

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

THAYARA KELLEN ALMEIDA TAVARES

**A INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA MICROESTRUTURA E
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO 1045**

São Luís – MA

2016

THAYARA KELLEN ALMEIDA TAVARES

**A INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA MICROESTRUTURA E
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO 1045**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Adilto Pereira Andrade Cunha.

São Luís – MA

2016

Tavares, Thayara Kellen Almeida.

A influência dos tratamentos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço 1045 / Thayara Kellen Almeida Tavares. – São Luís, 2016.

78 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Adilto Pereira Andrade Cunha.

1. Aço 1045. 2. Microestrutura. 3. Propriedades mecânicas.
4. Tratamentos térmicos. I. Título.

CDU 669.14.018.41:621.785

THAYARA KELLEN ALMEIDA TAVARES

**A INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA MICROESTRUTURA E
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO 1045**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: _____ de _____ de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr^o. Adilto Pereira Andrade Cunha.
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Prof^a. Daniele Rodrigues Freitas
Graduada em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Prof^o. Dr^o. Jean Robert Pereira Rodrigues
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

A Deus pelo seu maravilhoso amor e aos meus pais e irmãos pelo apoio, amor e compreensão durante a realização dessa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter colocado esse sonho em meu coração e ter me cercado de pessoas especiais que estão me ajudando a concluir mais uma etapa em minha vida sei que não poderei citar todos que me ajudaram nessa caminhada mas saibam que estão guardados em meu coração.

Agradecer ao meu Orientador Professor Doutor Adilto Pereira Andrade Cunha que se fez presente na finalização dessa caminhada servindo de exemplo e que estava sempre pronto a mostrar as instruções para realização deste trabalho.

Aos amigos de pesquisa, Rodrigo Miranda e Amadeu Santos.

Pelos amados professores que ensinaram e motivaram cada passo dessa jornada mostrando por onde ir e o que evitar na caminhada.

Neste momento só tenho a dizer muito obrigada aos Pais maravilhosos que tenho Walterlor Ribeiro Tavares e Aurideia Pinheiro Almeida Tavares os quais sempre estiveram comigo me dando forças para não desistir quando parecia que não ia conseguir obrigada por cada bronca e por cada abraço que fizeram com que essa menina frágil fosse se tornando cada dia mais forte e disposta a conquistar seus sonhos mesmo com sua forma lenta de agir em muitas situações.

Agradecer aos homens da minha vida que tem cuidado de mim como uma princesa Adriano Sérgio Tavares, Walterlor Ribeiro Tavares Junior e Thaylson Almeida Tavares que resolveram muitas situações para que eu pudesse continuar e me deram palavras de força para não desistir da batalha.

Agradecer a minha família linda: avós, tios, primos e primas que sempre me apoiaram e entenderam a minha ausência e que me motivaram a prosseguir independente das circunstâncias.

Aos meus padrinhos admiráveis Ana Cláudia Furtado Rocha e Armando Furtado Rocha.

E como não agradecer aos amigos sem os quais fica complicado caminhar pois estão sempre comigo e falar de vocês nesta caminhada é bem difícil pois se sou o que sou vocês se fizeram presente com certeza.

Como não agradecer as minhas irmãs Ariella Freitas Barros e Allana Freitas Barros que sempre me fizeram acreditar que ia conseguir e que estiveram presente nos momentos mais complicados e assim me fizeram vê que nem tudo era tão difícil assim e que a situação se resolveria.

E a vocês minhas meninas cada uma com seus gênios, e opiniões diferentes, que sempre me ajudaram e que compartilhamos momentos maravilhosos em meio as adversidades ao longo dessa caminhada Thayane Portela Oliveira, Beatriz Barros Nunes Rodrigues, Largylla mendes Torres e Yullia Sayune Carvalho.

E como esquecer de vocês amores da minha vida Thiago Barros e Glauco Vinícius Palhano Bezerra.

E agradecer a essa turma maravilhosa que se manteve unida em todas as situações.

E a vocês meus amigos e amigas de jornada entre momentos longe e perto Flávia Regina, Ismaylle Abreu, Suziane Ferreira, Akilá Carvalho, Nataliane, Isabel Santos, Renata Avelar, Clara Dayana, Brendinha Fernanda e minhas cunhadas Dilrivan Teixeira e Kamilla Abreu.

E a todos que de forma direta e indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

“Não te mandei eu? Sê forte e corajoso, não pisme, nem te espante porque eu sou teu Deus e estou contigo por onde quer que andares”.

Josué 1:9
Bíblia Sagrada

RESUMO

As mudanças que contribuem para a evolução das sociedades estão ligadas a capacidade do ser humano em produzir e modificar materiais para atender sua necessidade. Além do que, foi descoberto que as propriedades de um material podem ser alteradas por meio de tratamentos térmicos e adição de outras substâncias. O progresso de muitas das tecnologias que possibilitam a nossa existência tão agradável é de exclusividade do mundo que envolve o estudo dos materiais. Neste trabalho foram estudados os efeitos da microestrutura sobre as propriedades mecânicas do aço ABNT 1045, sob a aplicação de diferentes tratamentos térmicos com o objetivo de formação de diversas microestruturas com diferentes frações volumétricas das fases ferrita, bainita, martensita e martensita revenida com o intuito de relacioná-las com as propriedades mecânicas tais como: tensão de escoamento, tensão máxima suportada pelo material, ductilidade, dureza, energia absorvida por impacto dentre outras. Como resultados observou-se a microestrutura heterogênea do aço antes dos tratamentos térmicos, a homogeneização e obtenção da perlita grosseira obtida no recozimento pleno, a perlita fina observada após a normalização e a microestrutura martensítica após a têmpera e a martensita revenida depois do revenimento. Assim essas microestruturas influenciaram diretamente na menor tensão de escoamento do aço recozido comparado ao normalizado, na menor absorção de energia por impacto de 58,4J enquanto o normalizado apresenta 73,4J e por último na dureza rockwell C a qual apresentou maior valor para a microestrutura temperada 63HRC e menor valor para a microestrutura recozida 14,1 HRC.

Palavras chaves: Microestrutura. Propriedades mecânicas. Tratamentos térmicos.

ABSTRACT

The changes that contribute to the evolution of societies are linked to the capacity of human beings to produce and modify materials to meet their needs. In addition, it has been discovered that the properties of a material can be altered by means of heat treatments and addition of other substances. The progress of many of the technologies that make our existence so enjoyable is the exclusivity of the world that involves the study of materials. In this work the effects of the microstructure on the mechanical properties of the ABNT 1045 steel were studied under the different thermal treatments with the objective of forming several microstructures with different volumetric fractions of the ferrite, bainite, martensite and martensite phases with the intention of To relate them to the mechanical properties such as: yield stress, maximum stress supported by the material, ductility, hardness, energy absorbed by impact, among others. As a result, the heterogeneous microstructure of the steel before the heat treatments, the homogenization and the obtaining of the coarse pearlite obtained in the full annealing, the fine pearlite observed after the normalization and the martensitic microstructure after the tempering and the martensite after the tempering were observed. Thus, these microstructures directly influenced the lower flow stress of the annealed steel compared to the normalized one, in the lower energy absorption by impact of 58.4J while the normalized one presents 73.4J and finally in the rockwell hardness C which presented higher value for the microstructure Tempered 63HRC and lower value for the annealed microstructure 14.1 HRC.

Keywords: Microstructure. Mechanical properties. Heat treatments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	Diagrama de equilíbrio Ferro-carbono	20
Figura 02	Representação esquemática das microestruturas para uma liga ferro-carbono de composição eutetóide	22
Figura 03	Representação esquemática das microestruturas para uma liga ferro-carbono de composição hipoeutetóide.	23
Figura 04	Representação esquemática das microestruturas para uma liga ferro-carbono de composição hipereutetóide.	24
Figura 05	Representação esquemática do recozimento tempera e revenido.	25
Figura 06	Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno.	26
Figura 07	Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno.	27
Figura 08	Diagrama esquemático de transformação para normalização.	28
Figura 09	Diagrama esquemático de transformação para a normalização, comprovando a possibilidade de obtenção do constituinte bainita.	29
Figura 10	Diagrama de fases ferro-carbono de ferro na vizinhança do eutetóide indicando as faixas de temperatura para os tratamentos térmicos de aço-carbono comuns, mostrando a temperatura de normalização	30
Figura 11	Diagrama esquemático de transformação para tempera e revenido.	31
Figura 12	Representação esquemática da correspondência entre as redes CFC e TCC.	32
Figura 13	Modelo simplificado da transformação martensítica.	33
Figura 14	Intervalo de formação da martensita tipo ripas e tipo placas.	34
Figura 15	Variação da dureza no revenido da martensita em ligas Fe-C.	36
Figura 16	Esquema de ensaio de impacto Charpy. O corpo de prova absorve na sua deformação a fratura a diferença de energia potencial do pêndulo, correspondente à variação da altura ($h-h'$).	41
Figura 17	Apresenta os tipos e corpos de prova empregados nos ensaios Charpy e Izod.	42
Figura 18	Máquina policorte MAXICUT	44
Figura 19	Lixadeira Arotec S.A	44
Figura 20	Microscópio óptico usado para visualizar as microestruturas	45

Figura 21	Representação esquemática dos ensaios mecânicos realizados no aço 1045.	45
Figura 22	Barras de aço que foram usadas nos tratamentos térmicos	48
Figura 23	Forno Mufla Quimus usado para aquecer as barras até a completa austenização de suas estruturas.	48
Figura 24	Gráfico semelhante ao usado para obter a temperatura de recozimento e normalização	48
Figura 25	Corpos de prova usados no ensaio mecânico de tração.	49
Figura 26	Máquina de tração EMIC	50
Figura 27	Corpos de prova Charpy.	50
Figura 28	Máquina de impacto WP 410 Gunt	51
Figura 29	Microdurômetro usado para o Ensaio de microdureza vickers	52
Figura 30	Exemplo da aplicação de carga pelo penetrador no ensaio de microdureza vickers.	52
Figura 31	Imagem da configuração do microdurômetro antes da aplicação da carga.	53
Figura 32	Máquina de dureza Pantec RBS	54
Figura 33	Micrografia do aço 1045 na condição de recebido ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.	56
Figura 34	Micrografia do aço 1045 após tratamento térmico de recozimento ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.	57
Figura 35	Micrografia do aço 1045 após tratamento térmico de normalização ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal	57
Figura 36	Micrografia do aço 1045 após tratamento térmico de têmpera ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.	57
Figura 37	Micrografia do aço 1045 após tratamento térmico de revenimento a 400°C ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal	58
Figura 38	Micrografia do aço 1045 revenido a 450°C ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.	58
Figura 39	Micrografia do aço 1045 revenido à 500°C ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.	59
Figura 40	Fração volumétrica do aço 1045 seção longitudinal para a condição de recebido, recozido e normalizado.	60

Figura 41	Fração volumétrica do aço 1045 seção transversal para a condição de recebido, recozido e normalizado.	60
Figura 42	Comportamento do aço 1045 na condição de recebido.	61
Figura 43	Comportamento do aço 1045 recozido	61
Figura 44	Comportamento do aço 1045 normalizado.	61
Figura 45	Analisa a porcentagem de estricção do aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado	64
Figura 46	Representa a porcentagem de alongamento do aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.	65
Figura 47	Analisa a tensão de escoamento do aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.	66
Figura 48	Analisa a tensão máxima suportada pelo aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.	67
Figura 49	Analisa a energia absorvida por impacto no aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.	68
Figura 50	Micrografia do aço 1045 normalizado com endentação na ferrita.	69
Figura 51	Valores de dureza Vickers para o aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.	70
Figura 52	Dureza Rockwell C para o aço 1045 na condição de recebido, recozido, normalizado, temperado e revenido a 400°C,450°C e 500°C.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Sistema SAE e AISI de classificação dos aços	19
Tabela 02	Composição do aço em estudo SAE 1045	43
Tabela 03	Amostra do aço 1045 na condição de recebido e após tratamentos térmicos	43
Tabela 04	Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 na condição de recebido com corte longitudinal	59
Tabela 05	Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 na condição de recebido com corte transversal.	59
Tabela 06	Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 recozido com corte longitudinal	59
Tabela 07	Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 recozido com corte transversal	59
Tabela 08	Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 normalizado com corte longitudinal	59
Tabela 09	Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 normalizado com corte transversal	59
Tabela 10	Resultados obtidos no ensaio de tração para o aço 1045 na condição de recebido	62
Tabela 11	Resultados obtidos no ensaio de tração para o aço 1045 recozido	63
Tabela 12	Resultados obtidos no ensaio de tração para o aço 1045 normalizado	63
Tabela 13	Resultado do ensaio de microdureza Vickers do aço 1045	69
Tabela 14	Resultado do ensaio de dureza do aço 1045 na condição de recebido, recozido, normalizado, temperado e revenido	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Considerações iniciais	18
3.2	Definições e classificações	18
3.3	Diagramas de ferro-carbeto de ferro (Fe-Fe₃C)	20
3.4	Tratamentos térmicos	24
3.5	Recozimento Pleno	25
3.6	Normalização	28
3.7	Têmpera	30
3.7.1	Mecanismos da transformação Martensítica	31
3.8	Tratamento térmico de revenimento	35
3.8.1	Influência do revenido na dureza e tenacidade	36
3.9	Ensaio Mecânicos	37
3.9.1	Ensaio mecânico de tração	38
3.9.2	Ensaio de dureza	38
3.9.3	Ensaio de microdureza	40
3.9.4	Ensaio de impacto	40
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	43
4.1	Análise microestrutural	43
4.2	Ensaio mecânicos	45
4.3	Tratamentos térmicos realizados antes da confecção dos corpos de prova para o ensaio de tração, impacto e microdureza	46
4.3.1	Cálculo do tempo de austenização	46
4.3.2	Cálculo do tempo de austenização do aço 1045	46
4.4	Tratamentos térmicos realizados antes do ensaio de dureza	47
4.5	Ensaio mecânico de tração	49
4.6	Ensaio mecânico de impacto	50
4.7	Ensaio mecânico de microdureza	51
4.8	Ensaio mecânico de dureza	53

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1	Microestruturas obtidas.....	55
5.2	Resultado da fração volumétrica de ferrita e perlita.....	59
5.3	Resultado do ensaio mecânico de tração e análise dos gráficos de tensão x deformação.....	60
5.3.1	Propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de tração.....	62
5.3.2	Análise da redução de área do aço 1045	64
5.3.3	Análise da porcentagem de alongamento do aço 1045.....	65
5.3.4	Análise da tensão de escoamento do aço 1045	65
5.3.5	Análise da tensão máxima suportada pelo aço 1045	66
5.3.6	Análise da tensão de ruptura do aço 1045	67
5.4	Resultado do ensaio de impacto do aço 1045	68
5.5	Resultado do ensaio de microdureza para o aço 1045.....	68
5.5.1	Valores obtidos para microdureza Vickers do aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.	69
5.6	Análise da dureza Rocwell C para o aço 1045 nas condições em estudo.....	70
6	CONCLUSÃO.....	73
7	SUGESTÕES	75
	REFERÊNCIA	76

1 INTRODUÇÃO

Os materiais estão totalmente ligados ao cotidiano do homem quer seja nos meios de transporte, moradia, vestes, lazer, produção de alimentos entre outros. Ao longo da história, as mudanças que contribuem para a evolução das sociedades estão conectadas a capacidade do ser humano em produzir e modificar materiais para atender sua necessidade. Além do que, foi descoberto que as propriedades de um material podem ser modificadas por meio de tratamentos térmicos e adição de outras substâncias. O avanço de muitas das tecnologias que possibilitam a nossa existência tão agradável é de exclusividade do mundo que envolve o estudo dos materiais através das mudanças possíveis.

Diante disso este trabalho visa estudar um dos materiais mais usados no mundo e que tem suas propriedades mecânicas alteradas de acordo com a necessidade de sua aplicação, o aço, onde irá se conhecer um pouco mais dos tratamentos térmicos realizados neste material. Desta maneira este trabalho faz uma relação da influência dos tratamentos térmicos relacionando os resultados adquiridos para o material na condição de recebido, recozido, normalizado, temperado e revenido levando em consideração o resultado de alguns ensaios mecânicos onde se faz uma relação desses ensaios com as microestruturas formadas em cada tratamento térmico desenvolvido.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- a) Analisar os efeitos dos tratamentos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço ABNT 1045.

2.2 Objetivos específicos

- a) Identificar as microestruturas formadas por MO (Microscopia ótica).
- b) Analisar a fração volumétrica das fases para o material na condição de recebido, recozido e normalizado.
- c) Analisar as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração, microdureza e energia absorvida por impacto para o aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.
- d) Analisar a dureza do aço 1045 na condição de recebido, recozido, normalizado, temperado e revenido.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Considerações iniciais

O aço é o material mais versátil das ligas metálicas. Produzido em grande variedade de tipos e formas, para atender da melhor maneira possível as diversas aplicações. Esta variedade decorre da necessidade das inúmeras adequações dos produtos, às exigências do mercado que lhe pede aplicações específicas, sejam elas nas mudanças das propriedades mecânicas, na composição química, ou até mesmo na forma final do produto. (CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO, 2016).

3.2 Definições e classificações

Segundo Chiaverini (2008), “Aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,0% de carbono, além de certos elementos resultantes dos processos de fabricação”.

Os aços podem ser classificados de diversas formas, podendo agrupá-los quanto sua composição química, seu método de fabricação, forma, microestrutura, acabamento, método de desoxidação ou até pelo seu tratamento térmico (BARRA, 2013).

O sistema mais utilizado para a classificação dos aços é em função da composição química, os dois institutos mais influentes e desenvolvidos desse sistema são o SAE (Society of Automotive Engineers) e o AISI (American Iron and Steel Institute). O sistema consiste em classificar os aços em torno de um conjunto de quatro algarismo (até cinco), onde os dois primeiros números representam o elemento de liga presente no aço, já o último par de algarismo mostra o teor de carbono contido no mesmo (CHIAVERINI, 2008). A tabela 01 mostra alguns aços classificados de acordo com esse método.

Os aços carbono podem ser classificados quanto sua composição química (teor de carbono) podendo ser de baixo (até 0,25% C), médio (entre 0,25% e 0,5% C) e alto (entre 0,5% e 1,4% C) teor. Além desta classificação, pode-se subdividi-los em cinco grupos mais específicos, sendo estes: extradoce (%C <0,15), doce

(0,15<%C<0,3), meio- doce (0,3<%C<0,4), meio duro (0,4<%C<0,6) e extraduro (0,7%<C<1,2) (CHIAVERINI, 2008).

Tabela 01 - Sistema SAE e AISI de classificação dos aços.

Designação		Tipo de Aço
SAE	AISI	
10XX	C 10XX	Aços-carbono comuns
11XX	C 11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
13XX	13XX	Aços-manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços-níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços-níquel com 5,0% de Ni
31XX	31XX	Aços-níquel-cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E 33XX	Aços-níquel-cromo com 3,50% de Ni e 1,57% de Cr
303XX	—	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Ni-Cr
40XX	40XX	Aços-molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços-cromo-molibdênio com 0,50% ou 0,95% de Cr e 0,12%, 0,20% ou 0,25% de Mo
43XX	43XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio, com 1,82% de Ni, 0,50% ou 0,80% de Cr e 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços-níquel-molibdênio com 1,57% ou 1,82 de Ni e 0,20 ou 0,25% de Mo
47XX	47XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,20% de Mo
48XX	48XX	Aços-níquel-molibdênio com 3,50% de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aços-cromo com 0,27%, 0,40% ou 0,50% de Cr
51XX	51XX	Aços-cromo com 0,80% a 1,05% de Cr
501XX	—	Aços de baixo cromo para rolamentos, com 0,50% de Cr
511XX	E511XX	Aços de médio cromo para rolamentos, com 1,02% de Cr
521XX	E521XX	Aços de alto cromo para rolamentos, com 1,45% de Cr
514XX	—	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Cr
515XX	—	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Cr
61XX	61XX	Aços-cromo-vanádio com 0,80% ou 0,95% de Cr e 0,10% ou 0,15% de V (mín.)
86XX	86XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 0,55% de Ni, 0,50% ou 0,65% de Cr e 0,20% de Mo
87XX	87XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 0,55% de Ni, 0,50% de Cr e 0,25% de Mo
92XX	92XX	Aços-silício-manganês com 0,65%, 0,82%, 0,85% ou 0,87% de Mn, 1,40 ou 2,00% de Si e 0%, 0,17%, 0,32% ou 0,65% de Cr
93XX	93XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 3,25% de Ni, 1,20% de Cr e 0,12% de Mo
98XX	98XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,00% de Ni, 0,80% de Cr e 0,25% de Mo
950	—	Aços de baixo teor em liga e alta resistência
XXBXX	XXBXX	Aços-boro com 0,0005% de B min.
XXLXX	CXXLXX	Aços-chumbo com 0,15% – 0,35% de Pb

Fonte: (CHIAVERINI, 2008)

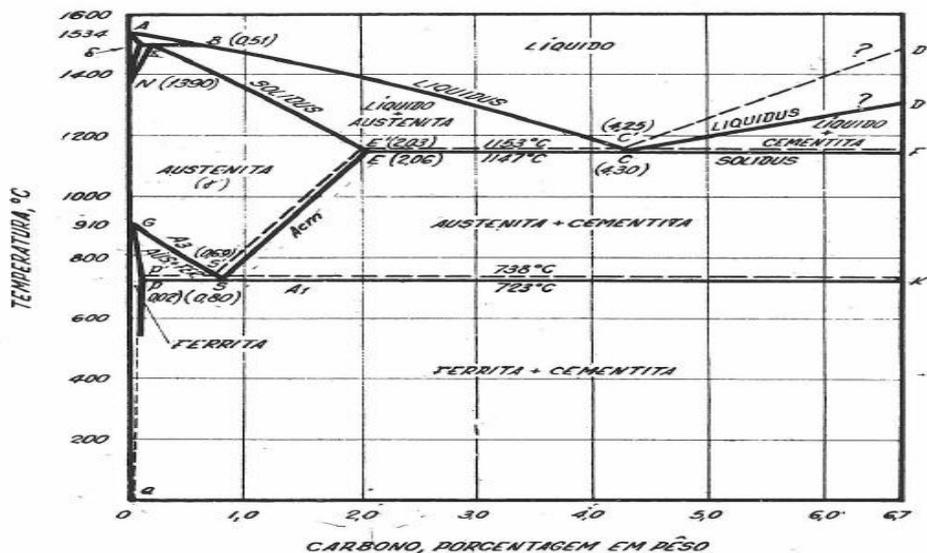
Os aços ligados são aqueles que contém elementos de liga acima da quantidade consideradas normais como Cr, Ni, Mo, Va, W, além de muitos outros-para que possam alterar várias características do aço carbono, desde sua propriedade mecânica até resistência à corrosão e temperabilidade. Eles podem ser agrupados inicialmente em aços de baixa liga, quando contém entre 3% a 5% de elementos de liga em sua composição, ou como aços alta liga, quando contém 10% a 12% de elementos de liga. A existência de aços com média liga pode ser considerada em grupo intermediário entre os aços de baixa e alta liga (CALLISTER, 2013).

