



UFC
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

AMANDA DE OLIVEIRA SILVA

**INFLUÊNCIA DE DIVERSOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA
MICROESTRUTURA E DUREZA DO AÇO 1045**

FORTALEZA

2021

AMANDA DE OLIVEIRA SILVA

INFLUÊNCIA DE DIVERSOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA MICROESTRUTURA E
DUREZA DO AÇO 1045

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S578i Silva, Amanda de Oliveira.
Influência de diversos tratamentos térmicos na microestrutura e dureza do aço 104ws5 /
Amanda de Oliveira Silva. – 2021.
39 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro
de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.
Coorientação: Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso.

1. Aço SAE 1045. 2. Aço carbono. 3. Tratamento térmico. 4. Título. I. Título.

CDD 669

AMANDA DE OLIVEIRA SILVA

INFLUÊNCIA DE DIVERSOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA MICROESTRUTURA E
DUREZA DO AÇO 1045

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Emilio Ferreira Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha mãe, madrinha, e avó.

Ao meu companheiro de vida.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Carla, por ter sido a minha primeira e principal incentivadora ao longo da vida acadêmica. Obrigada por saber a importância dos estudos na vida de uma mulher e por ter tornado o ato de estudar algo prazeroso. Conhecimento é a única coisa que ninguém pode tirar de você.

Ao meu companheiro, João Lucas, por todo amor, paciência e incentivo. Obrigada por acreditar em mim quando nem eu mesma acreditava.

À minha família por me ajudar de todas as maneiras possíveis e por sempre torcer pela minha vitória. Em especial, minha madrinha, Escolástica, e minha avó, Geralda, que são dois exemplos de mulheres na minha vida.

Ao Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva, pela orientação no seguinte trabalho e pelo apoio não só em atividades acadêmicas, mas como ser humano.

Ao professor Dr. Jorge Luiz Cardoso por todo apoio durante não apenas este trabalho, mas ao longo da minha graduação como profissional e amigo. Obrigada pelas conversas e chocolates compartilhados.

Ao professor Dr. Ricardo Emilio Ferreira Quevedo Nogueira pelas boas conversas e momentos compartilhados no Coral do Centro de Tecnologia, bem como em sala de aula e fora dela.

Agradeço também ao Antônio, secretário acadêmico do curso, que foi uma pessoa essencial durante esse período me auxiliando da maneira mais gentil e atenciosa possível.

Para finalizar, agradeço aos colegas e amigos da graduação, em especial Aretha Marinho, Luiza Guedes, Ronaldo Lima, Gabriela Rocha, Caio Fernandes, Daniel Melo e Iuri Abreu. Obrigada por todos os momentos compartilhados e por toda a ajuda.

“Milagres só acontecem com as pessoas que não desistem.” (IVANKOV, Emporio).

RESUMO

O aço SAE 1045 é um aço carbono com médio teor de carbono em sua composição química, o que o faz um aço comum de propriedades mecânicas medianas e uma baixa temperabilidade, sendo utilizado em componentes estruturais e de máquinas, eixos, engrenagens comuns, virabrequins e peças forjadas. O referido trabalho propõe-se analisar as variações microestruturais do aço SAE 1045 de acordo com os tratamentos térmicos utilizados: recozimento, normalização, têmpera em água, têmpera em salmoura e têmpera em água seguida de revenimento. Para isso, foram primeiramente analisadas as durezas obtidas em cada uma das amostras submetidas aos tratamentos térmicos e comparadas entre si, bem como com a amostra inicial. Em seguida, foram analisadas as microestruturas ópticas obtidas em cada uma das amostras submetidas aos tratamentos térmicos e comparadas entre si, bem como com a amostra inicial. Foi concluído que os resultados de dureza e de microscopia óptica estavam de acordo com a literatura pesquisada, na qual os tratamentos térmicos de têmpera resultaram em uma maior dureza de acordo com as agulhas martensíticas produzidas, sendo a têmpera em água a maior, seguida de salmoura e água com revenido devido à redução de tensões característica do revenimento. Nos procedimentos de recozimento pleno e normalização, foi possível observar um alto crescimento de ferrita pró-eutetóide, característica de aços hipoeutetóides como o SAE 1045, principalmente no tratamento térmico de recozimento devido ao seu resfriamento lento ao forno desligado.

Palavras-chave: Aço SAE 1045. Aço-carbono. Tratamento térmico.

ABSTRACT

SAE 1045 steel is a carbon steel with medium carbon content in its chemical composition, which makes it a common steel with medium mechanical properties and low hardenability, being used in structural and machinery components, shafts, common gears, crankshafts and forged parts. This work proposes to analyze the microstructural variations of SAE 1045 steel according to the heat treatments used: annealing, normalization, water quenching, brine quenching and quenching in water followed by tempering. For this, the hardness obtained in each of the samples submitted to heat treatments will first be analyzed and compared with each other, as well as with the initial sample. Then, the optical microstructures obtained in each of the samples submitted to heat treatments were analyzed and compared with each other, as well as with the initial sample. It was concluded that the hardness and optical microscopy results were in agreement with the researched literature, in which the heat quenching treatments resulted in a higher hardness according to the produced martensitic needles, with the water quenching being the largest, followed by brine and tempered water due to the stress reduction characteristic of tempering. In the procedures of full annealing and normalization, it was possible to observe a high growth of pro-eutectoid ferrite, characteristic of hypoeutectoid steels such as SAE 1045, mainly in the annealing heat treatment due to its slow cooling in the off furnace.

Keywords: SAE 1045 steel. Carbon steel. Heat treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	-	Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro.....	17
Figura 2	-	Transformações hipoeutetóides em vista parcial do diagrama de fases ferro-cementita.....	20
Figura 3	-	Amostras recebidas do Aço SAE 1045.....	24
Figura 4	-	Fluxograma de métodos da pesquisa.....	28
Figura 5	-	Simulação termodinâmica do aço SAE 1045.....	29
Figura 6	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Como Recebido (aumento de 200x).....	30
Figura 7	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Como Recebido. Lamelas de ferrita no grão perlítico (aumento de 500x).....	30
Figura 8	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Recozido. Ilhas de perlita (aumento de 200x).....	31
Figura 9	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Recozido (aumento de 500x).....	32
Figura 10	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Normalizado. Refinamento de grão em marcação vermelha (aumento de 200x).....	32
Figura 11	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Normalizado. Refinamento de grão em marcação amarela (aumento de 500x).....	33
Figura 12	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em água. Martensitas em marcação vermelha (aumento de 200x).....	34
Figura 13	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em Água. Martensitas em marcação amarela (aumento de 500x).....	34
Figura 14	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em Salmoura. Martensitas em marcação vermelha (aumento de 200x).....	35

Figura 15	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em Salmoura. Martensitas em marcação amarela (aumento de 500x).....	36
Figura 16	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em Água seguido de Revenimento. Martensitas em marcação vermelha (aumento de 200x).....	37
Figura 17	-	Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em Água seguido de Revenimento. Martesitas em marcação amarela (aumento de 500x).....	37
Figura 18	-	Dureza Rockwell C.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Composição química (em % de massa) para o aço 1045	24
Tabela 2	–	Tratamento térmico x Temperatura x Resfriamento.....	26
Tabela 3	–	Dureza Rockwell C.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
SIBI	Sistema Integrado de Bibliotecas
trad.	Tradutor

