



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PABLO LUIS SOARES DE OLIVEIRA

**ESTUDO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE ENDURECIMENTO DO AÇO
CARBONO COMUM AISI 1045**

Recife
2024

PABLO LUIS SOARES DE OLIVEIRA

**ESTUDO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE ENDURECIMENTO DO AÇO
CARBONO COMUM AISI 1045**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: PROF. DR. OSCAR OLIMPIO DE ARAUJO FILHO

RECIFE
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Oliveira, Pablo Luis Soares de.

Estudo do tratamento térmico de endurecimento do aço carbono comum
AISI 1045 / Pablo Luis Soares de Oliveira. - Recife, 2024.

71 : il., tab.

Orientador(a): Oscar Olimpio de Araujo Filho

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -
Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Aço. 2. AISI 1045. 3. Tratamento Térmico. 4. Microestrutura. 5.
Propriedades Mecânicas. I. Filho, Oscar Olimpio de Araujo. (Orientação). II.
Título.

620 CDD (22.ed.)

PABLO LUIS SOARES DE OLIVEIRA

**ESTUDO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE ENDURECIMENTO DO AÇO
CARBONO COMUM AISI 1045**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 18/10/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Oscar Olimpio de Araujo Filho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Edval Gonçalves de Araújo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Alexandre Douglas Araújo de Moura (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Resumo

O aço constitui-se essencialmente de uma liga de ferro e carbono, podendo incorporar outros elementos em proporções menores em sua estrutura. Atualmente, tem aplicações em uma variedade de setores, tais como máquinas, ferramentas e construção, entre outros. No entanto, sua utilização é delimitada em certos contextos devido às vantagens técnicas oferecidas por outros materiais. Como resposta a esse desafio, observa-se uma crescente evolução nas técnicas de tratamento térmico, visando alcançar propriedades mecânicas específicas com um custo reduzido. Essa modificação nas propriedades está intrinsecamente relacionada a três fatores fundamentais: a temperatura de aquecimento, a velocidade de resfriamento e a composição química do material. Este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos das temperaturas de austenitização, têmpera e revenido na propriedade mecânica de dureza de um aço de carbono comum AISI 1045, bem como realizar tratamento nas temperaturas especificadas para tratamento térmico de austenitização, têmpera e revenido e avaliar a propriedade mecânica de dureza do aço AISI 1045 para cada uma das condições de tratamento térmico.

Palavras-chave: Aço, AISI 1045, tratamento térmico, microestrutura, propriedades mecânicas

Abstract

Steel is essentially an alloy of iron and carbon, and can incorporate other elements in smaller proportions in its structure. Currently, it stands out as the most crucial metallic alloy, finding application in a variety of sectors, such as machinery, tools and construction, among others. However, its use is limited in certain contexts due to the technical advantages offered by other materials. In response to this challenge, there is a growing evolution in heat treatment techniques, aiming to achieve specific mechanical properties at a reduced cost. This change in properties is intrinsically related to three fundamental factors: the heating temperature, the cooling speed and the chemical composition of the material. This work aimed to study the effects of austenitizing/quenching temperatures on the mechanical hardness property of a common AISI 1045 carbon steel, as well as carrying out treatment at the temperatures specified for austenitizing/quenching heat treatment and evaluating the mechanical hardness property. of AISI 1045 steel for each of the heat treatment conditions.

Key word: Steel, AISI 1045, heat treatment, microstructure, mechanical properties