3.3 Diagramas de ferro-carbeto de ferro (Fe-Fe₃C)

As propriedades mecânicas de um metal assim como o seu desempenho em serviço, dependem da sua composição química, da estrutura cristalina, do histórico de processamento e dos tratamentos térmicos realizados em determinado material (KRAUS, 1994).

O suporte onde todo o tratamento térmico do aço é baseado está representado no diagrama de fases, apresentado na figura 01. Este diagrama descreve a composição das regiões de temperatura em que várias fases do aço estão estáveis, assim como os limites de equilíbrio entre os campos de fase (KRAUSS,1994).

Figura 01 - Diagrama de equilíbrio Ferro-carbono.



Fonte: (CHIAVERINI,2008)

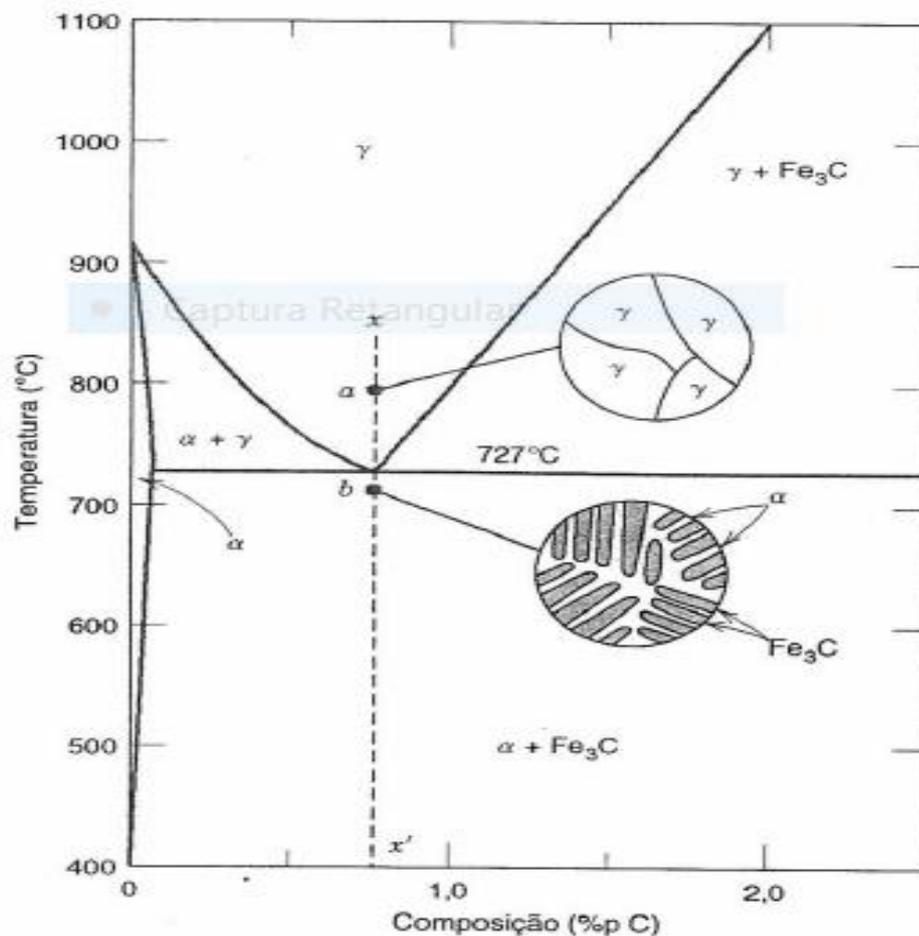
O diagrama representado na figura 01 retrata as ligas de aço com elementos de liga até teores considerados normais em aço carbono, onde é possível perceber alguns pontos importantes os pontos S, C e o A. O ponto S representa a transformação eutetóide do aço, quando o aço possui 0,8% de carbono em sua composição química e sua temperatura é de 727°C. No ponto eutetóide o ferro γ (austenita) se transforma em ferro α (ferrita) e cementita (Fe_3C), ocorrendo a transformação de uma fase sólida em outras duas distintas. Em C tem-se o ponto eutético onde ocorre a transformação de uma fase líquida para duas fases sólidas ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$), o que ocorre em uma concentração de 4,3%C e na temperatura de 1147°C que é a menor temperatura de fusão (por completo) do aço. No ponto A tem-se uma reação peritética, na qual ocorre a transformação de uma fase líquida e uma fase sólida em outra fase sólida distinta porém esses pontos não têm tanta importância comercial (CALLISTER, 2013; CHIAVERINI, 2008).

Além dos pontos importantes há linhas no diagrama de fases indispensáveis para um conhecimento mais aprofundado sobre as características dos aços. Essas linhas são chamadas de linhas de transformação, sendo mais importantes as linhas GS (A_3), PSK (A_1) e ES (A_{cm}). Passando de uma temperatura mais alta para uma temperatura inferior antes da composição eutetóide através da linha GS, o ferro γ estará começando a se transformar em ferro α . Desta maneira, no campo delimitado pelas linhas GS, PS, e GP estão as fases γ e α . A linha ES que está localizada após a composição eutetóide mostra o limite de solubilidade do carbono no ferro γ . Ao percorrer esta linha no sentido do resfriamento estar-se á transformando ferro γ em ferro γ mais Fe_3C , e isso se deve ao decréscimo da solubilidade do ferro γ ao diminuir a temperatura. A linha PSK está na temperatura de 727°C e delimita a presença de austenita no aço. Abaixo de 727°C não é mais possível encontrar ferro γ (austenita); nessa temperatura há importantes transformações no aço (CALLISTER, 2013; CHIAVERINI, 2008).

Os aços carbonos, como já falado, podem conter desde 0,008% até cerca de 2% de teor de carbono em sua composição química. No diagrama de fases é possível classificar os aços carbono quanto a quantidade de carbono presente em sua composição, sendo os aços compostos por 0,76% de carbono os aços eutetóides, os aços com teores abaixo de 0,76% de carbono os hipoeutetóides e os aços com teores acima de 0,76% de carbono os hipereutetóides. Os aços eutetóide, ao serem resfriados, partindo do campo austenítico (ferro γ) passam pelo ponto eutetóide na

temperatura de 727°. Nesse ponto, a austenita se transformará em ferrita mais cementita. Essas duas fases se encontraram dispostas em lamelas intercaladas e essa microestrutura é denominada de perlita, lembrando que se está tratando de estados de equilíbrio e que o resfriamento é extremamente lento. Essa transformação pode ser vista na figura 02 (CALLISTER, 2013; CHIAVERINI, 2008).

Figura 02 - Representação esquemática das microestruturas para uma liga ferro-carbono de composição eutetóide.

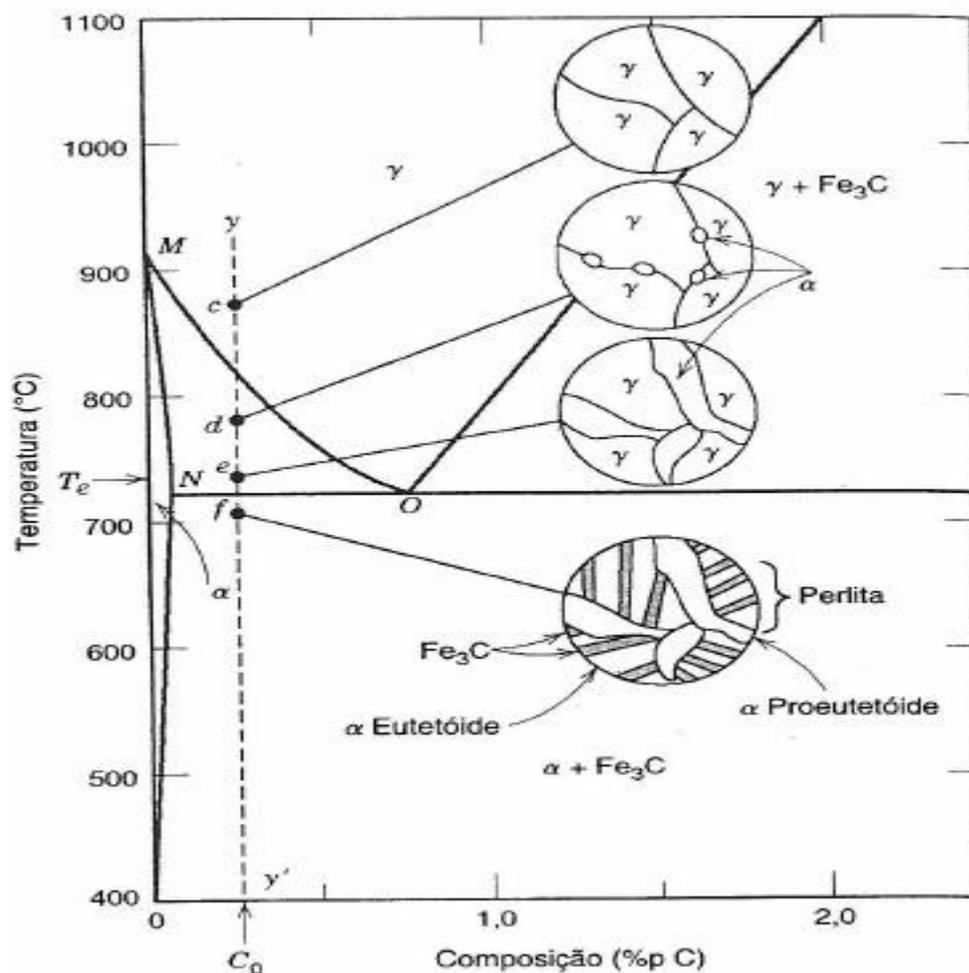


Fonte: (CALLISTER,2013)

Os aços hipoeutetóides se distinguem dos aços eutetóides por conter menos carbono em sua composição química. Deste modo, estão localizados mais à esquerda no diagrama de fases. Ao aquecer um aço hipoeutetóides com cerca de 0,3% de carbono em sua composição química a uma temperatura de 875°C (ponto C) ter-se-á somente austenita; ao resfriá-lo até uma temperatura em torno de 775°C (abaixo de A_3) começará a formar-se a ferrita α preferencialmente nos contornos de grão

da austenita. À medida que o aço é resfriado aproximado do ponto E, a quantidade de ferro α presente no aço é aumentada até chegar a linha A_1 (727°C). A ferrita formada entre A_3 e A_1 tem um nome específico chamada de ferrita proeutetóide. Atravessando-se a linha A_1 , toda austenita contida no aço se transformará em perlita (lamelas de ferrita e cementita), tendo como produto final ferrita proeutetóide e perlita. Na figura 03 está a representação da transformação de um aço hipoeutetóide (CALLISTER, 2013).

Figura 03 - Representação esquemática das microestruturas para uma liga ferro-carbono de composição hipoeutetóide.

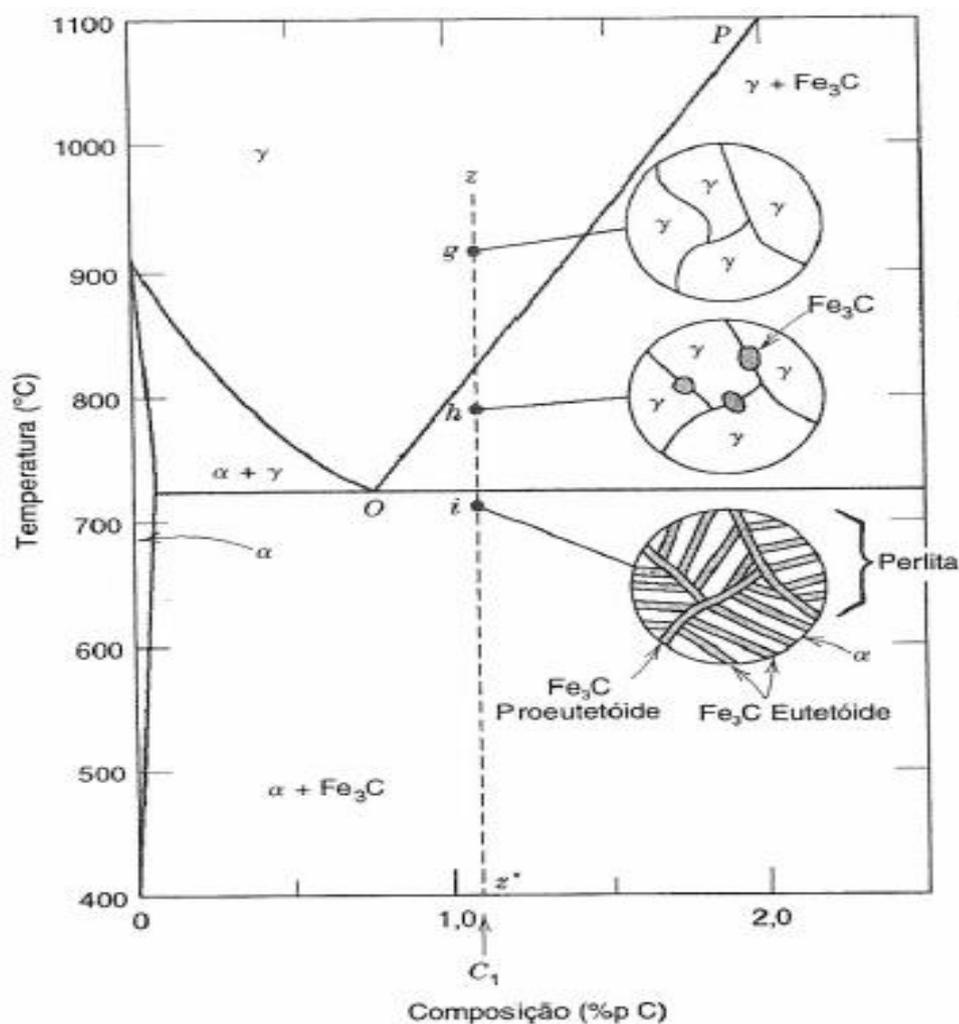


Fonte: (CALLISTER,2013)

Nos aços hipereutetóides o teor de carbono é superior ao dos aços eutetóides, ou seja, eles têm mais que 0,76% de carbono em sua composição química.

Acima da linha A_{cm} os aços hipereutetóides apresentam apenas a fase ferro γ . Ao ser resfriado abaixo da linha A_{cm} e acima da linha A_1 o aço transforma uma parte da austenita (ferro γ) em cementita, que neste tipo de aço é denominada cementita proeutetóide. Abaixo de A_1 e o resto de austenita presente no aço irá se transformar em perlita, tendo como microestrutura final cementita proeutetóide e perlita. A figura 04, o diagrama de fases representa esse tipo de transformação (CALLISTER, 2013).

Figura 04 - Representação esquemática das microestruturas para uma liga ferro-carbono de composição hipereutetóide.



Fonte: (CALLISTER,2013)

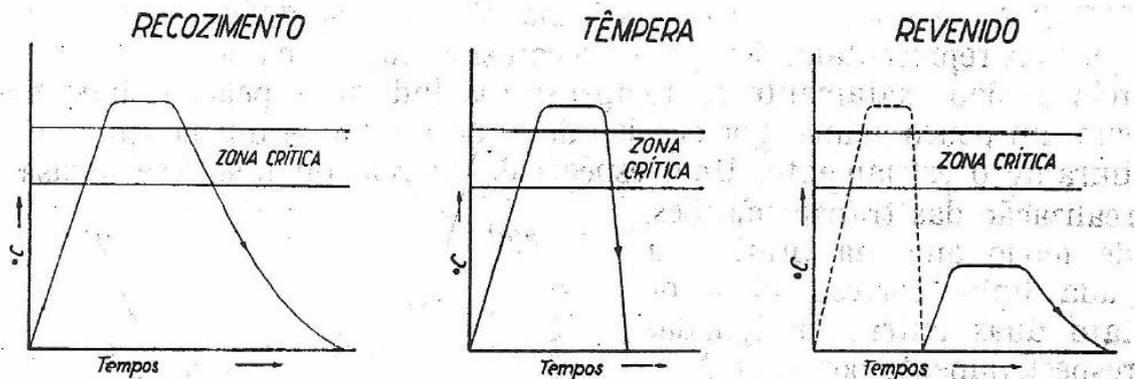
3.4 Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos podem ser retratados por período de aquecimento e resfriamento sob estados controlados de temperatura, tempo, atmosfera e

velocidades de aquecimento e resfriamento, com a finalidade de alterar suas propriedades físicas e mecânicas, proporcionando-lhes características determinadas que oferecem microestruturas modificadas sem que aconteça mudança na forma do produto (CHIAVERINI, 2008).

Existem três principais grupos de tratamentos térmicos: recozimento, tempera e revenimento.

Figura 05 - Representação esquemática do recozimento, tempera e revenido.



Fonte: (COLPAERT, 1974)

Os tratamentos de recozimento, normalização e tempera demanda transformações de fase a partir da austenita, lembrando que segundo Callister (1940) a normalização é um tratamento térmico de recozimento. E esses tratamentos são aplicáveis somente a aços transformáveis. Evidentemente, às inúmeras estruturas prováveis de se adquirir na transformação da austenita estão ligados a propriedades diferentes, desde o máximo de ductilidade e mínimo de dureza, característica de estruturas ferríticas, como também elevado valor de dureza e menor ductilidade que fazem parte das microestruturas ligadas a martensita.

Já o tratamento de revenimento está associado a aços temperados (SILVA; MEI, 1988).

3.5 Recozimento Pleno

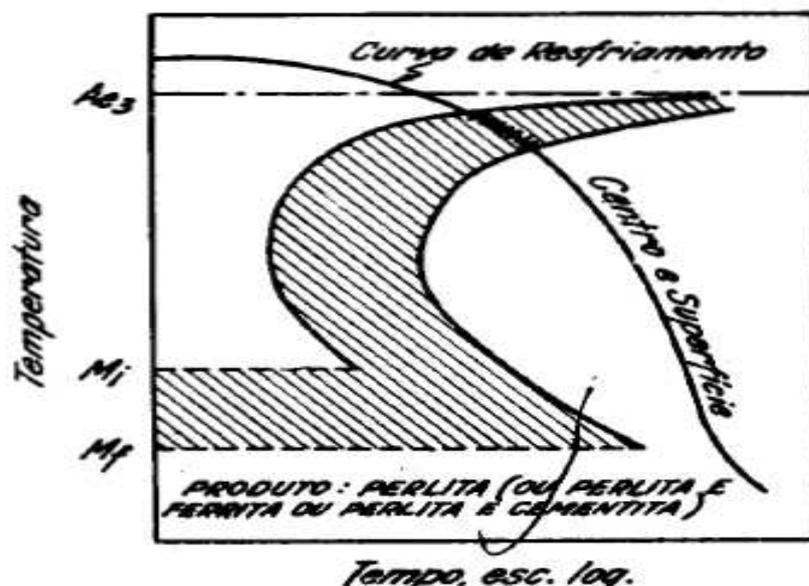
Em consequência dos processos de fabricação as barras e tarugos de aço podem acumular tensões e apresentar microestruturas heterogêneas com tamanho

de grão exagerado e dureza elevada. O recozimento pleno é feito com o objetivo de diminuir ao máximo a dureza do aço. Por meio do recozimento pleno é possível aumentar a ductilidade e a usinabilidade do aço além de controlar seu tamanho de grão. Usa-se este tratamento quando na sequência de fabricação o aço deve sofrer elevado grau de deformação ou a peça deve ser usinada. O recozimento pleno oferece ductilidade a peças que em outras circunstâncias apresentariam comportamento frágil (TSCIPTSCHIN, 2010).

Este tratamento ocorre ao se aquecer o aço acima da zona crítica, por um tempo suficiente para se ter a completa austenização do aço, onde acontece a total dissolução do carboneto de ferro no ferro gama, seguido de um resfriamento bastante lento que pode ser mediante o controle de velocidades de resfriamento do forno ou desligando o mesmo e deixando que o material resfrie ao mesmo tempo que ele (CHIAVERINI, 2008).

A figura 06 - mostra a representação esquemática do recozimento pleno, onde temos como resultado desse tratamento a perlita grosseira que é a estrutura ideal para aços de baixo e médio teor de carbono a qual não é adequada para aços de alto teor de carbono quando se leva em consideração a questão da usinabilidade, neste caso é preferível uma estrutura esferoidizada, adquirida pelo coalescimento (CHIAVERINI, 2008).

