

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza

Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo

Curso de Tecnologia em Materiais

**RELAÇÃO ENTRE AS MICROESTRUTURAS E AS PROPRIEDADES  
DO AÇO SAE 1045 TRATADO TERMICAMENTE**

**Geovana Alves Sant'ana**

São Paulo

2018

Geovana Alves Sant'ana

**RELAÇÃO ENTRE AS MICROESTRUTURAS E AS PROPRIEDADES  
DO AÇO SAE 1045 TRATADO TERMICAMENTE**

Monografia apresentada como  
requisito para obtenção do título de  
Tecnóloga em Materiais pela Faculdade  
de Tecnologia de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Marcos  
Domingos Xavier

São Paulo

2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao meu professor Marcos Domingos Xavier, pelo apoio e incentivo que me deu desde quando o conheci e mostrei meu interesse pela área.

Aos professores Davinson Mariano da Silva e Luis Fernando Maffeis Martins, por terem aceitado o convite para a minha banca examinadora e pelo conhecimento que me repassaram. Também a todos os professores que se empenharam nessa missão, sem eles não seria possível a minha formação.

Ao Caio Rodrigues por todo auxílio que me foi dado.

Aos colegas que conheci nesse curso que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha trajetória.

A todos meus amigos e familiares. Em especial o meu pai, que nunca deixou que eu fraquejasse e me estimulou sempre a dar o melhor de mim para conquistar os meus sonhos e que, ao mesmo tempo, deu o melhor dele para que isso se tornasse possível.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a Deus por todas as oportunidades que me concede.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo associar as microestruturas do aço SAE 1045, após passar por diversos tratamentos térmicos, com as propriedades que este passou a apresentar. Para a obtenção desses resultados, o aço foi cortado em 9 amostras, sendo que uma delas ficou isenta de tratamentos térmicos, chamada de original, e todas as outras passaram por processos de aquecimento, encharque e cada uma por um método de resfriamento diferente, que será explicado ao decorrer do trabalho. Em seguida, as amostras passaram pelo processo de lixamento e polimento e, logo após, as mesmas sofreram um ataque químico a partir de um ácido que entrou em contato com a superfície de cada peça, causando a corrosão da mesma, para que fosse possível a identificação dos contornos de grão e as diferentes fases da microestrutura. Para essa última etapa, foram conduzidas ao Microscópio Óptico. Por fim foi realizado um ensaio destrutivo, conhecido como ensaio de dureza Rockwell. Assim, foi estudado e comprovado que, quanto menores os grãos, mais contornos existirão e, logo, maiores serão as durezas desses materiais, pois há então uma dificuldade na movimentação das discordâncias.

**Palavras-chave:** aço SAE 1045, tratamento térmico, propriedades mecânicas, microestruturas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama ferro-carbono para aço SAE 1045 .....	15
Figura 2: Transformação nos aços hipoeutetóides.....	18
Figura 3: Diagrama de uma liga Fe-C eutetóide.....	19
Figura 4: Diagrama de transformação isotérmica para um aço hipoeutetóide. ....	21
Figura 5: Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno .....	23
Figura 6: Diagrama esquemático de transformação para normalização .....	24
Figura 7: Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido.....	25
Figura 8: AÇO SAE 1045 .....	28
Figura 9: Máquina cortadora de amostras metalográficas PANCUT 80. Laboratório de Materiais de Construção Mecânica, Fatec-SP.....	29
Figura 10: Forno mufla FLYEVER. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP .....	30
Figura 11: Lixadeira de fita BALDAN LFH-2. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.....	31
Figura 12: Politriz Lixadeira Metalográfica PL 02 ET, com lixas (280, 400, 600). Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP .....	32
Figura 13: Politriz Lixadeira Metalográfica PL 02 ET, com pano de polir. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP .....	32
Figura 14: Nital 2%.....	33
Figura 15: Microscópio óptico, ZEISS AXIO. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.....	34
Figura 16: Durometro Heket, modelo HPO. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.....	35
Figura 17: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra original. A) Aumento de 100x. B) Aumento de 200x.....	36
Figura 18: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra recozida. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x.....	37
Figura 19: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra normalizada. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x.....	38
Figura 20: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra temperada a água. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x .....	39

Figura 21: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra revenida a 100°C. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x .....	40
Figura 22: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra revenida a 300°C. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x .....	40
Figura 23: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra revenida a 500°C. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x .....	41
Figura 24: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra revenida a 700°C. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x. ....	42
Figura 25: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra esferoidizada. A) Aumento de 100x. B) Aumento de 500x.....	42
Figura 26: Comparação micrográfica de amostras recozidas. A) Micrografia obtida por autoria própria (aço SAE 1045). B) Micrografia retirada da literatura para um aço SAE 1040. Ambas com aumento de 200x.....	47
Figura 27: Comparação micrográfica de amostras normalizadas. A) Micrografia obtida por autoria própria. B) Micrografia retirada da literatura. Ambas de aço SAE 1045, com aumento de 500x .....	48
Figura 28: Comparação micrográfica de amostras temperadas. A) Micrografia obtida por autoria própria. B) Micrografia retirada da literatura. Ambas de aço SAE 1045, com aumento de 500x.....	48
Figura 29: Comparação micrográfica de amostras esferoidizadas. A) Micrografia obtida por autoria própria (aço SAE 1045). B) Micrografia retirada da literatura para um aço SAE 1040. Ambas com aumento de 100x.....	49

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Gráfico comparativo de durezas Rockwell A, de um aço SAE 1045, de acordo com seus tratamentos térmicos. Fonte: Acervo pessoal. ....44

Gráfico 2: Gráfico da curva de revenimento de um aço SAE 1045, de acordo com as suas diversas temperaturas de revenimento. Fonte: Acervo pessoal.....45

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Faixa de temperatura permitida para cada tratamento térmico .....	22
Quadro 2: Dureza Rockwell A de um aço SAE 1045, depois de passar por seus respectivos tratamentos térmicos.....	43
Quadro 3: Dureza Rockwell C de um aço SAE 1045, depois de passar por seus respectivos tratamentos térmicos.....	43

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**CCC** – Cúbica de Corpo Centrado

**CFC** – Cúbica de Face Centrada

**HCP** – Hexagonal Compacta

**SAE** – Society of Automotive Engineers

**TTT** – Tempo-Temperatura-Transformação

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
2.1 AÇO .....	13
2.2 DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO FERRO-CARBONO .....	14
2.3 DIAGRAMA TRANSFORMAÇÃO-TEMPO-TEMPERATURA .....	19
2.4 TRATAMENTOS TÉRMICOS .....	21
2.4.2 Normalização .....	24
2.4.4 Revenimento .....	26
2.4.5 Esferoidização .....	27
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	28
3.1 AÇO SAE 1045 .....	28
3.2 CORTE .....	29
3.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS .....	30
3.4 LIXAMENTO .....	31
3.5 POLIMENTO .....	32
3.6 ATAQUE QUÍMICO .....	33
3.7 MICROSCOPIA ÓPTICA .....	34
<b>4 RESULTADOS</b> .....	36
4.1 MICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA .....	36
4.1.1 Amostra Original .....	36
4.1.2 Amostra Recozida .....	37
4.1.3 Amostra Normalizada .....	38
4.1.4 Amostra Temperada .....	38
4.1.5 Amostra Revenida a 100°C .....	39
4.1.6 Amostra Revenida a 300°C .....	40

4.1.7 Amostra Revenida a 500°C .....	41
4.1.8 Amostra Revenida a 700°C .....	41
4.1.9 Amostra Esferoidizada.....	42
4.2 DUREZAS ROCKWELL A .....	43
4.3 DUREZAS ROCKWELL C .....	43
4.4 GRÁFICO COMPARATIVO DE DUREZAS POR TRATAMENTOS TÉRMICOS .....	44
4.5 CURVA DE REVENIMENTO – ROCKWELL A.....	45
<b>5 DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
5.1 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA .....	46
5.1.1 Microestruturas e Propriedades.....	46
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>50</b>
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a pré-história o aço tem uma importante utilidade, e essa dimensão tem se tornado cada vez maior. Com uma boa combinação de resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo, fica fácil compreender a sua importância e a extensão de suas aplicações em diversas áreas.

Um aspecto importante dos aços é que a sua maioria é trabalhável e, ao passar por tratamentos térmicos, podem alcançar propriedades adequadas para cada tipo de aplicação desejada. Isso se torna mais fácil de ser compreendido com os estudos.

Há uma relação bastante significativa entre as microestruturas e as propriedades mecânicas dos aços. A compreensão e quantificação dos efeitos microestruturais sobre as propriedades mecânicas destes metais é o caminho para o desenvolvimento de produtos cada vez melhores, tornando possível atender de maneira econômica aos requisitos cada vez mais severos impostos pelos seus usuários.

É certo dizer que através da dureza – característica esta que pode ser definida como uma medida que estima o quanto um material sólido resiste a deformações permanentes quando uma força é aplicada nele – é possível relacioná-la à todas as outras propriedades. Essa prática se faz através de ensaios destrutivos de dureza, que pode ser determinada com o auxílio de máquinas, que apresentam diferentes métodos e escalas, relacionando a amplitude de penetração com um valor numérico considerado propriedade dureza. Alguns dos métodos mais utilizados são Brinell, Vickers e Rockwell.

A partir da comparação dos valores de dureza – nesse caso utilizado o tipo Rockwell A – obtidos em amostras submetidas aos tratamentos térmicos de recozimento, normalização, têmpera, revenimento e esferoidização, tem-se como objetivo entender como esses tratamentos influenciam nas propriedades mecânicas em questão, e até mesmo saber a qual tratamento deve-se submeter o aço de acordo com a aplicação desejada.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AÇO

Entende-se por aço a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais. Para ligas que contenham teores de carbono superiores a 2,11%, dá-se o nome de ferro fundido (CHIAVERINI, 1996, p.22).

Podem ser divididos em aço-carbono, que são os aços que contém apenas os elementos residuais resultantes dos seus processos de fabricação, e em aços-liga, que contém elementos de liga adicionais em teores acima dos que são considerados normais (CHIAVERINI, 1996, p.22).

Estudamos nesse trabalho sobre um aço-carbono. Ainda dentro dessa divisão, podem ser considerados aços de baixo teor de carbono, com C inferior a 0,2%, aços de médio teor de carbono, com C entre 0,2 a 0,5%, e aços de alto teor de carbono, com C acima de 0,5% (CHIAVERINI, 1996, p.22).

Vale ressaltar que trabalhamos com um aço-carbono de médio teor de carbono, uma vez que foi o utilizado o SAE 1045. De acordo com a norma ABNT NBR NM 87:2000, esse aço pode ser composto por 0,43% a 0,50% de carbono; 0,60 a 0,90% de manganês; máximo 0,03% de potássio e máximo 0,05% de enxofre.

## 2.2 DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO FERRO-CARBONO

Os diagramas de fases ou diagramas de equilíbrio, como também são conhecidos, têm como finalidade mostrar alterações de estado físico e de estrutura que sofrem as ligas metálicas, em decorrência de aquecimentos ou resfriamentos lentos.

Um dos diagramas mais estudados entre as ligas metálicas presentes na atualidade, é o Ferro-Carbono, fato facilmente explicado já que os aços carbono, além de serem os materiais metálicos mais utilizados pelo homem, apresentam variadas e interessantes transformações no estado sólido.

A maior parte dos metais apresenta, à pressão ambiente (1 atm), uma única estrutura cristalina, estável desde a temperatura ambiente até seu ponto de fusão. As estruturas de ocorrência mais comum são as estruturas compactas CFC (cúbica de face centrada) e HCP (hexagonal compacta) e a estrutura não-compacta CCC (cúbica de corpo centrado) (COLPAERT, 2008).

