte Pantec utilizado para corte dos corpos de prova.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 9: Corpos de prova utilizados nos tratamentos térmicos.



Fonte: Autor, 2018.

3.2.2 TRATAMENTOS TÉRMICO

Em seguida foi executado o tratamento térmico de normalização das peças em um forno JUNG, como na Figura 10, a uma temperatura de 870 °C, as quais foram mantidas por 65 minutos a essa temperatura, objetivando obter uma microestrutura homogênea e refinada, em substituição a uma microestrutura grosseira original.

Figura 10: Forno JUNG utilizado nos tratamentos térmicos.



Fonte: Autor, 2018.

Seguido da normalização foi realizado o tratamento térmico de tempera das peças, a uma temperatura de 870°C , as quais foram mantidas a essa temperatura por 65 minutos, para a completa homogeneização do corpo de prova. Após esse processo as peças foram submetidas ao resfriamento em água, salmoura e óleo. Esse tratamento resulta em uma microestrutura martensita, com elevada dureza e fragilidade.

Seguido da tempera, as peças foram submetidas ao tratamento térmico de revenimento, à uma temperatura de 200°C , por 65 minutos, com o objetivo de aliviar as tensões causadas durante a etapa de tempera.

3.2.3 PREPARAÇÃO PARA METALOGRAFIA E ENSAIO DE DUREZA

Posteriormente as peças foram preparadas para os ensaios de dureza e metalografia, onde foram lixadas em uma lixadeira politriz, como na Figura 11, com lixas d'água de granulometria de grão 120 até 1200, e posteriormente polidos com alumina em suspensão 1 um, e lubrificante Diapol. Por último as peças foram atacadas em banho químico de nital 2% por 30 segundos, para tornar possível a visualização das estruturas formadas.

Figura 11: Lixadeira politriz utilizada para preparar os corpos de prova.



Fonte: Autor, 2018.

3.2.4 ENSAIO DE METALOGRAFIA E DUREZA

Após a preparação, as peças foram submetidas ao ensaio de metalografia, utilizando um microscópio invertido, como na Figura 12, para avaliação das microestruturas formadas.

Figura 12: Microscópio invertido PanTec utilizado no ensaio metalografico.



Fonte: Autor, 2018.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

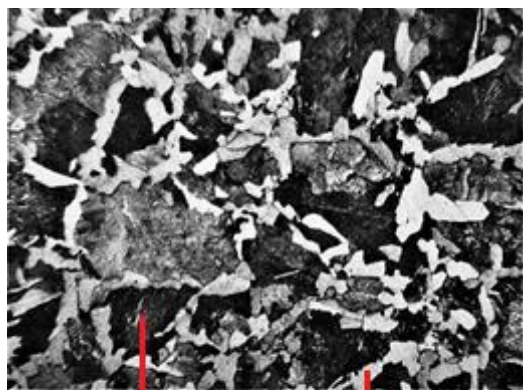
4.1 ENSAIOS DE METALOGRAFIA

Na sequência, figuras da metalografia dos corpos de prova, todas elas realizadas em um microscópio invertido com ampliação de 400x.

A Figura 14 mostra a micrografia do aço SAE 1045 no seu estado inicial, como recebido, na qual é possível observar a matriz ferrítica (parte clara), e os grãos de perlita, a parte escura.

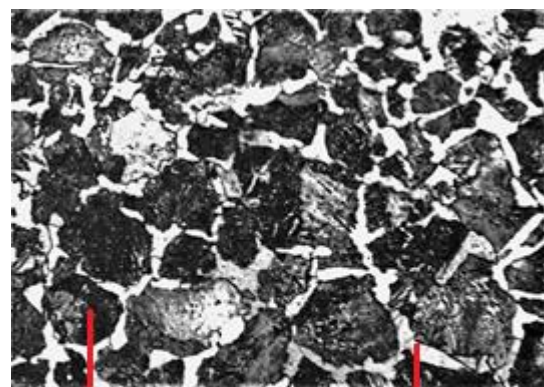
A Figura 15 apresenta a micrografia do aço SAE 1045 após o tratamento térmico de normalização, o qual o objetivou refinar e homogeneizar a microestrutura. Observa-se que a estrutura resultante é de pequenos grãos de perlita e ferrita fina, tipicamente encontradas em aço normalizado.