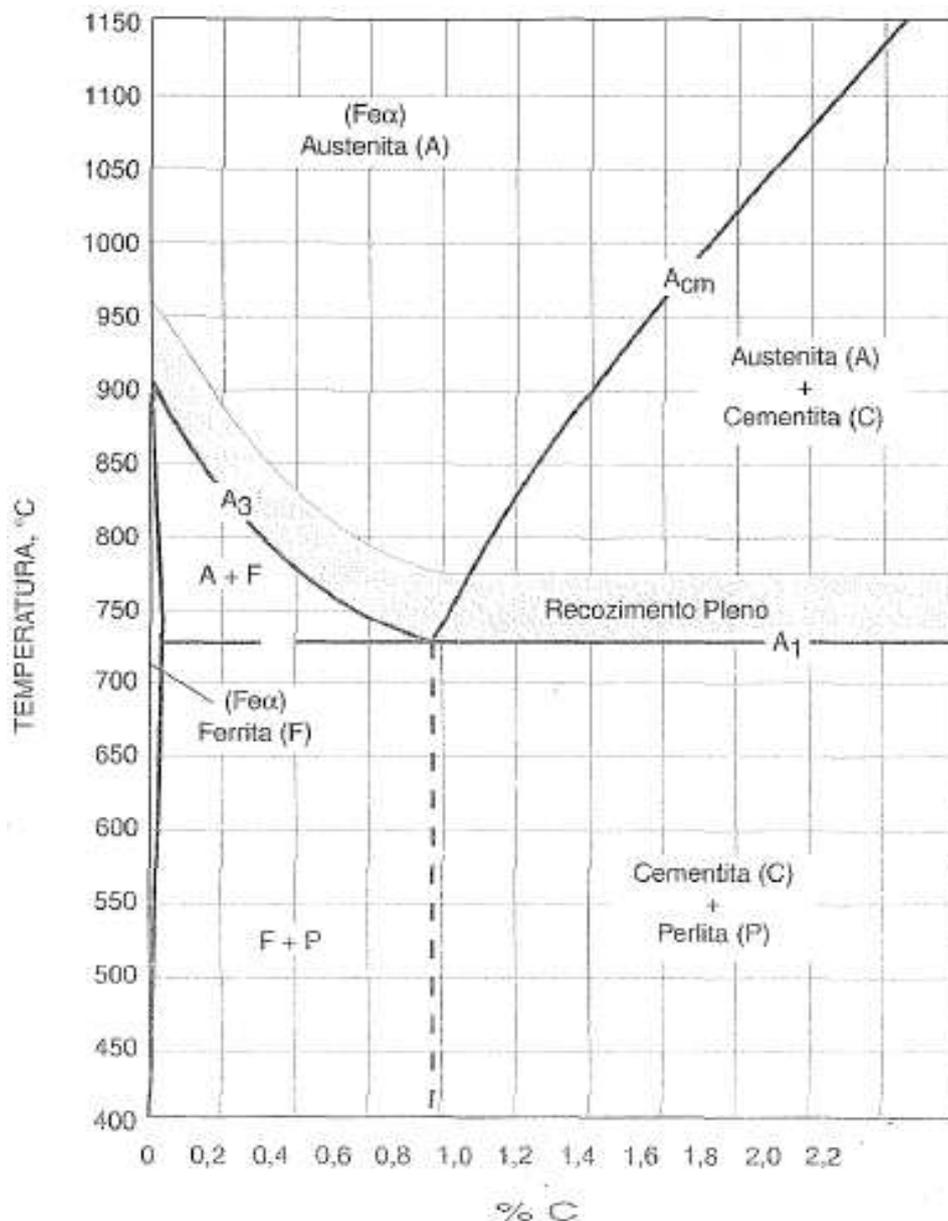
Figura 06 - Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno.



Fonte: (CHIAVERINI,2008)

Para que ocorra o recozimento pleno é necessário que a temperatura esteja aproximadamente a 50°C acima do limite superior da zona crítica, linha A_3 , para aços hipoeutetóides e acima do limite inferior linha A_1 , para aços hipereutetóides. Para esses aços é necessário que não se ultrapasse a linha A_{cm} já que no resfriamento lento posterior, ao passar novamente por essa linha, formar-se-ia nos contornos de grão da austenita a cementita, um involucro de carbonetos que iria fragilizar posteriormente a peça tratada. A figura 07 mostra as regiões de temperatura para o recozimento pleno (SILVA E MEI, 1988).

Figura 07 - Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno.

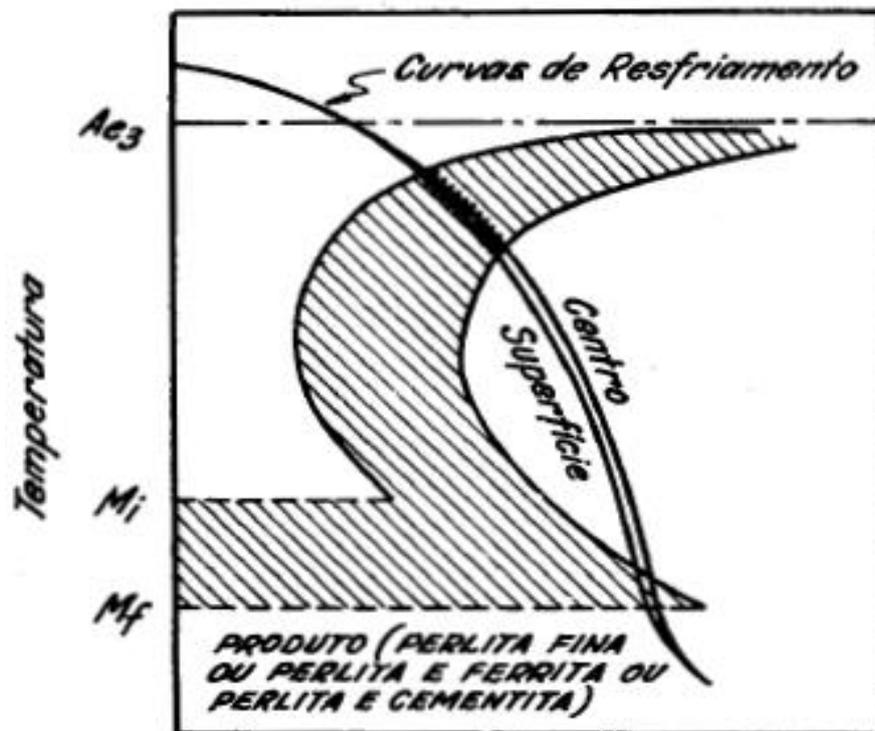


Os constituintes estruturais que resultam do recozimento pleno são: perlita e ferrita para aços hipoeutetóides, perlita e cementita para aços hipereutetóides e perlita para aços eutetóides.

3.6 Normalização

É o aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica, seguido de resfriamento ao ar, esse tratamento está esquematizado na figura 08. Para aços hipoeutetóides, pode-se admitir que a temperatura de aquecimento ultrapasse a linha A_3 e para os hipereutetóides a linha A_{cm} , só que agora diferentemente do caso do recozimento pleno sem os inconvenientes da formação dos involucro frágil de carbonetos já que o resfriamento é ao ar (CHIAVERINI, 2008).

Figura 08 - Diagrama esquemático de transformação para normalização.

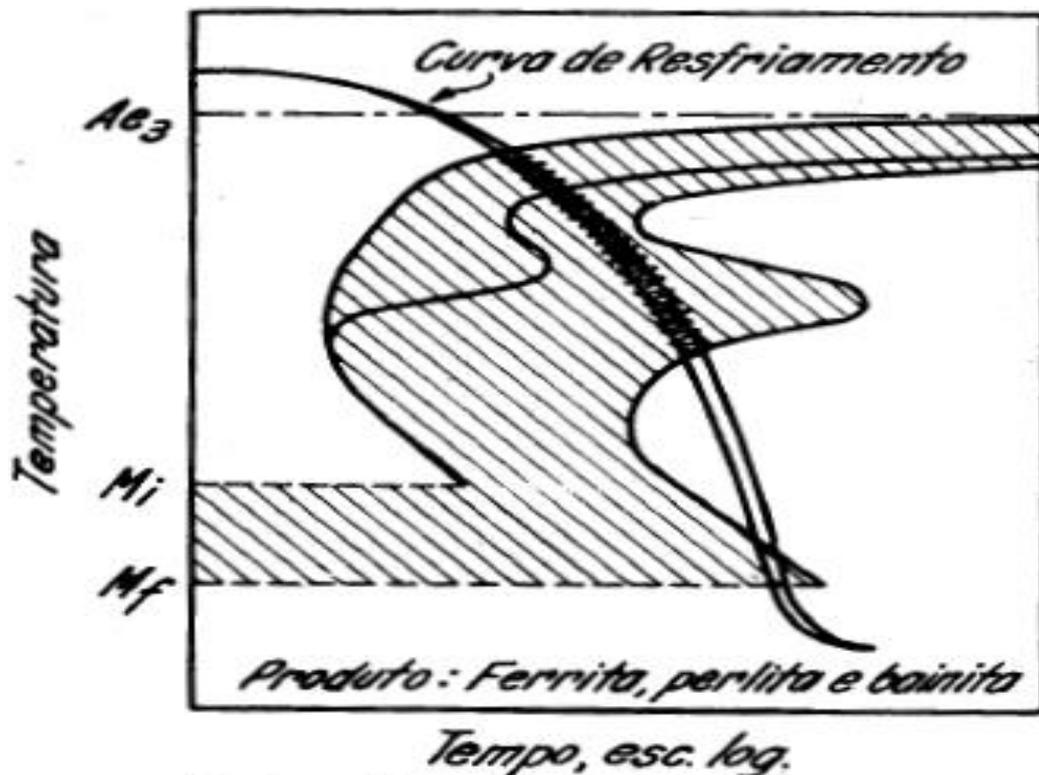


Fonte: (CHIAVERINI, 2008)

A normalização visa refinar a granulação grosseira de peças fundidas, assim como também é aplicada em peças depois de laminadas ou forjadas. A normalização é ainda usada como tratamento antes de se aplicar a têmpera e revenido, justamente para produzir estrutura mais uniforme do que a obtida por

laminação, por exemplo além de reduzir à tendência ao empenamento e facilitar a solução de carbonetos e elementos de liga. Especialmente nos aços-liga quando os mesmos são esfriados lentamente após a laminação, os carbonetos tendem a ser macios e volumosos, difíceis de se dissolver em tratamentos posteriores de austenização. A normalização repara esse inconveniente. Os constituintes formados na normalização são a ferrita e perlita fina, ou cementita e perlita fina. Eventualmente dependendo do aço pode-se formar a bainita que está esquematizada na figura 09 (CHIAVERINI, 2008).

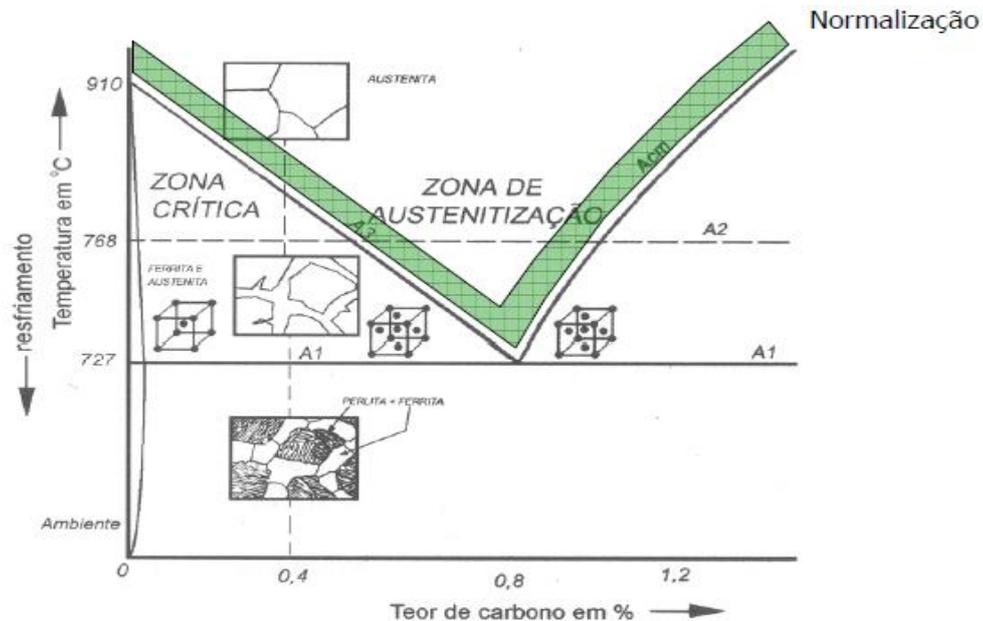
Figura 09 - Diagrama esquemático de transformação para a normalização, comprovando a possibilidade de obtenção do constituinte bainita.



Fonte: (CHIAVERINI,2008)

A faixa de temperatura onde acontece a normalização pode ser visualizada na figura 10, é importante saber que segundo Callister (2013) a normalização é um tipo de tratamento térmico de recozimento usado como dito anteriormente para refinar os grãos (diminuir o tamanho médio dos grãos) e produzir uma distribuição de tamanho mais uniforme e desejável; os aços perlíticos com grãos finos são mais tenazes do que os com grãos grosseiros.

Figura 10 - Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro na vizinhança do eutetóide indicando as faixas de temperatura para os tratamentos térmicos de aço-carbono comuns, mostrando a temperatura de normalização.



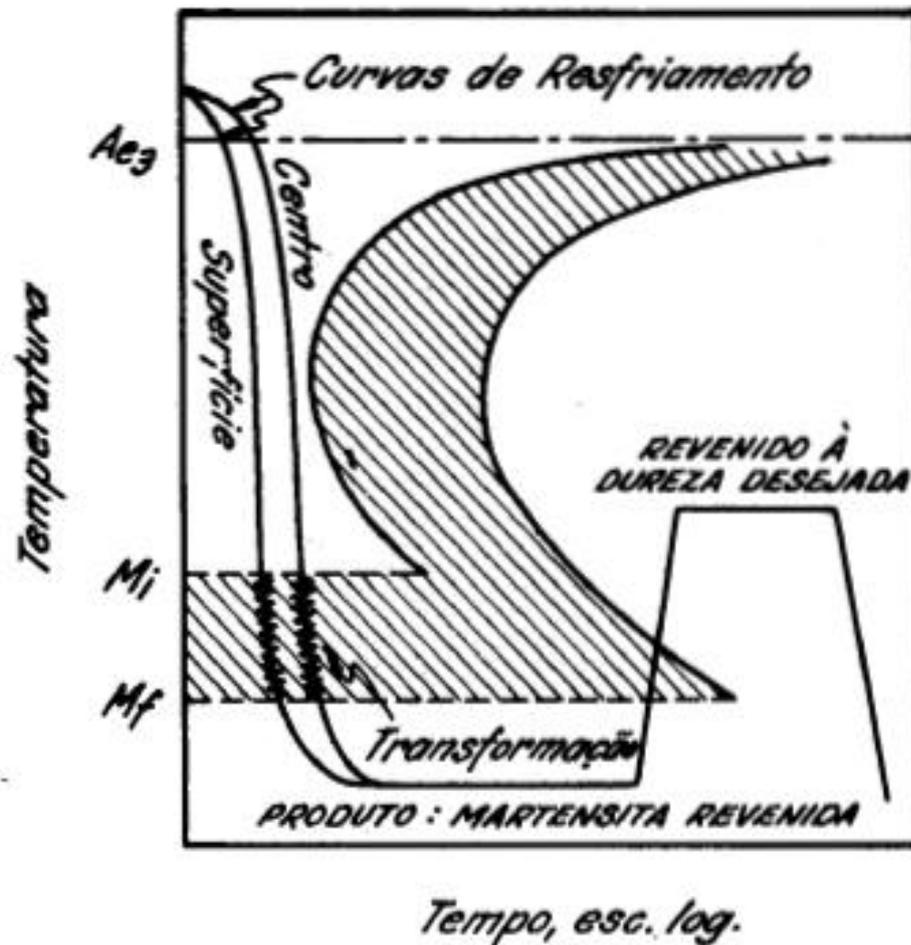
Fonte: (TSCHIPTSCHIN, 2010).

3.7 Têmpera

O tratamento térmico de têmpera consiste em produzir uma microestrutura martensítica, a martensita a qual é muito dura e tem alto limite de resistência a tração e pode ser de dois tipos: lenticular ou em ripas. Como a martensita é uma microestrutura que não está em equilíbrio não é encontrada no diagrama de fases pois na sua transformação não ocorre a transformação da austenita. Para se obter a estrutura martensítica deve-se fazer com que a curva de esfriamento passe à esquerda do cotovelo da curva em "C", evitando-se assim a transformação da austenita esquematizado na figura 11 (CALLISTER, 2013; CHIAVERINI, 2008).

O ciclo térmico para temperar um aço constitui-se em aquecer a liga até o campo austenítico, deixar por algum tempo até que toda a peça esteja na mesma temperatura e em seguida resfria-la rapidamente. O resfriamento da peça pode ser em água, óleo, salmora ou até mesmo no ar. O que irá influenciar na escolha no meio de resfriamento será a temperabilidade do material, quanto menor a sua temperabilidade mais drástico terá que ser o meio de resfriamento (CHIAVERINI, 2008).

Figura 11 - Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido.



Fonte: (CHIAVERINI, 2008).

3.7.1 Mecanismos da transformação Martensítica.

O tratamento térmico de têmpera é associado a uma transformação martensítica especial que pode ocorrer nos materiais metálicos. O nome martensita foi dado a microestrutura resultante das transformações das ligas de ferro-carbono, durante o resfriamento rápido da austenita (NISHIYAMA, 1978). Em seguida notou-se que algumas ligas não ferrosas também sofriam esse tipo de reação. Logo o termo se estendeu à denominação de qualquer produto que sofresse uma transformação adifusional assistida por tensão (GUIMARÃES, 1981).

A transformação martensítica modifica as características físicas dos materiais. Dessa forma, define-se como uma transformação de fase no estado sólido sem difusão, resultante de um movimento coordenado e/ou cooperativo entre os

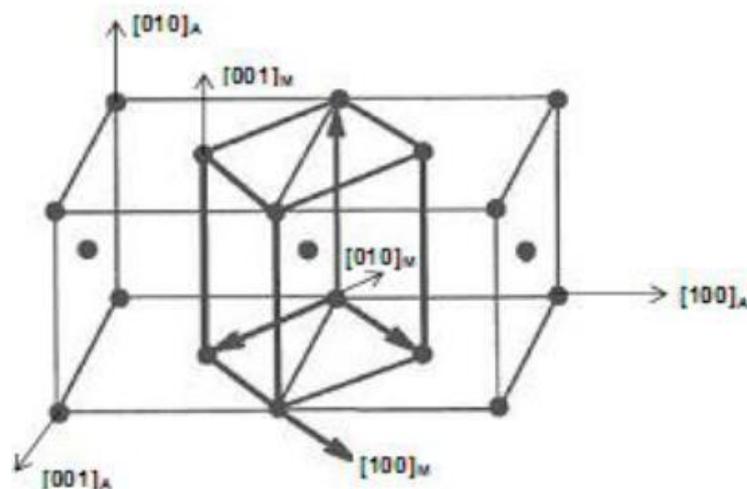
átomos da fase matriz, mantendo uma correlação entre os reticulados da fase matriz e da fase resultante.

Na segunda década do século passado foi apresentado um mecanismo pelo qual a martensita seria formada com um mínimo de movimentação atômica partindo da austenita, devido à descoberta da existência de uma deformação intrínseca à mudança de forma da martensita (REED-HILL, 1982).

O mecanismo foi explicado como deformação homogênea, em que o movimento coordenado dos átomos transforma a malha de bravais CFC da austenita em TCC ou CCC da martensita, ilustrado na figura 12. Isto ocorre de maneira tal que, a fase austenítica possui alta simetria cristalográfica, estrutura CFC, e martensítica, simetria cristalográfica menor (tetragonal, trigonal, romboédrica, dentre outras) (REED-HILL, 1982; OTSUKA E WAYAMAN, 1999; CALLISTER, 2013).

No momento em que ocorre a transformação martensítica, a estrutura do material CFC é transformada em CCC por um processo de cisalhamento brusco. Nesta nova estrutura, os átomos de carbono, nitrogênio e demais elementos de liga são impedidos de se difundirem para seus lugares ficando em solução. No entanto, a presença destes elementos intersticiais em teores acima do limite de solubilidade da fase CCC, determina-se uma estrutura TCC, por distorção. Posteriormente a transformação a composição química e a vizinhança atômica permanecem inalteradas (GUIMARÃES, 1981).

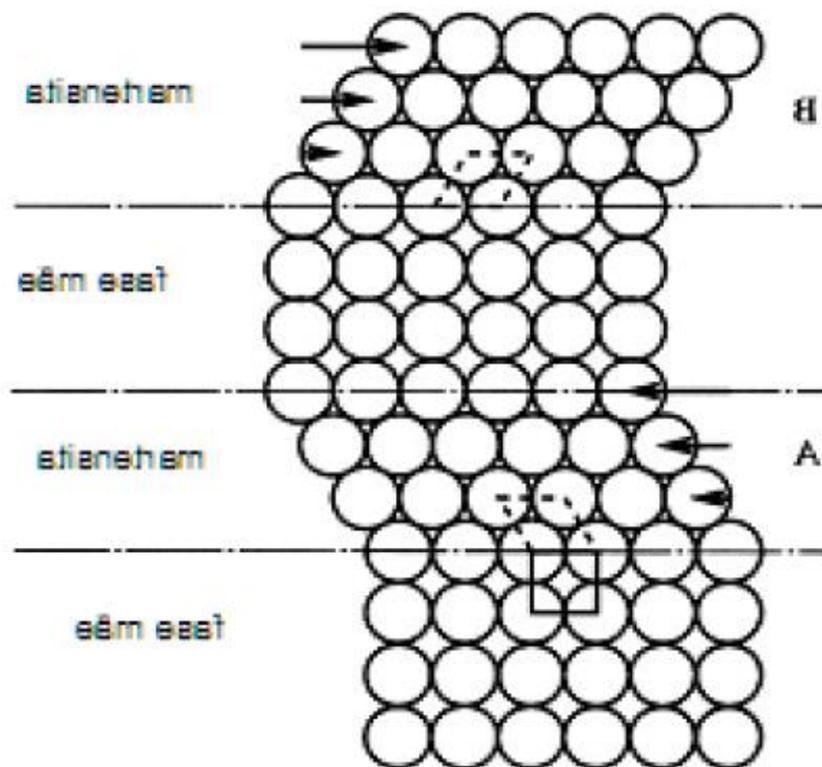
Figura 12 - Representação esquemática da correspondência entre as redes CFC e TCC.



Fonte: (Reed-Hill, 1982)

A modificação da austenita (estrutura CFC) em CCC ou TCC se dá pelo achatamento da cela tetragonal da austenita ao longo do eixo c, e na simultânea elevação das dimensões ao longo do eixo a, pelo mecanismo conhecido como distorção de Bain. (NOVIKOV, 1994). A figura 13 mostra um modelo simplificado dessa transformação martensítica.

Figura 13 – Modelo simplificado da transformação martensítica.