O ferro é excepcional, neste aspecto, e apresenta polimorfismo, isto é, apresenta duas estruturas cristalinas à pressão ambiente, dependendo da temperatura. A baixas temperaturas (até 910°C) o ferro tem a estrutura CCC. Acima desta temperatura, a estrutura CFC se torna mais estável. Ainda acima de 1394°C, a estrutura CCC volta a ser estável até o ponto de fusão do ferro (1535°C). Assim, as diferentes fases do ferro são estáveis em diferentes faixas de temperatura e de pressão (COLPAERT, 2008).

Para um melhor entendimento sobre as variações da estrutura e do teor de carbono, será explicado um pouco mais sobre o diagrama Ferro-Carbono.

Analisando o diagrama, deve-se perceber alguns pontos essenciais para seu entendimento básico (figura 1).

O ponto A corresponde ao ponto de fusão do ferro puro, isto é, 1538°C, e o ponto D, ainda impreciso, ao ponto de fusão do  $\text{Fe}_3\text{C}$  (figura 1). Ainda no ponto A, mostra-se uma reação de natureza especial, chamada peritética, a qual, entretanto, não apresenta qualquer importância comercial. Abaixo dessa

temperatura, o ferro cristaliza de acordo com um reticulado cúbico centrado e a forma alotrópica é chamada “delta” ( $\delta$ ).

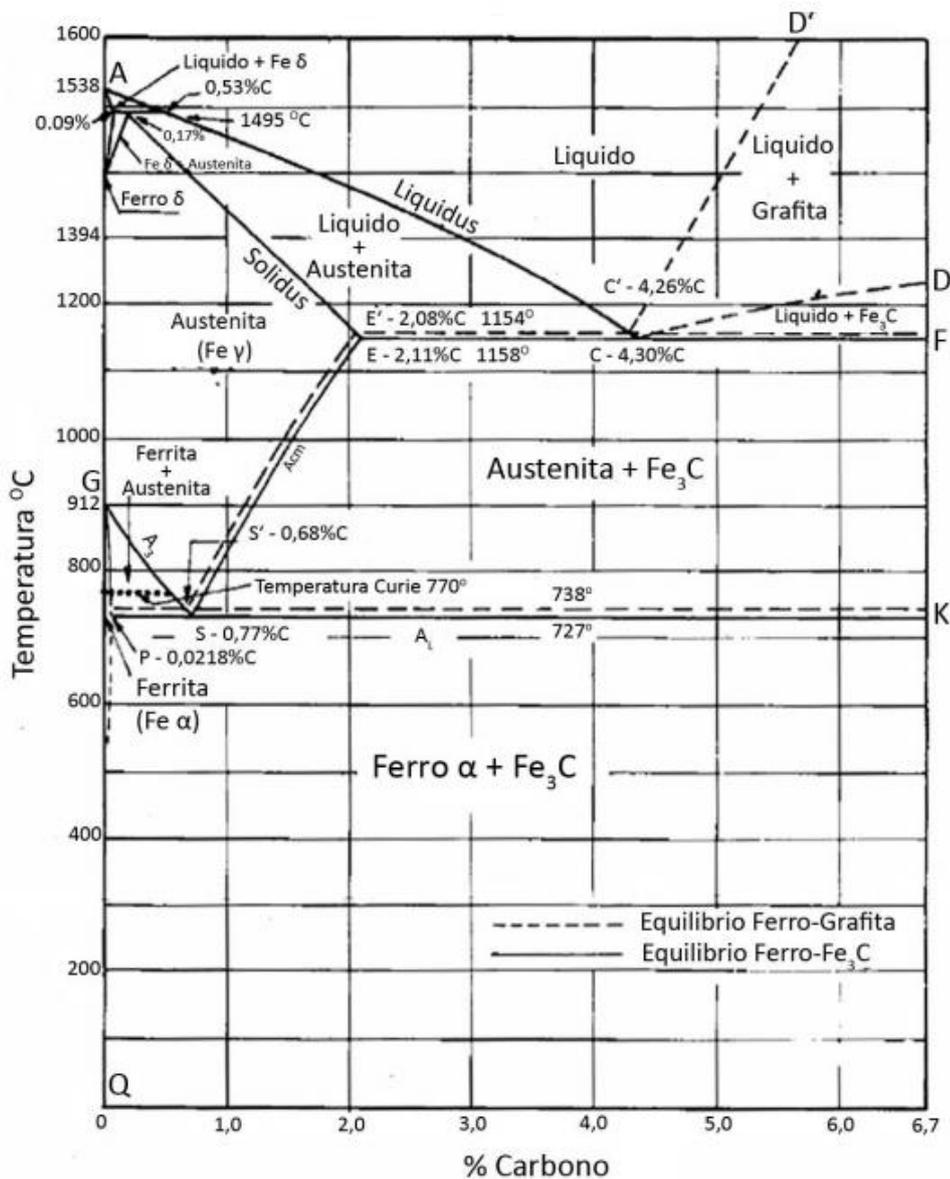


Figura 1: Diagrama ferro-carbono para aço SAE 1045.  
Fonte: Chiaverini (1996).

Destacando alguns pontos importantes do diagrama, como pode ser visto na figura 1, tem-se:

- Limite de solubilidade: limite máximo de um soluto que pode ser dissolvido em um solvente para formar uma solução sólida. A adição de soluto em excesso a esse limite resulta na formação de uma outra solução sólida.
- O limite inferior a 0,008% corresponde à máxima solubilidade do carbono no ferro à temperatura ambiente.
- O limite superior 2,11% corresponde à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro e que ocorre a 1158°C.
- Linhas Líquidus: acima da linha liquidus temos somente constituintes no estado líquido.
- Linha sólidos: abaixo da linha sólidos temos apenas constituintes no estado sólido.
- Linha A1 – indica a ocorrência de uma parada durante a transformação. Assim, ao transformar um aço enquanto a transformação gama em alfa + cementita não se completar, a temperatura permanecerá constante.
- Linha A3 – indica a temperatura de transformação gama em alfa.
- Linha Acm – indica a temperatura de transformação de gama em cementita.
- Chama-se zona crítica a região de transição entre a austenita e a região de ferrita + cementita. Esta região é representada no diagrama como a faixa de temperatura entre as linhas A1 e A3 ou A1 e Acm.
- As linhas que limitam o início e o fim das transformações são chamadas de linhas de transformações e elas limitam as zonas chamadas zonas críticas.
- Ponto peritético: onde 1 sólido + 1 líquido se transforma em 1 sólido.  
Ferrita delta + líquido → austenita.
- Ponto eutético: ponto de fusão, onde 1 líquido se transforma em 2 sólidos.  
Líquido → cementita + austenita.

- Ponto eutetóide: ponto mais baixo de transformação sólida, onde 1 sólido se transforma em 2 sólidos.

Austenita → ferrita + cementita.

Para um maior entendimento sobre os últimos dois pontos citados acima, daremos ênfase agora ao pontos C, na parte superior do diagrama, a 1148°C, onde tem-se a indicação da presença de uma liga eutética, com 4,3% de carbono, sendo este chamado de ponto eutético, e ao ponto S, com 0,77% de carbono, chamado de ponto eutetóide.

Como visto, no ponto S, a 0,77%, tem-se a transformação eutetóide. Entre 0,008 a 0,77%, acontecem as transformações hipoeutetóides e, acima de 0,77 até 2,11%, têm-se as transformações hipereutetóides (CHIAVERINI, 1996, p.25).

- Campo ferrítico (fase  $\alpha$ ) – Campo correspondente à solução sólida de carbono no ferro  $\alpha$ , nesse campo a estrutura atômica é cúbica de corpo centrado.
- Campo austenítico (fase  $\gamma$ ) – Campo correspondente à solução sólida de carbono no ferro  $\gamma$ , nesse campo a estrutura atômica é cúbica de face centrada.
- Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) – Microconstituente composto de ferro e carbono. Esse carboneto forma-se quando o limite de solubilidade do carbono é ultrapassado (6,7% de C) e apresenta elevada dureza, estrutura atômica ortorrômbica.
- Perlita: é uma combinação de ferro ( $\alpha$ ) e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

Como o aço em estudo se trata de um SAE 1045 (hipoeutetóide), será focado em sua composição o exemplo a seguir:

A aproximadamente 1000°C, a microestrutura consistirá inteiramente em grãos da fase  $\gamma$ . Ao resfriar até uma temperatura de 800°C e que se encontra dentro da região  $\alpha + \gamma$ , essas duas fases coexistirão.

A maioria das pequenas partículas  $\alpha$  se formará ao longo dos contornos originais dos grãos de  $\gamma$ . Enquanto se resfria uma liga através da região  $\alpha + \gamma$ , a austenita vai tornando-se ligeiramente mais rica em carbono.

Continuando o resfriamento, porém ainda na região  $\alpha + \gamma$ , uma proporção maior da fase  $\alpha$  será produzida. Neste ponto a fase  $\alpha$  conterá 0,025% de C e a fase  $\gamma$  terá a composição do eutetóide.

Abaixo da temperatura do eutetóide, toda a fase  $\gamma$  se transformará em perlita. Não existirá qualquer alteração na fase  $\alpha$  produzida antes da temperatura do eutetóide e estará presente como uma fase matriz contínua ao redor das colônias de perlita.

A ferrita estará presente tanto na perlita como na fase que se formou enquanto se resfriava antes da temperatura do eutetóide. A ferrita que está presente na perlita é chamada ferrita eutetóide e a ferrita que se formou antes da temperatura do eutetóide é chamada ferrita proeutetóide.

É possível ter uma noção básica de como são as microestruturas descritas acima através da figura 2.

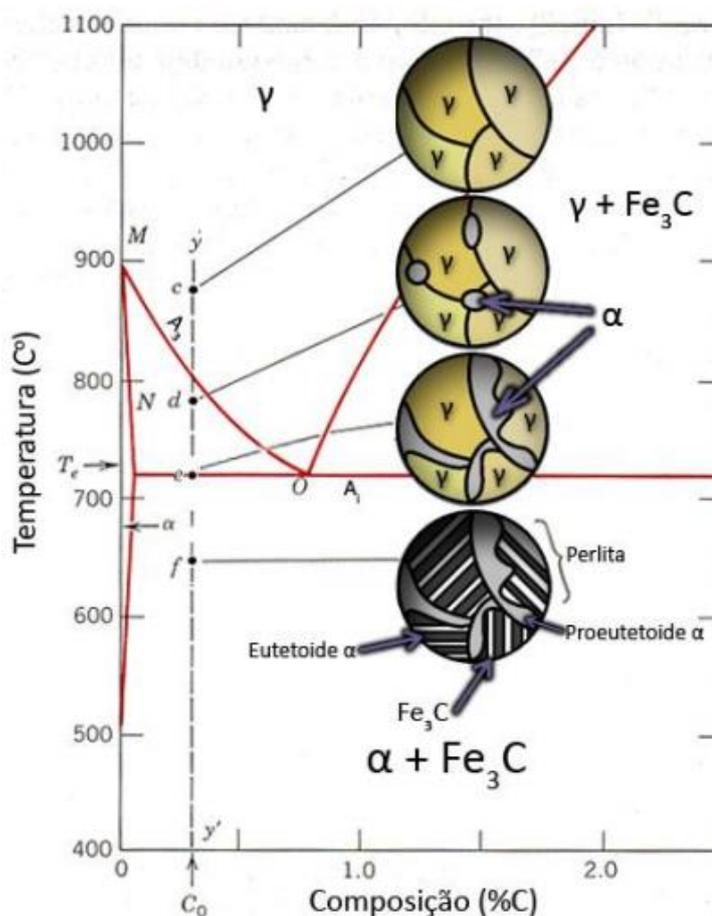


Figura 2: Transformação nos aços hipoeutetóides. Fonte: Callister (2002).