SUMÁRIO

1. Introdução.....	6
2. Contextualização.....	7
2.1 Definição.....	7
2.2 Classificação e Especificação dos Aços.....	7
2.3 Diagrama de Equilíbrio Fe-C: Aspectos e Transformações.....	13
2.4 Curva Tempo-Temperatura-Transformação.....	15
2.5 Constituintes do Aço.....	16
2.5.1 Ferrita.....	16
2.5.2 Cementita.....	17
2.5.3 Perlita.....	17
2.5.4 Austenita.....	18
2.5.5 Martensita.....	18
2.6 Aço 1045.....	19
2.7 Tratamentos Térmicos:.....	20
2.7.1 Fatores que influenciam tratamento térmico.....	21
2.7.2 Tipos de Tratamento Térmico:.....	24
2.8 Ensaio Mecânicos:.....	31
2.8.1 Ensaio de Dureza:.....	32
2.8.2 Microdureza:.....	39
3. Justificativas.....	40
4. Objetivos:.....	41
4.1 Geral.....	41
4.2 Específicos.....	41
5. Metodologia.....	42
5.1 Preparação Metalográfica:.....	42
5.1.1 Corte das Amostras:.....	42
5.1.2 Tratamentos Térmicos:.....	44
5.1.3 Corte Amostras Termicamente Tratadas para Embutimento.....	45
5.1.4 Embutimento:.....	45
5.1.5 Lixamento:.....	47
5.1.6 Polimento:.....	48
5.1.7 Ataque Químico:.....	50
5.2 Análise De Dureza:.....	51
5.2.1 Ensaio de Microdureza Vickers:.....	51
5.3 Análise Metalográfica:.....	53
6. Resultados Da Microdureza:.....	55
7. Resultados Da Microscopia Ótica E Eletrônica De Varredura:.....	61
8. Discussão:.....	65
9. Conclusão:.....	67
10. Referências Bibliográficas:.....	68

1. Introdução

O aço como uma liga de ferro e carbono está associado à inovação dos primeiros fornos, possibilitando a correção de impurezas no ferro e a adição de propriedades para aprimorar sua qualidade e durabilidade.

Atualmente, o aço desempenha um papel central como uma matéria-prima essencial na sociedade contemporânea, sendo amplamente utilizado em diversos setores industriais. O aço tornou-se indispensável em praticamente todas as indústrias, contribuindo significativamente para a qualidade e segurança na construção civil, instalações de comunicação, obras rodoviárias e ferroviárias, utensílios domésticos, fabricação de veículos, máquinas e equipamentos, entre outros (Smith et al., 2020).

Além de sua importância econômica, destaca-se o caráter sustentável do aço, uma vez que é um material 100% reciclável, permitindo sua reutilização na fabricação de novos produtos.

A versatilidade do aço é evidenciada em sua aplicação desde objetos cotidianos, como clipes, até equipamentos militares, como tanques de guerra. Sua popularidade deve-se ao baixo custo de produção, conformação e união, em comparação com outros materiais, além da abundância de suas matérias-primas (Jones, 2018).

A utilização de tratamentos térmicos para modificar a estrutura dos aços é uma prática comum, uma vez que determinadas características mecânicas são significativamente alteradas quando o material é submetido a ciclos de aquecimento e resfriamento.

A diversidade de propriedades mecânicas disponíveis no aço é uma razão para sua ampla utilização, sendo possível adequar essas propriedades às necessidades específicas por meio de diferentes composições químicas dos aços ou pela realização de tratamentos termomecânicos (Brown, 2021).

2. Contextualização

2.1 Definição

A definição precisa do termo "aço" é desafiadora, uma vez que as ligas comerciais não são estritamente binárias. Embora o ferro e o carbono sejam os principais constituintes, outros elementos secundários estão presentes devido aos processos de fabricação. Assim, adota-se a seguinte definição: "Aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de elementos residuais resultantes dos processos de fabricação" (Chiaverini, 2018).

Com milhares de ligas distintas, a classificação comumente adotada leva em consideração o teor de carbono, dividindo os aços em categorias de baixo, médio e alto teor de carbono, além de subclasses que consideram a variação nas concentrações de outros elementos de liga (Callister, 2015).

2.2 Classificação e Especificação dos Aços

A Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE), o Instituto Americano do Ferro e do Aço (AISI), e a Sociedade Americana para Ensaios e Materiais (ASTM) desempenham papéis fundamentais na classificação e especificação de aços, bem como de outras ligas em diversas indústrias (SAE, 2020; AISI, 2018; ASTM, 2021).

A classificação das ligas pode ocorrer de várias maneiras, sendo uma delas baseada no percentual de carbono. Nesse sentido, destaca-se o Aço Carbono, que representa a maior parcela consumida devido ao seu baixo custo e à ampla gama de propriedades que podem ser obtidas por meio da variação do teor de carbono e do estado de fornecimento (encruado, temperado, etc.). Os aços carbono podem ser subdivididos em:

Aços de Baixo Carbono, caracterizados por teores geralmente inferiores a 0,30% de carbono. Essas ligas apresentam baixa dureza e resistência, mas exibem excepcionais características de ductilidade e tenacidade. São usináveis, soldáveis e economicamente vantajosas em sua produção, encontrando aplicações em

componentes automotivos, formas estruturais, chapas para tubulações, edificações, pontes. (Callister, 2015).