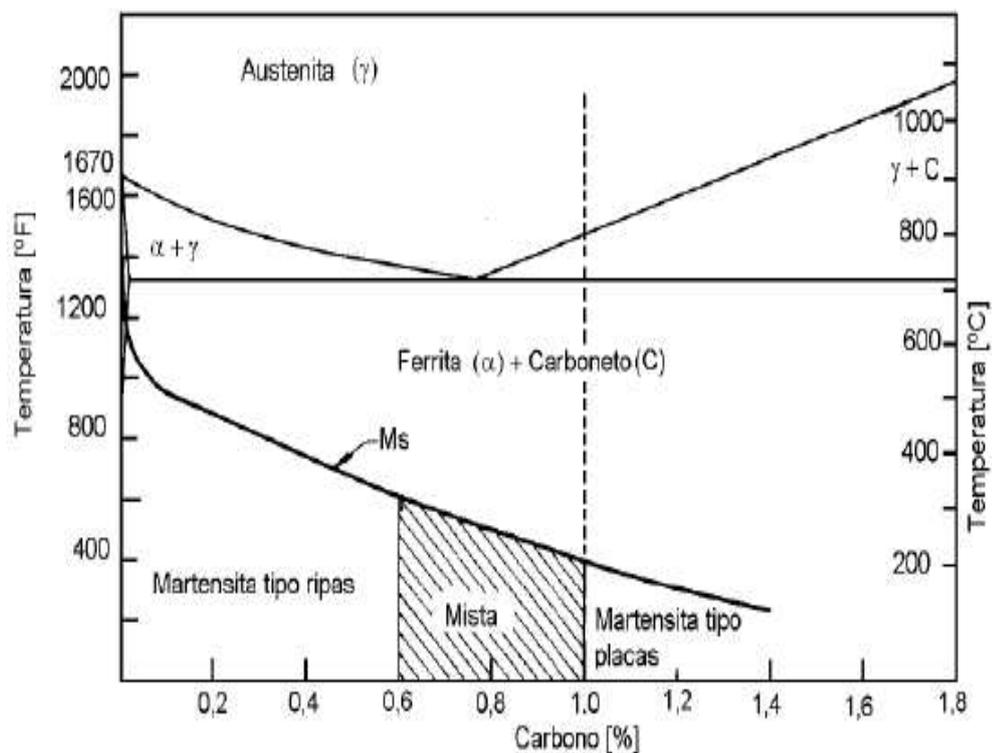
Fonte: (OTSUKA e WAYMAN,1999).

A deformação microscópica acontece na construção de uma plaqueta de martensita por um cisalhamento paralelo ao plano de hábito, que é tido como um plano não distorcido e invariante, em uma escala macroscópica, no qual as plaquetas de martensita se formam (NISHYAMA, 1978). Este cisalhamento pode ser associado a uma deformação por tração ou compressão simples uniaxial, sendo perpendicular ao plano de hábito. Quando ocorre uma deformação desse tipo é chamada de deformação com plano invariante, sendo esta a maneira mais simples para acontecer essa transformação, mantendo-se ainda a invariância do plano de hábito. A invariância no plano de hábito garante o mínimo de deformação elástica durante a

transformação. Isto é mais fácil de supor no caso da transformação com uma superfície de separação entre os cristais iniciais e de martensita: a invariância desta superfície previne a formação de macro deformações elásticas na fase inicial de martensita (REED-HILL,1982; NOVIKOV, 1994).

As martensitas dos aços-carbonos podem se formar de duas maneiras, como foi dito anteriormente, sendo uma na forma de ripa e a outra na forma lenticular que é internamente maclada. Para teores de carbono maiores (1,0-1,4%C) tendem a mostrar grandes frações volumétricas da componente maclada, para teores mais baixos (0,2-0,6%C), é favorecida a formação em ripas e entre 0,6 e 1,0%C, ocorre uma mistura de placas e ripas. Estas transformações podem ser observadas na figura 14. (KRAUS, 1994; CALLISTER, 2013).

Figura 14 – Intervalo de formação da martensita tipo ripas e tipo placas.



Fonte: (KRAUSS,1994)

As tensões térmicas originadas na peça provêm modo de têmpera devido aos altos gradientes térmicos. Além das tensões térmicas o processo de transformações da martensita, a partir da austenita, também cria uma série de tensões

de transformação. A soma destas tensões é definida como tensão residual de têmpera (KRAUSS, 1994).

Um dos maiores problemas relacionados ao aço temperado consiste justamente na baixa tenacidade e na alta concentração de tensões da martensita. Já que a martensita obtida pela têmpera é uma estrutura bastante dura e frágil. Segundo Kraus (1994), esta fragilidade se deve às distorções no reticulado ocasionadas pelos átomos de carbono retidos nos sítios octaédrico da martensita, à separação das impurezas para os contornos de grão da austenita, à formação de carbonetos durante a têmpera e às tensões residuais de têmpera.

Para aliviar estas tensões e melhorar a tenacidade do material temperado se faz necessário outra etapa de tratamento térmico. O processo adequado para este fim é denominado revenimento.

3.8 Tratamento térmico de revenimento

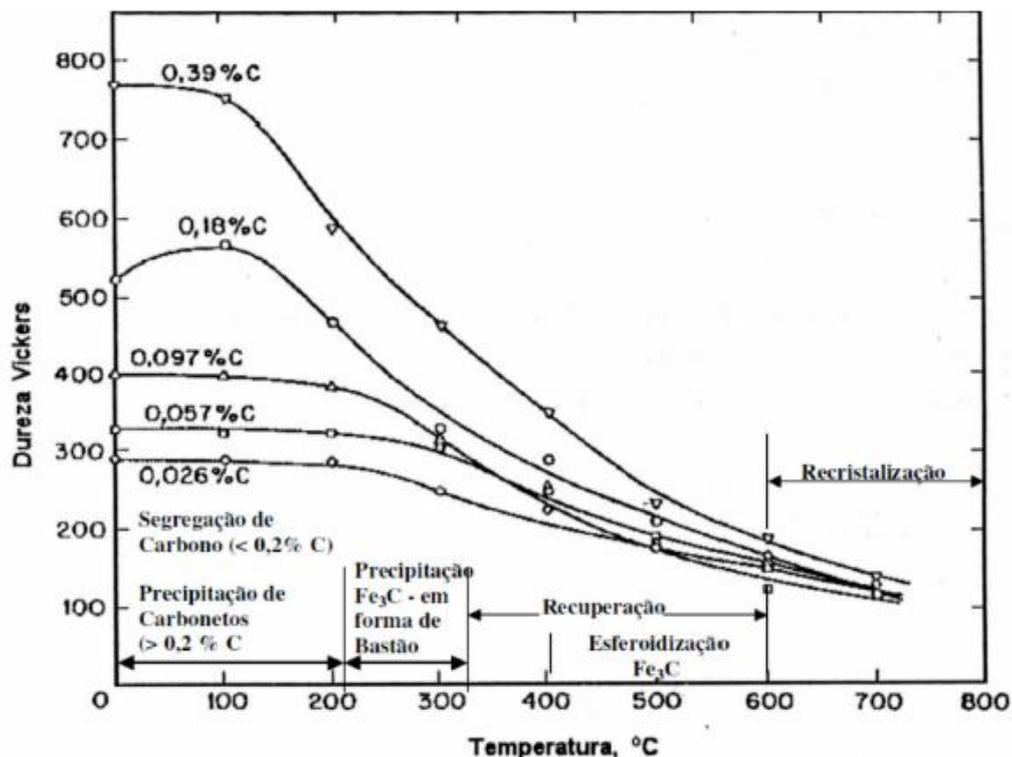
O tratamento térmico de revenido é estabelecido como um processo de aquecimento de aços martensíticos a elevadas temperaturas, a fim de torna-los mais dúcteis, tendo como objetivo um aprimoramento das propriedades mecânicas e da tenacidade do aço. O revenimento envolve segregação de carbono para os defeitos da rede e a precipitação de carbonetos metaestáveis, onde a natureza depende da composição química da liga e da temperatura de revenido. Além do que, acontece a decomposição da austenita retida e a recuperação e recristalização da estrutura martensítica. Estas reações ocorrem pelo processo de difusão do soluto na matriz e muitas vezes elas se sobrepõem, sendo influenciadas pela adição dos elementos de liga (ALEXANDER, 2009).

O revenimento é dividido em quatro estágios. O primeiro estágio é onde acontece a precipitação de carbonetos metaestáveis de transição. O segundo e o terceiro estágios envolvem a decomposição da austenita retida em ferrita e cementita. Em aços ligados sempre que o revenimento acontece a temperaturas mais elevadas, ocorre o fenômeno da dureza secundária, que se costuma chamar de quarto estágio. A segregação de carbono e a formação de aglomerados destes são conhecidas como “clusters”, que ocorrem através do processo conhecido como envelhecimento. Esta etapa pode ocorrer antes do primeiro estágio de revenido (PARKER,1997; HYAN, NUTTING,1986).

3.8.1 Influência do revenido na dureza e tenacidade.

As propriedades mecânicas dos aços estão entrelaçadas com as mudanças microestruturais que acontecem durante o revenido. Esta mudança ocorre em função do tempo e da temperatura de revenido. Observa-se na figura 15, a variação da dureza em função da temperatura revenido para martensitas em ligas Fe-C e as reações que acontecem durante o revenido (Wang,2004; Novikov,1994; Reed-Hill,1982).

Figura 15 - Variação da dureza no revenido da martensita em ligas Fe-C.



Fonte: (CHIAVERINI,2008)

Acontece um crescente amolecimento com o aumento da temperatura entre 200 e 700°C, para os aços temperados. No gráfico da figura d, consegue-se perceber que, em temperatura abaixo de 200°C, a queda de dureza é muito insignificante, podendo até mesmo ocasionar um aumento de dureza devido a precipitação de carbonetos metaestáveis dispersos na matriz. (Wang, 2004; Reed-Hill,1982).

Uma queda considerada da dureza acontece na faixa entre 280 a 400°C, ocasionada pela precipitação e crescimento da cementita, que está associada a

diminuição de carbono de solução sólida. Este crescimento diminui a quantidade de precipitados na matriz Fe_3C , Aumentando a área sem barreiras que impossibilitam a movimentação das discordâncias. A recuperação e a recristalização da matriz também diminuem a dureza e a resistência e aumentam a tenacidade e a ductilidade (REED-HILL,1982; MADER,1984).

Ou seja, quanto maior a temperatura e o tempo de revenido, menores durezas e resistência dos aços, com maior ductilidade e tenacidade (MADER,1984).

A faixa entre 100° e 250°C, no primeiro estágio do revenido, ocorre a precipitação de um carboneto de ferro de reticulado hexagonal com diminuição na dureza até cerca de 60 Rockwell C (CHIAVERINI, 2008).

Na faixa entre 200° e 300°C, segundo estágio do revenido, a dureza Rockwell continua a diminuir, em aços de médio ou alto carbono ou ligeiramente ligados, nos quais alguma austenita pode ter sido retida no processo de têmpera, existe a tendência de transformação da austenita em bainita (CHIAVERINI,2008).

Entre 250° e 300°C, no terceiro estágio do revenido, forma-se outro tipo de carboneto, principalmente em aços de alto carbono, e já se nota em nível microscópico a formação de uma massa escura, chamada troostita. Assim, a dureza continua diminuindo, atingindo valores da ordem de 50 Rockwell C (CHIAVERINI, 2008).

Entre 400° e 600°C, os carbonetos precipitados adquirem uma formação esferoidal sobre um fundo de ferrita fina acicular e a dureza Rockwell C vai para valores de 45 a 25 Rockwell C. Esta estrutura é chamada de sorbítica (Chiaverini, 2008).

Entre 600° e 700°C começa a acontecer à recristalização e o crescimento de grão; os carbonetos precipitados, em particular a cementita nos aços carbono apresentam-se em forma claramente esferoidal sobre um fundo de ferrita. Essa estrutura é chamada frequentemente de esferoidita e corresponde ao tratamento de coalescimento, sendo muito tenaz e mole e com dureza variando de 5 a 20 Rockwell C.

3.9 Ensaios Mecânicos

Em um projeto de engenharia, independentemente da dimensão, grande ou pequeno porte é necessário o conhecimento do comportamento do material empregado no projeto, em outras palavras suas propriedades mecânicas, em diversas

condições de uso. Estas formas de uso estão relacionadas a uma gama de variáveis, tais como a temperatura, tipos de carga aplicada e sua frequência de aplicação, desgaste, deformabilidade, atmosfera corrosiva entre outros (Oliveira,2010).

Para que o engenheiro projetista possa se sair bem em seu trabalho, é necessário que o mesmo entenda sobre o comportamento dos materiais empregados no projeto. Tais parâmetros podem ser obtidos pelos ensaios mecânicos. Apesar de existirem tabelas com os valores de propriedades dos materiais utilizados na engenharia, é imprescindível que os engenheiros tenham conhecimento da maneira como acontecem os ensaios, bem como o que significa cada parâmetro a ser analisado (OLIVEIRA, 2010).

Desta forma, devem-se conhecer os fundamentos básicos relativos a cada ensaio mecânico, e neste trabalho vai-se estudar o ensaio mecânico de tração, dureza, microdureza e impacto.

3.9.1 Ensaio mecânico de tração

É quando se tem a aplicação de uma carga de tração crescente, em uma única direção em um dado corpo de prova, previamente preparado e normatizado até a ruptura do mesmo. Ao realizar-se este ensaio deseja-se medir a variação no comprimento em função da carga aplicada. Inúmeros dados técnicos são obtidos com este ensaio e é um dos mais utilizados no mundo metal- mecânico, os principais dados obtidos neste ensaio são: limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade, ductilidade, coeficiente de encruamento e coeficiente de resiliência. Os ensaios de tração permitem conhecer como os materiais reagem a tração, quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento se rompe. Quando são deparados a campos de forças os metais deformam-se. A intensidade e o tipo de deformação sofrido pelo metal estão relacionados com a resistência mecânica do metal, da intensidade das forças e momentos aplicados, do caminho da deformação, etc. (OLIVEIRA, 2010).

3.9.2 Ensaio de dureza

Conforme Souza et al. (2009), a dureza da superfície é uma propriedade física importante dos materiais. A qual pode ser definida como sendo a resistência

oferecida pelos sólidos à penetração de uma ponta, podendo ser considerada um indicativo da resistência do material ao desgaste, resistência a abrasão, além da capacidade do material de resistir a esforços.

Segundo Callister (2013) a dureza é uma propriedade mecânica do material a qual está relacionada à facilidade ou dificuldade de deformação plástica localizada, isto é, é a resistência que o material tem às pequenas impressões ou riscos.

Autores como (VAN VLACK, 1984 e CALLISTER, 2013) dizem que a dureza é uma propriedade onde se usa procedimentos específicos de medição e é definida como resistência à deformação permanente de uma superfície que sofre uma penetração. Os testes Brinell e Rockwell são muitos utilizados para dizer a dureza de materiais.

Alguns trabalhos (Leta et al.; 2004 e Anusavice, 2005) descrevem que o ensaio de dureza é quando o material é submetido a impressão de uma pequena marca feita na superfície de uma peça quando se aplica pressão através da ponta do penetrador, observando o quanto o material resiste à força do penetrador.

Maneiro (2006) fala que o ensaio de dureza é um dos ensaios mecânicos mais usados já que apresenta grandes vantagens sobre os demais. Dentre essas vantagens está a simplicidade e o custo. Já que os corpos de prova não precisam de preparação complexa (no máximo lixar e polir) e o equipamento é relativamente barato. E também é considerado um ensaio não destrutivo, pois não ocorre deformação ou fratura da amostra. E por último é um ensaio que tras várias informações tais como módulo de elasticidade, limite de resistência, tensão residual, e outras.

Os testes mais usados para detectar a dureza dos materiais são conhecidos como: Brinell, Rockwell, Vickers e Knoop. As durezas Brinell e Rockwell que também são conhecidas como macrodureza usam áreas extensas de um determinado material para analisar a dureza. Por esta razão várias empresas usam este método para análise de dureza na indústria, conforme retrata Anusavice (2005).

A dureza dos materiais pode ser expressa através de diversas escalas que, direta ou indiretamente, estão relacionadas a pressão aplicada para deformar a superfície testada. Os indentadores podem ser esféricos, piramidais ou cônicos, de acordo com alguns trabalhos (American Society for Metals- Metals handbook, 200 e Chiaverini, 1986).

Segundo Chiaverini (2008), a determinação da dureza dos materiais é uma forma rápida de avaliar as condições de fabricação e tratamento das ligas metálicas, as diferenças estruturais locais e a influência dos elementos de liga. Mesmo que a dureza não seja usada como parâmetro de projetos de peças correlaciona-se com razoável aproximação com algumas propriedades mecânicas como resistência a tração, especialmente no caso dos aços.

Conforme Suterio (2005), o ensaio de dureza está bastante difundido e fundamentado, pois existem inúmeros estudos nesta área com o propósito de caracterizar o material nos diversos lados, ou seja, o ensaio de dureza está sendo usado para determina as propriedades mecânicas, tensões residuais, resistência a fratura, entre outros.

Segundo descrito em American society for Metals-Metals Handbook (2000), para metais a dureza é diretamente proporcional à tensão de escoamento para a deformação imposta pela endentação. Propriedades como tenacidade, resistência ao desgaste, usinabilidade, podem ser estimadas pela medição de dureza. O ensaio de dureza é talvez o teste mais simples e de menor custo para caracterizar um material, pois como dito anteriormente não requer uma preparação elaborada da amostra. Os equipamentos empregados também são de baixo custo.

3.9.3 Ensaio de microdureza

Este ensaio tem a finalidade de determinar a dureza de volumes de materiais microscópios em peças bem pequenas, camadas superficiais e recobrimentos finos e principalmente em medir a dureza de fases separadas ou estruturas dos componentes das ligas.

O ensaio produz uma impressão microscópica no material aplicando cargas de 1 a 10kgf em durômetro Vickers ou Knoop.

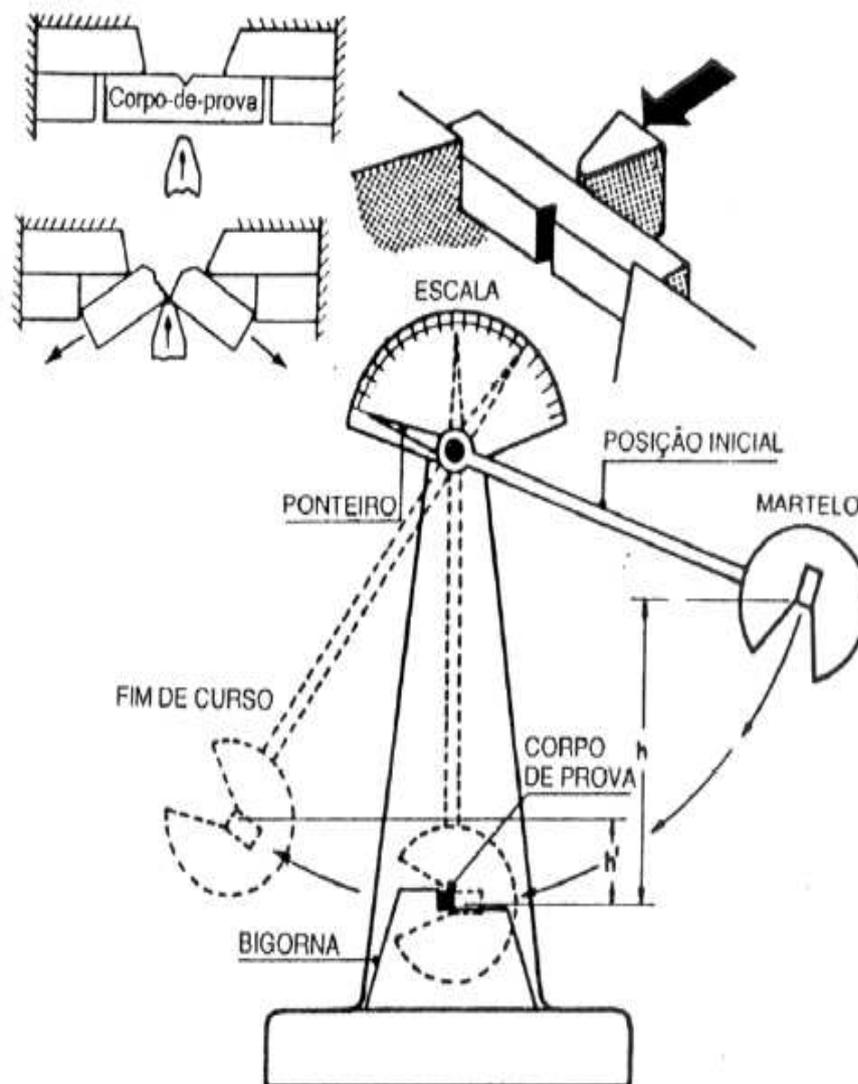
3.9.4 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto mais empregado para analisar e qualificar a tenacidade ao impacto é o Charpy. Este é padronizado pelo método E23 da ASTM. Neste ensaio o corpo de prova contém um entalhe e recebe o impacto de um martelo, como indicado na figura 17.

Neste ensaio o pêndulo possui em princípio uma energia potencial, que é transformada em energia cinética (SOUZA, 1982). Ao fraturar e ceder o corpo de prova, o pêndulo cede energia, obtendo uma altura de fim de curso inferior a inicial. A diferença de energia potencial do pêndulo é a energia absorvida.

As máquinas de impacto têm um braço acoplado ao pêndulo que, no seu movimento, desloca um ponteiro, de modo a mostrar a energia absorvida, conforme a figura 16.