Figura 14: Metalografia aço como adquirido. Figura 15: Metalografia aço Normalizado



Grãos de perlita. Matriz ferrítica

Fonte: Autor, 2018.



Grãos de perlita. Matriz ferrítica.

Fonte: Autor, 2018.

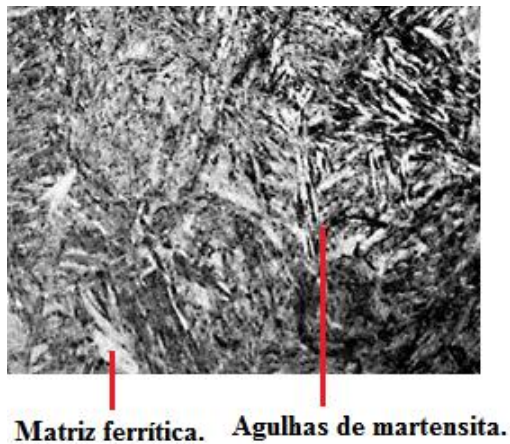
Na sequência da normalização, foi realizado a tempera em três diferentes meios de resfriamento, óleo, água e salmoura como nas Figuras a seguir.

Figura 16: Metalografia Tempera em óleo.



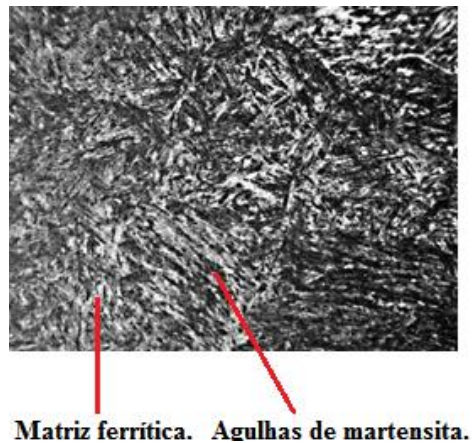
Fonte: Autor, 2018.

Figura 17: Metalografia Tempera em água.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 18: Metalografia Tempera em salmoura.



Fonte: Autor, 2018.

A Figura 16 apresenta a micrografia do aço SAE 1045 temperado em óleo, o qual apresentou uma leve formação de agulhas martensita entre grãos de perlita em uma matriz ferrítica. Esse é o meio de resfriamento menos severo quando comparado com água e salmoura, resultando em pouca quantidade de martensita, o que implica em uma menor dureza.

A Figura 17 verifica-se a formação de agulhas de martensita mais intensa dispersas em uma matriz ferrítica, consequência do meio de resfriamento em água, porém em menor quantidade quando se comparado ao resfriamento em salmoura, e mais presente do que ao resfriamento no óleo.

Por último a Figura 18, apresenta uma intensa formação de agulhas de martensita, decorrentes do meio de resfriamento mais severo de salmoura, lhe conferindo uma dureza elevada quando comparada com outros meios de resfriamento, como esperado.

4.2 ENSAIOS DE DUREZA

O ensaio de dureza em conjunto com as micrografias, verifica-se um aumento de resistência mecânica e refino dos microconstituintes formados, indicando o sucesso obtido através dos tratamentos térmicos.

Dentre os meios de resfriamentos testados no processo de tempera, o que apresentou maior aumento de dureza foi o resfriamento em salmoura, o que já era esperado, devido à intensa formação de martensita por consequência do meio severo de resfriamento observado no ensaio metalográfico, o qual atingiu uma dureza de 57,15 HRC.

Em seguida, muito próximo ao resfriamento anterior, verifica-se a tempera com resfriamento em água, onde também houve a formação de martensita, com menos intensidade, apesar de ser um meio de resfriamento severo, a dureza se manteve abaixo do resfriamento em salmoura, atingindo 55,10 HRC.