A figura 1 apresenta as composições químicas de vários aços-carbono com baixo teor de carbono.

Figura 1: Composição química de aços com baixo teor de carbono

UNS	SAE	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)			
		C	Mn	P Máx.	S Máx.
G10060(5)	1006(5)	0.08 Max	0.25-0.40	0.030	0.050
G10070(4)	1007(4)	0.02-0.10	0.50 Max	0.030	0.050
G10080(5)	1008(5)	0.10 Max	0.30-0.50	0.030	0.050
G10090(5)	1009(5)	0.15 Max	0.60 Max	0.030	0.050
G10100	1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.030	0.050
G10120	1012	0.10-0.15	0.30-0.60	0.030	0.050
G10130	1013	0.11-0.16	0.30-0.60	0.030	0.050
G10150	1015	0.13-0.18	0.30-0.60	0.030	0.050
G10160	1016	0.13-0.18	0.60-0.90	0.030	0.050
G10170	1017	0.15-0.20	0.30-0.60	0.030	0.050
G10180	1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.030	0.050
G10190	1019	0.15-0.20	0.70-1.00	0.030	0.050
G10200	1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.030	0.050
G10210	1021	0.18-0.23	0.60-0.90	0.030	0.050
G10220	1022	0.18-0.23	0.70-1.00	0.030	0.050
G10230	1023	0.20-0.25	0.30-0.60	0.030	0.050
G10250	1025	0.22-0.28	0.30-0.60	0.030	0.050
G10260	1026	0.22-0.28	0.60-0.90	0.030	0.050
G10290	1029	0.25-0.31	0.60-0.90	0.030	0.050

Fonte: SAE/Gerdau, 2024

Os aços de Médio Carbono apresentam concentrações de carbono entre aproximadamente 0,30% e 0,60% (Callister, 2015). Com o intuito de aprimorar suas propriedades mecânicas, tais ligas podem ser submetidas a tratamentos térmicos, incluindo etapas de austenitização, têmpera e revenido, possuem baixa temperabilidade, sendo passíveis de tratamento térmico bem-sucedido somente em seções muito finas e com taxas de resfriamento extremamente altas.

Dentro do contexto industrial, os aços com médio teor de carbono encontram aplicação em uma variedade de componentes, como rodas de trens, trilhos de ferrovias, engrenagens, virabrequins e outras peças de máquinas, além de componentes estruturais que demandam uma combinação específica de alta resistência mecânica, resistência à abrasão e tenacidade (Callister, 2015).

A Figura 2 apresenta a composição química de algumas ligas de médio carbono. (Gerdau/SAE).

Figura 2: Composição química de aços com médio teor de carbono

UNS	SAE	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)			
		C	Mn	P Máx.	S Máx.
G10300	1030	0.28-0.34	0.60-0.90	0.030	0.050
G10330	1033	0.30-0.36	0.70-1.00	0.030	0.050
G10350	1035	0.32-0.38	0.60-0.90	0.030	0.050
G10370	1037	0.32-0.38	0.70-1.00	0.030	0.050
G10380	1038	0.35-0.42	0.60-0.90	0.030	0.050
G10490	1049	0.46-0.53	0.60-0.90	0.030	0.050
G10390	1039	0.37-0.44	0.70-1.00	0.030	0.050
G10400	1040	0.37-0.44	0.60-0.90	0.030	0.050
G10420	1042	0.40-0.47	0.60-0.90	0.030	0.050
G10430	1043	0.40-0.47	0.70-1.00	0.030	0.050
G10440	1044	0.43-0.50	0.30-0.60	0.030	0.050
G10450	1045	0.43-0.50	0.60-0.90	0.030	0.050
G10460	1046	0.43-0.50	0.70-1.00	0.030	0.050
G10500	1050	0.48-0.55	0.60-0.90	0.030	0.050
G10530	1053	0.48-0.55	0.70-1.00	0.030	0.050
G10550	1055	0.50-0.60	0.60-0.90	0.030	0.050
G10600	1060	0.55-0.65	0.60-0.90	0.030	0.050

Fonte: SAE/Gerdau, 2024

Os aços Alto Carbono, comumente apresentando concentrações de carbono entre 0,60% e 1,4% (Callister, 2015), destacam-se por serem os mais duros e resistentes, embora menos dúcteis quando comparados a outros aços-carbono. Entre as aplicações, encontram-se os aços-ferramenta e para matrizes, que incluem adições de elementos como cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio. Essas ligas desempenham funções como ferramentas de corte e matrizes para a conformação de materiais, sendo amplamente utilizadas na produção de facas, lâminas de corte, lâminas de serras, molas e arames de alta resistência (Callister, 2015).