LISTA DE SÍMBOLOS

\$	Dólar
%	Porcentagem
£	Libra
¥	Iene
€	Euro
§	Seção
©	Copyright
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Diagrama Ferro-Carbono	17
3.1.1	<i>Ferrita (ferro alfa)</i>	18
3.1.2	<i>Austenita (ferro gama)</i>	18
3.1.3	<i>Fase delta (ferro delta)</i>	18
3.1.4	<i>Cementita (Fe₃C)</i>	19
3.1.5	<i>Pontos relevantes do diagrama Fe-Fe₃C</i>	19
3.2	Aços Carbono	21
3.3	Aço SAE 1045	21
3.4	Tratamentos Térmicos	22
3.4.1	<i>Recozimento Pleno</i>	22
3.4.2	<i>Normalização</i>	22
3.4.3	<i>Têmpera</i>	23
3.4.4	<i>Revenimento</i>	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1	Materiais	23
4.2	Métodos	24
4.2.1	<i>Simulações Termodinâmicas</i>	24
4.2.2	<i>Tratamentos Térmicos</i>	25
4.2.3	<i>Preparação Metalográfica</i>	26
4.2.3	<i>Dureza</i>	26
4.2.4	<i>Aquisição das imagens por microscopia óptica</i>	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1	Caracterização Microestrutural	27
5.1.1	<i>Como Recebida</i>	27
5.1.2	<i>Recozida</i>	29
5.1.3	<i>Normalizada</i>	30

5.1.4	<i>Temperada em água</i>	32
5.1.5	<i>Temperada em salmoura</i>	33
5.1.6	<i>Temperada em água e revenida</i>	35
5.2	Dureza	36
6	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Os aços, por definição, são ligas de ferro-carbono que contém teores na faixa de 0,008% a aproximadamente 2,11% (CHIAVERINI, 2008) ou, segundo Santos (2016) e Callister e Rethwisch (2016), respectivamente, até 2,06% e 2,14% de carbono, além de elementos secundários oriundos de seu processo de fabricação (CHIAVERINI, 2008). Os limites inferiores e superiores correspondem, respectivamente, à máxima solubilidade do ferro à temperatura ambiente e à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro (CHIAVERINI, 2008). Outra definição importante para o trabalho é a de aço-carbono, que são as ligas binárias que possuem apenas ferro e carbono em sua composição (SANTOS, 2016).

Os aços-carbono são amplamente utilizados na sociedade, como é o caso da indústria metal mecânica, e possuem funcionalidades diversas devido à sua facilidade de serem tratados termicamente. Tratar termicamente um aço significa submetê-lo a um conjunto de operações de aquecimento, sob condições controladas de tempo, temperatura, atmosfera e velocidade de resfriamento visando alterar suas propriedades em função de uma característica previamente desejada para sua posterior utilização (CHIAVERINI, 2018). Dito isso, no decorrer deste trabalho, foram separadas seis amostras as quais foram submetidas aos seguintes tratamentos térmicos: recozimento pleno, normalização, têmpera em água, têmpera em salmoura e têmpera em água com revenimento.

A primeira amostra (1) permaneceu como recebida e não foi submetida a nenhum tratamento térmico, apenas aos testes de Dureza Rockwell C e Microscopia Óptica. A segunda amostra (2) foi submetida ao processo de recozimento pleno, que consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica para que ele seja totalmente austenitizado, seguido de um resfriamento lento, geralmente dentro do forno desligado (CHIAVERINI, 2018). Seus principais objetivos são a redução da dureza, o aumento da usinabilidade, a facilitação do trabalho a frio e atingir as microestruturas e propriedades desejadas (SILVA, 2010). A terceira amostra (3) foi submetida ao processo de normalização, que consiste no aquecimento da peça a uma temperatura acima da zona crítica com posterior resfriamento ao ar (CHIAVERINI, 2018) parado ou agitado (SILVA, 2010). Segundo Costa (2010), seu uso é recomendado para homogeneização da estrutura antes de um processo de têmpera ou revenimento e após o forjamento, sendo utilizada para refino de grão, melhora da usinabilidade, refino de estruturas brutas de fusão e obtenção de melhores propriedades mecânicas.

As amostras 4, 5 e 6 foram todas submetidas ao tratamento térmico de têmpera, porém a ^o5 foi em salmoura, enquanto as 4 e 6 foram em água com a diferença de que a 6

também passou pelo processo de revenimento pós têmpera. A têmpera ocorre com o aumento da temperatura até acima da faixa crítica, austenizando completamente o aço, seguida de um resfriamento rápido (CHIAVERINI, 2018) o suficiente para evitar transformações perlíticas e bainíticas (SILVA, 2010). Sendo assim, o objetivo final da têmpera é obter a martensita como constituinte final, pois do ponto de vista das propriedades mecânicas obtém-se uma maior dureza e resistência à tração (CHIAVERINI, 2018).

O aço utilizado no seguinte trabalho foi o SAE 1045, que possui em média um teor de 0,45% de carbono e é amplamente utilizado na construção civil por apresentar média resistência, pouca temperabilidade, além de possuir boa usinabilidade quando em condições normalizadas ou laminadas (PEREIRA *et al*, 2018). O interesse pela temática surgiu durante a disciplina de Tratamentos Térmicos, ministrada pelo professor Dr. Marcelo José Gomes da Silva, também orientador deste trabalho de conclusão de curso.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Analisar as variações microestruturais do aço SAE 1045 de acordo com os tratamentos térmicos utilizados: recozimento, normalização, têmpera em água, têmpera em salmoura e têmpera em água seguida de revenimento.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar as durezas obtidas em cada uma das amostras submetidas aos tratamentos térmicos e compará-las entre si, bem como com a amostra inicial.
- Analisar as microestruturas ópticas obtidas em cada uma das amostras submetidas aos tratamentos térmicos e compará-las entre si, bem como com a amostra inicial.

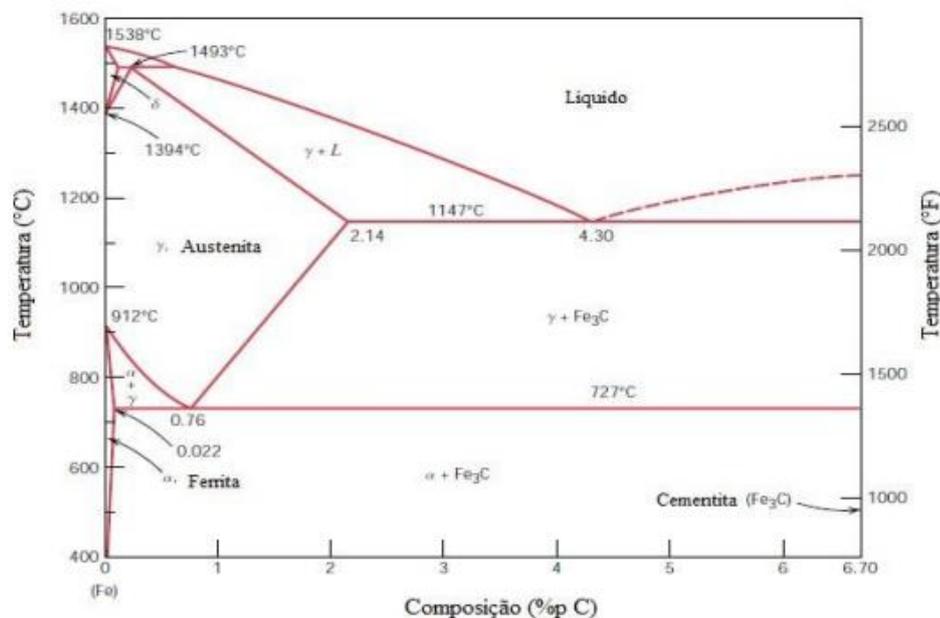
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção se refere a um breve resumo sobre os principais tópicos abordados ao longo deste trabalho, como algumas definições importantes. Além disso, serão abordados os tratamentos térmicos aos quais as amostras foram submetidas de uma forma mais detalhada.