### 2.3 DIAGRAMA TRANSFORMAÇÃO-TEMPO-TEMPERATURA

Deve-se ressaltar que o diagrama Fe-C é um diagrama dependente somente da temperatura e da porcentagem de carbono, e as transformações microestruturais que ocorrem sob aquecimento e resfriamento lentos são transformações ditas de equilíbrio. Para transformações rápidas o suficiente a ponto de evitar as transformações de equilíbrio estuda-se um diagrama distinto, o diagrama TTT (tempo-temperatura-transformação).

Esse é um diagrama que serve para as curvas TTT estabelecerem a temperatura e o tempo em que ocorre uma determinada transformação.

Para um melhor entendimento, usaremos o diagrama de transformação isotérmica de um aço eutetóide (ver figura 3).

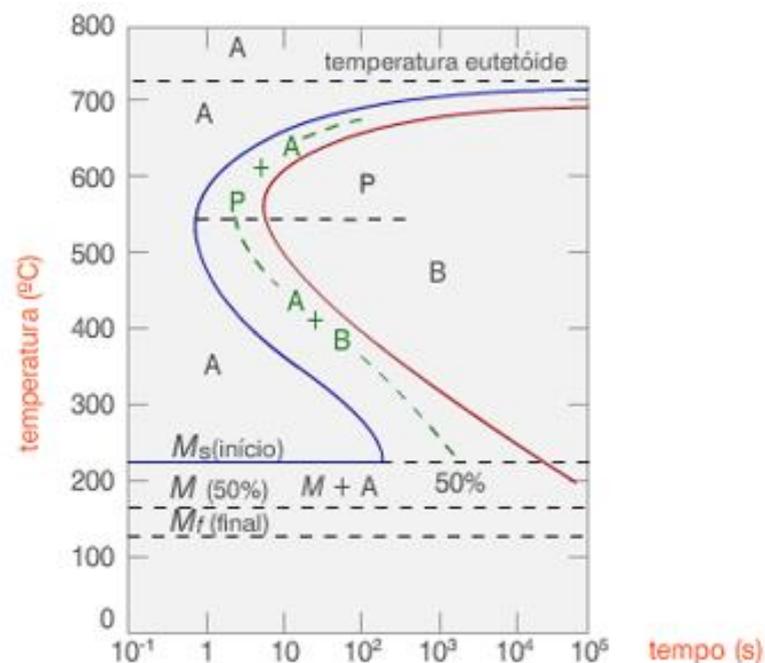


Figura 3: Diagrama de uma liga Fe-C eutetóide. Fonte: Ciência dos materiais multimídia.

Diferentemente do diagrama de equilíbrio, a curva TTT considera o fator tempo. Isso significa que o aço passará por transformações de acordo com o tempo em que permanecer em determinada temperatura.

O diagrama é composto por dois eixos vertical e horizontal que representam, respectivamente, a temperatura e o logaritmo do tempo e por três principais curvas, sendo que uma representa o tempo necessário a cada temperatura para o início da transformação, e a outra representa a conclusão da transformação. A curva tracejada corresponde a um estado de 50% da transformada.

Na figura 3, A é austenita; B é bainita; M é martensita; P é perlita.

Além disso, o diagrama também é composto por linhas tracejadas na horizontal, que representam a microestrutura que será obtida à certa temperatura e tempo.

A temperatura eutetóide ( $727^{\circ}\text{C}$ ) é indicada por uma linha horizontal tracejada e acima dessa temperatura apenas a austenita estará presente. À esquerda da curva que representa o início da transformação, também apenas a austenita estará presente, só que essa austenita é instável (CHIAVERINI, 1996, p.47).

Em temperaturas imediatamente abaixo da eutetóide são produzidas camadas relativamente grossas, tanto para a ferrita quanto para a cementita devido ao fato de as taxas de difusão serem relativamente altas. Dessa forma, os átomos de carbono podem se difundir ao longo de distâncias relativamente longas. A estrutura é conhecida como perlita grosseira. Com a diminuição da temperatura, a taxa de difusão do carbono também diminui, e as camadas se tornam progressivamente mais finas. A estrutura é conhecida como perlita fina.

Entre  $300$  e  $540^{\circ}\text{C}$  tem-se bainita superior, que é uma série de ripas paralelas (tiras finas e estreitas) ou agulhas de ferrita separadas por partículas alongadas de cementita. Já entre  $200$  e  $300^{\circ}\text{C}$  tem-se bainita inferior, cuja mesma se caracteriza por ferrita na forma de placas finas, sendo que partículas estreitas de cementita (forma de bastões ou lâminas muito finas) se formam no interior das placas de ferrita.

A aproximadamente  $230^{\circ}\text{C}$  tem-se o início da transformação martensítica.

E, já que esse trabalho se trata de um aço hipoeutetóide, na figura 4 pode-se observar o seu diagrama TTT.

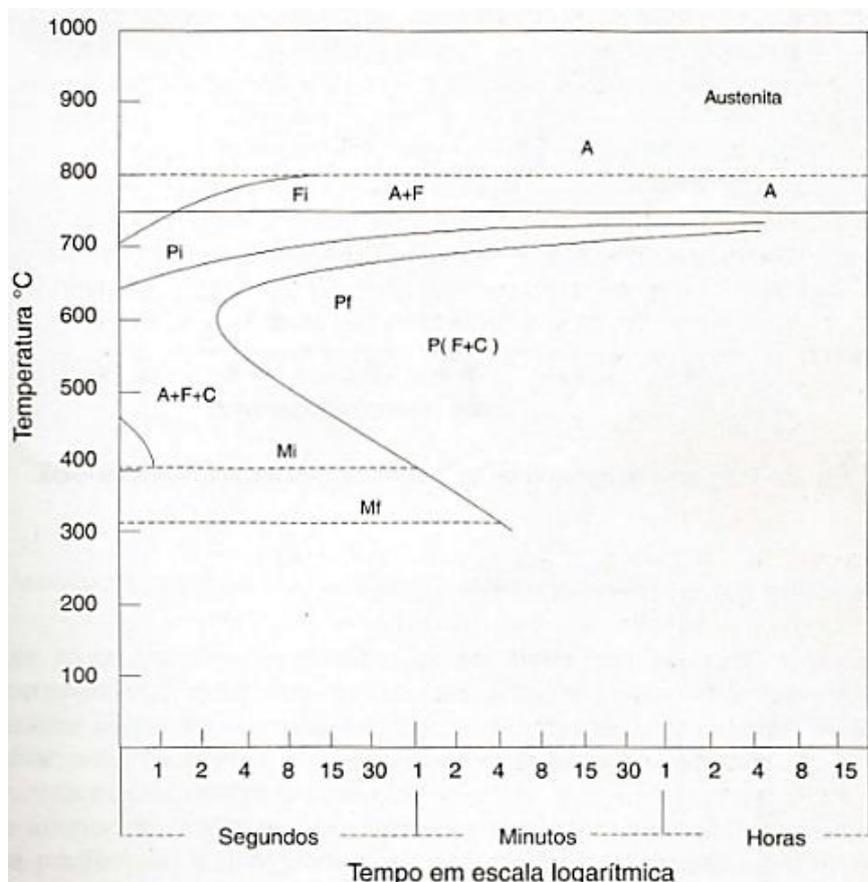


Figura 4: Diagrama de transformação isotérmica para um aço hipoeutetóide.  
Fonte: Chiaverini (1996).

## 2.4 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Como a definição de tratamentos térmicos, temos:

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinados (CHIAVERINI, 1996, p.82).

Sendo que alguns de seus principais objetivos são melhorias na ductilidade, assim como aumento ou diminuição da dureza e remoção de tensões.

Os fatores de influência nos tratamentos térmicos são: aquecimento, tempo de permanência à temperatura de aquecimento e resfriamento.

O aquecimento é realizado a uma temperatura acima da crítica, porque então tem-se completa austenitização do aço, ou seja, total dissolução do carboneto de ferro no gama: essa austenitização é [...] o ponto de partida para as transformações posteriores desejadas, as quais processarão em função da velocidade de esfriamento adotada (CHIAVERINI, 1996, p.83)

Para cada tratamento, tem-se uma faixa de temperatura fixa determinada pela natureza do processo para o mesmo ser realizado (vide quadro 1).

*Quadro 1: Faixa de temperatura permitida para cada tratamento térmico. Fonte: Villares Indústrias de Base SA.*

<b>Tratamento térmico</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
Normalização	840 - 870
Recozimento	790 - 870
Têmpera	800 - 840
Revenimento	100 / 300 / 500 / 700

Como pode-se observar, 840°C foi uma temperatura em comum entre todos os tratamentos (com exceção do revenimento, pois teve o objetivo de ser realizado a diferentes temperaturas, as quais foram citadas na tabela) e, pela praticidade de poder aquecer todas as amostras juntas, foi então a temperatura utilizada.

Já para o tempo de permanência, é recomendada 1 hora de forno por polegada de espessura da peça, tempo este contado quando o forno atingir a temperatura desejada. É importante obedecer ao tempo para que consiga realizar as modificações estruturais desejadas.

O resfriamento acaba sendo o fator mais importante, pelo fato de ser ele quem define a estrutura e as propriedades do aço. Pode ser feito em água, óleo, dentro do forno ou ao ar, isso quem determinará será o tratamento desejado.

### 2.4.1 Recozimento Pleno

De acordo com Chiaverini (1996, p.90), é um tratamento que consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica, ou seja, acima da linha superior de transformação A3 (aproximadamente 50°C acima), durante o tempo necessário e suficiente para ter-se a solução do carbono ou dos elementos de liga no ferro gama, seguido de resfriamento lento, que significa manter a amostra no interior do forno, ao desliga-lo, após o ciclo de aquecimento e deixa-la resfriando (ver figura 5).

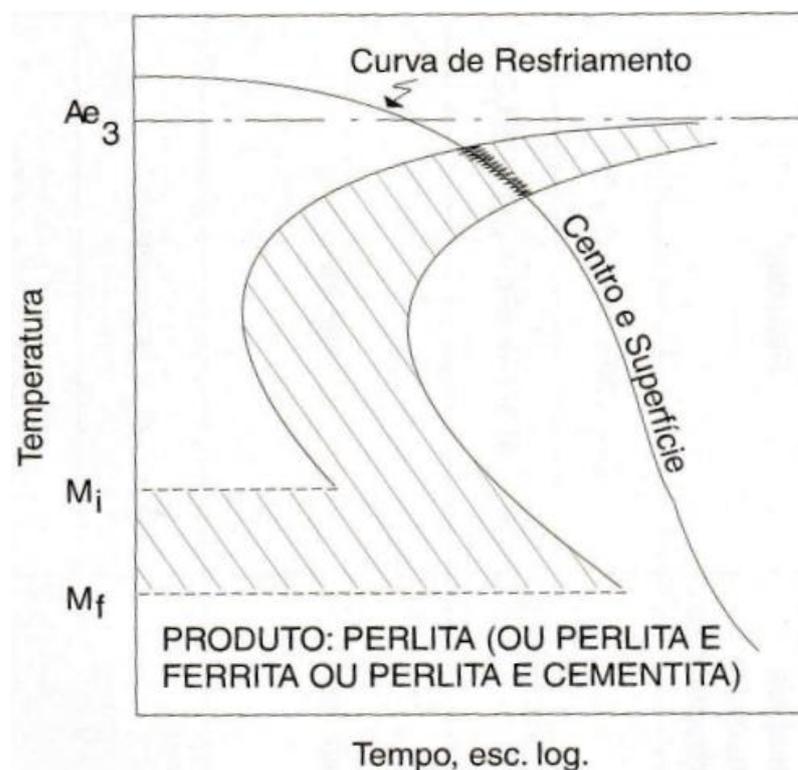


Figura 5: Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno.  
Fonte: Chiaverini (1996).