A Figura 3 fornece uma representação gráfica da composição química de algumas dessas ligas com alto teor de carbono. (Gerdau/SAE, 2024)

Figura 3: Composição química de aços com alto teor de carbono

UNS	SAE	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)			
		C	Mn	P Máx.	S Máx.
G10650	1065	0.60-0.70	0.60-0.90	0.030	0.050
G10700	1070	0.65-0.75	0.60-0.90	0.030	0.050
G10740	1074	0.70-0.80	0.50-0.80	0.030	0.050
G10750	1075	0.70-0.80	0.40-0.70	0.030	0.050
G10780	1078	0.72-0.85	0.30-0.60	0.030	0.050
G10800	1080	0.75-0.88	0.60-0.90	0.030	0.050
G10840	1084	0.80-0.93	0.60-0.90	0.030	0.050
G10850	1085	0.80-0.93	0.70-1.00	0.030	0.050
G10860	1086	0.80-0.93	0.30-0.50	0.030	0.050
G10900	1090	0.85-0.98	0.60-0.90	0.030	0.050
G10950	1095	0.90-1.03	0.30-0.50	0.030	0.050

Fonte: SAE/Catálogo Gerdau

A especificação da AISI/SAE para aços segue um padrão composto por um número de quatro dígitos, nos quais os dois primeiros indicam o tipo da liga, enquanto os dois últimos fornecem a concentração de carbono multiplicada por 100. Em aços-carbono comuns, os dois primeiros dígitos são 1 e 0, enquanto as ligas de aço têm designações específicas por diferentes combinações dos dois dígitos iniciais, como 13, 41 e 43. (AISI, 2018)

A Figura 4 apresenta a classificação dos aços conforme estabelecido pela SAE, proporcionando uma visão clara e organizada das diferentes categorias dessas ligas (SAE, 2020).

Figura 4: Classificação dos aços de acordo com a composição química

Designação SAE	Tipo de aço
10XX	Aços-carbono comuns
11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
13XX	Aço-manganês com 1,75% de Mn
15XX	Aço-manganês com 1,00% de Mn
23XX	Aço-níquel com 3,50% de Ni
25XX	Aço-níquel com 5,00% de Ni
31XX	Aço-níquel-cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	Aço-níquel-cromo com 3,50% de Ni e 1,55% de Cr
40XX	Aços-molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	Aços-cromo-molibdênio com 0,50% ou 0,90% de Cr e 0,12% ou 0,20% de Mo
43XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,80% de Ni, 0,50% ou 0,80% de Cr e 0,25% de Mo
46XX	Aços-níquel-molibdênio com 1,55% ou 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
47XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,20% de Mo
48XX	Aços-níquel-molibdênio com 3,50% de Ni e 0,25% de Mo
50XX	Aços-cromo com 0,28% ou 0,65% de Cr
50BXX	Aços-cromo-boro com baixo teor de Cr e no mínimo 0,0005% de B
51XX	Aços-cromo com 0,80% a 1,05% de Cr
52XXX	Aços-rolamento
61XX	Aços-cromo-vanádio com 0,80% ou 0,95% de Cr e 0,10% ou 0,15% de V
86XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
87XX	Idem
92XX	Aços-silício-manganês com 0,85% Mn e 2,00% de Si
93XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 3,25% de Ni 1,20% de Cr e 0,12 de Mo
94BXX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com baixos teores de Ni, Cr, Mo e, no mínimo, 0,0005% de B
98XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,00% de Ni, 0,80% de Cr e 0,25% de Mo

(Fonte: Gerdau/SAE, 2024)

De acordo com Colpaert, H., 1974, e Costa e Silva, A. L. e Mei, P. R., 1988, os aços podem ser classificados pela sua aplicação:

1. Aços Estruturais

São destinados à construção de estruturas metálicas, como pontes, torres de linha de transmissão e edifícios. Os requisitos essenciais para esses aços incluem resistência mecânica, soldabilidade, disponibilidade no mercado e preço acessível. Aços carbono comum, notavelmente na faixa de 0,15%C a 0,35%C, atendem a esses requisitos, sendo exemplos comuns os aços AISI 1015 e 1020.