3.1 Diagrama Ferro-Carbono

Devido ao fato de que tanto os aços quanto os ferros fundidos são ligas de ferro-carbono, o estudo em especial do diagrama de fases ferro-carbono pode ser o mais importante dentre todas as ligas binárias pela sua ampla utilização industrial (CALLISTER E RETHWISCH, 2016). Na prática, utiliza-se apenas o diagrama de fases ferro-carbono de ferro (ou ferro-cementita) pois aços e ferros fundidos apresentam um teor de carbono inferior a 6,7%, que é a concentração de carbono no carbetto de ferro. (CALLISTER E RETHWISCH, 2016; SANTOS, 2006)

Figura 1 - Diagrama de fases ferro-carbono de ferro



Fonte: Callister e Rethwisch (2000)

Durante as transformações de fases observadas no diagrama ferro-carbono, pode-se perceber que o ferro passa por algumas transformações alotrópicas, ou seja, aquelas nas quais

há uma mudança na estrutura cristalina do elemento de acordo com alterações na temperatura. Segundo Santos, 2016:

“Até 910°C o ferro apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrado (ccc), sendo denominado ferro alfa; de 910°C até 1400°C apresenta uma estrutura cúbica de face centrada (cfc), sendo denominado ferro gama; de 1400°C até 1534°C volta a apresentar estrutura cúbica de corpo centrado, mas com parâmetros de rede diferentes da anterior, sendo denominado ferro delta, e acima de 1534°C encontra-se no estado líquido. Quando se adiciona carbono (C) ao ferro, podem ser formadas fases sólidas baseadas nas formas alotrópicas, constituídas por soluções sólidas intersticiais e que apresentam campos de estabilidade em função do teor de carbono e da temperatura, e uma fase intermediária. A fase baseada no ferro alfa é denominada ferrita, a fase baseada no ferro gama é denominada austenita, a fase baseada no ferro delta é denominada fase delta e a fase intermediária é denominada cementita e apresenta uma estrutura cristalina ortorrômbica.” (p.363)

3.1.1 Ferrita (ferro alfa)

A ferrita é uma fase de estrutura cúbica de corpo centrado e constitui-se como uma solução sólida intersticial de carbono em ferro alfa, possuindo uma solubilidade máxima de 0,022%p a 727°C em função do arranjo atômico que não permite uma boa acomodação dos átomos de carbono (CALLISTER E RETHWISCH, 2016). Em relação às suas propriedades mecânicas, pode-se afirmar que a ferrita apresenta baixas dureza e resistência mecânica, o que a caracteriza como uma fase dúctil (SANTOS, 2006).

3.1.2 Austenita (ferro gama)

A austenita, por outro lado, possui estrutura cúbica de face centrada e é uma fase que apresenta solução sólida intersticial de carbono no ferro gama. Essa fase é estável apenas acima de 723°C e, em função de seu arranjo atômico possuir maiores posições intersticiais, sua solubilidade é aproximadamente 100 vezes maior que a da ferrita (CALLISTER E RETHWISCH, 2016). O limite de solubilidade da austenita é utilizado como parâmetro ao caracterizar os aços como ligas de ferro com teor máximo de aproximadamente 2,06% de carbono, enquanto acima desse valor até 6,7% estão na faixa de ferros fundidos (SANTOS, 2006).

3.1.3 Fase delta (ferro delta)

Segundo Santos (2006), a fase delta, assim como a ferrita, também possui estrutura cúbica de corpo centrado, porém se mantém estável a temperaturas próximas ao ponto de fusão do ferro, contudo, em função dessa semelhança, alguns autores também se referem a essa fase

como ferrita delta. Além disso, Santos (2006) explica que seu limite de solubilidade é inferior ao da austenita por ser uma estrutura cúbica de corpo centrado, porém é maior que o da ferrita alfa, visto que a altas temperaturas os parâmetros de rede dessa estrutura aumentam, chegando a aproximadamente 0,10%pC a 1493°C.

3.1.4 Cementita (Fe_3C)

Segundo Callister e Rethwisch (2016), a cementita é formada quando o limite de solubilidade de carbono abaixo de 727°C é excedido na ferrita alfa, mas também coexiste com a fase gama entre 727 e 1147°C. Diferentemente da ferrita, possui alta dureza e resistência mecânica, além de não depender das estruturas alotrópicas do ferro, visto que a solubilidade do carbono é desprezível e, dito isso, é considerada uma fase intermediária e até um composto intermediário (SANTOS, 2006).

A cementita, então, é considerada uma fase frágil e possui estrutura cristalina ortorrômbica correspondendo a 6,7%p de carbono, que é a porcentagem máxima de carbono do diagrama Fe-Fe₃C, a qual a liga com essa porcentagem de carbono seria constituída praticamente de 100% deste composto intermediário (SANTOS, 2006; CALLISTER E RETHWISCH, 2016). Sendo assim, sua presença em alguns aços aumenta a resistência mecânica e dureza dessas ligas (CALLISTER E RETHWISCH, 2016), o que torna o seu estudo essencial na indústria siderúrgica. Seguindo esse raciocínio, Silva (2010) afirma mais um ponto relevante do estudo da cementita, que é o fato de que ela dá origem à perlita, que é um eutetóide extremamente importante no estudo.

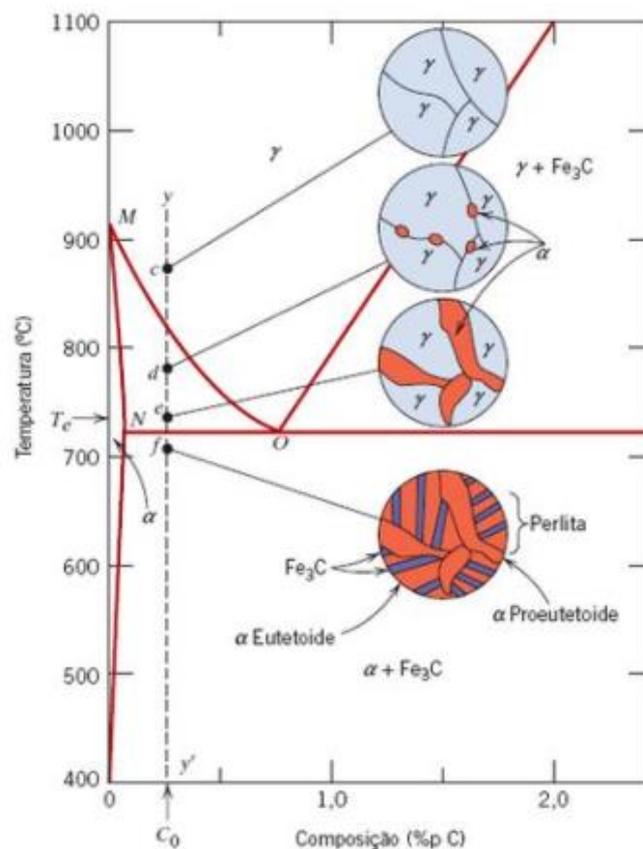
3.1.5 Pontos relevantes do diagrama Fe-Fe₃C

Diversos são os pontos dos quais pode-se retirar informações sobre o aço no diagrama ferro-cementita, dentre eles os pontos de transformação peritética (a 1493°C, na qual há reação da fase delta com a líquida formando a austenita), eutética (a 1147°C, na qual a fase líquida se transforma em uma mistura de cementita com austenita) e a eutetóide (a 723°C, na qual a austenita transforma-se em uma mistura de ferrita com cementita) (SANTOS, 2006). Segundo Callister e Rethwisch (2016), outra informação relevante é sobre o ponto eutetóide, que se dá em 0,76%p de carbono a 727°C e é a partir dele que se pode verificar se uma liga é hipo (abaixo) ou hipereutetóide (acima do ponto eutetóide), além de eutetóide, que é quando sua concentração

é de 0,76%p de carbono. No caso do aço SAE 1045, por possuir em média 0,45%p de carbono, caracteriza-se como uma liga hipoeutetóide.