Esse tratamento térmico tem como objetivo: remover tensões e quaisquer efeitos provindos de tratamentos térmicos ou mecânicos a que o aço tiver sido submetido anteriormente, diminuir a dureza para melhorar a usabilidade do aço, ajustar o tamanho do grão, dentre outros (CHIAVERINI, 1996, p.87).

### 2.4.2 Normalização

Assim como pode ser visto na figura 6, que mostra o diagrama esquemático do tratamento térmico de normalização, esse é um tratamento que consiste no aquecimento do aço a uma temperatura acima da linha  $A_{c3}$ , no caso dos aços hipoeutetóides, seguido de resfriamento ao ar.

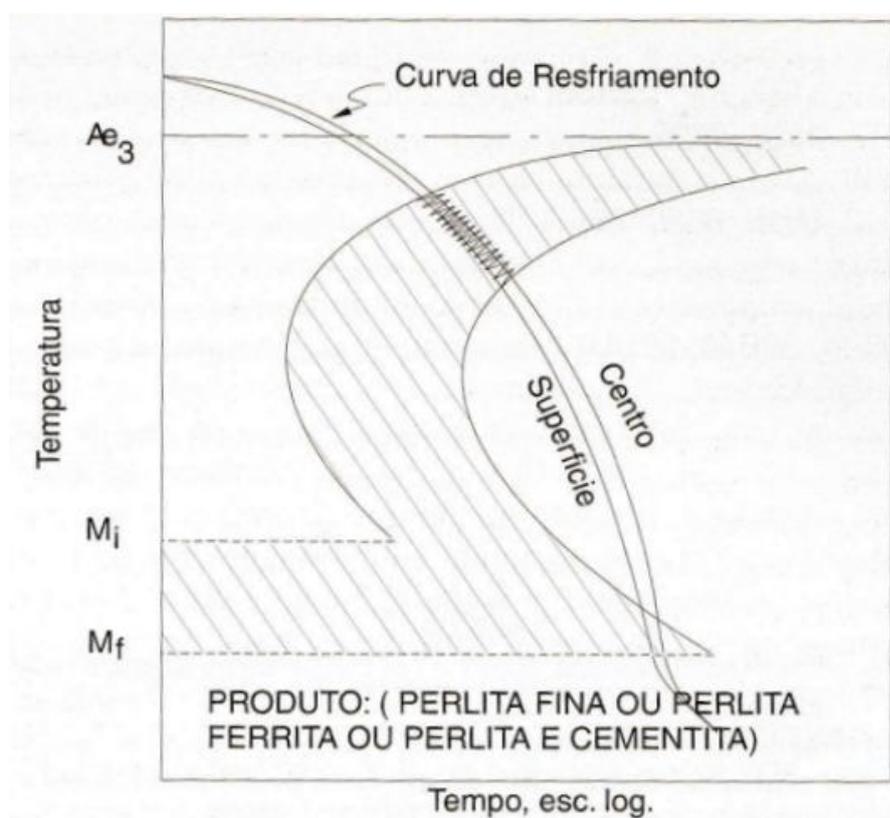


Figura 6: Diagrama esquemático de transformação para normalização.  
Fonte: Chiaverini (1996).

De acordo com CHIAVERINI (1996, p.99), esse tratamento tem como objetivo refinar a granulação grosseira de alguns aços. É usada como um tratamento preliminar à têmpera e ao revenido, em geral para produzir uma estrutura mais uniforme e facilitar a solução dos carbonetos e elementos de liga.

### 2.4.3 Têmpera

Conforme Chiaverini (1996, p.99), é um tratamento que consiste no aquecimento do aço até a sua temperatura de austenitização, seguido de resfriamento rápido (ver figura 7).

A rápida queda de temperatura aprisiona os átomos de carbono dentro da estrutura cristalina dos átomos de ferro antes que eles possam se dissipar para fora, resultando em uma ligeira distorção da forma destas estruturas, aumentando a dureza do aço.

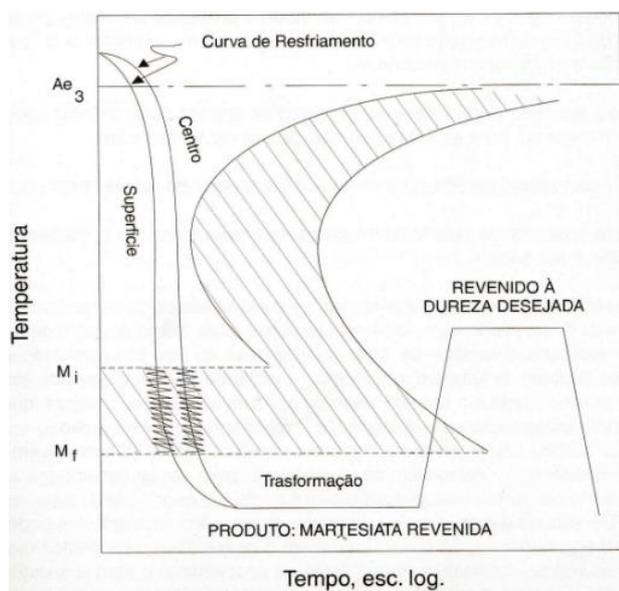


Figura 7: Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido.  
Fonte: Chiaverini (1996).

Os meios mais comuns de resfriamento são líquidos, como por exemplo a água, água contendo sal ou aditivos cáusticos, óleo podendo conter uma variedade de aditivos ou soluções aquosas de polímeros (CHIAVERINI, 1996, p.99).

Uma vez que a martensita é muito dura e resistente à tração, e esse é constituinte obtido na têmpera, percebe-se que alcançar essas propriedades é o principal objetivo desse tratamento (CHIAVERINI, 1996, p.99).

#### 2.4.4 Revenimento

De acordo com a figura 7, que esquematiza o diagrama de transformação da têmpera, percebe-se que esse é um tratamento que se trata do reaquecimento das peças temperadas a temperaturas abaixo da linha inferior de transformação do aço.

Conforme Chiaverini (1996, p.103), esse é o tratamento térmico que quase sempre acompanha a têmpera. Isso acontece pelo fato de esta produzir inconvenientes e tornar o material muito duro e frágil, então o revenimento tem como função eliminá-los e corrigi-los, respectivamente, aumentando sua ductilidade, e ainda aliviar ou remover as tensões internas.

Para cada faixa de temperatura de revenido, existe uma combinação de propriedades mecânicas. Destacarei as faixas das temperaturas utilizadas para a realização desse trabalho:

- Entre 100°C e 250°C: ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo épsilon, de fórmula  $Fe_{2-3}C$  (CHIAVERINI, 1996, p.106).
- Entre 200°C e 300°C: ocorre transformação de austenita em ferrita e cementita em aços-carbono de médio e alto teor de carbono (CHIAVERINI, 1996, p.106).
- Entre 400°C e 600°C: ocorre uma recuperação da subestrutura de discordâncias; os aglomerados de  $Fe_3C$  passam a uma forma esferoidal, ficando mantida uma estrutura de ferrita fina acicular (CHIAVERINI, 1996, p.106).
- Entre 600°C e 700°C: ocorre recristalização e crescimento do grão; a cementita precipitada apresenta a forma nitidamente esferoidal; a ferrita apresenta forma aqui-axial (CHIAVERINI, 1996, p.106).

#### 2.4.5 Esferoidização

É um tratamento que consiste no aquecimento do aço a uma temperatura inferior à zona crítica, ou seja, aproximadamente 727°C. Pode-se afirmar que seu período de aquecimento é longo, porém varia de acordo com o tamanho da peça. No caso do aquecimento do aço utilizado nesse trabalho, de acordo com o seu diâmetro, o tempo ideal é de 12 a 15 horas, aproximadamente.

No recozimento de esferoidização se objetiva alterar a distribuição dos carbonetos na microestrutura (principalmente aqueles presentes na perlita), transformando-os em pequenos glóbulos ou 'esferas, dispersos na matriz. Este tratamento não é, normalmente, acompanhado por transformação de fases. A força motriz para a transformação da microestrutura é a redução de área interfacial. A esfera é a forma geométrica de menor relação área/volume (COLPAERT, 2008, p. 258).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, as amostras utilizadas foram de um aço SAE 1045. Esse aço foi cortado em 9 amostras, sendo um deles o original, ou seja, que não passou por nenhum processo de tratamento térmico, e todos os outros passaram por diferentes processos, tais como têmpera, revenimento, recozimento, normalização e esferoidização. Para a remoção das rebarbas e de riscos mais profundos, passaram pela lixadeira. Subsequentemente, foram submetidas aos seus respectivos tratamentos térmicos. Após o resfriamento, as amostras foram polidas, atacadas quimicamente e então analisadas microscopicamente. Por fim, todas passaram pelo ensaio de dureza e tiveram suas medidas obtidas.

#### 3.1 AÇO SAE 1045

O aço utilizado para o desenvolvimento da monografia foi o SAE 1045, o mesmo que o da figura 8.

Não se pode dizer ao certo qual era a sua composição química pois não foi possível a análise no laboratório trabalhado.



Figura 8: AÇO SAE 1045. Fonte: Acervo pessoal.

### 3.2 CORTE

Inicialmente o aço passou por uma máquina para ser cortado em 5 partes, e então cada uma foi cortada ao meio, na seção longitudinal. No total foram utilizadas apenas 9 das 10 amostras, quantidade necessária para o número de tratamentos desejado, obedecendo, também, às dimensões adequadas. Foi utilizada a cortadora de amostras metalográficas PANCUT 80 (vide figura 9).



*Figura 9: Máquina cortadora de amostras metalográficas PANCUT 80. Laboratório de Materiais de Construção Mecânica, Fatec-SP. Fonte: Acervo pessoal.*

Esse processo consiste em fixar a amostra por um sistema de morsa dupla com acionamento interno e, então, a tampa com o seu visor é abaixada para que seja possível acompanhar o processo com proteção, sem isentar o uso dos óculos para uma proteção ainda maior. O corte é controlado por uma alavanca de ação lateral que desloca o disco abrasivo contra a amostra a ser cortada. Para evitar o aquecimento excessivo das amostras e alterar suas propriedades, a máquina conta com um sistema de refrigeração interno, que consiste na introdução de água com aditivo antioxidante refrigerante durante o momento do corte.

O diâmetro das amostras era de aproximadamente 8,5 mm.

### 3.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos, em geral, consistem no aquecimento, encharque e resfriamento da amostra. Para este trabalho foram feitos os seguintes tratamentos: recozimento, normalização, têmpera, revenimento a diferentes temperaturas (100°C, 300°C, 500°C, 700°C) e esferoidização, com o auxílio de um forno mufla, FLYEVER modelo FE50RPN, conforme mostra a figura 10.