2. Aços para Molas

Compostos principalmente por aços carbono comum, esses aços, em alguns casos, recebem adição de elementos de liga, principalmente manganês. Apresentam características fundamentais, como alta resistência à fadiga e alto limite de elasticidade. Exemplos incluem os aços AISI 1070, 1080 e 1090.

3. Aços para Beneficiamento

São aços que possibilitam tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento, com teor de carbono superior a 0,30%, podendo ou não conter elementos de liga. A seleção desses aços é pautada por propriedades mecânicas da peça, geometria, esforços estáticos e dinâmicos, e temperabilidade. Exemplos são AISI 1045, 4130, 4330, 5140, 8640.

4. Aços para Cementação ou Nitretação

Caracterizados por baixo teor de carbono ($C < 0,30\%$), com ou sem a presença de elementos de liga, esses aços são aplicados em elementos de máquinas que demandam alta resistência ao desgaste e boa ductilidade. Exemplos incluem AISI 1010, 1016, 3120, 5120.

5. Aços para Ferramenta

Destinam-se à fabricação de peças e ferramentas utilizadas na produção de outras peças. Esses aços devem atender a requisitos específicos de fabricação, como usinagem e tratamento térmico. Exemplos incluem bits de usinagem e matrizes de injeção de plásticos.

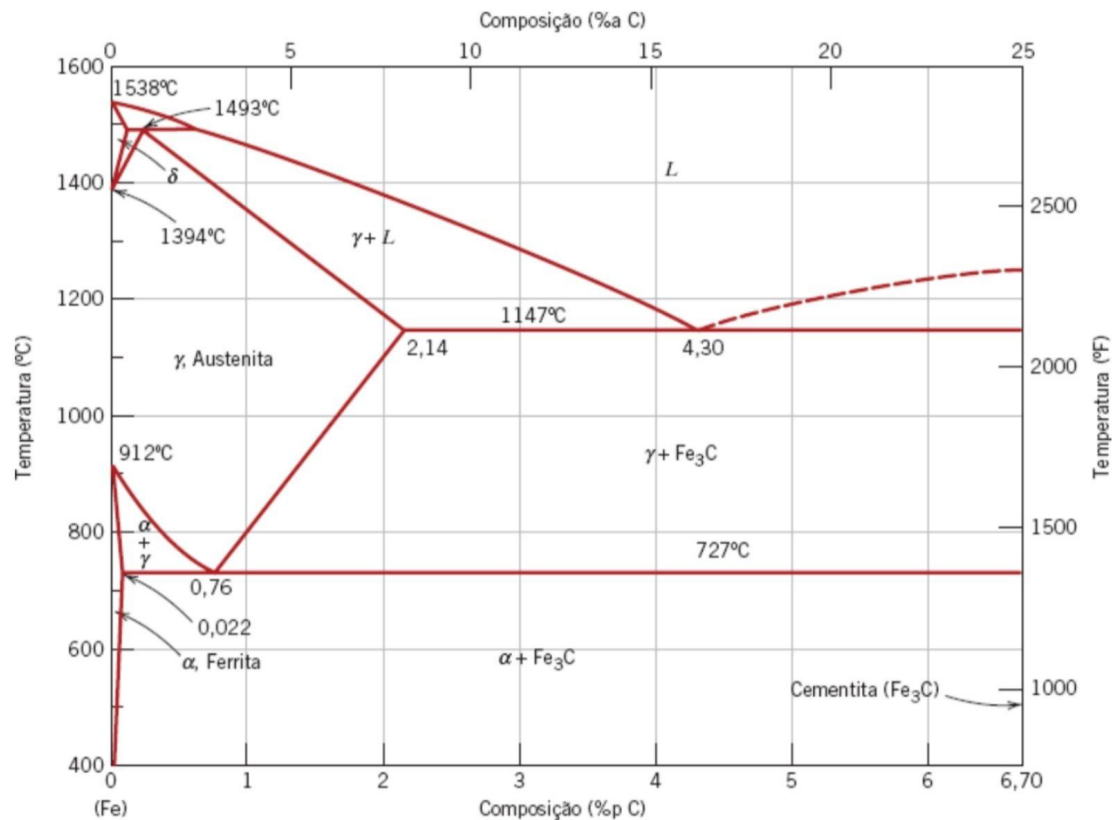
2.3 Diagrama de Equilíbrio Fe-C: Aspectos e Transformações