Em relação ao desenvolvimento da microestrutura na liga, será detalhado apenas para uma liga hipoeutetóide tendo em vista a composição das amostras trabalhadas. De acordo com a Figura 2, pode-se observar que no ponto c a liga apresenta uma estrutura monofásica composta apenas por grãos de austenita e que no ponto d já existe uma nucleação de ferritas, denominadas ferritas pró-eutetóides ou ferritas primárias, visto que elas começam a surgir ao atingir o limite superior da linha A3, antes do início da reação eutetóide à 727°C (SANTOS, 2006; CHIAVERINI, 2008).

Figura 2 - Transformações Hipoeutetóides em vista parcial do diagrama de fases ferro-cementita



Fonte: Callister e Rethwisch (2000)

Segundo Chiaverini (2010, p. 371), “o intervalo de temperatura entre A1 e A2 é denominado zona crítica.”, e é nessa faixa que, ao continuar resfriando, essas ferritas primárias permanecem crescendo nos contornos de grão da austenita, visto que são pontos favoráveis de

nucleação heterogênea e, tendo em vista que a ferrita possui uma solubilidade baixa ao carbono, ele é deslocado para a austenita, enriquecendo sua composição até alcançar o limite superior da linha A1, onde essa austenita rica em carbono irá se decompor em ferrita e cementita, formando uma estrutura perlítica resultante da transformação eutetóide. (SANTOS, 2006; CHIAVERINI, 2008).

Sendo assim, como estrutura final obtém-se uma estrutura perlítica composta por ferrita alfa e cementita com composição variada dependendo da velocidade da reação bem como composição do aço e demais fatores, além das ferritas pró-eutetóides presentes nos contornos de grão da perlita. Segundo Callister e Rethwisch, a perlita é considerada mediana mecanicamente se comparada à maciez da ferrita e à dureza da cementita.

3.2 Aços Carbono

Segundo Chiaverini (2008), a definição de aço não é simples, por ser uma liga de natureza complexa e que, a rigor, os comerciáveis não são ligas binárias, visto que sempre apresentam em sua composição elementos secundários oriundos do processo de fabricação. Sendo assim, aço é definido pelo autor como uma liga de ferro-carbono com porcentagem de carbono entre 0,008% e 2,11% além dos elementos residuais oriundos do processo de fabricação, como previamente citados, e quando esses elementos residuais apresentam teores acima dos considerados normais, são denominados aços-liga.

A primeira classificação é dividida em três subcategorias: aços de baixo (teor de carbono inferior a 0,2%), médio (teor de carbono entre 0,2 e 0,5%) e alto (teor de carbono acima de 0,5%) teor de carbono (CHIAVERINI, 2008). Dito isso, a porcentagem de carbono é importante para a dureza do material e sua quantidade é um dos principais fatores a serem levados em conta para a escolha dos tratamentos térmicos aos quais os aços são submetidos. As amostras utilizadas no seguinte trabalho são de um aço-carbono com médio teor de carbono, o aço-carbono SAE 1045.

3.3 Aço SAE 1045

O aço SAE 1045 é um aço carbono com médio teor de carbono em sua composição química, o que o faz um aço comum de propriedades mecânicas medianas e uma baixa temperabilidade, sendo utilizado em componentes estruturais e de máquinas, eixos, engrenagens comuns, virabrequins e peças forjadas (LUZ, 2017).

3.4 Tratamentos Térmicos

De acordo com Chiaverini (2008), tratar termicamente um aço é o ato de submetê-lo a um conjunto de operações sob condições controladas de tempo, temperatura, atmosfera e velocidade de resfriamento, visando obter propriedades específicas para a liga em questão. Como previamente citado, as amostras selecionadas para o trabalho foram submetidas aos tratamentos térmicos que serão abordados e explicados nos subtópicos seguintes.

3.4.1 Recozimento Pleno

Segundo Chiaverini (2008), o recozimento total ou pleno é um tratamento térmico que consiste em um prévio aquecimento da amostra até uma temperatura acima da zona crítica, ou seja, acima de A3 para os aços hipoeutetóides (aproximadamente 50°C acima) durante tempo suficiente para total austenitização, seguido de um lento resfriamento, que acontece em geral dentro do forno desligado após o processo ser finalizado. A estrutura formada a partir desse processo é a perlita grosseira (CHIAVERINI, 2008), contudo para que toda a microestrutura seja austenitizada, é necessário um tempo excessivo de aquecimento acima de A3, fazendo com que seja mais viável a utilização de outros tratamentos térmicos (SILVA, 2010) que não serão aqui mencionados. Com a obtenção da microestrutura formada por perlita grosseira, obtém-se uma melhor usinabilidade para aços de baixo e médio carbono (CHIAVERINI, 2008), que é o caso do aço SAE 1045.

3.4.2. Normalização

Segundo Silva (2010), o tratamento térmico de normalização para aços hipoeutetóides se dá com a elevação da temperatura acima de A3 para completa austenitização, assim como o recozimento, mas seu resfriamento se dá ao ar livre, seja parado ou agitado. O objetivo da normalização é o refino dos grãos grosseiros e é frequentemente utilizada como tratamento preliminar a outros tratamentos térmicos, como a têmpera e o revenido (CHIAVERINI, 2008; SILVA, 2010) e possui outras metas, como a melhoria da usinabilidade, refino de estruturas brutas de fusão e obtenção de propriedades mecânicas específicas (SILVA, 2010).

Em comparação com o recozimento, a microestrutura para aços hipoeutetóides na normalização apresenta uma menor quantidade de ferrita primária, enquanto a perlita possuirá

uma granulometria mais fina. Dito isso, quanto maior o percentual de carbono na liga, maior será sua dureza e resistência mecânica e, conseqüentemente, menor ductilidade (SILVA, 2010).

3.4.3 Têmpera

Segundo Silva (2010), temperar o aço se dá através da elevação de sua temperatura acima de A3 por tempo suficiente para completa austenitização, seguido de um resfriamento rápido o suficiente para que não haja transformação perlítica e bainítica, visando a obtenção de uma estrutura dura e metaestável, chamada martensita. O resfriamento pode ser feito em meio líquido ou gasoso e, no caso deste trabalho, será apenas em líquido, que serão água e salmoura.

3.4.4 Revenimento

Por vezes, o processo de têmpera leva à formação de uma microestrutura excessivamente dura e frágil pelo alto número de tensões internas, o que não é ideal para um aço. Dito isso, o processo de têmpera normalmente é seguido de um revenido para obtenção de uma maior ductilidade e resistência ao choque. (CHIAVERINI, 2008). O revenimento se trata de um aquecimento brando com finalidade de alívio às tensões internas após a têmpera, permitindo uma combinação de resistência e tenacidade (SILVA, 2010).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos tópicos a seguir, serão apresentados os materiais, bem como os processos e equipamentos utilizados no decorrer do trabalho.

4.1 Materiais

Os materiais utilizados foram seis amostras do aço SAE 1045 fornecidos por uma empresa de fundição nacional de grande porte. A composição química do aço 1045 foi determinada pelo uso do espectrômetro de emissão óptica modelo PDA 7000 (Shumadzu) do Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da UFC.