*Figura 10: Forno mufla FLYEVER. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP. Fonte: Acervo pessoal.*

Na etapa do aquecimento, as amostras foram colocadas dentro do forno, com exceção da original, que não passou por nenhum tratamento, para passarem pelo processo de austenitização, no período de 1 hora à temperatura de 840°C. No resfriamento, cada amostra passou pelo seu respectivo processo. Para a amostra normalizada, seu resfriamento foi ao ar. Para a recozida, ao forno. Já para a temperada, à água. Algumas, ainda, depois de passarem pelo resfriamento de têmpera, foram submetidas ao forno de novo, para o processo de revenimento. Cada qual com a sua temperatura, conforme citada acima, pelo período de 1 hora também. No tratamento de esferoidização, o tempo no forno foi de 12 horas à uma temperatura de 727°C, e seu resfriamento foi feito no forno.

### 3.4 LIXAMENTO

Depois de tratadas, todas as amostras passaram pela lixadeira de fita BALDAN LFH-2 (vide figura 11), uma vez que sua alta granulação permite a remoção de cantos vivos, imperfeições superficiais mais aparentes e da carepa, que é uma camada de óxido que se forma durante aquecimento.



*Figura 11: Lixadeira de fita BALDAN LFH-2. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP. Fonte: Acervo pessoal.*

Na técnica de lixamento manual, como é comumente conhecida a etapa consequente, as amostras foram submetidas à lixas com granulometria cada vez menor, iniciando a #280, em seguida #400 e findando em #600, sendo que a cada troca de lixa se torna necessário girar as amostras num ângulo de 90° para garantir a remoção dos riscos anteriores, sempre com uso de água corrente. Esse processo foi realizado na máquina Politriz Lixadeira Metalográficas PL 02 ET (vide figura 12).



Figura 12: Politriz Lixadeira Metalográfica PL 02 ET, com lixas (280, 400, 600). Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP. Fonte: Acervo pessoal.

### 3.5 POLIMENTO

Subsequente ao lixamento, as amostras passam por um processo que visa um acabamento superficial polido e isento de marcas, para uma melhor visualização da sua superfície. Para a realização desse processo, utilizou-se a mesma máquina da etapa anterior, Politriz Lixadeira Metalográfica PL 02 ET (figura 13), discernindo apenas o pano utilizado, que é específico para polimento. Nesse processo também foi utilizada alumina em suspensão.



Figura 13: Politriz Lixadeira Metalográfica PL 02 ET, com pano de polir. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP. Fonte: Acervo pessoal.

### 3.6 ATAQUE QUÍMICO

Depois de assegurado de que todos os riscos e resíduos do óxido de alumina foram eliminados, foi feito o ataque químico com uma solução de nital a 2% (composto por 98 mL de ácido de etílico e 2 mL de ácido nítrico) (vide figura 14). Caso ainda houvesse qualquer risco, seria de extrema importância voltar à etapa de polimento ou até mesmo de lixamento, dependendo do seu tamanho e profundidade, para que isso não afetasse a visualização da microestrutura no microscópio.

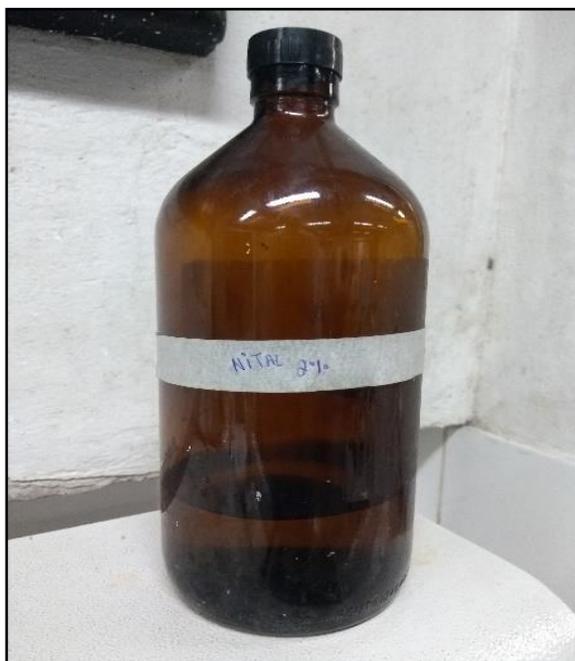


Figura 14: Nital 2%. Fonte: Acervo pessoal.

O Nital foi colocado em contato com a superfície polida das amostras por um processo de imersão, por um período de aproximadamente 10 segundos - tempo suficiente para causar a corrosão da superfície da amostra e permitir a identificação e visualização dos contornos de grãos e as diferentes fases na microestrutura.

Subsequente ao ataque químico, a amostra deve ser rigorosamente limpa para a remoção dos resíduos desse processo através de lavagem em água corrente e álcool, e posteriormente seca através de jato de ar quente.

### 3.7 MICROSCOPIA ÓPTICA

Depois de passarem pelos processos de lixamento, polimento e ataque químico, as amostras estavam devidamente preparadas e, então, foram analisadas no microscópio óptico, ZEISS AXIO (figura 15).



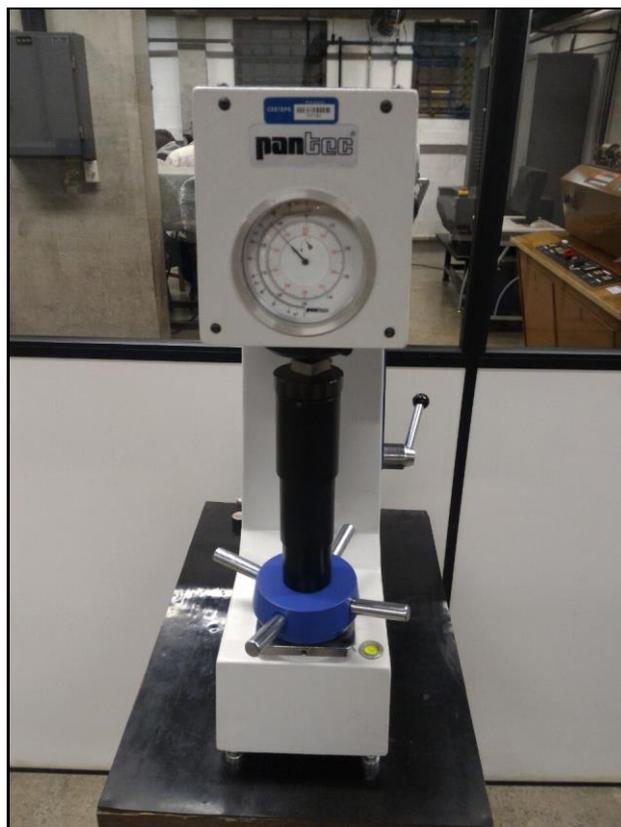
*Figura 15: Microscópio óptico, ZEISS AXIO. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP. Fonte: Acervo pessoal.*

Os aumentos utilizados foram de 200 e 500 vezes.

Foram capturadas imagens das melhores regiões da superfície analisada, para que ficasse registrada a microestrutura e, então, pudesse ser feita a discussão sobre o que foi visto.

### 3.8 ENSAIOS DE DUREZAS

Para a realização dos ensaios de dureza, tanto Rockwell A quanto Rockwell C, utilizou-se Durômetro Heket, modelo HPO (vide figura 16).



*Figura 16: Durometro Hecker, modelo HPO. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP. Fonte: Acervo pessoal.*

Os procedimentos realizados para a obtenção dos valores de dureza consistem primeiramente no devido posicionamento do corpo de prova sobre a mesa de apoio. Em seguida, foi necessário fazer uma liberação da pré-carga, no valor de 10kgf, pois é o que garante o contato eficaz do penetrador com a superfície a ser ensaiada. Subsequentemente, houve a aplicação da carga maior, que varia com o tipo de análise realizada. Para os ensaios Rockwell A, a carga aplicada foi de 60 kgf e, para Rockwell C, a carga foi de 150 kgf. Por fim essa carga é retirada e a profundidade da impressão é dada diretamente no mostrador, na forma de um valor de dureza, que é lido em uma escala apropriada ao penetrador e à carga utilizada.

O tipo de penetrador utilizado foi o diamante cone 120°, pois este atende as exigências para ambos os tipos de ensaio.

Em cada amostra foram realizados três ensaios de dureza Rockwell A e Rockwell C, para que fosse possível tirar uma média mais precisa sobre os valores obtidos.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 MICROGRAFIAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

#### 4.1.1 Amostra Original

Nas micrografias abaixo têm-se a primeira análise realizada, que aconteceu em uma amostra original. É possível observar nestas micrografias uma estrutura bandeada indicando o sentido da conformação mecânica que esta sofreu. Na figura 17-A percebemos uma granulação fina e bem definida, já com um aumento mais elevado (figura 17-B), tem-se a ampliação dos grãos que permite a observação da estrutura lamelar de ferrita e cementita, típica de constituintes perlíticos. As regiões claras aos redores dos grãos consistem em ferrita.

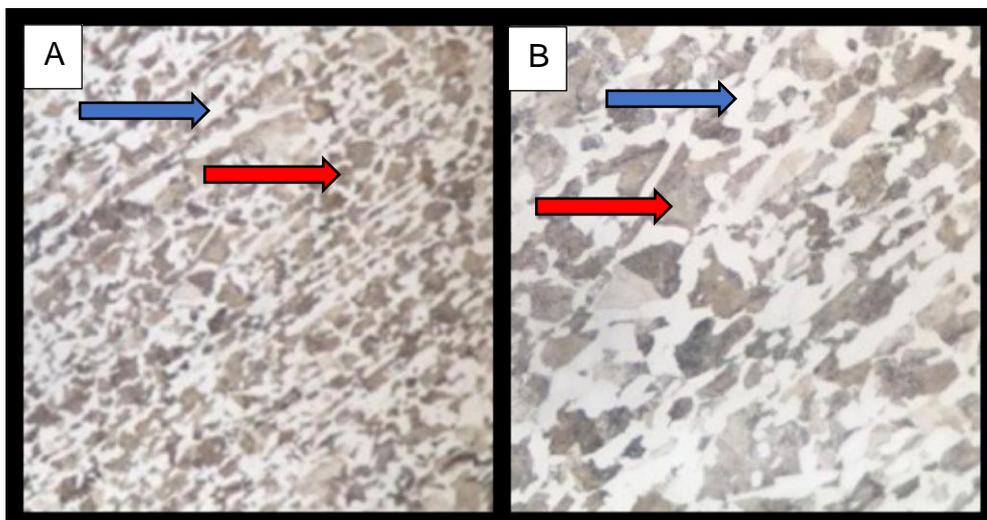


Figura 17: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra original. A) Aumento de 100x. B) Aumento de 200x. Fonte: Acervo pessoal.

Legenda:

■ Grãos de perlita.

■ Ferrita.

#### 4.1.2 Amostra Recozida

Nessa segunda micrografia, temos a microestrutura da amostra recozida, que passou por um resfriamento ao forno. Isso explica seu aspecto parecido com o da amostra original, diferenciando-as pelo tamanho dos grãos, cujo na recozida houve um aumento.

Também é possível observar que a alumina, por ser um meio de polimento abrasivo, realmente causou em alguns pontos abrasão.