Muitas das informações sobre o controle da estrutura das fases de um sistema específico são mostradas de maneira conveniente e concisa no chamado diagrama de equilíbrio. Existem três parâmetros que podem ser controlados externamente e que afetarão a estrutura das fases, temperatura, pressão e composição, e os diagramas de fases são construídos quando várias combinações desses parâmetros são traçadas umas em função das outras. (Callister, 2018)

Os diagramas de fases binários são mapas que representam as relações entre a temperatura e as composições e quantidades das fases em equilíbrio, as quais influenciam a microestrutura de uma liga. De todos os sistemas de ligas binárias, talvez o mais importante seja o formado pelo ferro e pelo carbono. Tanto os aços quanto os ferros fundidos, que são os principais materiais estruturais em toda cultura tecnologicamente avançada, são essencialmente ligas ferro-carbono. (Callister, 2018)

Para o entendimento dos aços, o estudo do diagrama de equilíbrio Fe-C é indispensável. A Figura 5 ilustra o diagrama da liga binária Fe-C para teores de carbono até 6,67% (Chiaverini, 2018).

Figura 5: Diagrama Ferro-Carbono



(Fonte: Callister, 2015)

O diagrama de equilíbrio Fe-C, também conhecido como diagrama Fe- Fe_3C , é uma ferramenta crucial no entendimento das fases presentes em ligas ferro-carbono. À sua direita, evidencia-se a composição do carboneto de ferro Fe_3C , representando 6,67% de carbono. (Chiaverini, 2018).

Na porção superior do diagrama, são apresentadas as reações relacionadas à passagem do estado líquido para o sólido. Analogamente, a porção inferior espelha uma semelhança com a parte superior, representando as reações no estado sólido (Chiaverini, 2018).

Dentro desse contexto, destacam-se alguns pontos significativos:

Campo Ferrítico (Fase α): Este campo refere-se à solução sólida de carbono no ferro α , caracterizada por uma estrutura atômica cúbica de corpo centrado.

Campo Austenítico (Fase γ): Representa a solução sólida de carbono no ferro γ , possuindo uma estrutura atômica cúbica de face centrada. A fase γ tem uma solubilidade máxima de carbono de 2,06% a 1147°C.

Cementita (Fe_3C): Microconstituente composto de ferro e carbono, apresentando alta dureza, estrutura ortorrômbica e 6,67% de carbono.

Pontos Eutetóide e Eutético: O ponto eutetóide, com uma composição de carbono de 0,77%, indica a reação eutetóide, transformando a austenita em perlita. Já o ponto eutético, com 4,3% de carbono, corresponde à temperatura de fusão ou solidificação mais baixa, a 1147°C, caracterizando ligas eutéticas.

2.4 Curva Tempo-Temperatura-Transformação

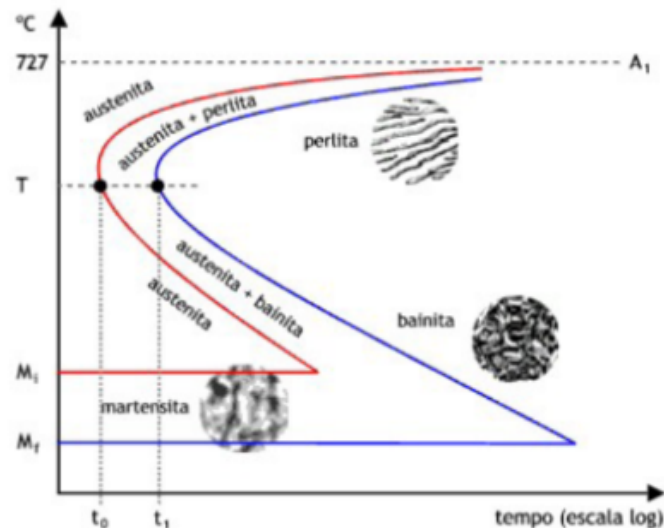
O diagrama de fases ferro-carbono é útil para prever muitas condições de transformação, mas não fornece muita informação sobre o estado de não equilíbrio dos aços. Sob cada condição, as transformações podem ser melhor descritas por diagramas Tempo-Temperatura-Transformação, geralmente chamados de diagramas TTT. Relacionam a transformação da austenita com as condições de tempo e temperatura a que ela está submetida. Estes ajudam a compreender o comportamento do aço nas várias fases do tratamento térmico. Esses diagramas são usados principalmente para prever a estrutura e as propriedades mecânicas dos aços temperados a partir da região de austenitização e mantidos a uma temperatura elevada constante abaixo do ponto eutetóide. (K.H.Prabhudev, 1988)