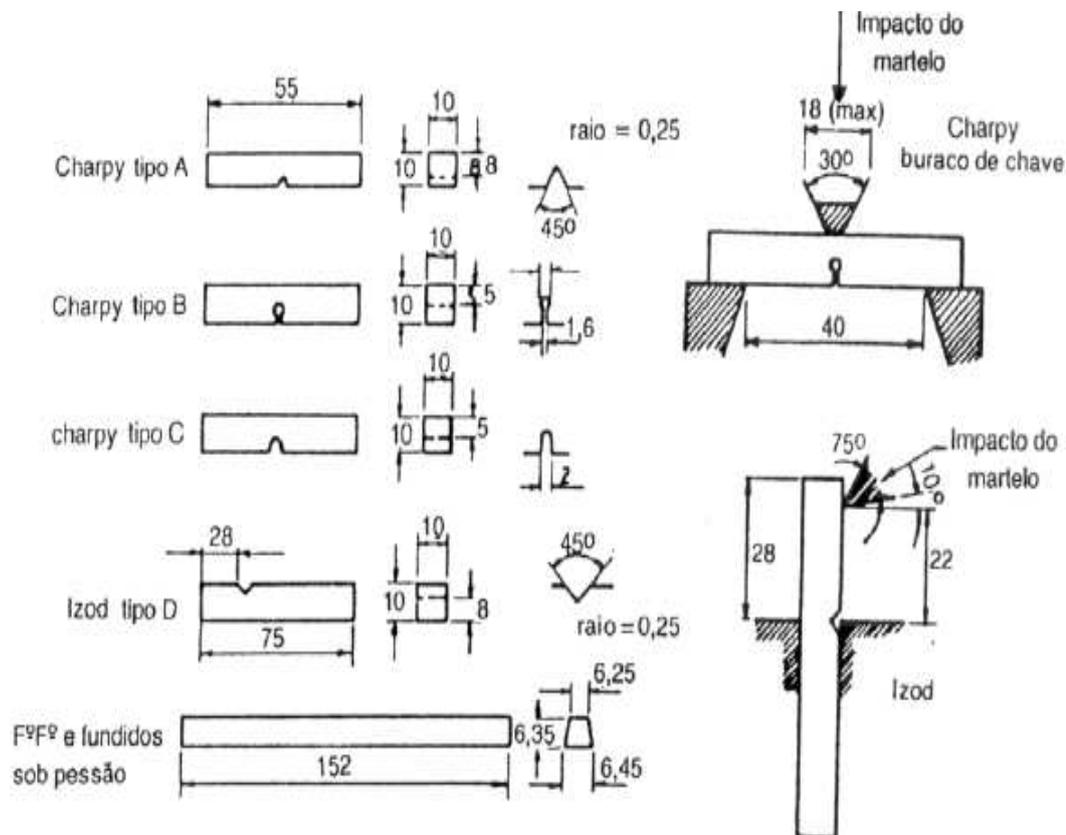
Figura 16 - Esquema de ensaio de impacto Charpy. O corpo de prova absorve na sua deformação e fratura a diferença de energia potencial do pêndulo, correspondente à variação da altura ($h-h'$).



Os corpos de prova Charpy podem ser feitos em tamanhos reduzidos ou com entalhes, como o “buraco de chave” ou U invertido.

No ensaio Izod o impacto é realizado com o corpo de prova na posição vertical. Neste ensaio as tensões do corpo de prova são diferentes podendo o entalhe ser dispensado em materiais fundidos.

Figura 17 - Apresenta os tipos e corpos de prova empregados nos ensaios Charpy e Izod.



Fonte: (ASTM E23, 2012)

A fratura se propaga a partir do entalhe como clivagem (materiais frágeis) ou pelo coalescimento de microcavidades (fratura fibrosa em materiais dúcteis).

O crescimento do entalhe pela fratura fibrosa pode mudar o mecanismo de propagação para clivagem. No final da fratura, como a seção resistente é reduzida, ocorre a fratura por cisalhamento.

É frequente avaliar-se na superfície do corpo fratura do corpo de prova a proporção entre as áreas fraturadas por clivagem e por rasgamento (fratura fibrosa) e cisalhamento.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O material em estudo foi retirado de tarugos de aço de médio teor de carbono, o aço 1045, com a composição demonstrada na tabela 02.

Tabela 02 - Composição do aço em estudo SAE 1045

Aço SAE	C%	Mn%	Si%	P%	S%
1045	0,43	0,70	0,20	0,04	0,05

4.1 Análise microestrutural

Retirou-se do tarugo do aço 1045 catorze amostras para análise microestrutural, onde de acordo com os tratamentos térmicos realizados obteve-se as amostras nas seguintes condições: recebido, recozido, normalizado, temperado e revenido sendo que para cada condição avaliou-se a microestrutura obtida com o corte em duas seções a longitudinal e a transversal a tabela 03 representa melhor o que está sendo descrito neste parágrafo.

Tabela 03 - Amostra do aço 1045 na condição de recebido e após tratamentos térmicos.

AMOSTRAS DO AÇO 1045	
CORTE LONGITUDINAL	CORTE TRANSVERSAL
Condição de Recebido	Condição de Recebido
Recozido	Recozido
Normalizado	Normalizado
Temperado	Temperado
Revenido a 400°C	Revenido a 400°C
Revenido a 450°C	Revenido a 450°C
Revenido a 500°C	Revenido a 500°C

Fonte: Autoria própria.

Para a confecção dessas amostras utilizou-se o espaço físico do laboratório de materiais da Universidade Estadual do Maranhão com ajuda do Instituto Federal de Educação, ciência e tecnologia do Maranhão do departamento de mecânica e materiais (DMM).

Utilizou-se barras redondas do aço 1045, as quais foram cortadas no tamanho desejado, utilizando-se uma cortadora metalográfica Maxi Cut (Figura 18), com disco abrasivo e realizou-se o tratamento térmico de recozimento, normalização, têmpera e revenido, os cálculos e a maneira de realização desses ensaios estão demonstrados nos tópicos seguintes. Em seguida as amostras foram embutidas a quente, utilizando-se baquelite e a embutidora metalográfica Arotec, num processo de aquecimento de sete minutos a uma pressão de 300 Kgf/cm², que em seguida sofreu resfriamento ao ar até a temperatura ambiente.

Após o embutimento as amostras foram submetidas ao processo de lixamento, utilizando-se uma poltriz lixadeira metalográfica Arotec (figura 19) e lixas d'água com a granulometria variando de 100 a 1200 mesh em seguida polida com pasta de diamantes de 1µm. As microestruturas dos aços foram reveladas e atacadas com solução de Nital 1%, após o ataque as amostras foram fotografadas por microscopia ótica, através do microscópio óptico Nikon (figura 20).

Com a aquisição das imagens das microestruturas, analisou-se o comportamento dos grãos e realizou-se os cálculos da fração volumétrica de cada fase, através do software imagem j.

Figura 18 - Máquina policorte MAXICUT



Fonte: autoria própria

Figura 19 - Lixadeira Arotec S.A

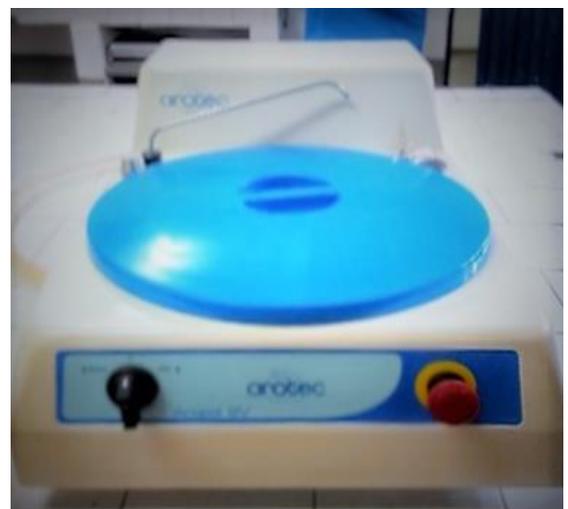


Figura 20 - Microscópio óptico usado para visualizar as microestruturas

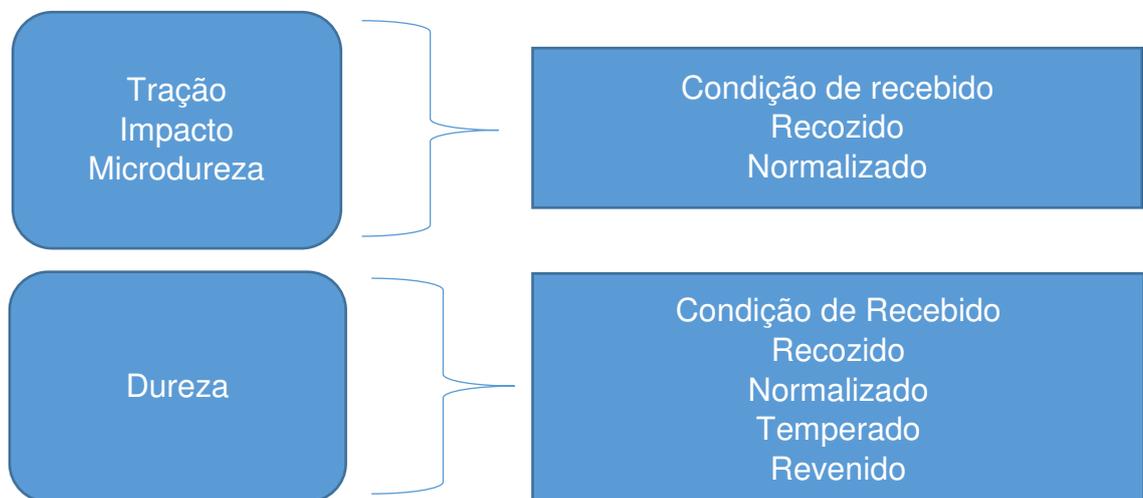


Fonte: autoria própria.

4.2 Ensaaios mecânicos

Através do aço em estudo realizou-se alguns ensaios mecânicos: tração, impacto, microdureza e dureza sendo que os três primeiros ensaios foram analisados apenas para condição de recebido, recozido e normalizado enquanto o último para todas as condições nas quais havia sido realizado a análise da microestrutura, os ensaios realizados estão esquematizados na figura 21.

Figura 21 - Representação esquemática dos ensaios mecânicos realizados no aço 1045.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Tratamentos térmicos realizados antes da confecção dos corpos de prova para o ensaio de tração, impacto e microdureza.

As barras de aço (figura 22) usadas para confecção dos corpos de prova submetidas aos ensaios mecânicos, passaram pelo processo de aquecimento e resfriamento do material, tratamento térmico, a fim da obtenção do aço com a estrutura normalizada e recozida, para realizar os tratamentos térmicos foi necessário fazer o cálculo para a obtenção do tempo de permanência destas barras de aço (figura 23) no forno Mufla- Quimus (figura 23), conforme está descrito nas etapas abaixo:

4.3.1 Cálculo do tempo de austenização.

- a) 1ª etapa: verifica-se o perfil geométrico da peça
- b) 2ª etapa: adota-se o tempo de encharque que neste trabalho será 2 minutos a cada milímetro de espessura já que se trata de um aço carbono.
- c) 3ª etapa: calcular o tempo de aquecimento conforme a expressão a seguir:
- d) $T_{\text{aquecimento}} = 0,1 \cdot D_1 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$ (minutos)
- e) Sendo: D_1 = o valor mínimo entre diâmetro e a espessura (menor dimensão)
- f) Sendo: K_1 = é o coeficiente do forno e neste estudo valerá 2 pois trata-se de um meio gasoso.
- g) Sendo: K_2 = é o coeficiente que dá forma as peças e neste trabalho é igual a 2 por tratar de forma cilíndrica.
- h) Sendo: K_3 = é o coeficiente de regularidade de aquecimento da peça no forno, sendo 1 para aquecimento em todos os lados que é o caso em estudo.
- i) 4ª etapa: Soma-se os tempos calculados para obter o tempo total em minutos

4.3.2 Cálculo do tempo de austenização do aço 1045

- a) $\text{tempo}_{\text{encharque}} = 50$ minutos para uma espessura de 25mm

- b) $\text{tempo}_{\text{aquecimento}} = 0,1 \times 25 \times 2 \times 2 \times 1 = 10$ minutos
- c) $\text{tempo}_{\text{total}} = 60$ minutos

Após a obtenção dos tempos de austenização encontra-se no gráfico (figura 24) a temperatura do tratamento térmico desejado que neste trabalho é igual tanto para o tratamento térmico de recozimento quanto para o de normalização. Após o tempo de austenização do material as barras que sofreram recozimento esfriaram lentamente dentro do forno enquanto as que sofreram normalização foram retiradas e resfriadas ao ar até chegarem a temperatura ambiente.

Logo, para o tratamento térmico de recozimento e normalização do aço 1045 usou-se a temperatura de 840°C obtida no gráfico representado na figura 24, a um tempo de permanência no forno de 60 minutos e em seguida as barras que sofreram recozimento pleno permanecem no forno para resfriamento lento e tirou-se as barras a serem normalizadas de dentro do forno a fim de serem resfriadas ao ar.

4.4 Tratamentos térmicos realizados antes do ensaio de dureza

Realizou-se o recozimento e a normalização conforme descrito no item anterior. Fez-se também o tratamento de têmpera onde foi utilizado a mesma temperatura de austenização usada no recozimento e normalização (840°C), mas neste tipo de tratamento o resfriamento é de forma brusca e para o trabalho em estudo usou-se água como meio de resfriamento, ou seja, colocou-se o material no forno a uma temperatura de 840°C em um intervalo de tempo de 60 minutos e em seguida colocou-se esse material em um recipiente com água na temperatura ambiente o que nos possibilita a realização do tratamento térmico de têmpera.

Para realizar o ensaio de dureza fez-se também o tratamento térmico de revenimento após a têmpera onde o material temperado foi colocado dentro do forno a 400°C por um tempo de uma hora e cinquenta minutos e em seguida resfriado ao ar e o mesmo procedimento foi feito a 450°C e 500°C para posteriormente analisarmos a dureza desse material revenido nas três temperaturas em estudo.

Figura 22 - Barras de aço que foram usadas nos tratamentos térmicos.



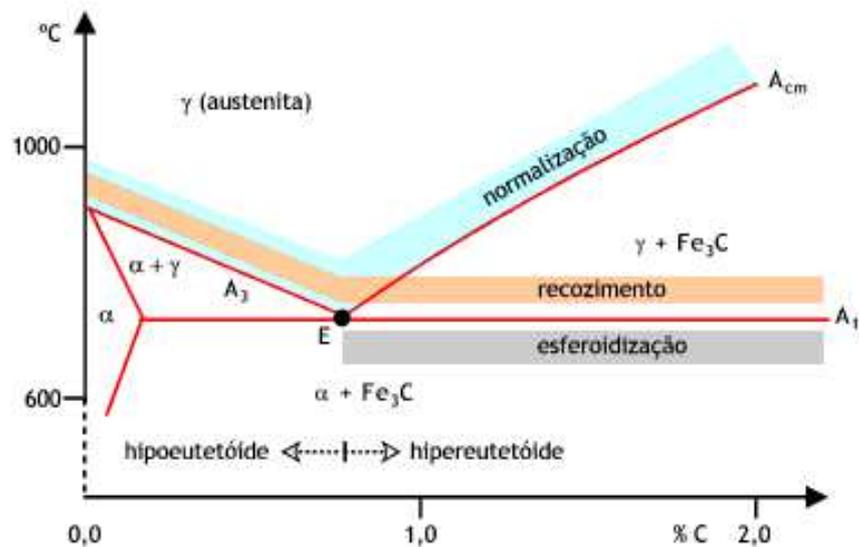
Fonte: autoria própria

Figura 23 - Forno Mufla Quimus usado para aquecer as barras até a completa austenização de suas estruturas.



Fonte: autoria própria

Figura 24 - gráfico semelhante ao usado para obter a temperatura de recozimento e normalização



Fonte:

4.5 Ensaio mecânico de tração

Após a realização dos tratamentos térmicos descritos anteriormente confeccionou-se os corpos de prova para o ensaio mecânico de tração segundo a norma ASTM-E8/E8M-11, realizando cinco ensaios para cada condição a fim de obter-se a média e o desvio padrão para validação dos resultados, terminando por confeccionar um total de 15 corpos de prova, sendo cinco para análise do material na condição de recebido, cinco recozido e cinco normalizado.

Neste ensaio colocou-se os corpos de prova(figura 25) na máquina de tração EMIC (figura 26), diante de um esforço, que tende a alonga-lo até a sua ruptura, onde os esforços ou cargas aplicadas foram medidos na própria máquina de ensaio através do software Tesc, onde os corpos de prova utilizados possuem formas e dimensões padronizadas conforme a norma ASTM- E8/E8M-11, onde foi possível obter o valor do limite de resistência a tração ou tensão máxima, limite de escoamento, alongamento e redução de área do material estudados, tanto pelo gráfico gerado pela própria máquina como por informações tiradas do gráfico feito pelo programa Origin 8.0 o que facilitou os cálculos e a visualização dos resultados para análises que serão descritas nos resultados.

Figura 25 - Corpos de prova usados no ensaio mecânico de tração.



Fonte: Autoria própria

Figura 26 - Máquina de tração EMIC

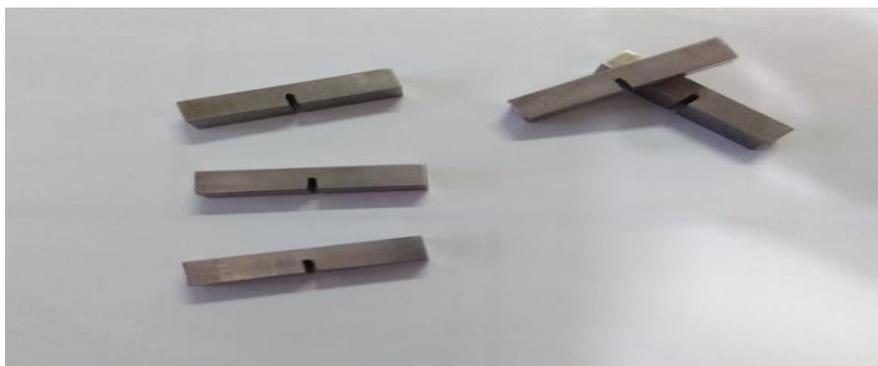


Fonte: Autoria própria

4.6 Ensaio mecânico de impacto

O ensaio de impacto foi realizado da seguinte forma usou-se cinco corpos de prova do aço 1045 nas condições de recebido, normalizado e recozido onde submeteu-se os corpos de prova Charpy (figura 27) confeccionados segundo a norma ASTM-E23-12C ao ensaio mecânico realizado na máquina de impacto WP 410 Gunt (figura 28). Os resultados apresentados foram obtidos na forma de energia absorvida pelo corpo de prova durante o impacto, neste ensaio a massa do martelo e a aceleração da gravidade são conhecidas, a altura inicial também é conhecida. A única variável desconhecida é a altura final, que foi obtida pelo ensaio, após o rompimento do corpo de prova, numa escala relacionada com a unidade de medida de energia adotada que foi o joule.

Figura 27 - Corpos de prova Charpy.



Fonte: autoria própria

Figura 28 - Máquina de impacto WP 410 Gunt

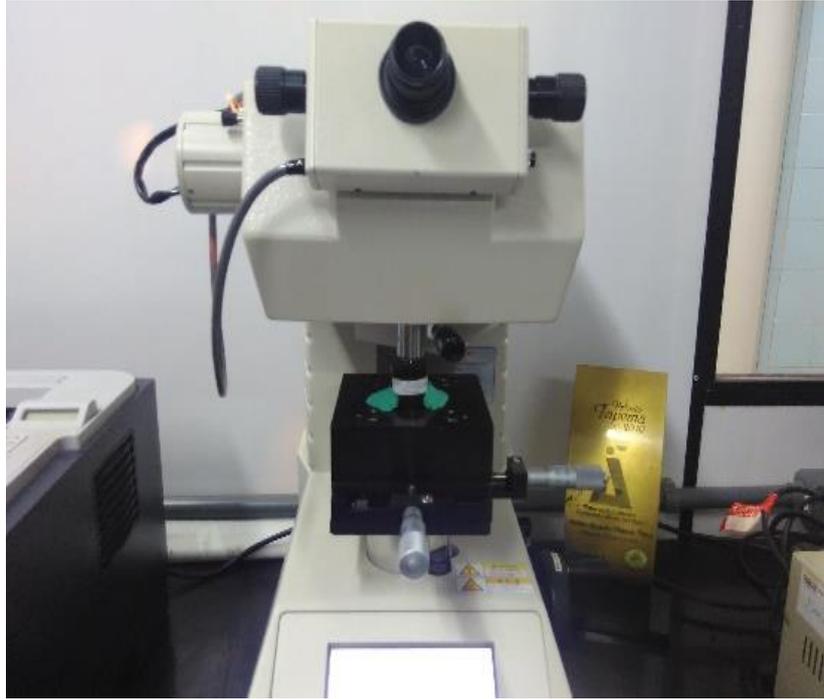


Fonte: autoria própria

4.7 Ensaio mecânico de microdureza

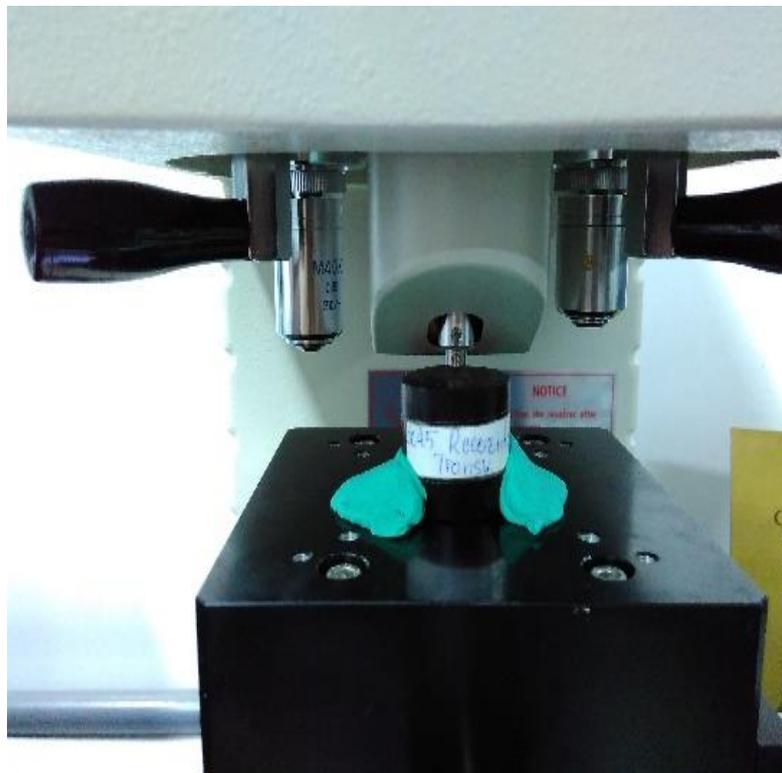
Neste ensaio trabalhou-se com as amostras usadas para análise microestrutural do material, só que agora fez-se a análise da dureza nas fases tanto da ferrita quanto da cementita, ou melhor do constituinte que possui cementita e ferrita, a perlita, para as condições de recebido, normalizado e recozido do aço 1045. Para isso usou-se o microdurômetro (figura 29) este equipamento é composto da base, penetrador e sistema de aplicação de carga, e microscópio acoplado, onde fez-se a aplicação de carga e mediu-se a dureza em cinco diferentes locais na superfície das amostras nas suas fases as quais foram aleatoriamente escolhidas. O penetrador de diamante foi posicionado sobre a amostra, para em seguida, acionar o disparador e assim iniciar a aplicação da carga (figura 30) no ensaio de microdureza vickers aplicou-se a carga pelo equipamento no intervalo de quinze segundos, e depois o penetrador foi levantado e a objetiva de 40X foi posicionada para leitura das diagonais da impressão. A dureza vickers é determinada pela equação: $HV = 2P \operatorname{sen} \left(\frac{136^\circ}{2} \right) / d^2$ onde p é a carga em N, d é o comprimento da diagonal da impressão e $\Theta = 136^\circ$. O equipamento utilizado fornece diretamente em seu visor o valor calculado para dureza vickers (HV), a partir das medidas das diagonais da endentação e da seleção de carga aplicada (figura 32), a figura 32 mostra a imagem da configuração para que o ensaio de microdureza possa ser realizado.