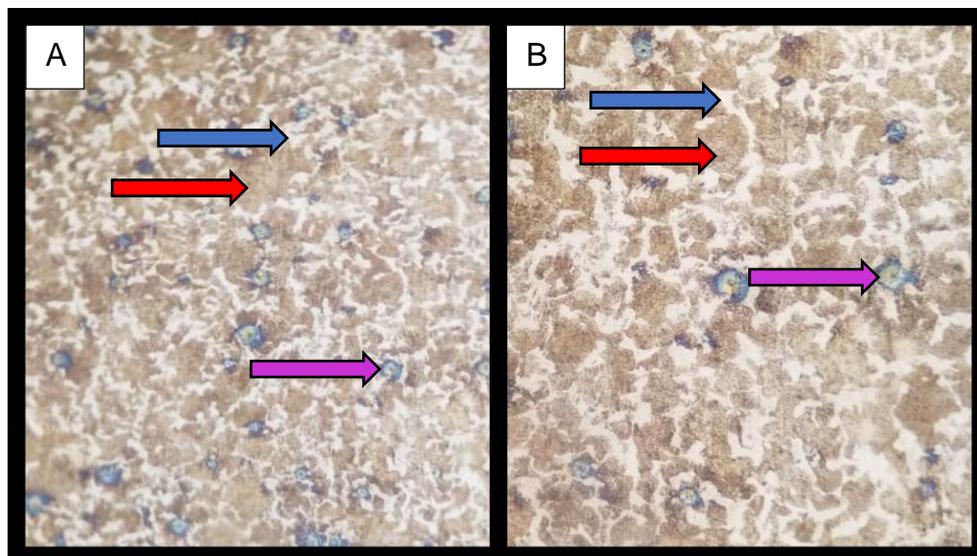


Figura 18: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra recozida. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x. Fonte: Acervo pessoal.

Legenda:

- Grãos de perlita.
- Ferrita.
- Efeitos da alumina.

#### 4.1.3 Amostra Normalizada

Já nessa micrografia observamos a microestrutura da amostra normalizada, que passou por um resfriamento ao ar livre.

Ainda um pouco parecida com a amostra original, observa-se uma estrutura com grãos, porém mais finos, de ferrita envolvendo perlita.

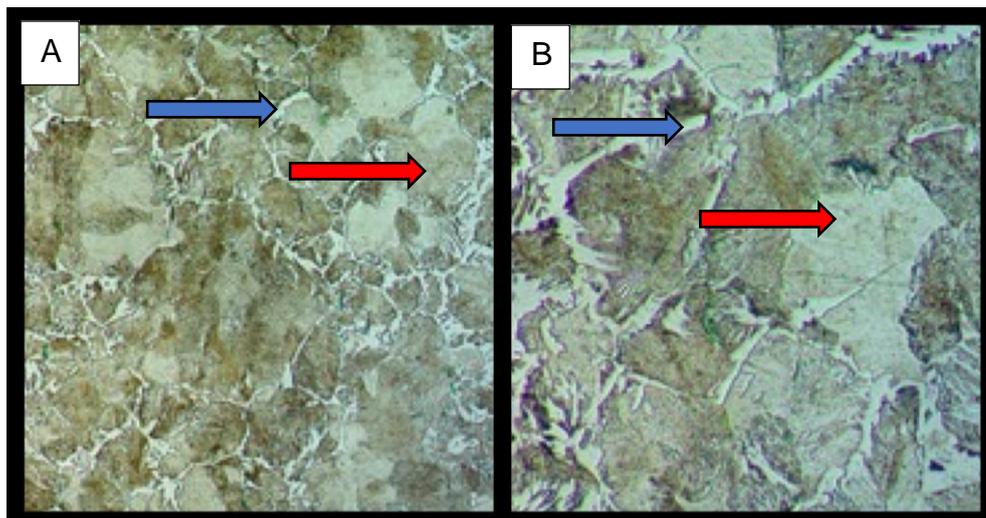


Figura 19: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra normalizada. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x. Fonte: Acervo pessoal.

Legenda:

■ Grãos finos de perlita.

■ Ferrita.

#### 4.1.4 Amostra Temperada

Para análise da micrografia da amostra temperada – amostra essa que passou um processo de resfriamento em água, obtivemos as seguintes microestruturas (figura 20-A e 20-B).

É possível observar martensita em ripas, isto é, mais ilhas claras de austenita retida.

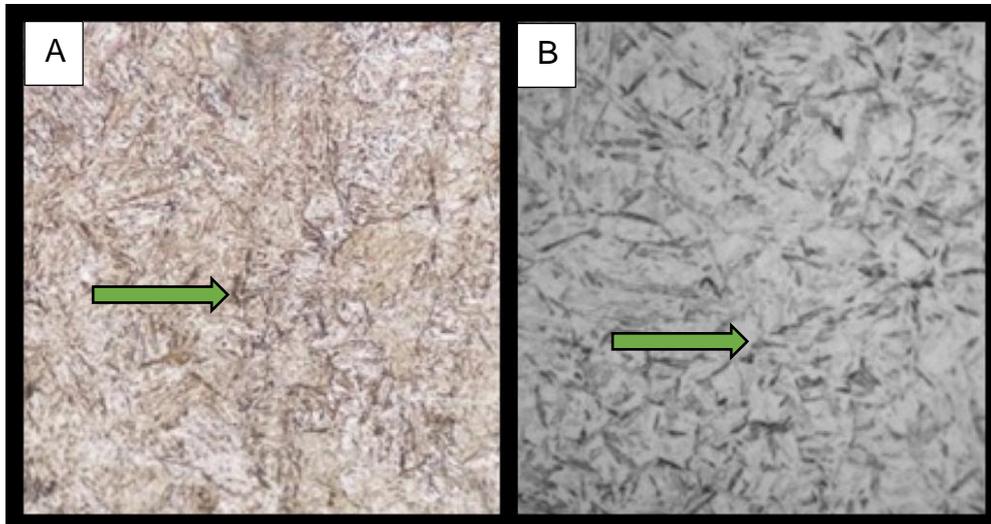


Figura 20: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra temperada a água. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x. Fonte: Acervo pessoal.

Legenda:

■ Agulhas de martensita.

#### 4.1.5 Amostra Revenida a 100°C

Todas as amostras que foram designadas para o tratamento de revenimento, depois de serem temperadas em água, passaram por um processo de reaquecimento, cada qual a uma temperatura diferente. Neste caso a 100°C (ver figura 21).

O que se pode observar pela micrografia obtida, é de uma microestrutura composta por martensita revenida, ou seja, com carbonetos precipitados e agulhas mais escuras. Porém, o aumento da temperatura causa o crescimento das agulhas de ferrita e a coalescência dos precipitados, e por esse motivo, conforme a temperatura aumenta, a tendência dessas agulhas é clarear.

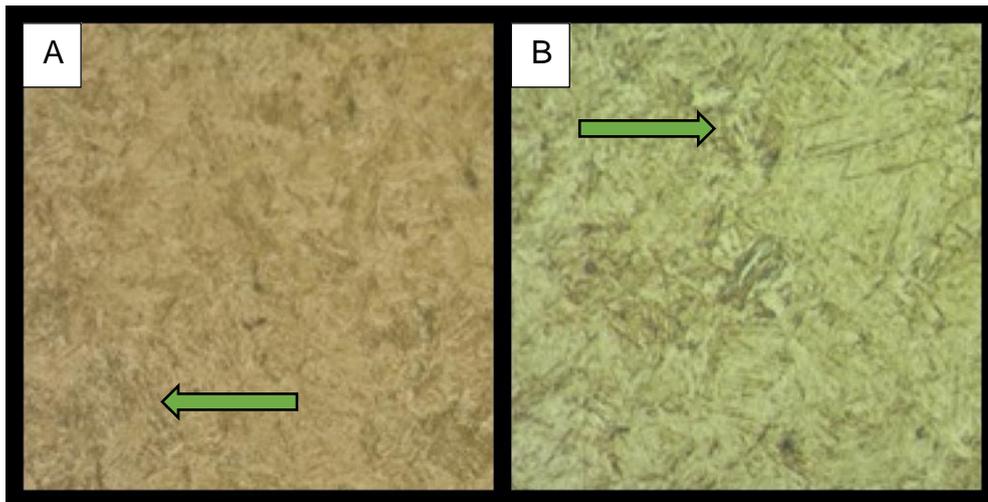


Figura 21: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra revenida a 100°C.  
A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x. Fonte: Acervo pessoal.

Legenda:

■ Agulhas de martensita revenida.

#### 4.1.6 Amostra Revenida a 300°C

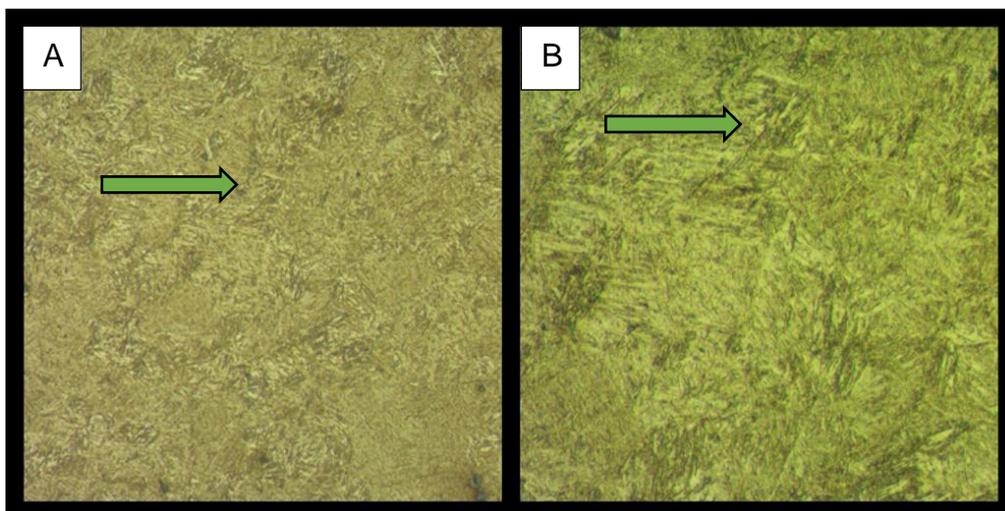


Figura 22: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra revenida a 300°C.  
A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x. Fonte: Acervo pessoal.

Legenda:

■ Agulhas de martensita revenida.

#### 4.1.7 Amostra Revenida a 500°C

Embora a literatura afirme que é permitido temperar um aço SAE 1045 em água, a microscopia desta amostra evidencia que a mesma pode trincar mesmo quando temperada nestas condições.

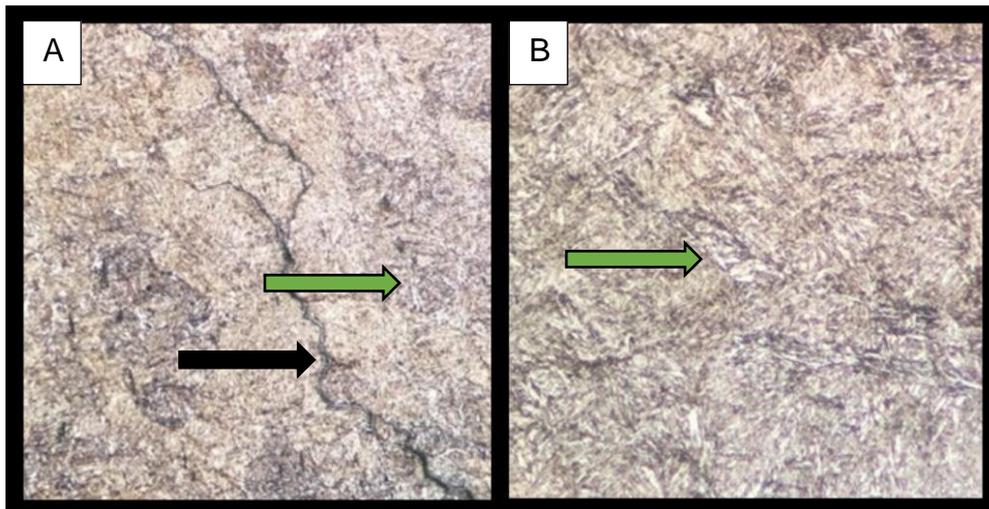


Figura 23: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra revenida a 500°C. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x. Fonte: Acervo pessoal.

Legenda:

■ Agulhas de martensita revenida.