Além do diagrama de equilíbrio, outro aspecto essencial no estudo das transformações do aço é a Curva TTT (Tempo-Temperatura-Transformação). Ela permite compreender os fenômenos que ocorrem durante o resfriamento a diferentes velocidades. (Chiaverini, 2018).

A Curva TTT, produzida por meio do estudo metalográfico de corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas, revela a cinética de transformação de fase. Essa curva é útil para indicar o tempo necessário para atingir o grau de transformação desejado, sendo valiosa no controle do resfriamento do material e

fornecendo informações sobre as propriedades mecânicas e a microestrutura resultante (Chiaverini, 2018).

Figura 6: Curva TTT



(Fonte: Chiaverini)

2.5 Constituintes do Aço

Os constituintes básicos encontrados nos aços são, pois, austenita, ferrita, cementita, perlita e martensita.

2.5.1 Ferrita

Ferro puro ou aços que contenham teor de carbono abaixo do limite de solubilidade da cementita na fase CCC são essencialmente monofásicos, contendo apenas a fase CCC, chamada ferrita à temperatura ambiente. (Colpaert, 2008)

A ferrita é o ferro no estado alotrópico alfa, solução sólida intersticial de carbono; apresenta também uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui baixa dureza e baixa resistência à tração, mas excelente resistência ao choque e elevado alongamento. (Chiaverini, 1996)

É formada no resfriamento lento do aço hipoeutetóide austenitizado abaixo da Temperatura de transformação da austenita em perlita. É macio, dúctil e possui uma dureza de 70-100 BHN e uma condutividade bastante alta. A ferrita presente no aço pode ter outros elementos como elementos residuais além da pequena quantidade de carbono em soluções sólidas. Os grãos de ferrita são poligonais e de formato e tamanho regulares. (K. H. Prabhudev, 1988)

2.5.2 Cementita

Nas ligas ferro-carbono, o excesso de carbono em relação ao limite de solubilidade deve formar uma segunda fase, a qual é mais frequentemente a Cementita ou carboneto de ferro. Quando comparada a austenita e ferrita, a cementita é muito dura. A presença em um aço de carboneto de ferro junto a ferrita, aumenta muito a resistência do mesmo. (Van Vlack, L. H, 1984)

A cementita é o carboneto de ferro Fe_3C contendo 6,67% de carbono, muito duro e quebradiço, é responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como pela sua menor ductilidade. possui estrutura cristalina ortorrômbica. (Chiaverini, 1996)

É caracterizado por uma estrutura cristalina ortorrômbica. A cementita é um composto duro e quebradiço que possui uma dureza de 65-68 HRC. A presença de carbonetos em aços endurecidos e principalmente em aços rápidos e para trabalho a frio, aumenta a resistência ao desgaste das ferramentas. (K. H. Prabhudev, 1988)

2.5.3 Perlita

A perlita é uma mistura de 88% de ferrita e 12% de cementita, na forma de lâminas finas dispostas alternadamente. As propriedades mecânicas da perlita são, portanto, intermediárias entre as da ferrita e da cementita. (Chiaverini. 1996)

A reação eutetóide do sistema Fe-C envolve a formação simultânea de ferrita e cementita a partir da austenita com composição eutetóide. A mistura é caracteristicamente lamelar, isto é, composta por camadas alternadas de ferrita e cementita. A microestrutura resultante, denominada perlita, é muito importante na tecnologia do ferro e do aço. (Van Vlack, L. H, 1984)

Perlita é uma mistura eutetóide de cementita e ferrita que possui uma dureza de HRC 10-30 dependendo do tipo de aço. Por exemplo, quando um aço eutetóide (0,8% de carbono) é austenitizado e rapidamente resfriado abaixo de Ar_1 até cerca de 700°C, e transformado isotermicamente, a decomposição da austenita para formar perlita ocorre por nucleação e crescimento. (K. H. Prabhudev, 1988)