E por último o resfriamento em óleo, o qual é o meio menos severo dos meios de resfriamento, atingiu 26,42 HRC

Com o objetivo de facilitar a visualização, todas as respectivas durezas obtidas em Rockwell C foram convertidas para dureza Brinell através da interpolação utilizando a Tabela 1 para conversão das durezas.

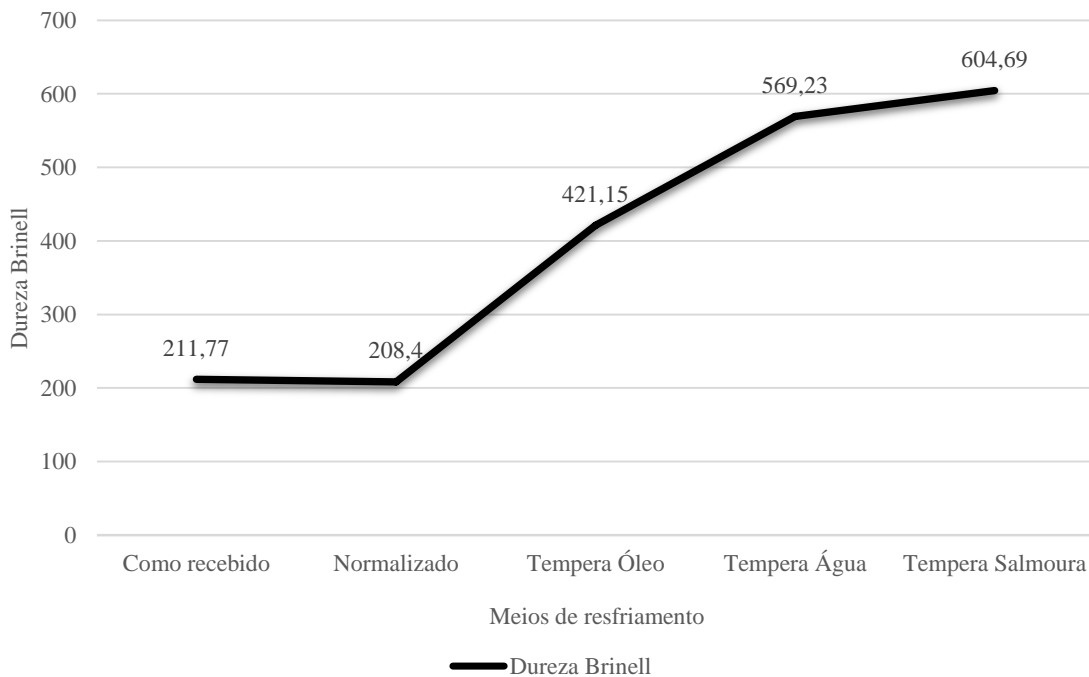
Tabela 2: Resultado ensaio de Dureza

Tipo de Tratamento Térmico	Dureza Rockwell C	Dureza Brinell
Sem Tratamento	15,95 HRC	211,77 HB
Normalizado	15,20 HRC	208,40 HB
Tempera óleo	26,42 HRC	421,15 HB
Tempera água	55,10 HRC	569,23 HB
Tempera salmoura	57,15 HRC	604,69 HB

Fonte: Autor, 2018.

Figura 19 representa um gráfico que demonstra através de uma curva a variação da dureza obtida de cada corpo de prova, expondo o aumento de dureza obtido entre as sem tratamento térmico, normalizadas, e temperadas em três diferentes meios de resfriamentos seguidas de revenimento.

Figura 19: Dureza Brinell x Meio de resfriamento



Fonte: Autor, 2018.

A fim de estipular valores para resistência à tração, foi utilizado uma relação empírica entre dureza Brinell e o limite de resistência, que permite converter a dureza em tensão, apesar de não ser necessariamente precisa.

$$\sigma = k * HB \left[\frac{Kgf}{mm^2} \right] \quad (1)$$

Onde:

k : É uma constante, a qual deve-se utilizar o valor de 3,6 para aços carbono e 3,4 para aços carbono tratados termicamente.

HB: Dureza Brinell.