Figura 29 - Microdurômetro usado para o Ensaio de microdureza vickers



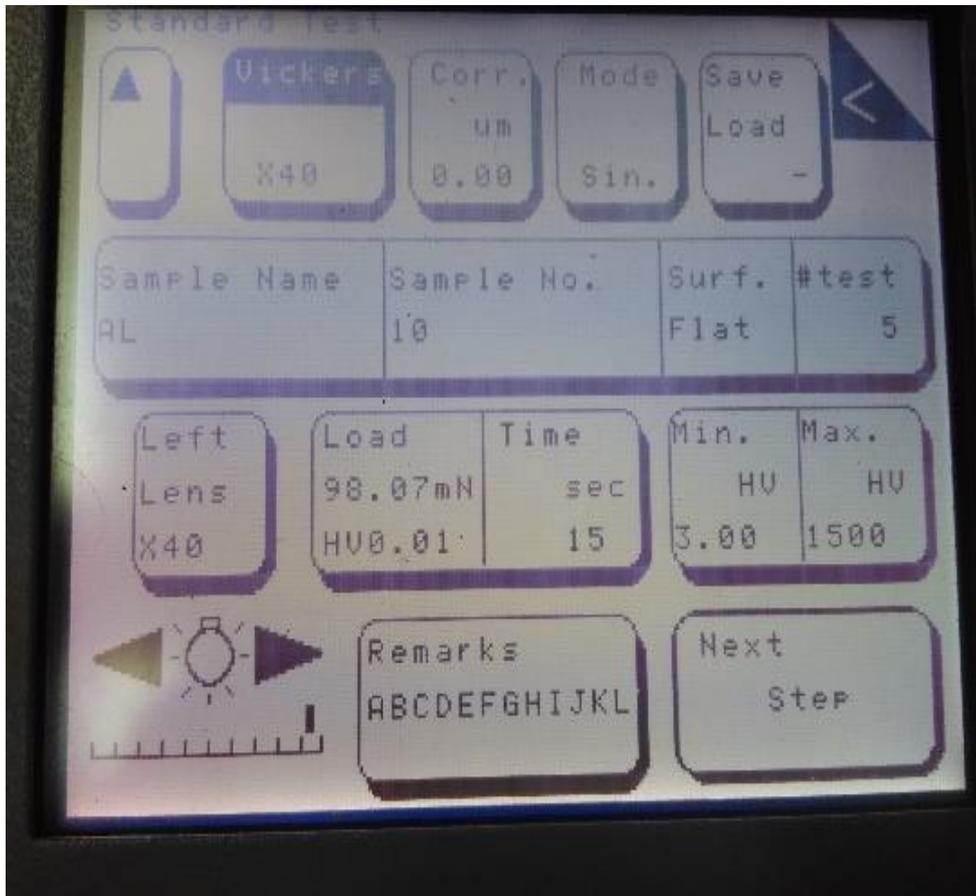
Fonte: autoria própria

Figura 30 - Exemplo da aplicação de carga pelo penetrador no ensaio de microdureza vickers.



Fonte: autoria própria

Figura 31 - Imagem da configuração do microdurômetro antes da aplicação da carga.



Fonte: autoria própria

4.8 Ensaio mecânico de dureza

Realizou-se o ensaio de dureza Rockwell o qual foi efetuado na escala C para o aço 1045 na condição de recebido, recozido, normalizado, temperado e revenido nas temperaturas de 400°C, 450°C e 500°C de acordo com os procedimentos especificados na norma ASTM E18-2014. Utilizou-se o penetrador do tipo cone esférico de diamante, com pré-carga de 10kgf e com uma carga total de 150kgf.

A leitura do grau de dureza, Rockwell C, foi feito na máquina de dureza Pantec RBS mostrado na figura 32 e para cada amostra analisou-se cinco pontos a fim de se obter a média e o desvio padrão do ensaio desenvolvido o que oferece uma maior confiabilidade nos ensaios realizados.

Figura 32 - Máquina de dureza Pantec RBS



Fonte: autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as microestruturas obtidas antes e após os tratamentos térmicos de recozimento, normalização, têmpera e revenido para as seções longitudinal e transversal do aço SAE 1045 e serão apresentadas algumas discussões acerca dessas microestruturas e também será mostrado a porcentagem de ferrita e perlita para o material na condição de recebido, recozido e normalizado. Além disso serão apresentados resultados e discussões obtidos nos ensaios de tração, impacto, microdureza e dureza para o aço SAE 1045.

5.1 Microestruturas obtidas

Na figura 33 tem-se as micrografias do aço 1045 na condição de recebido onde percebe-se os grãos com formatos heterogêneos. Em A tem-se o corte da seção longitudinal do aço enquanto em B visualiza-se a seção transversal sendo possível perceber uma pequena diferença na organização de seus grãos.

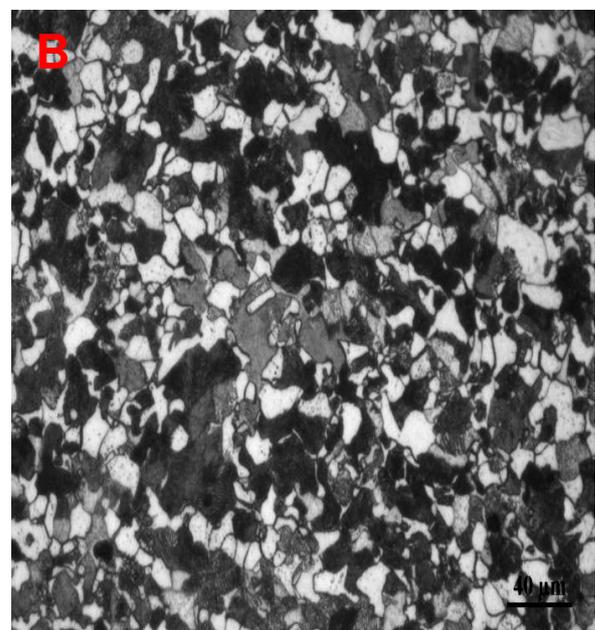
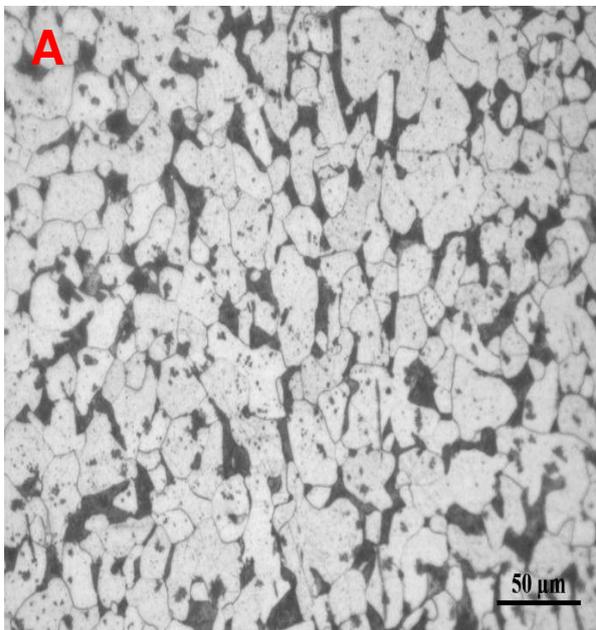
Enquanto isso na figura 34 tem-se a micrografia do aço 1045 após o tratamento térmico de recozimento onde nota-se a homogeneização da microestrutura se comparado com a figura 33 e percebe-se claramente a obtenção da perlita grosseira que é a estrutura ideal para aços de baixo e médio teor de carbono. Como constituintes dessa microestrutura tem-se a perlita em preto e a ferrita em branco.

Já na figura 35 observa-se a micrografia do aço 1045 após o tratamento de normalização sendo possível visualizar a granulação mais fina dos grãos se comparado com a microestrutura do mesmo aço na condição de recebido ou de recozido isso ocorre devido ao resfriamento mais rápido que acontece nesse tipo de tratamento o que possibilita diminuir o tamanho médio dos grãos e produzir uma distribuição de tamanho mais uniforme e desejável e é nesse tratamento que se obtém a perlita fina que é uma estrutura desejável na engenharia.

Já figura 36 observa-se a micrografia do aço 1045 após o tratamento de têmpera onde obtém-se a martensita e a bainita e nessa a microestrutura os grãos não estão mais organizados como no recozimento e na normalização. Tudo acontece porque no momento em que ocorre a transformação martensítica, a estrutura do material FCC é transformada em CCC por um processo de cisalhamento brusco.

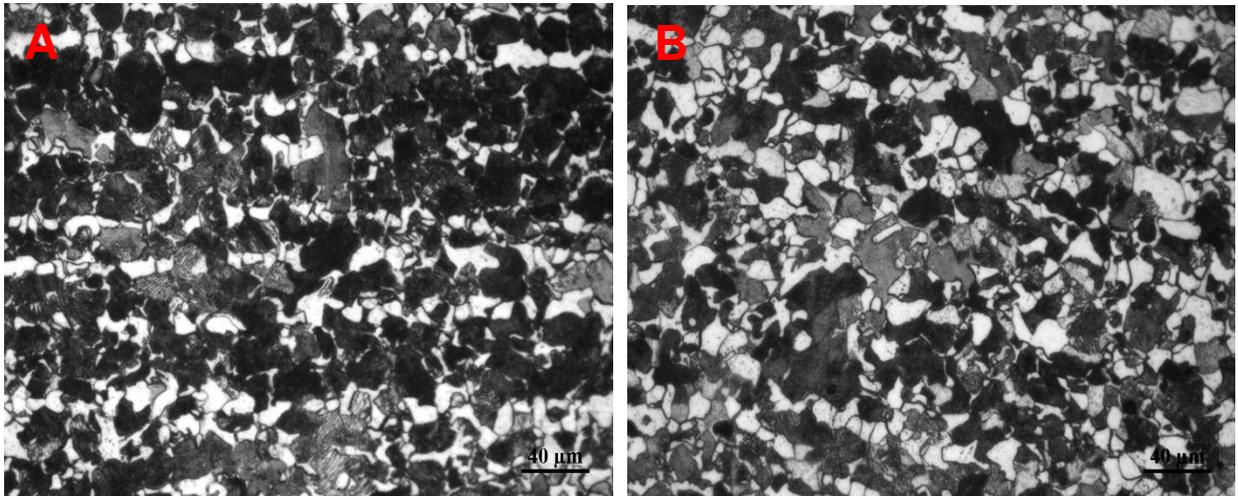
Nesta nova estrutura, os átomos de carbono, nitrogênio e demais elementos de liga são impedidos de se difundirem para seus lugares ficando em solução. No entanto, a presença destes elementos intersticiais em teores acima do limite de solubilidade da fase CCC, determina-se uma estrutura TCC, por distorção. Posteriormente a transformação a composição química e a vizinhança atômica permanecem inalteradas e essa microestrutura fornece elevada dureza se comparada com os aços recozidos ou normalizados o que na maioria das vezes faz com que essa microestrutura seja indesejável por ser bastante frágil então aplica-se o tratamento térmico de revenimento que nos fornece uma dureza intermediária pois nesse tratamento ocorre a difusão, ou seja, o carbono é difundido para o material, não ficando retido apenas na martensita o que permite que a dureza diminua. As figuras 37-39 nos mostram microestruturas obtidas após o revenimento do aço temperado que está na figura 37. Revenimento que aconteceu à 400°C, 450°C e 500°C onde as diferentes temperaturas proporcionam diferentes dureza a esse material apesar de possuir microestruturas semelhante.

Figura 33 - Micrografia do aço 1045 na condição de recebido ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.



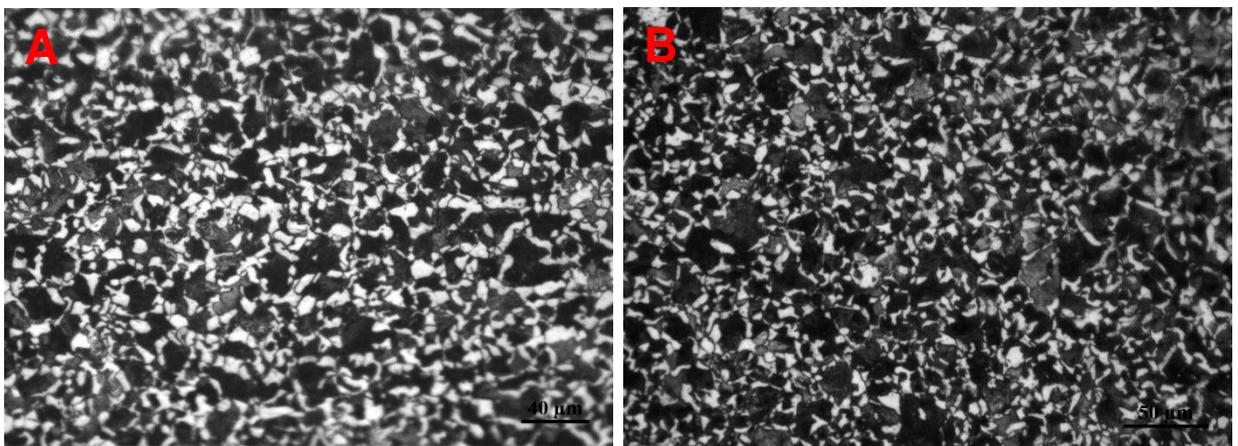
Fonte: autoria própria

Figura 34 - Micrografia do aço 1045 após tratamento térmico de recozimento ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.



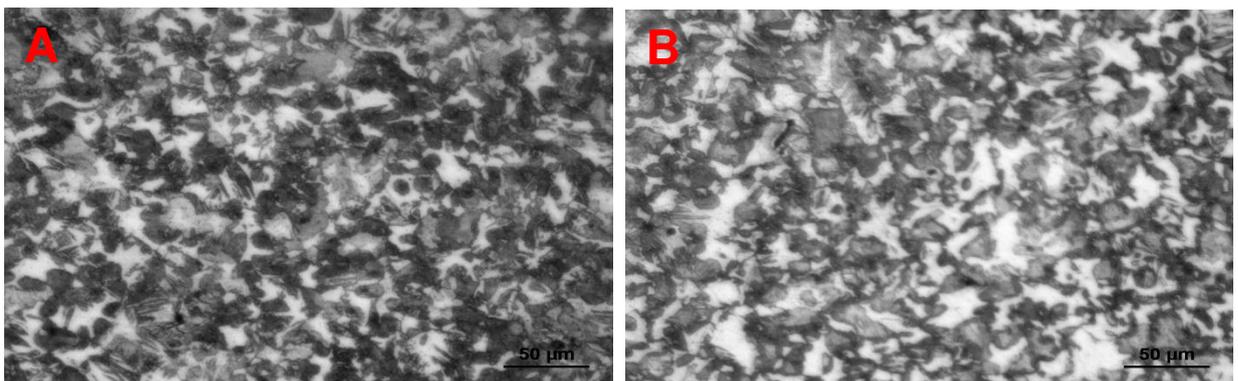
Fonte: Autoria própria

Figura 35 - Micrografia do aço 1045 após tratamento térmico de normalização ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.



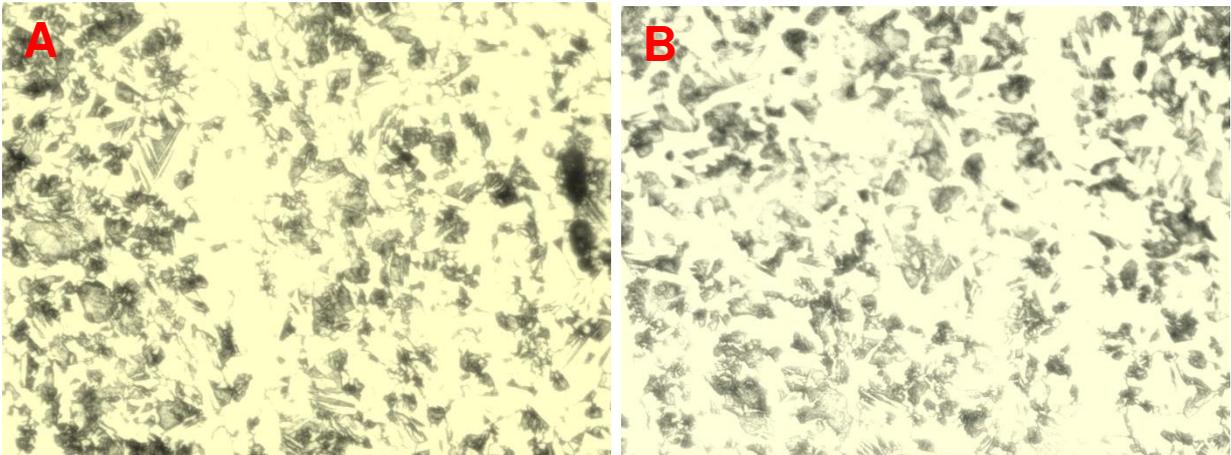
Fonte: Autoria própria

Figura 36 - Micrografia do aço 1045 após tratamento térmico de têmpera ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.



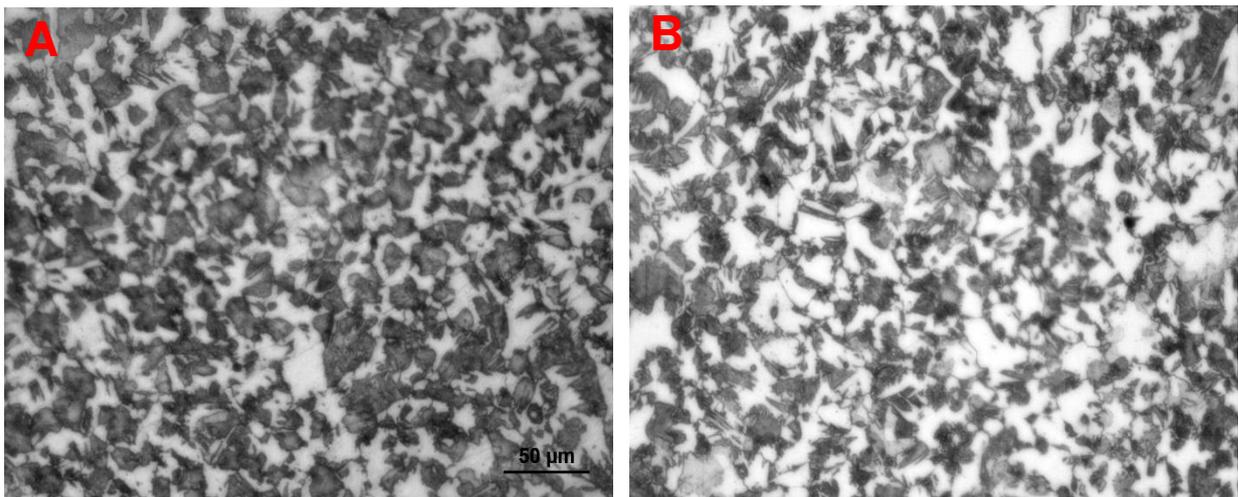
Fonte: Autoria própria

Figura 37 - Micrografia do aço 1045 após tratamento térmico de revenimento a 400°C ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.



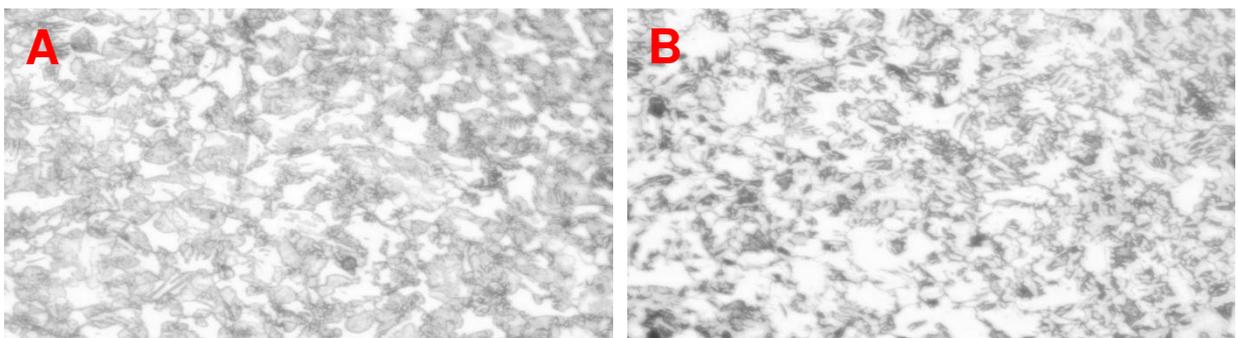
Fonte: autoria própria

Figura 38 - Micrografia do aço 1045 revenido a 450°C ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.



Fonte: autoria própria

Figura 39 - Micrografia do aço 1045 revenido à 500°C ampliação 300X: (a) seção longitudinal (b) seção transversal.



Fonte: autoria própria

5.2 Resultado da fração volumétrica de ferrita e perlita

Tabela 04 - Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 na condição de recebido com corte longitudinal

Tabela 4		
Aço 1045	%Ferrita	%Perlita
1ª imagem	73,306	26,694
2ª imagem	75,131	24,869
3ª imagem	74,505	25,495
Média	74,314	25,66
Desvio	0,75	0,75

Fonte: autoria própria

Tabela 05 - Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 na condição de recebido com corte transversal.