Tabela 1 – Composição química (em % de massa) para o aço 1045.

Aço 1045									
C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Al	Pb	Ti	Fe
0,45	0,12	0,53	0,068	0,099	0,087	0,031	0,082	0,006	Bal

Fonte: Autor

As amostras do aço 1045 foram recebidas como pedaços de vergalhão de diâmetro 1,20 cm conforme Figura 3. Seis amostras foram separadas para esse estudo.

Figura 3 - Amostras recebidas do aço SAE 1045.



Fonte: Autor.

4.2 Métodos

4.2.1 *Simulação termodinâmica*

Primeiramente foi feito um estudo termodinâmico usando o software ThermoCalc® com o banco de dados TCFE6 para a identificação das fases. Com essa simulação, foi possível escolher as temperaturas dos tratamentos térmicos.

4.2.2 *Tratamentos térmicos*

Como previamente citado, diversos tratamentos térmicos foram realizados nas amostras do aço SAE 1045. A priori, foi estipulada uma temperatura padronizada para todos os tratamentos térmicos realizados, que foi a temperatura de 900 °C. Todas as amostras foram colocadas ao mesmo tempo dentro do forno Mufla por 90 minutos para que alcançassem a temperatura almejada, permanecendo por mais 10 minutos nessa temperatura e, de acordo com cada tratamento térmico a qual cada uma seria submetida, foram retiradas do forno.

Os tratamentos térmicos realizados foram recozimento pleno, normalização, têmpera em água, têmpera em salmoura e têmpera em água seguida de revenimento. O meio de resfriamento de cada tratamento térmico foi pensado e feito com cuidado. Como previamente explicado, no recozimento a amostra permanece dentro do forno desligado até atingir o equilíbrio com o ambiente, sendo executado de tal maneira. Na normalização, o resfriamento foi feito ao ar parado, também até atingir o equilíbrio térmico com o meio.

Para a têmpera em água, a amostra foi mergulhada em água. Para a têmpera em salmoura, a amostra foi mergulhada em uma solução aquosa de 3,5% NaCl em água destilada. Por último, na têmpera em água seguida de revenimento, este aconteceu em torno de 500 °C ao forno por 1 hora e, posteriormente, a peça foi resfriada ao forno desligado até obter equilíbrio térmico com o meio. Uma amostra foi deixada na condição como recebida para comparação.

Tabela 2 - Tratamento térmico x Temperatura x Resfriamento

Tratamento térmico	Temperatura (°C)	resfriamento
recozimento	900	Lento dentro do forno desligado
normalização	900	Lento ao ar
Têmpera em água	900	Rápido em água
Têmpera em salmoura	900	Rápido em salmoura
Têmpera em água + revenimento	500	Lento dentro do forno desligado

Fonte: Autor

4.2.3 Preparação metalográfica

Para dar início ao preparo dos corpos de prova, foi utilizada a máquina de corte Cut-Off, que possui sistema de refrigeração e assim evita o superaquecimento das peças, o que levaria a uma possível transformação de fases na microestrutura do aço. Em seguida, foi feito o embutimento das amostras em baquelite visando facilitar os posteriores procedimentos de lixa e polimento. As peças foram lixadas em lixas d'água de diferentes granulometrias, sendo elas de 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh, alternando em 90 graus a posição da peça a cada lixa trocada. A próxima etapa foi a de polimento, na qual foram utilizados panos de feltro mais alumina com granulometria de 3 μm e 1 μm como agente abrasivo. Por último, as amostras foram submetidas a um ataque químico com uso do reagente Nital (ácido nítrico, HNO_3 , 2%) com tempo de imersão de 4 segundos.

4.2.4 Dureza

Para esta etapa, verificou-se a dureza das amostras através da dureza Rockwell do tipo C ao realizar a medição de dureza 5 vezes em cada peça do material. Dentre as amostras feitas,

as duas primeiras foram descartadas a fim de verificar a calibração ou não da máquina e, a partir das 3 medidas restantes, foi feita a média. Os corpos de prova foram submetidos a uma aplicação de força de 150 kgF (N) verticalmente através de um indentador de diamante, ferramenta amplamente utilizada durante aferições de dureza Rockwell do tipo C. Para finalizar o processo, pressionou-se o indentador na amostra por 10 segundos até o resultado ser disponibilizado no dial do instrumento.

4.2.5 Aquisição das imagens por microscopia ótica

Para a aquisição das imagens, foi usado um microscópio óptico da marca Leica DMI 3000. Foram feitas imagens com vários aumentos. A pesquisa seguiu o fluxograma da Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma de métodos da pesquisa.

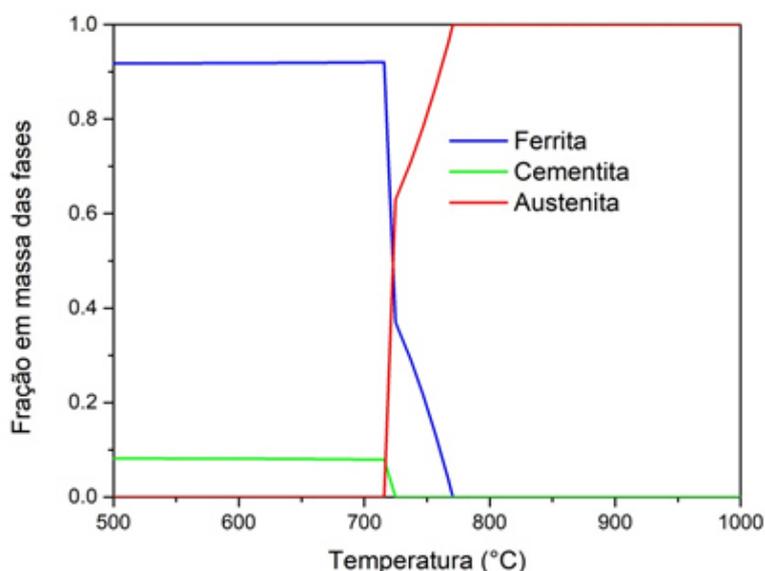


Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentadas as micrografias obtidas do aço SAE 1045 e serão analisadas de acordo com a influência dos tratamentos térmicos aos quais cada amostra foi submetida. Em seguida, serão apresentados os perfis de dureza do aço após os variados tratamentos térmicos. Porém, antes de todo o procedimento, como citado anteriormente, foi feita uma simulação termodinâmica através do ThermoCalc para prever o comportamento microestrutural do aço 1045 de acordo com a temperatura (Figura 5).

Figura 5 - Simulação termodinâmica do aço SAE 1045.



Fonte: Autor.

Com base na Figura 5, é possível visualizar que a temperatura escolhida de 900°C é suficiente para total austenitização do aço, visto que, de acordo com o gráfico gerado via ThermoCalc, a 900°C tem-se 100% de microestrutura austenítica, que é representada em vermelho na imagem.