Tabela 3: Limite de Resistência estimado

Tipo de Tratamento térmico	Limite de Resistência estimado ($\frac{Kgf}{mm^2}$)
Sem tratamento	762,37
Normalizado	750,24
Tempera em óleo	1431,91
Tempera em água	1935,38
Tempera em salmoura	2055,94

Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 3 apresenta valores apenas aproximados de limite de resistência, servindo apenas como uma abordagem estimativa, tal como é somente possível fazer esta estimativa admitindo-se que a dureza seja uma propriedade aditiva, o que na prática não ocorre.

Percebe-se através dos ensaios de dureza e metalografia que o comportamento do aço SAE 1045 quando submetido aos tratamentos térmicos realizados, demonstrou um resultado satisfatório. No melhor caso chegou a atingir 57,15 HRC, quando temperado em salmoura, uma dureza alta para um aço médio carbono.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este trabalho conclui-se que o aço SAE 1045 quando submetido aos tratamentos térmicos de têmpera e revenido, apresentou resultados positivos. Utilizando-se de ensaios metalográficos e de durezas foi possível avaliar as microestruturas formadas associando as durezas, para confirmar o resultado obtido.

A maior dureza foi obtida no resfriamento em salmoura, lhe conferindo 57,15 HRC, devido à intensa formação de agulhas de martensita, por consequência da severidade do meio de resfriamento, seguido pelo resfriamento em água, que apresentou uma dureza de 55,10 HRC decorrente também de uma alta formação de agulhas de martensita e por último a em óleo, o qual era o meio de resfriamento menos severo, apresentou uma baixíssima formação de martensita, lhe conferindo uma dureza de 26,42 HRC, sendo a menor dos meios de resfriamentos utilizados.

Através dos ensaios metalográficos pode a intensa presença de martensita nas amostras temperadas em salmoura e água, por este motivo lhes conferiram as durezas mais altas. Na amostra temperada em óleo é possível visualizar baixa formação de martensita entre grãos de perlita e matriz ferrítica, o que explica a redução de dureza quando comparada com os meios de resfriamento anteriores.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Para o seguimento desta pesquisa, pode-se realizar diferentes tratamentos térmicos dos que o abordado nesta pesquisa, objetivando atingir outras propriedades mecânicas.

- Também se pode avaliar o limite de resistência prático e através de um espectrômetro a composição química do aço. Ou até mesmo pode-se avaliar a temperabilidade do material através de um ensaio Jominy, que é designado para avaliar a temperabilidade de um aço.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbosa, F. (03 de Maio de 2011). Universidade Federal de Juiz de Fora. Fonte: Site da Universidade Federal de Juiz de Fora: <http://www.ufjf.br/lrm/files/2011/05/apostilalrm2011.pdf>

Callister, W. (2002). **Ciencia e engenharia de materiais**: uma Introdução . São Paulo: LTC.

Chiaverini, V. (1996). **Aços e Ferros fundidos**. São Paulo: ABM.

_____. (2003). **Tratamentos térmicos das ligas metálicas**. São Paulo: ABM.

Colpaert, H. (1974). **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São paulo: Edgard Blucher.

Favorit, A. (30 de 10 de 2018). **Aços Favorit**. Fonte: Favorit: http://www.favorit.com.br/sites/default/files/tabelas/acos_ferramentas_0.html

HUME-ROTHERY, W. (1968). **Estrutura das ligas de ferro**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda.

Jr, W. D. (2002). **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

Kerlinger, F. N. (1980). **Metodologia da Pesquisa em Ciências Sociais**. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária Ltda.

Menezes do Vale, A. R. (2011). **Tratamento Térmico**. Belem - PA: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia.

Rodrigues, L. E. (05 de Outubro de 2018). **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo**. Fonte: Site da Eng Brasil: <http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula3.pdf>

Vera, M. (15 de 10 de 2018). **MetalurgicaVera**. Fonte: MetalurgicaVera: <http://metalurgicavera.com.br/produtos/TABELA-DE-CONVERSAO-DE-DUREZAS.php>