Tabela 5		
Aço 1045	%Ferrita	%Perlita
1ª imagem	69,255	30,745
2ª imagem	76,503	23,497
3ª imagem	69,730	30,27
Média	71,82	28,17
Desvio	3,31	3,31

Tabela 06 - Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 recozido com corte longitudinal

Tabela 6		
Aço 1045	%Ferrita	%Perlita
1ª imagem	28,780	71,22
2ª imagem	30,477	69,52
3ª imagem	26,779	73,22
Média	28,67	71,32
Desvio	1,51	1,51

Fonte: autoria própria

Tabela 07 - Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 recozido com corte transversal.

Tabela 7		
Aço 1045	%Ferrita	%Perlita
1ª imagem	26,562	73,438
2ª imagem	27,443	72,557
3ª imagem	33,977	66,023
Média	29,32	70,67
Desvio	3,3	3,30

Tabela 08 - Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 normalizado com corte longitudinal

Tabela 08		
Aço 1045	%Ferrita	%Perlita
1ª imagem	31,550	68,45
2ª imagem	34,685	65,31
3ª imagem	33,453	66,54
Média	33,22	66,76
Desvio	1,73	1,73

Fonte: autoria própria

Tabela 09 - Porcentagem de ferrita e perlita para o aço 1045 normalizado com corte transversal.

Tabela 09		
Aço 1045	%Ferrita	%Perlita
1ª imagem	36,002	63,988
2ª imagem	40,909	59,091
3ª imagem	34,587	65,413
Média	37,166	62,834
Desvio	2,7	2,7

Através das figuras 33,34 e 35 deu-se origem aos gráficos da figura 40 e 41 podendo-se verificar a quantidade de perlita e ferrita formada para o aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado nas seções longitudinais e transversais. Onde é possível perceber que não há uma variação significativa na porcentagem de ferrita e perlita para as essas seções.

Figura 40 - Fração volumétrica do aço 1045 seção longitudinal para a condição de recebido, recozido e normalizado.

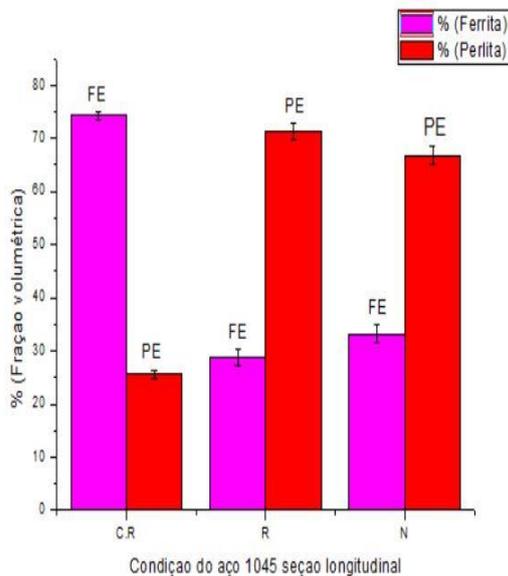
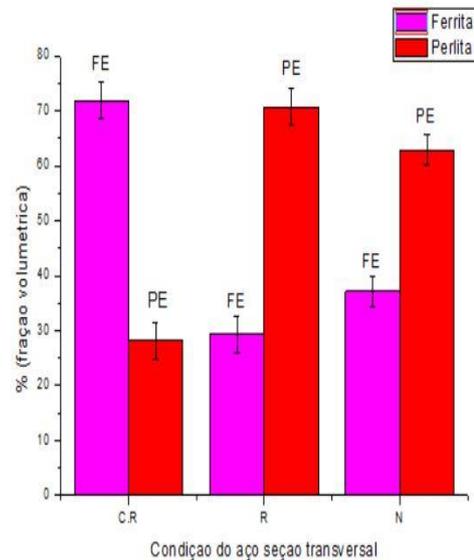


Figura 41 - Fração volumétrica do aço 1045 seção transversal para a condição de recebido, recozido e normalizado.

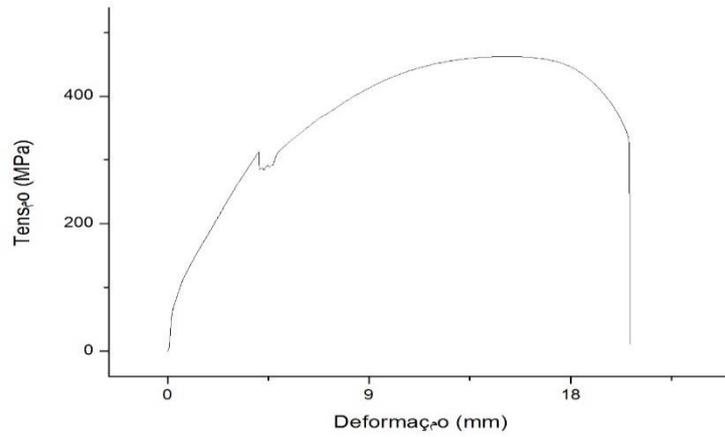


Fonte: autoria própria

5.3 Resultado do ensaio mecânico de tração e análise dos gráficos de tensão x deformação

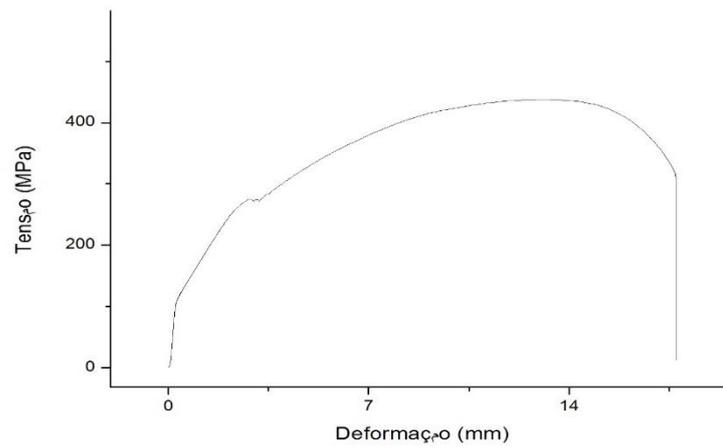
Nas figuras 42,43 e 44 temos os gráficos tensão x deformação feitos no programa origin. Que foram construídos através dos pontos fornecidos pela máquina de tração, EMIC, onde pode-se analisar o comportamento do aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado sendo assim possível determinar diversas propriedades mecânicas dos materiais importantes em projetos como tensão de escoamento, tensão máxima, tensão de ruptura entre outras.

Figura 42 - Comportamento do aço 1045 na condição de recebido.



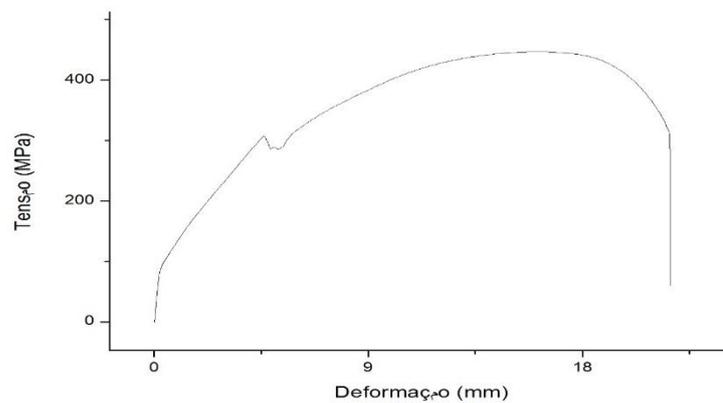
Fonte: autoria própria

Figura 43 - Comportamento do aço 1045 recozido.



Fonte: autoria própria

Figura 44 - Comportamento do aço 1045 normalizado.



Fonte: autoria própria

5.3.1 Propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de tração

Nas tabelas 10,11 e 12 tem-se algumas das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração como percentagem de redução de área, alongamento percentual, tensão de escoamento, tensão máxima suportada pelo material e tensão de ruptura para a condição de recebido, recozido e normalizado do aço 1045, em que se realizou para cada condição cinco ensaios a fim de obter uma maior confiabilidade nos resultados.

Tabela 10 - Resultados obtidos no ensaio de tração para o aço 1045 na condição de recebido.

AÇO 1045	REDUÇÃO DE ÁREA			ALONGAMENTO			ESC.	TENSÃO	
								MÁXIMA	RUPTURA
Condição de Recebido.	d_o [mm ²]	d_f [mm ²]	Estricção [%]	L_o [mm]	L_f [mm]	[%]	σ_{max} [MPA]	σ_{max} [MPA]	σ_{max} [MPA]
CP1	9	5,5	62,65	85	101,2	19,05	287,49	466,71	318,11
CP2	9	5,3	65,32	85	103	21,17	292,76	466,41	356,14
CP3	8,9	5,5	61,81	85	103,9	22,23	289,41	463,24	342,92
CP4	8,7	5,2	64,27	85	99,3	16,82	302,76	466,24	312,9
CP5	8,8	5,3	63,72	85	103,2	21,41	309,33	462,24	310,5
Média	8,88	5,36	63,55	85	102,1	20,13	296,35	465	328,11
Desvio	-	-	1,22	-	-	1,96	6,47	4,01	18,14

Fonte: autoria própria

Tabela 11 - Resultados obtidos no ensaio de tração para o aço 1045 recozido

AÇO 1045	REDUÇÃO DE ÁREA			ALONGAMENTO			ESC.	TENSÃO	
								MÁXIMA	RUPTURA
Condição de Recebido.	d _o [mm ²]	d _f [mm ²]	Estricção [%]	L _o [mm]	L _f [mm]	[%]	σ _{max} [MPA]	σ _{max} [MPA]	σ _{max} [MPA]
CP1	8,8	5,4	62,34	85	105,1	23,64	262,53	430,5	309,81
CP2	8,3	5,4	57,67	85	101,7	19,64	270,38	437,5	312,32
CP3	8,1	5	61,89	85	104,2	22,58	265,43	420,4	309,12
CP4	8,8	5,5	60,93	85	104	22,35	263,43	425,5	310,35
CP5	8,8	5,2	65,08	85	106,2	24,94	265,41	432,5	308,33
Média	8,56	5,3	61,58	85	104,2	22,63	265,43	429,8	309,98
Desvio	-	-	2,39	-	-	-	2,71	6,56	1,34

Fonte: autoria própria

Tabela 12 - Resultados obtidos no ensaio de tração para o aço 1045 normalizado

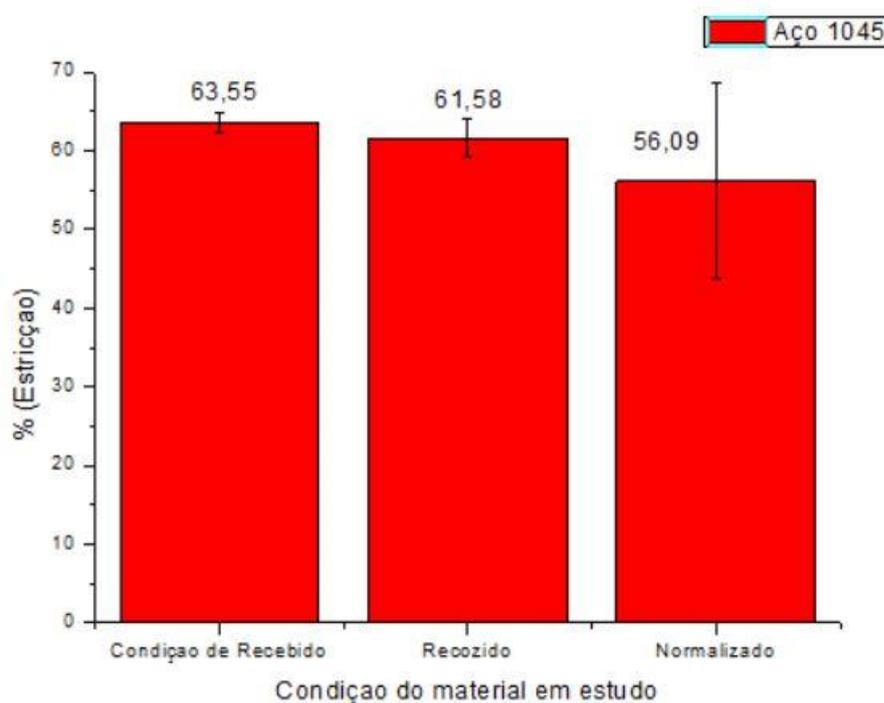
AÇO 1045	REDUÇÃO DE ÁREA			ALONGAMENTO			ESC.	TENSÃO	
								MÁXIMA	RUPTURA
Condição de Recebido.	d _o [mm ²]	d _f [mm ²]	Estricção [%]	L _o [mm]	L _f [mm]	[%]	σ _{max} [MPA]	σ _{max} [MPA]	σ _{max} [MPA]
CP1	8,9	5,6	60,40	85	101,1	18,94	271,38	441,22	318,11
CP2	9,1	7,5	32,07	85	98,5	12,70	267,28	426,35	356,14
CP3	9	5,95	56,29	85	99,3	16,82	305,56	462,15	342,92
CP4	8,9	5,2	65,86	85	101,1	18,94	295,19	446,74	312,9
CP5	8,9	5,2	65,86	85	101,1	18,94	293,12	462,15	310,5
Média	8,96	5,89	56,09	85	100,2	17,26	286,5	447,72	328,11
Desvio	-	-	12,42	-	-	2,42	14,7	11,55	18,14

Fonte: autoria própria

5.3.2 Análise da redução de área do aço 1045

A redução da área do aço 1045 é medida através da porcentagem de estrição do material o qual segundo Ibraim,2006 é uma medida do estrangulamento da seção e pode caracterizar a ductilidade do material. Diante dos resultados obtidos neste trabalho para o aço 1045 é possível verificar que este aço recozido apresentou maior porcentagem de estrição se comparado com o aço normalizado o que pode ser verificado na figura 45 onde o aço recozido apresenta porcentagem de estrição de 61,58% e o normalizado 56,09%.O que é justificável pela microestrutura obtida nesses tratamentos pois no recozimento obtém-se a perlita grosseira que possui um maior espaçamento interlamelar de ferrita e cementita o que proporciona uma maior ductilidade se comparado com a perlita fina obtida na normalização o que proporciona uma menor ductilidade nesse tipo de tratamento térmico. Logo o recozimento apresentou maior ductilidade do que a normalização algo esperado pela literatura segundo Callister, Chaverini;2011,2008.

Figura 45- Analisa a porcentagem de estrição do aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.

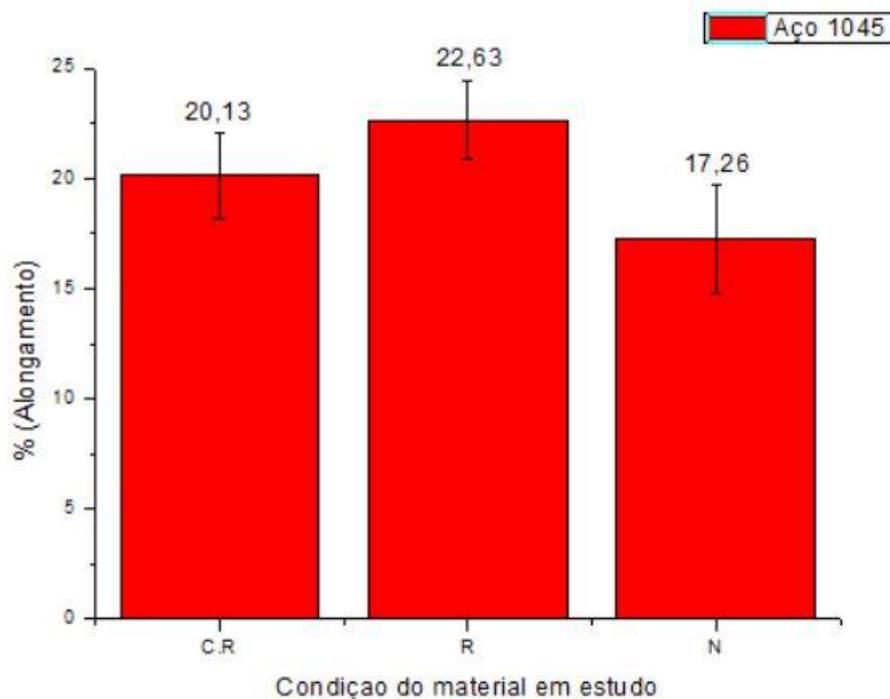


Fonte: autoria própria

5.3.3 Análise da porcentagem de alongamento do aço 1045

Diante da figura 46 é possível perceber que o aço 1045 recozido apresenta maior porcentagem de alongamento se comparado com o mesmo aço na condição de recebido e normalizado algo esperado tendo em vista se tratar de um tratamento que oferece uma microestrutura com propriedade de ductilidade elevada conforme falado anteriormente a perlita grosseira desta forma é explicado o aço recozido apresentar percentual de alongamento igual a 22,63 enquanto o normalizado apresenta 17,26 e o aço na condição de recebido está entre esses dois valores 20,13.

Figura 46 - Representa a porcentagem de alongamento do aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.

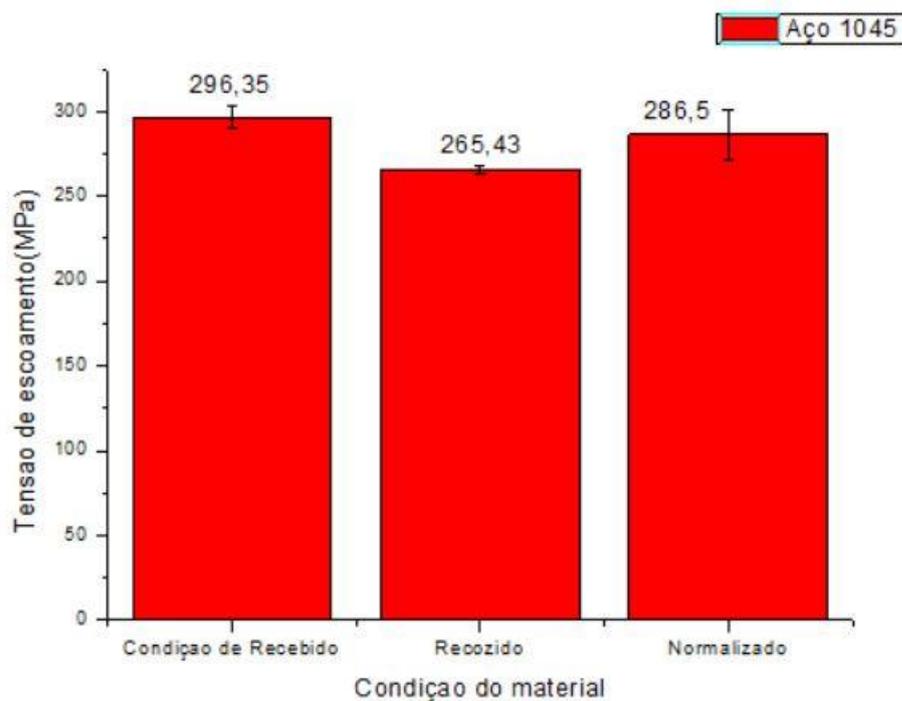


5.3.4 Análise da tensão de escoamento do aço 1045

Através do gráfico representado na figura 47 percebe-se que o aço normalizado apresenta maior valor de tensão para que aconteça o processo de escoamento o qual deve ser evitado para qualquer solicitação de engenharia tendo em vista ser o ponto onde começa a ocorrer a deformação plástica do material através do movimento das discordâncias em sua microestrutura assim o aço normalizado

1045 apresentou tensão de escoamento igual a 286,5 MPa e o aço recozido apresentou uma tensão de 265,43 algo que satisfaz o esperado para esse estudo tendo em vista a microestrutura do material recozido ser mais dura o que aumenta a resistência a tração desse material e que dependendo da solicitação é preferível um material normalizado a um recozido em virtude da maior tensão de escoamento todavia se essa tensão não for necessária e for preciso que o material seja mais dúctil para ser usinado por exemplo usa-se o tratamento de recozimento, tudo vai depender da solicitação onde o material vai ser empregado.

Figura 47 - Analisa a tensão de escoamento do aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.



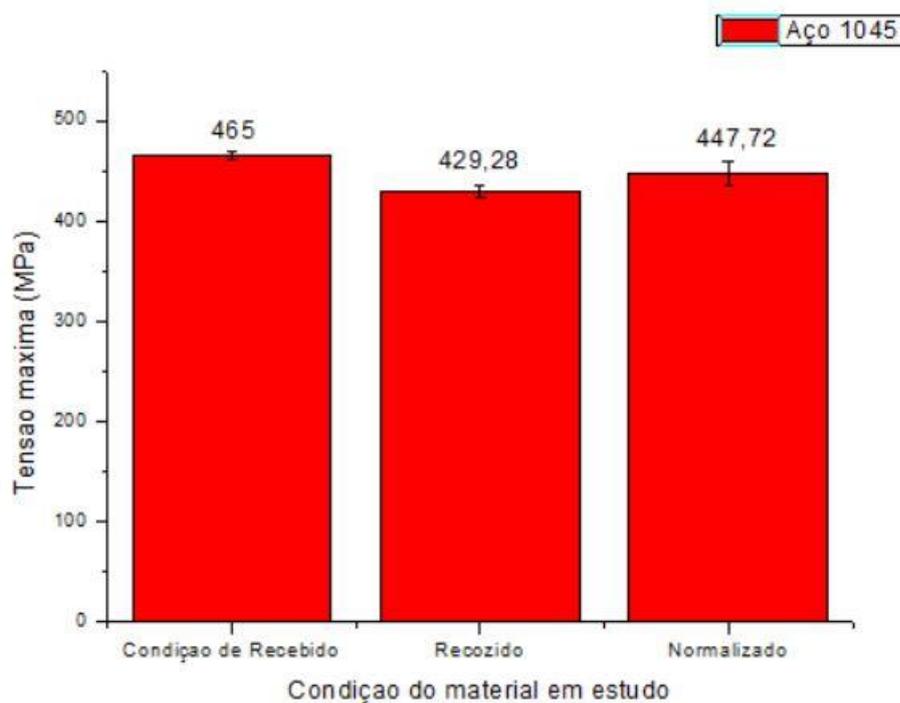
Fonte: autoria própria

5.3.5 Análise da tensão máxima suportada pelo aço 1045

Analisando apenas a tensão máxima do aço 1045 recozido e normalizado representado através da figura 48 é possível perceber que mais uma vez o aço normalizado suporta maior tensão que o recozido algo esperado até mesmo pelo aço normalizado apresentar maior tensão de escoamento pois se o contrário acontecesse

com a tensão máxima suportada pelo material algo estaria errado e tudo isso ocorre como já foi falado anteriormente pela forma como se encontra a microestrutura do material de acordo com a organização dos grãos já que para cada tratamento obtém-se uma microestrutura diferente e como o normalizado apresenta a perlita fina com espaçamento interlamelar menor que a perlita grosseira isso justifica a maior tensão suportada pelo aço normalizado já que os grãos estão mais uniformes e refinados e dificultam o rompimento de suas ligações e movimentos das discordâncias nos dando uma tensão máxima suportada pelo aço normalizado de 447,72 MPa e para o aço recozido de 429,28 MPa.