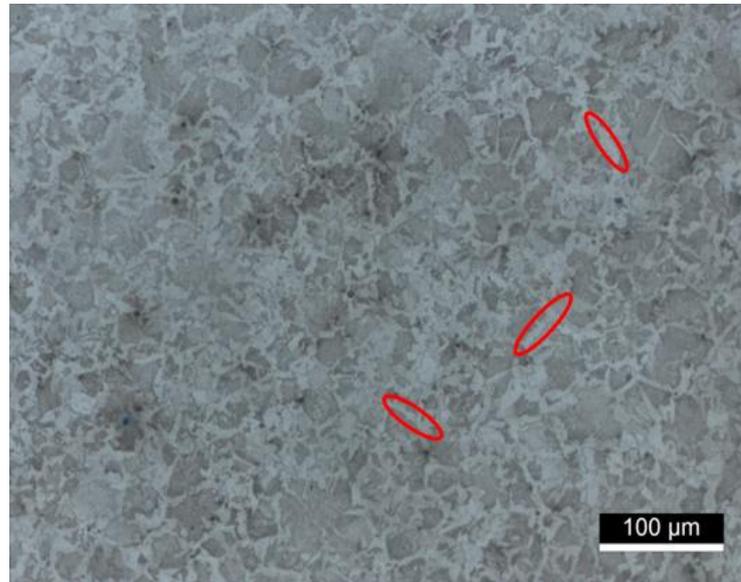
5.1 Caracterização Microestrutural

5.1.1 Como recebida

Na Figura 6, pode-se perceber na amostra recebida a presença de ferrita pró-eutetóide nos contornos de grão, marcada na imagem de vermelho, característica de um aço

hipoeutetóide, como explicado na seção 3.1.5 deste trabalho. Na Figura 7, com o aumento de 500x, foi possível visualizar as lamelas de ferrita no grão perlítico, destacadas em amarelo.

Figura 6 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Como Recebido (aumento de 200x).



Fonte: Autor

Figura 7 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Como Recebido. Lamelas de ferrita no grão perlítico (aumento de 500x).



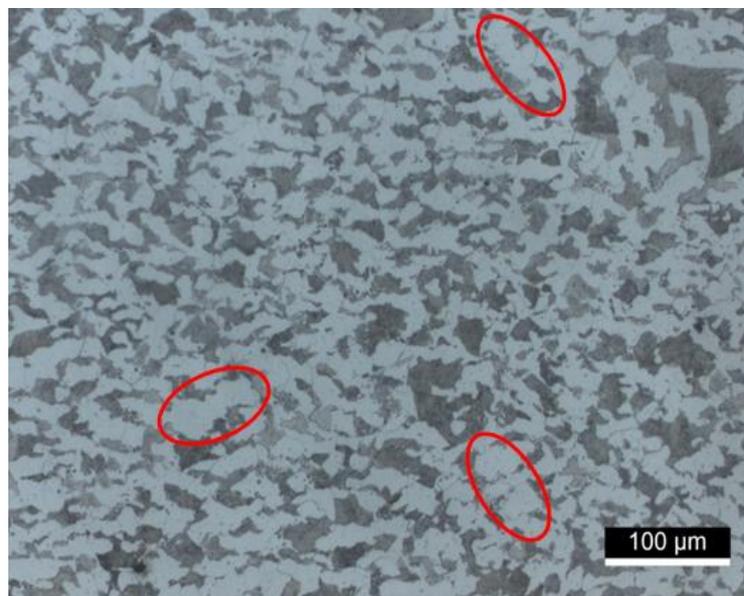
Fonte: Autor.

5.1.2 Recozida

Com o processo de recozimento pleno, a amostra apresentou, como esperado, uma microestrutura grosseira característica da forma lenta de resfriamento dentro do forno. Dito isso, pode-se verificar nas figuras 8 e 9 uma estrutura perlítica com grãos não tão grandes, visto que houve um alto crescimento da ferrita pró-eutetóide em seus contornos, também característico do lento resfriamento.

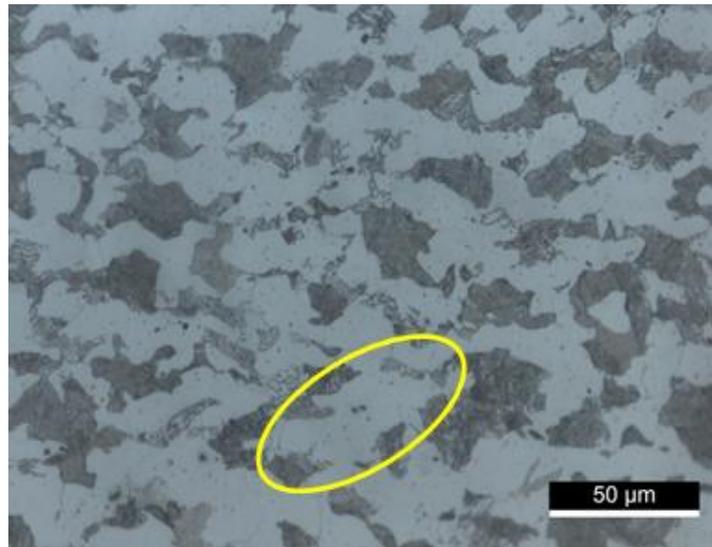
Nas figuras pode-se identificar a ferrita pró-eutetóide em branco, enquanto os grãos de perlita estão caracterizados na parte mais escura, lembrando ilhas de perlita em um mar de ferrita alfa (Figura 8). O crescimento dessa ferrita pró-eutética acabou por limitar um maior crescimento do grão perlítico, porém ainda apresentando uma estrutura grosseira característica do procedimento. Esse grande aumento de ferrita alfa na microestrutura, como exposto em 3.4.1, confere ao aço hipoeutetóide uma melhor usinabilidade.

Figura 8 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Recozido. Ilhas de perlita (aumento de 200x).



Fonte: Autor

Figura 9 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Recozido (aumento de 500x).

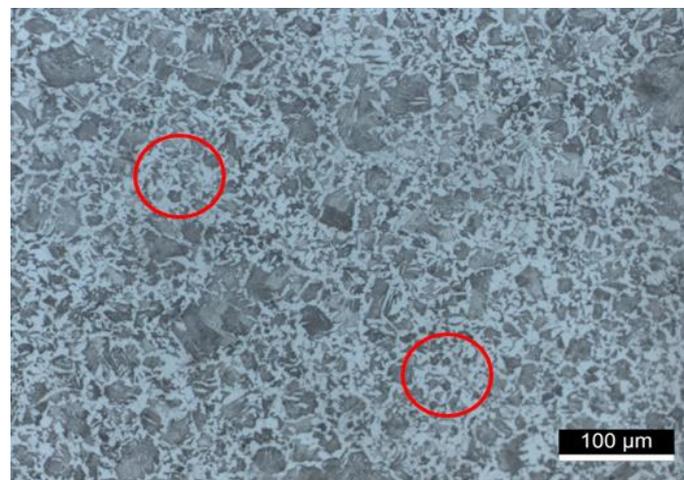


Fonte: Autor

5.1.3 Normalizada

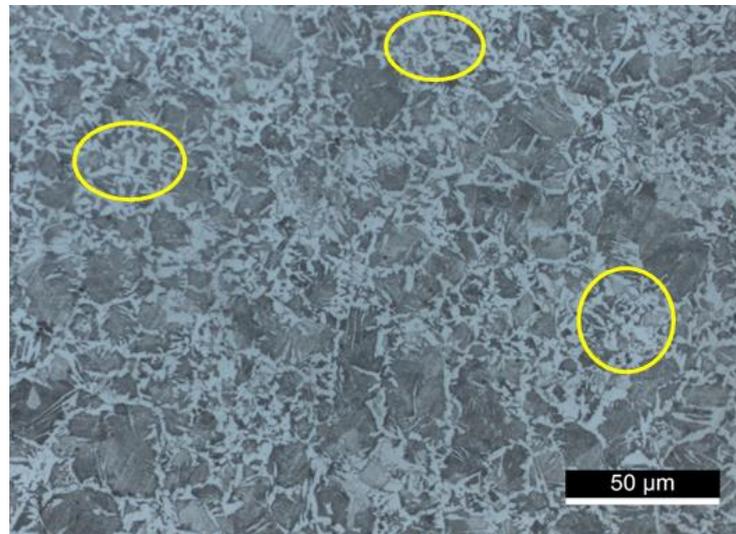
Assim como exposto em 3.4.2, o procedimento cumpriu a expectativa de refino da maioria dos grãos grosseiros que foram anteriormente apresentados nas figuras 6 e 7 da amostra como recebida, salvo exceções de grãos que tiveram um crescimento anormal. Dito isso, pode-se visualizar em vermelho (figura 10) e em amarelo (figura 11) o refinamento dos grãos perlíticos (regiões escuras) em meio a ferritas alfa com menor crescimento em relação ao procedimento anterior de recozimento pleno.