■ Trinca do material.

#### 4.1.8 Amostra Revenida a 700°C

Já é possível perceber, mesmo que ainda faça parte do tratamento de revenimento, ou seja, que ainda possua em sua microestrutura martensita revenida, uma tendência à esferoidização (ver figura 24).

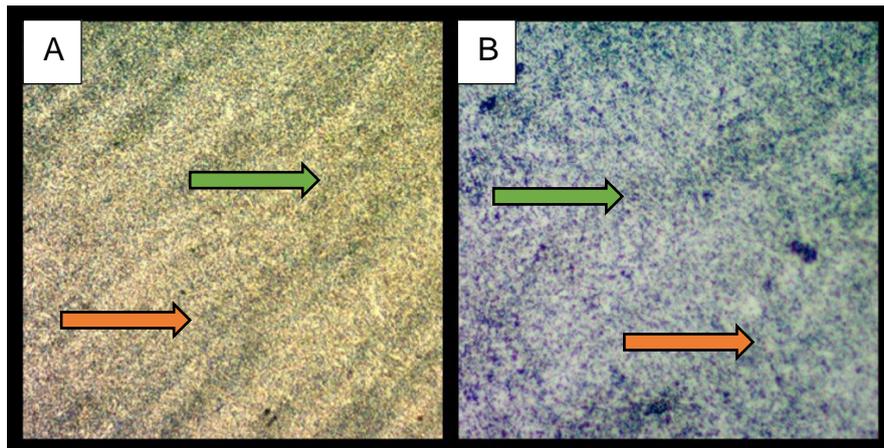


Figura 24: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra revenida a 700°C. A) Aumento de 200x. B) Aumento de 500x. Fonte: Acervo pessoal.

Legenda:

- Agulhas de martensita revenida.
- Tendência à esfeirodização da cementita.

#### 4.1.9 Amostra Esferoidizada

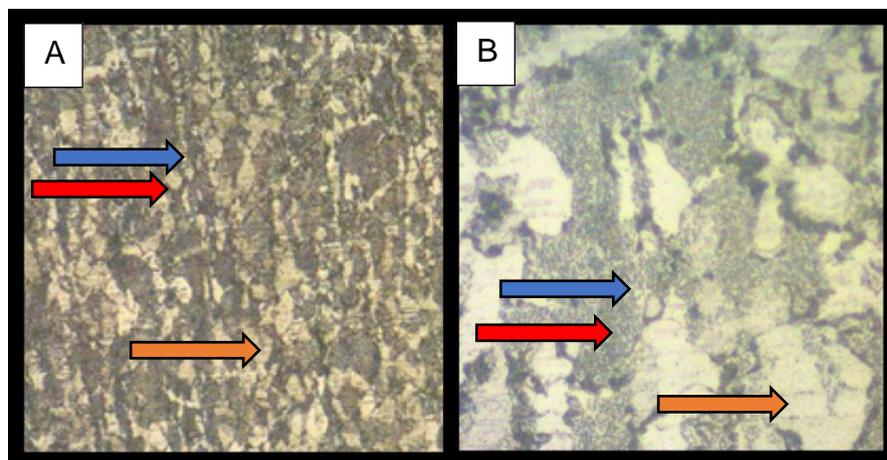


Figura 25: Micrografias obtidas por microscopia óptica. Aço SAE 1045 amostra esferoidizada. A) Aumento de 100x. B) Aumento de 500x. Fonte: Acervo pessoal.

Legenda:

- Grãos de perlita.
- Ferrita.
- Tendência à esfeirodização da cementita.

## 4.2 DUREZAS ROCKWELL A

Aqui tem-se os valores de dureza obtidos através do ensaio Rockwell, nesse caso para o tipo A, de acordo com seus respectivos tratamentos, uma vez que os valores de dureza representados graficamente são explicados através do tipo de tratamento térmico aplicado nas amostras.

Alguns pontos da tabela ficaram muito distantes e não contribuíram para a faixa de significância, por esse motivo foram descartados, para não prejudicarem o valor médio obtido.

*Quadro 2: Dureza Rockwell A de um aço SAE 1045, depois de passar por seus respectivos tratamentos térmicos. Fonte: Acervo pessoal.*

-	Original	Normalizada	Temperada	Recozida	Revenida a 100°C	Revenida a 300°C	Revenida a 500°C	Revenida a 700°C	Esferoidizada
Medida 1	54,5	44	75,5	31	68	64	58,5	43,5	40
Medida 2	54,5	-	73,5	37	68,5	66	56	47,5	45
Medida 3	50	49	76	34	-	68	55	48,5	41
Média	53	46,5	75	34	68,25	66	56,5	46,5	42
Desvio padrão	2,6	3,5	1,3	3	0,35	2	1,8	2,65	2,65

## 4.3 DUREZAS ROCKWELL C

*Quadro 3: Dureza Rockwell C de um aço SAE 1045, depois de passar por seus respectivos tratamentos térmicos. Fonte: Acervo pessoal.*

-	Original	Normalizada	Temperada	Recozida	Revenida a 100°C	Revenida a 300°C	Revenida a 500°C	Revenida a 700°C	Esferoidizada
Medida 1	25,5	2	58	70,5	54,5	35,5	29,5	3	55
Medida 2	26	3	55	66	54,5	36,5	34	4,5	65
Medida 3	25	2,5	55	52,5	54,5	33	31	6	57
Média	25,5	2,5	56	63	54,5	35	31,5	4,5	59

Vale lembrar que a faixa de utilização para Rockwell A é de 20 a 88 HRA, e Rockwell C de 20 a 70 HRC.

Então, como pode-se observar no quadro 3, algumas durezas que foram medidas em Rockwell C ficaram fora de escala, tais como as da amostra temperada e revenida a 700°C. Por esse motivo, analisaremos apenas as durezas Rockwell A, uma vez que todas obedecem à faixa de utilização.

#### 4.4 GRÁFICO COMPARATIVO DE DUREZAS POR TRATAMENTOS TÉRMICOS

Foi feito um gráfico de barras para melhor análise das durezas Rockwell A obtidas de acordo com seus respectivos tratamentos térmicos, como pode ser visto abaixo.

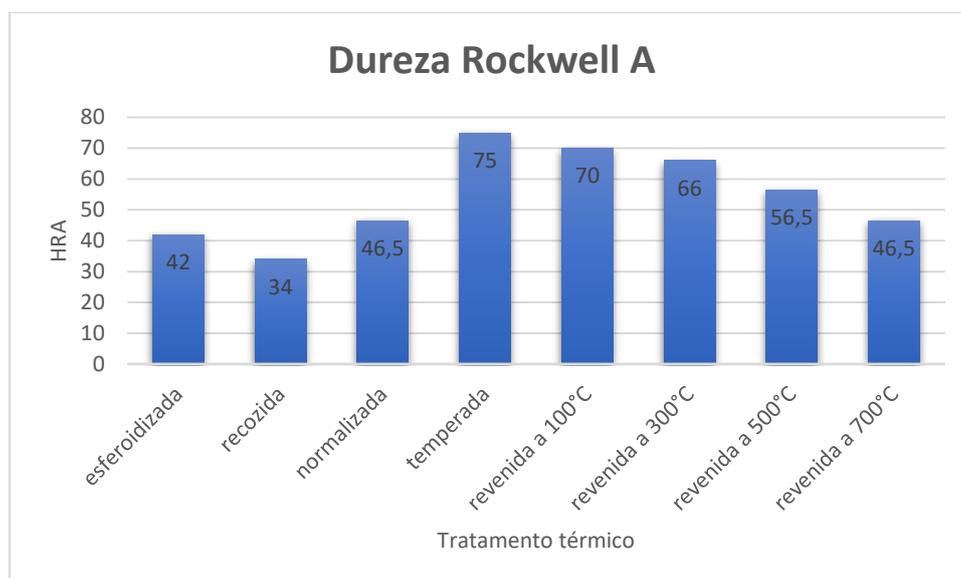


Gráfico 1: Gráfico comparativo de durezas Rockwell A, de um aço SAE 1045, de acordo com seus tratamentos térmicos. Fonte: Acervo pessoal.

#### 4.5 CURVA DE REVENIMENTO – ROCKWELL A

A partir dos dados obtidos foi feita uma curva de revenimento, marcando a dureza adquirida conforme a temperatura em que foi feita o revenimento (vide gráfico 2).

Essa curva tem como objetivo possibilitar que saibamos a qual temperatura o aço deve ser revenido para alcançar tal dureza. Dessa forma fica mais fácil conciliar a propriedade desejada com o tratamento térmico necessário.

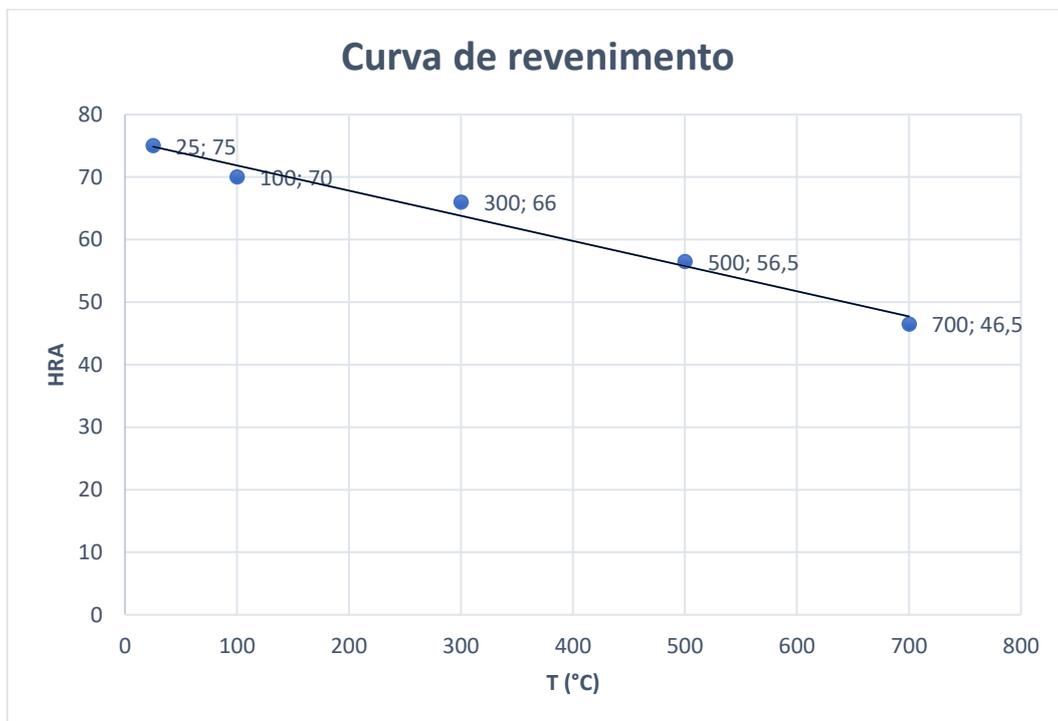


Gráfico 2: Gráfico da curva de revenimento de um aço SAE 1045, de acordo com as suas diversas temperaturas de revenimento. Fonte: Acervo pessoal.

Os pontos em azuis mostram os valores obtidos, sendo a linha traçada, uma linha de tendência.

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

Buscou-se neste trabalho validar todos os conceitos desenvolvidos e apresentados, portanto para isso achou-se coerente comparar os dados desta pesquisa com aqueles da literatura.

Então, para esse tópico, foram utilizadas micrografias encontradas na literatura de alguns livros e artigos, para que fosse possível comparar com os resultados obtidos nesse trabalho.