Figura 48 - Analisa a tensão máxima suportada pelo aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.



Fonte: autoria própria

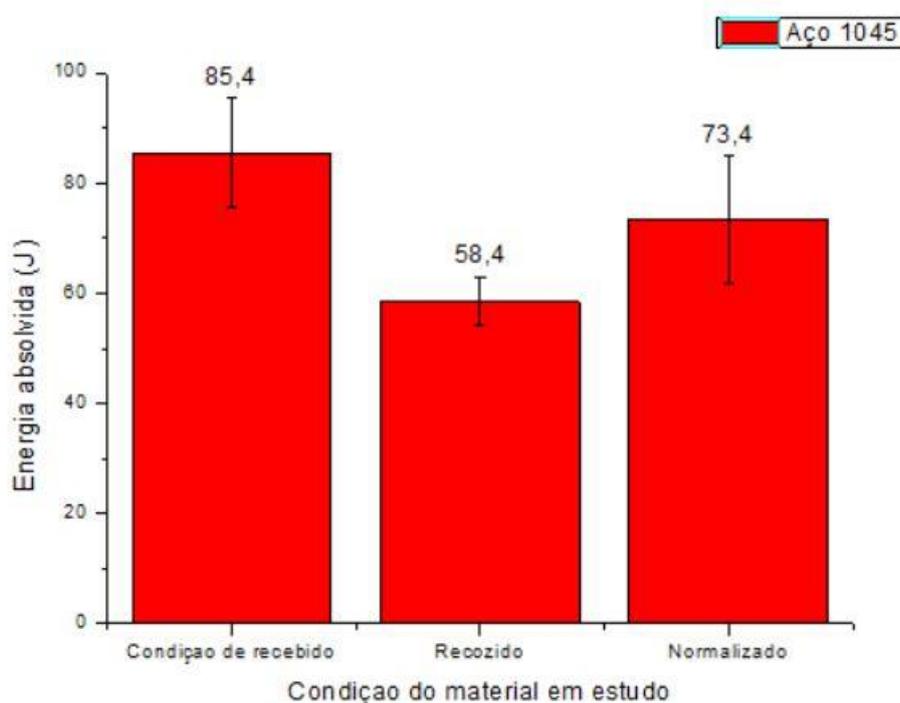
5.3.6 Análise da tensão de ruptura do aço 1045

A tensão de ruptura é fornecida pelas figuras 42,43 e 44 formados no programa Origin todavia essa medida não é importante na engenharia tendo em vista que a ruptura de qualquer material não deve ser nem cogitada logo não é necessário uma análise detalhada de seus valores.

5.4 Resultado do ensaio de impacto do aço 1045

Analisando a quantidade de energia absorvida no aço recozido e normalizado é possível perceber que o aço 1045 normalizado apresenta maior quantidade de energia absorvida no valor de 73,4 J se comparado com o aço recozido que apresenta 58,4 J o que se justifica pelo fato do aço normalizado ter maior poder de absorção de energia do que o aço recozido sem que aconteça a sua fratura quando submetido a uma força repentina e brusca devido a microestrutura apresentada pelo aço 1045 normalizado o que está demonstrado na figura 49.

Figura 49 - Analisa a energia absorvida por impacto no aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.

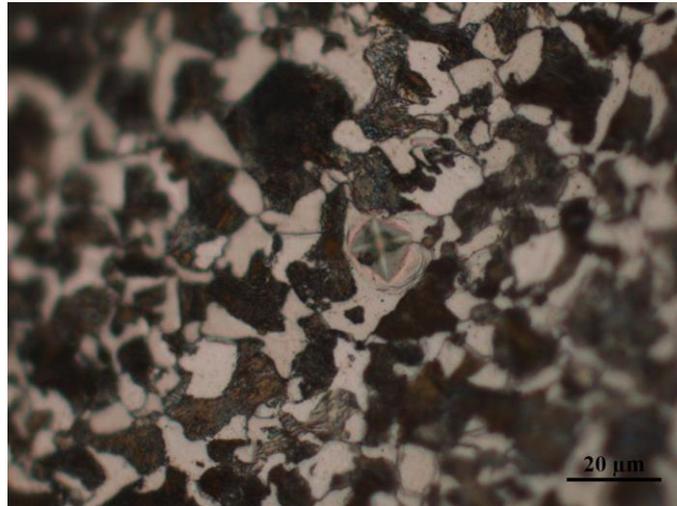


Fonte: autoria própria

5.5 Resultado do ensaio de microdureza para o aço 1045

Na figura 50 tem-se a micrografia da endentação na ferrita do aço 1045 normalizado, endentação semelhante acontece na perlita e no aço 1045 para a condição de recebido e recozido o qual fornece os valores de microdureza vickers que será analisado no item seguinte.

Figura 50 - Micrografia do aço 1045 normalizado com endentação na ferrita.



Fonte: autoria própria

5.5.1 Valores obtidos para microdureza Vickers do aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.

A tabela 13 mostra os valores encontrados no ensaio de microdureza vickres onde calculou-se a média e o desvio padrão do aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.

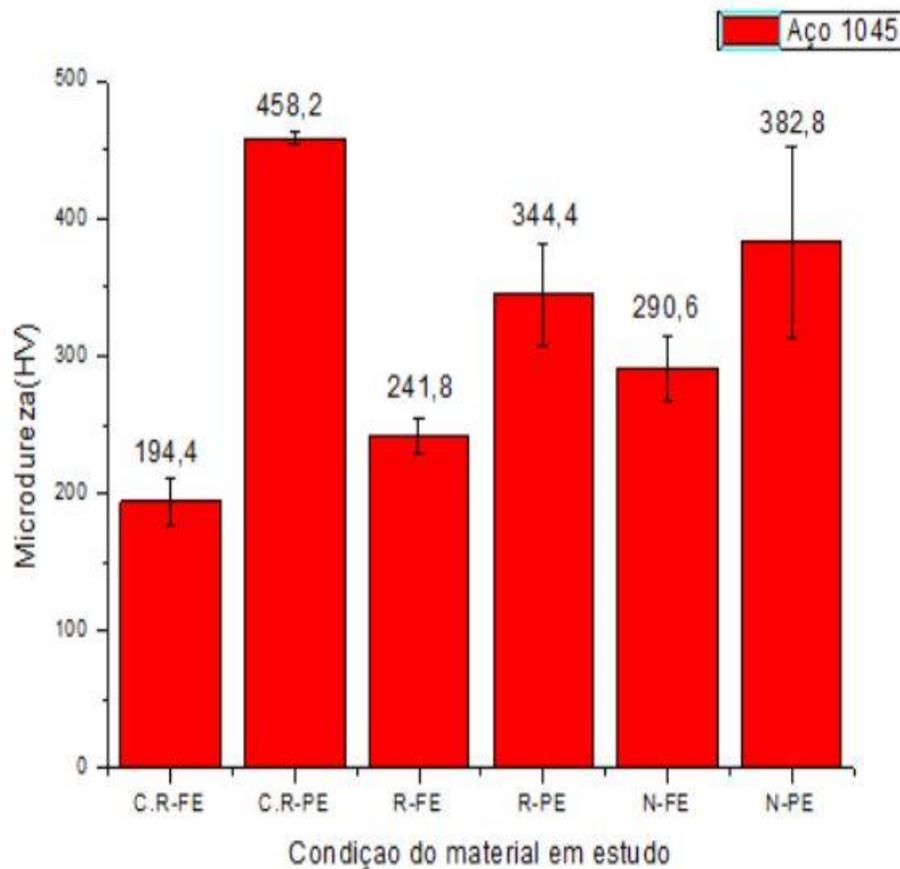
Tabela 13 - Resultado do ensaio de microdureza Vickrs do aço 1045

AÇO 1045						
Endenta Ção	Rec. Fe	Rec.pe	Recoz.fe	Recoz.pe	Norm.fe	Norm.pe
1º ponto	195	464	256	360	279	492
2º ponto	198	454	221	364	305	388
3º ponto	168	454	236	282	256	339
4º ponto	222	462	257	389	286	285
5º ponto	189	457	239	327	327	410
Média	194,4	458,2	241,8	344,4	290,6	382,8
Desvio	17,32	4,11	13,46	36,91	24,02	69,53

Fonte: autoria própria

A figura 51 fornece os valores de microdureza vickers para o aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado onde é possível comprovar que a ferrita apresenta menor dureza em virtude é claro do menor percentual de carbono, constituinte duro do aço, dissolvido na ferrita enquanto a perlita apresenta maior dureza para todas as condições em virtude do maior teor de carbono dissolvido neste material.

Figura 51 - Valores de dureza Vickers para o aço 1045 na condição de recebido, recozido e normalizado.



Fonte: autoria própria

5.6 Análise da dureza Rocwell C para o aço 1045 nas condições em estudo.

A tabela 14 mostra a dureza fornecida pelo aço 1045 na condição de recebido, recozido, normalizado, temperado e revenido, bem como as médias encontradas e o desvio padrão que está melhor representado na figura 51.

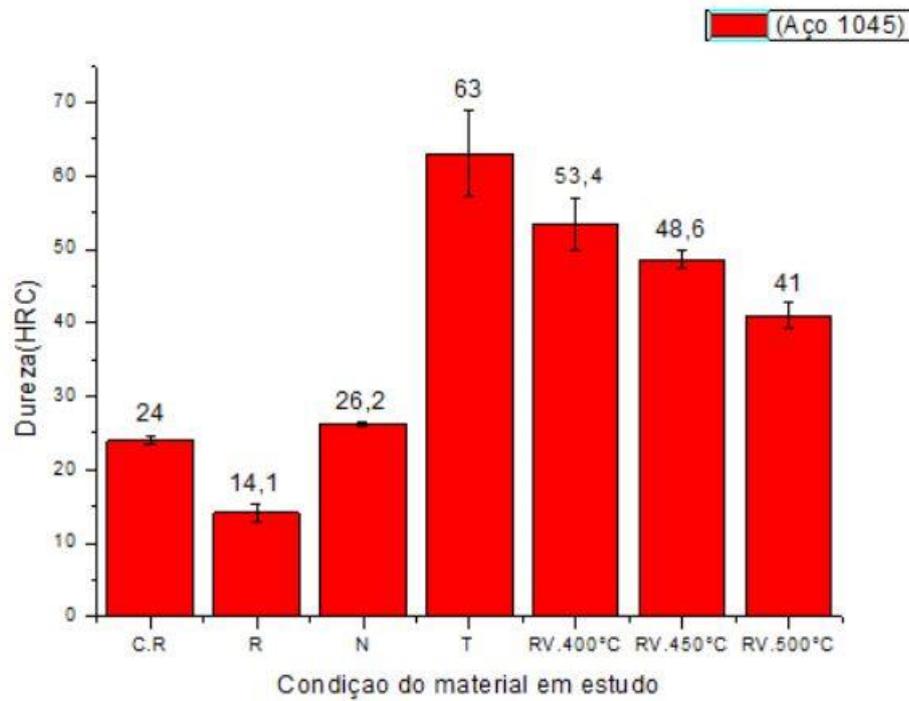
Tabela 14 - Resultado do ensaio de dureza do aço 1045 na condição de recebido, recozido, normalizado, temperado e revenido.

Condição	Aço 1045						
	Receb	Recoz.	Norm.	Temp.	Rev. 400°C	Rev. 450°C	Rev. 500°C
1º ponto	23,5	12	26	65	55	50	41
2º ponto	23,5	14	26	57	56	47	38
3º ponto	24	14	26,5	72	52	48	41
4º ponto	24,5	14,5	26,5	56	51	48	42
5º ponto	24,5	16	26	65	53	50	43
Média	24	14,1	26,2	63	53,4	48,6	41
Desvio	0,44	1,28	0,24	5,89	3,44	1,2	1,67

Fonte: autoria própria

A figura 52 mostra de forma clara a dureza Rocwell na escala C obtida para o aço 1045 na condição de recebido, recozido, normalizado, temperado e revenido a 400°C, 450°C e 500°C onde os resultados satisfazem as expectativas pois o aço após sofrer recozimento sofre uma diminuição em sua dureza algo esperado tendo em vista sua microestrutura formada por perlita grosseira a qual fornece maior ductilidade ao material e conseqüentemente menor dureza e continuando a análise do gráfico percebe-se que aço normalizado tem um ganho na dureza se comparado com o recozido o que se justifica pelo produto de seus constituintes a perlita fina que possui um grão mais refinado e um menor espaçamento interlamelar o que proporciona um ganho de dureza no material em seguida tem-se o aço temperado o qual tem um ganho considerado de aumento de sua dureza pois tem como produto o constituinte chamado martensita que proporciona uma dureza elevada ao material devido a não ocorrência de difusão, ou seja, o carbono fica retido na martensita por último temos o aço 1045 revenido o qual nos possibilita corrigir a dureza obtida na têmpera a qual deve ser evitada em um valor muito alto pois o aço se torna frágil, pois nesse tratamento térmico ocorre a difusão, ou seja, o carbono é difundido para o material, não ficando retido apenas na martensita o que permite que a dureza diminua.

Figura 52 - Dureza Rockwell C para o aço 1045 na condição de recebido, recozido, normalizado, temperado e revenido a 400°C, 450°C e 500°C.



Fonte: Autoria própria

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do estudo permitiu analisar a influência do tratamento térmico de recozimento, normalização, têmpera e revenido na microestrutura e propriedades mecânicas do aço 1045 por meio da compreensão dos princípios teóricos que envolvem o tema.

O material em estudo foi retirado de tarugos de aço de médio teor de carbono o aço SAE 1045 onde adquiriu-se catorze amostras para análise microestrutural, sendo que para cada condição avaliou-se a microestrutura obtida com o corte em duas seções a longitudinal e a transversal onde realizou-se a aquisição das imagens das microestruturas, possibilitando analisar o comportamento dos grãos e realizar os cálculos da fração volumétrica, através do software image j para o aço na condição de recebido, recozido e normalizado. Após a realização dos tratamentos térmicos descritos anteriormente realizou-se os ensaios mecânicos onde confeccionou-se os corpos de prova para o ensaio mecânico de tração segundo a norma ASTM-E8/E8M-11, o ensaio de impacto segundo a norma ASTM-E23-12C, ensaio de microdureza Vickers utilizando as amostras usadas para análise microestrutural do material, só que agora fez-se a análise da dureza nas fases tanto da ferrita quanto do constituinte cementita e o ensaio de dureza de acordo com os procedimentos especificados na norma ASTM E18-2014.

Podendo observar a estrutura heterogênea para o aço 1045 na condição de recebido, a estrutura homogênea composta de perlita grosseira para o aço 1045 que fornece uma maior ductilidade do material, a estrutura homogênea composta de perlita fina que possibilita um aumento na dureza devido ao pequeno espaçamento interlamelar obtido pelos grãos pequenos resultantes desse tratamento a estrutura martensítica que possibilita elevada dureza que tem a forma de ripas e as estruturas revenidas que possibilitam uma diminuição na dureza no aço temperado e através do ensaio mecânico de tração foi possível perceber que a normalização apresenta maior tensão de escoamento e suporta uma maior tensão se comparada com o aço recozido e que o aço recozido apresenta maior percentual de estrição e alongamento algo que se justifica pelo fato da estrutura de perlita grosseira possibilitar uma maior ductilidade ao material e percebeu-se também através do ensaio de impacto que a normalização apresenta maior absorção de energia se comparada com o aço recozido e através do ensaio de microdureza comprovou-se que a perlita apresenta maior dureza do que a

ferrita para as condições de recebido, recozido e normalizado o que se justifica pela quantidade de carbono dissolvido na perlita ser maior do que na ferrita já que o carbono é o constituinte que proporciona grandes dureza para o aço e por último analisou-se a dureza para as condições de recebido, recozido, normalizado, temperado e revenido onde notou-se uma menor dureza para o aço recozido ,um ganho de dureza para o normalizado e uma elevada dureza para o aço temperado e uma diminuição nessa dureza para o aço revenido.

Esses resultados possibilitam entender a relação que a microestrutura obtida em cada tratamento térmico desenvolvido tem com as propriedades mecânicas obtidas pelos ensaios mecânicos pois dependendo da microestrutura obtida o material apresenta maior ou menor ductilidade, tensão de escoamento, tensão máxima, energia absorvida microdureza, dureza entre outros.

Sendo necessário estudar em trabalhos futuros um material no qual se tenha elevados elementos de liga pois os mesmos visam, aumento de dureza, de resistência mecânica, absorção de energia possibilitando aplicações diversificadas na indústria sem que ocorra por exemplo a quebra do material.

7 SUGESTÕES

Analisar as imagens através do MEV (microscópio eletrônico de varredura) possibilitando a visualização das fases ferrita e cementita que são responsáveis pela formação do constituinte perlita.

Realizar o ensaio de microdureza nas amostras temperadas e revenidas a fim de se identificar as fases presentes como martensita, bainita e o constituinte perlita.

Analisar um material com maiores teores de elementos de liga.

REFERÊNCIA

ADALBERTO, V.C; JURANDIR, G.JR; RICARDO, M.R; VIDAL, D.P.S. Ensaio mecânicos de materiais metálicos, Universidade de Mogi das Cruzes, São Paulo, 2009.

ALEXANDER. Estudo da influência da criogenia na resistência ao desgaste abrasivo do aço ASTM 743 tipo CA6NM, UNICAMP, 2009.

AMERICAN Society for Metals – Metals Handbook, “ Mechanical Testing and Evaluatio” , Ohio: Metals Park, vol. 8,9 ed.2000.

ANUSAVICE, K.J. , “Philips Materiais Dentários”, Elsevier, 11ª ed., Rio de Janeiro, p.764. 2005.

ASTM E 23 – 07ª, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. ASTM International, 47 p, PA, USA, 2012.

BARRA, GABRIEL COELHO. **Estudo de viabilidade técnica e economia de troca de processo de cementação em linha industrial de tratamento térmico.** 2013. 69f. dissertação(Graduação em Engenharia Metalurgica)-Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CALLISTER, W.D.J(2013) Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. 7ª ed Utah: John Wiley e Sons.

CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO. (2014) **Aços Estruturais.** Rio de Janeiro CBCA. Disponível em:< <http://.cbca-acobrasil.org.br/construção-em-aco-acos-estruturais.php>> Acesso em: outubro 2016.

CHIAVERINI, V. (2008) **Aços e Ferros Fundidos**, 7 ed. ABM, São Paulo.
COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** São Paulo: Edgard Blucher , 1974.

GUIMARÃES, J.R.C.(1981) **Conceituação, cinética e morfologia da transformação martensítica em aços.** Revista Latino americana de metalurgia y materiales, v1, nº 1,3-9

HYAM, E.D. e Nutting, J.:(1986) Journal of Iron and Steel Institute 184, 148.

KRAUSS, G.S (1994) Heat treatment and processing principles.Ohio: ASM International

KRAUSS, G.S (1994) Heat treatment and processing principles.Ohio: ASM International

Leta, F.R, V.B. e Mello, J.C.S, agosto, 2004, “ Medição de Identação de Dureza com Algoritmos de visão computacional e Técnica de Decisão com Incertezas”, Engevista, v.6,n2,p.15-35

MANEIRO, M.A.G., Rodríguez, J.,2006, “ A Procedure to Prevent Pile up Effects on the Analysis of Spherical Indention data in Elastic-Plastic Materials”, Mechanics of Materials, Madrid, Spain.

MARDER.A.R.;GOLDSTEIN.J.I (1984) Phase transformations in Ferrous Alloys Structure-Property Relationships in Ferrous transformation Products.AIME,pp 11-41.
NISHYAMA.Z (1978) **Martensitic transformation**. Academia press. New York, p.14-79.

OUTSUKA,K,WAYMAN,C.M(1999) Shape, memory Cambridge,USA.284p.
Oliveira.G.S (2010) Ensaio mecânicos de metais, FEMEC

PARKER, E.R.:(1997) Metallurgical Transactions 8A,1024.

SILVA,André Luiz V.Da Costa; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**, 2 ed. Sumaré, SP: Eletrometal S.A.Metals Especiais, 1988.

NISHYAMA.Z (1978) **Martensitic transformation**. Academia press. New York, p.14-79.

NOVIKOV,I. (1994) **Teoria dos tratamentos térmicos dos metais**. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 439,457,550.

OUTSUKA,K,WAYMAN,C.M(1999) Shape, memory Cambridge,USA.284p.
PARKER, E.R.:(1977) Metallurgical Transactions 8A,1024.

REED-HILL.R.E (1982) **Princípios de metalurgia Física**, 2ª ed ABM, São Paulo
SILVA,André Luiz V.Da Costa; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**, 2 ed. Sumaré, SP: Eletrometal S.A.Metals Especiais, 1988
Compostas de Uso Direto e Indireto”, Cienc. Odontol.Bras.v12, n1, p23-30
SOUZA, R.O.A et al.; janeiro/março,2009, “Avaliação da Dureza Vickers de Resinas

SOUZA, S.A., Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos Teóricos e Práticos. 5ª Edição, Editora EDGRAD BLUCHER LTDA,1982.

TSCHIPTSCHIN (2010) **Tratamento térmico de aços**, São Paulo.
Van Vlack, L.,1984, “Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais”, Editora Campos Ltda, Rio de Janeiro 4.ed.

WANG.S.Y.; Wang. C.Y.; Zhao.D.L(2004) Effect of Double Boron Impurities on the Iron Grain Boundary Cohesion.Journal of alloy and Compounds, n 368, p 308-311.