Figura 10 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Normalizado. Refinamento de grão em marcação vermelha (aumento de 200x).



Fonte: Autor

Figura 11 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Normalizado. Refinamento de grão em marcação amarela (aumento de 500x).

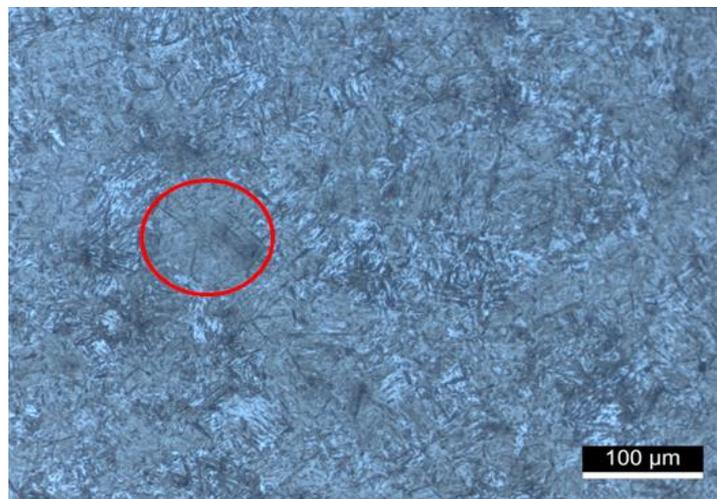


Fonte: Autor

5.1.4 Temperada em água

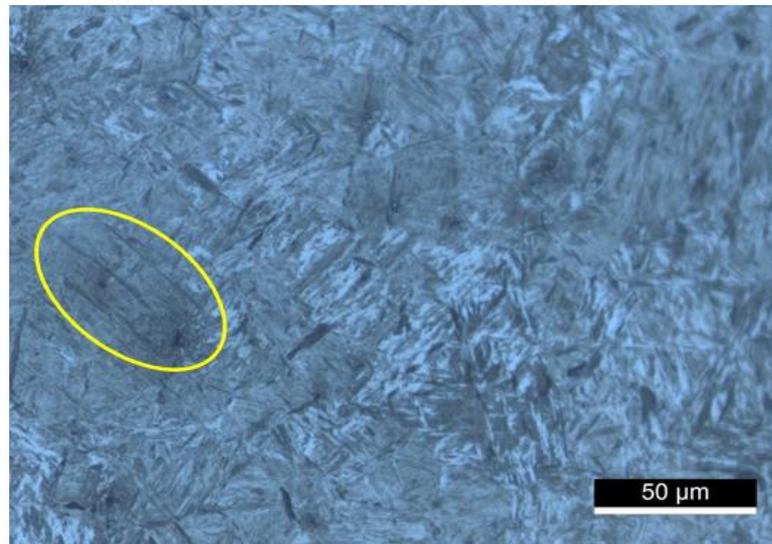
Assim como na literatura e em 3.4.4, a microscopia óptica da amostra submetida ao procedimento de têmpera em água apresentou microestrutura martensítica em formato de agulhas (região escura, devido ao alto teor de carbono) marcadas em vermelho (figura 12) e amarelo (figura 13).

Figura 12 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em água. Martensitas em marcação vermelha (aumento de 200x).



Fonte: Autor

Figura 13 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em Água. Martensitas em marcação amarela (aumento de 500x).

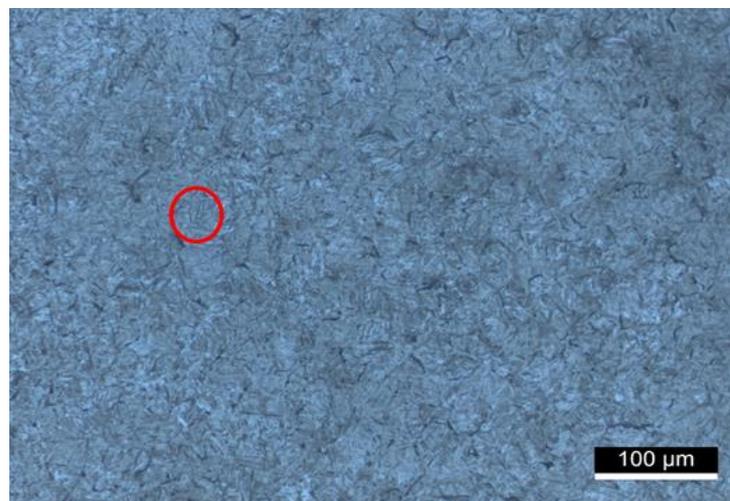


Fonte: Autor

5.1.5 Temperada em salmoura

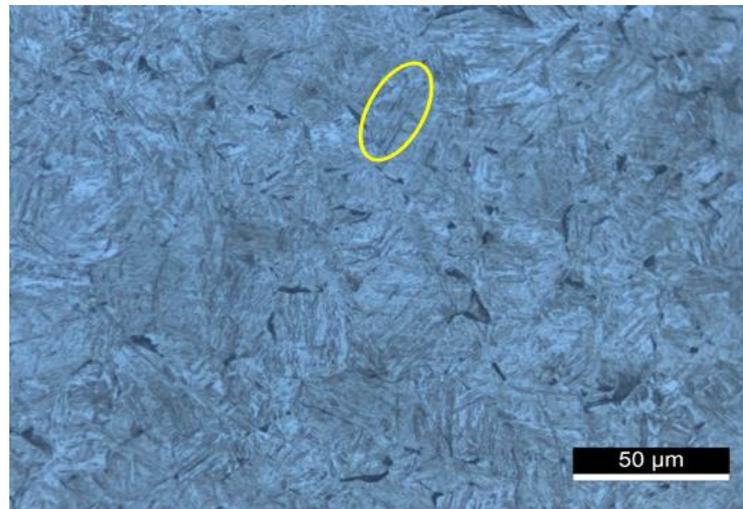
Em comparação à têmpera em água, o tratamento térmico em salmoura produziu uma microestrutura mais refinada e com agulhas de martensita mais finas (região mais escura), o que pode ser observado nas figuras 14 e 15 em marcações vermelha e amarela, respectivamente.

Figura 14 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em Salmoura. Martensitas em marcação vermelha (aumento de 200x).



Fonte: Autor

Figura 15 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em Salmoura. Martensitas em marcação amarela (aumento de 500x).