Não foi possível encontrar micrografias de todos os tipos de tratamentos para o aço SAE 1045, então, para alguns casos, utilizou-se do aço SAE 1040, uma vez que este possui uma composição química muito próxima do aço desejado. Ainda assim, houve uma certa dificuldade para obter todas as micrografias necessárias, por esse motivo a ausência destas em alguns tópicos, como por exemplo nas amostras revenidas.

#### 5.1.1 Microestruturas e Propriedades

##### *5.1.1.1 Amostra original*

A amostra original apresenta um fibramento mecânico que significa maior resistência mecânica na direção principal do mesmo.

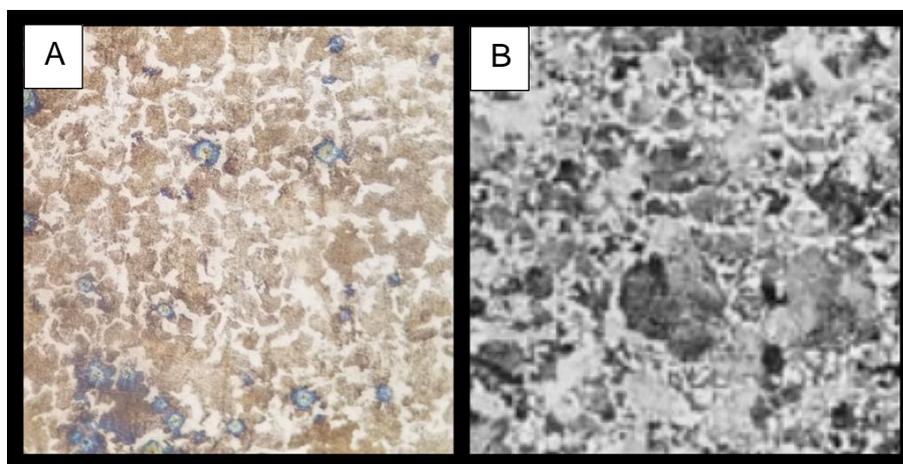
##### *5.1.1.2 Amostra recozida*

Usando os princípios da metalurgia física, o recozimento é um tratamento térmico que aumenta o tamanho dos grãos, portanto, gera menos contornos de grãos na microestrutura. Essa menor quantidade é uma

justificativa para a queda da dureza, visto que os contornos são barreiras para a movimentação de discordâncias.

De acordo com Chiaverini (1996, p.90) os constituintes estruturais que resultam do recozimento pleno são perlita grossa e ferrita. E, ao analisar as micrografias obtidas nesse trabalho, na figura 26, foi possível confirmar a presença destes constituintes.

Além da micrografia, a dureza em relação à amostra original também pode ser verificada como menor (vide gráfico 1, p.44), fazendo jus à literatura.



*Figura 26: Comparação micrográfica de amostras recozidas. A) Micrografia obtida por autoria própria (aço SAE 1045). B) Micrografia retirada da literatura para um aço SAE 1040. Ambas com aumento de 200x. Fonte: Metals Handbook (2004).*

### 5.1.1.3 Amostra normalizada

A normalização, de modo contrário, refina grãos, logo, gera mais contornos e, conseqüentemente, mais barreiras para a movimentação das discordâncias. Portanto apresenta maior dureza.

Comparando a micrografia da literatura com a obtida nesse trabalho, foi possível confirmar a presença de ferrita e perlita fina, e o refino dos grãos, se comparado ao tratamento de recozimento (vide figura 27).

Quando comparada à dureza, também pode-se verificar uma maior em relação à amostra recozida (vide gráfico 1, p.44).

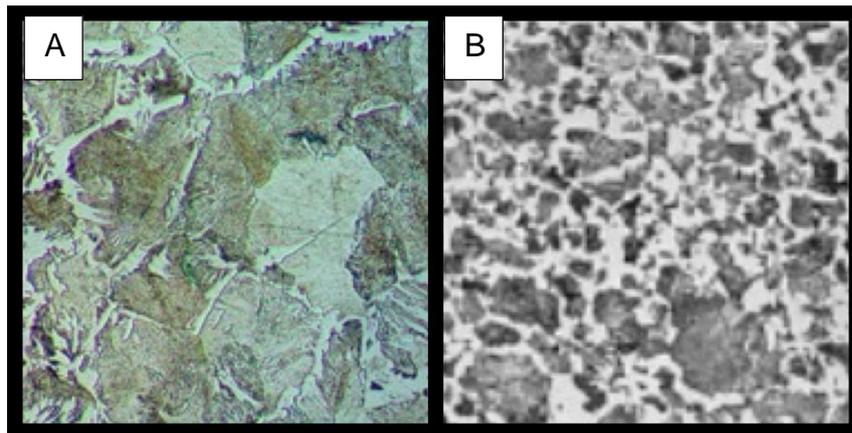


Figura 27: Comparação micrográfica de amostras normalizadas. A) Micrografia obtida por autoria própria. B) Micrografia retirada da literatura. Ambas de aço SAE 1045, com aumento de 500x. Fonte: *Metals Handbook* (2004).

#### 5.1.1.4 Amostra temperada

No caso do material temperado, tem-se a martensita, que é uma fase metaestável composta por ferro que está supersaturada com carbono. Portanto tem a presença de distorções, tensões residuais e discordâncias. Sendo esses alguns motivos para a dureza da martensita ser bem alta.

Na figura 28, ao comparar a micrografia das microestruturas obtidas na realização do trabalho com a micrografia da literatura, pode-se verificar em ambas a presença de martensita, que possui esse formato de agulhas.

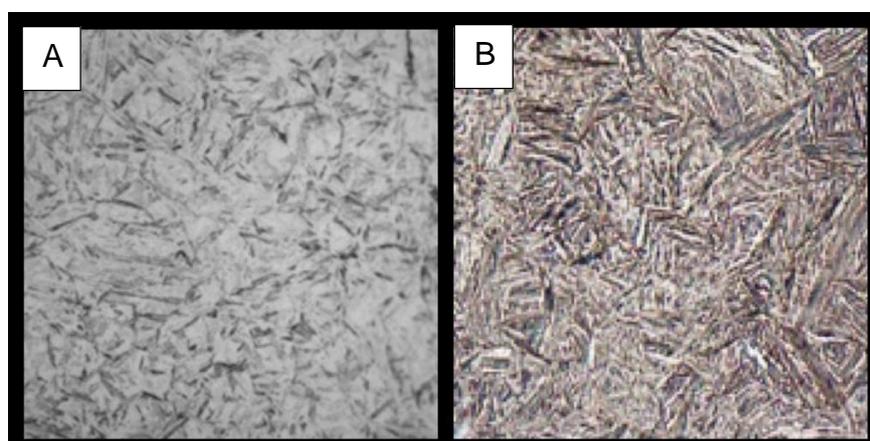


Figura 28: Comparação micrográfica de amostras temperadas. A) Micrografia obtida por autoria própria. B) Micrografia retirada da literatura. Ambas de aço SAE 1045, com aumento de 500x. Fonte: *FREITAS* (2009).

#### 5.1.1.5 Amostra revenida

Para esse tratamento térmico não foi encontrada nenhuma micrografia para o mesmo aço e com as mesmas temperaturas utilizadas. Mas, como conceituado, conforme o revenimento é feito, obtém-se a precipitação de carbonetos, ou seja, a martensita vai empobrecendo em carbono e formando  $\text{Fe}_3\text{C}$  (cementita). Em torno de  $700^\circ\text{C}$ , tem-se ferrita com tendência à esferoidização da cementita, pois está muito próxima da faixa de esferoidização.

Também se sabe que a tendência é de a dureza ir diminuindo conforme a temperatura de revenimento for subindo, e foi o que se pôde observar.

#### 5.1.1.6 Amostra esferoidizada

Conforme a figura 29-A mostra, a estrutura permaneceu com ferrita e perlita, percebeu-se, então, que era necessário um tempo maior que 12 horas para a esferoidização completa. Mesmo assim, pela presença de alguns pequenos glóbulos dispersos na matriz, verifica-se a tendência à esferoidização. Já na figura 29-B, retirada da literatura, percebe-se nitidamente a presença de carbonetos esferoidizados em uma matriz de ferrita.

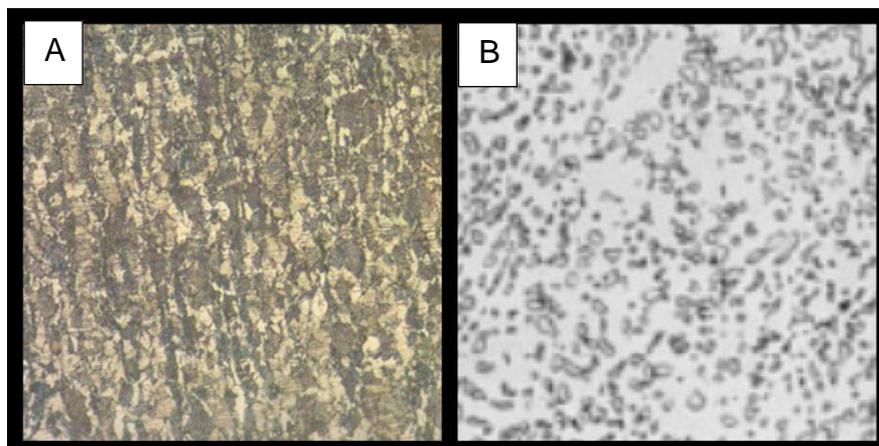


Figura 29: Comparação micrográfica de amostras esferoidizadas. A) Micrografia obtida por autoria própria (aço SAE 1045). B) Micrografia retirada da literatura para um aço SAE 1040. Ambas com aumento de 100x. Fonte: Metals Handbook (2004).

## 6 CONCLUSÕES

A apresentação dos resultados do trabalho realizado permitiu conhecer o comportamento do aço SAE 1045 para estabelecer a influência que os tratamentos térmicos têm sobre esse material.

Trabalho esse de grande importância, uma vez que a utilização do aço cresce gradativamente, e para cada aplicação se deseja propriedades diferentes. Para saber como alcançá-las basta ter conhecimento sobre os diversos tipos de tratamentos térmicos, e relacionar a microestrutura provinda desse tratamento com as propriedades que se deseja obter.

Em resumo, o material com a maior dureza obtida foi o temperado, visto que este é constituído de uma microestrutura martensítica, onde a dureza se dá pela supersaturação de carbono. Subsequente, tiveram-se as durezas das amostras revenidas, sendo que, conforme a temperatura aumentou, a dureza diminuiu. Para as outras amostras, as durezas mostraram-se proporcionais aos tamanhos de grãos, uma vez que, quando pequenos, eles servem como barreiras para a movimentação de discordâncias. Logo, quanto maiores os grãos, mais fácil de as discordâncias se movimentarem, ou seja, mais dúcteis.

## 7 REFERÊNCIAS

CALLISTER D. JR., W. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, 2000.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7ª. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996.

CIÊNCIA dos materiais multimídia. Disponível em: <<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=21&top=138>> . Acesso em: 01 Setembro 2018.

COLPAERT, H. **Metalurgia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2008.

FREITAS, V. L. **MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF CARBON STEELS USING ULTRASONIC VELOCITY MEASUREMENTS**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 6. 2009.

**LABORATÓRIO METALOGRAFIA TESTMAT – REAGENTE MICROSCOPIA E ANÁLISE METALOGRAFIA**, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.testmat.com.br/blog/2013/05/30/laboratorio-metalografia-testmat-reagente/>>. Acesso em: 01 Setembro 2018.

VOORT, G. F. V. **METALS HANDBOOK**. ASM International, v. 9: Metallography and microstructure, 2004.