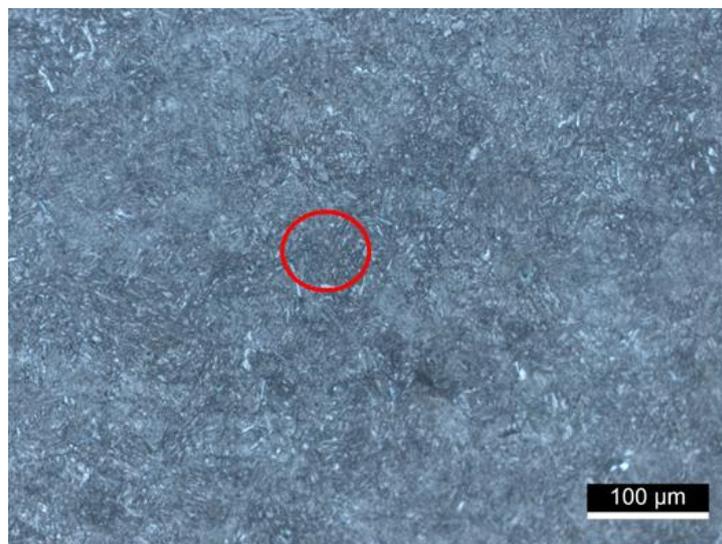


Fonte: Autor

5.1.6 Temperada em água e revenida

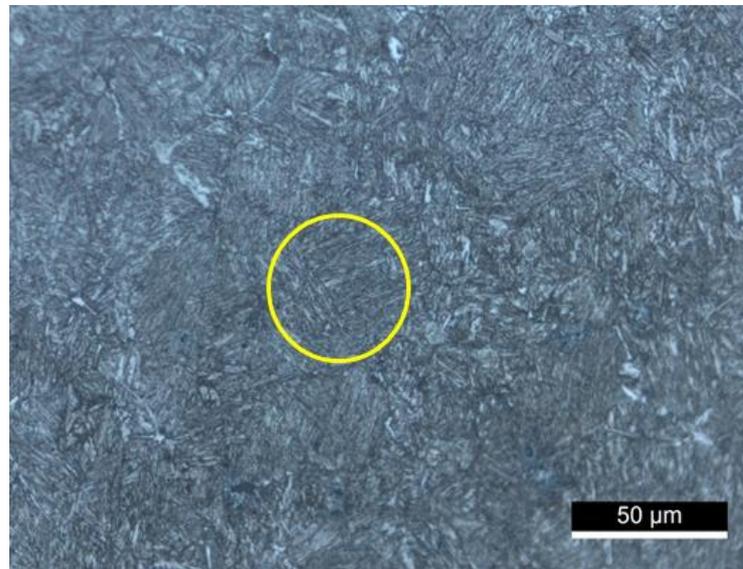
O tratamento térmico de têmpera em água seguida de revenimento produziu uma estrutura martensítica com agulhas ainda mais finas que no meio em salmoura, porém de menor comprimento, resultado do revenimento que reduz as tensões internas. É possível observar essa microestrutura nas figuras 16 e 17 em marcações vermelha e amarela, respectivamente.

Figura 16 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em Água seguido de Revenimento. Martensitas em marcação vermelha (aumento de 200x).



Fonte: Autor

Figura 17 - Imagem em Microscopia Óptica do Aço 1045 Temperado em Água seguido de Revenimento. Martensitas em marcação amarela (aumento de 500x).



Fonte: Autor

5.2 Durezas

De acordo com a Tabela 3, as maiores durezas foram obtidas através dos procedimentos de têmpera, o que vai ao encontro com a literatura pesquisada. Por outro lado, o procedimento de recozimento pleno reduziu a dureza em comparação com a amostra como recebida, o que também era esperado de acordo com o tópico 3.4.1 deste trabalho. Para a normalização, não obteve um aumento significativo da dureza, contudo o aumento dos contornos de grão pelo refino da estrutura fez com que houvesse uma mínima elevação da dureza.

Tabela 3 - Dureza Rockwell C

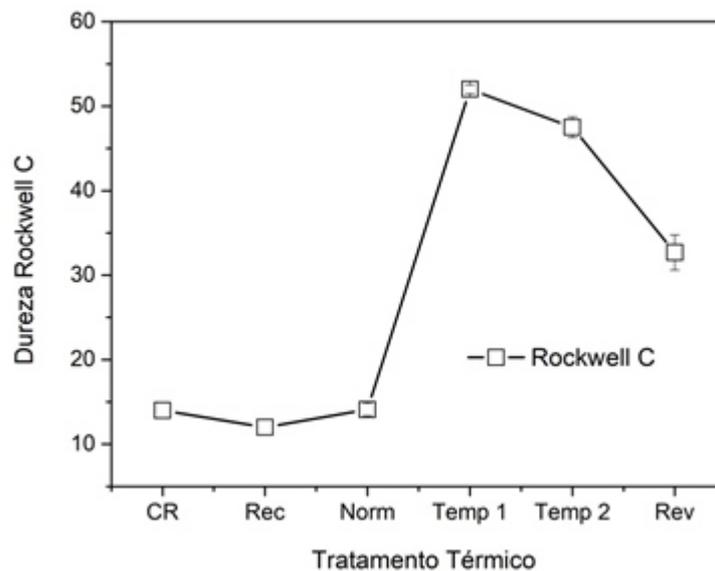
Condição da amostra	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Dureza	erro
Como recebida	14	14	14	14	0
recozida	12	12	12	12,0	0
Normalizada	14	13,4	14,9	14,1	0,75

Temp em água	52,5	52,1	51,5	52,0	0,50
Temp em salmoura	46,5	47,2	48,9	47,5	1,23
Revenida	35	31	32	32,7	2,08

Fonte: Autor

Em relação às têmperas, pode-se observar que a têmpera em água, com uma martensita de formato mais alongado e mais grossa, fez com que a sua dureza fosse mais elevada em relação à têmpera em salmoura, onde foi obtida uma martensita um pouco menor e mais fina. No caso da têmpera com revenimento, foi notório uma martensita com agulhas de comprimento pequeno e muito finas, resultando em um aumento da ductilidade e conseqüente rebaixamento da dureza, o que era esperado de acordo com o tópico 3.4.4 deste trabalho. Para uma melhor visualização das diferentes durezas, foi produzido o gráfico na Figura 18. No gráfico, Temp 1 refere-se à têmpera em água, enquanto Temp 2 e CR referem-se, respectivamente, à têmpera em salmoura e amostra como recebida.

Figura 18 – Dureza Rockwell C



Fonte: Autor.

6 CONCLUSÃO

É possível concluir que os tratamentos térmicos selecionados para a produção desse trabalho e suas características microestruturais e de dureza estão de acordo com a literatura selecionada pela autora. Os processos de têmpera produziram microestrutura martensítica, reconhecida pela sua alta dureza, enquanto o revenimento suavizou as tensões produzidas para uma melhor usinabilidade do aço. Nos procedimentos de recozimento pleno e normalização, foi possível observar um alto crescimento de ferrita pró-eutetóide, característica de aços hipoeutetóides como o SAE 1045, principalmente no tratamento térmico de recozimento devido ao seu resfriamento lento ao forno desligado.

Para trabalhos futuros, sugiro estudar o efeito da têmpera em salmoura, variando o teor de NaCl e verificando sua influência na dureza do material, bem como a mudança em sua microestrutura. Acredito ser um passo adiante do trabalho iniciado, tendo uma boa continuidade de processo.

REFERÊNCIAS

- CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CALLISTER, W. D. Jr; **CIÊNCIA DE MATERIAIS, Engenharia. Uma introdução**. 7^a Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: ABM, 2002
- COLPAERT, Hubertus et al. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Editora Blucher, 2008.
- LUZ, Gelson. **Aço SAE 1045 Propriedades Mecânicas e Composição Química**. Blog Materiais, [s. l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 22 de agosto de 2021.
- Novikov, I. **Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais**, Rio de Janeiro, Editora UFRJ , 1994.
- REZENDE, G. dos S. **Transformações de fases em materiais metálicos**. Campinas SP Editora Unicamp, p. 17, 2006.
- SILVA, André Luiz da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. Sumaré, Sp: Edgar Blucher, 2010.