2.5.4 Austenita

A austenita, nos aços carbonos comuns, só é estável acima de 727°C; consta de uma solução sólida de carbono no ferro gama e apresenta uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui boa resistência mecânica e apreciável tenacidade; é não magnética. (Chiaverini, 1996)

A modificação cúbica de faces centradas do ferro é denominada austenita ou ferro- γ . É a forma estável do ferro puro entre 910°C e 1400°C. Na faixa de temperatura que é estável, a austenita é mole e dúctil e, conseqüentemente, se presta bem para processos de fabricação. (Van Vlack, L. H, 1984)

A microestrutura austenítica é estável a temperaturas elevadas e oferece excelente resistência à corrosão. Essa característica torna os aços austeníticos ideais para aplicações em ambientes agressivos, como na indústria petroquímica, trabalhos em temperaturas elevadas e na fabricação de equipamentos médicos. ("Microestrutura dos aços na indústria metalúrgica - Sacchelli", 2024)

2.5.5 Martensita

Martensita é a solução sólida supersaturada de carbono e outros elementos no ferro alfa com uma rede distorcida. Este é um constituinte duro produzido quando um aço é resfriado a partir da temperatura de endurecimento a uma taxa maior que a taxa crítica de resfriamento. Em ligas de ferro-carbono e aços, a austenita é a fase original e se transforma em martensita durante o resfriamento. A transformação da martensita é sem difusão e tem exatamente a mesma composição que sua austenita original, até 2% de carbono, dependendo da composição da liga. A estrutura resultante é uma mudança ordenada de uma rede cúbica de face centrada para uma configuração tetragonal. (K. H. Prabhudev, 1988)

É o constituinte estrutural resultante da têmpera dos aços e sua microestrutura apresenta-se na forma de agulhas cruzadas. Os átomos de carbono estão nas faces e nas arestas, apresenta por isso uma rede distorcida. Esta distorção da rede é a responsável pela dureza da martensita. Apresenta uma rede tetragonal. (“Constituintes estruturais de equilíbrio dos aços”, 2024)

A martensita é uma fase dura e quebradiça formada quando o aço é rapidamente resfriado (têmpera). Na indústria metalúrgica, a martensita é frequentemente utilizada em ferramentas de corte e componentes que exigem alta dureza e resistência ao desgaste. No entanto, a martensita pura é muito frágil, por isso é comum realizar um tratamento de revenimento para aumentar a tenacidade. (“Microestrutura dos aços na indústria metalúrgica - Sacchelli”, 2024)

2.6 Aço 1045

O aço SAE 1045 é um aço hipoeutetóide com baixa temperabilidade, ou seja, baixa penetração de fase martensítica em sua seção transversal. Segundo a NBR 172/2000 é classificado como aço para construção mecânica, tendo aplicação em eixos em geral, engrenagens, pinos parafusos, pinças, braçadeiras, etc. No entanto, mesmo possuindo uma boa relação entre resistência mecânica e custo operacional, este aço necessita de determinados tratamentos térmicos para obter melhor propriedades mecânicas.

O aço SAE 1045 apresenta uma ampla aplicabilidade, sendo considerado de baixo custo e boa resistência mecânica, apresentando cerca de 0,45% de carbono. Mesmo com uma boa resistência mecânica, o aço SAE 1045 é submetido a diversos tipos de tratamentos térmicos, como, por exemplo, têmpera e revenimento, com o intuito de melhorar suas propriedades mecânicas (GROOVER, 2014; CHIAVERINI, 1986).

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

O aço SAE 1045 tem um excelente custo-benefício, boa resistência mecânica, é muito utilizado na fabricação de componentes de uso geral, apresenta uma temperabilidade baixa, com pouca penetração de dureza na seção transversal e, quando tratado termicamente, é aumentada sua aplicabilidade (Gallo, 2006)

A composição química do Aço 1045 está apresentada na tabela 1:

Tabela 1 - Composição química do aço 1045, de acordo com SAE

C	Mn	Pmax	Smax	Si
0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050	0,10 – 0,60

2.7 Tratamentos Térmicos:

Tratamentos térmicos são os processos de tratamento das peças de metais e ligas, através da ação do calor, com o objetivo de modificar suas estruturas e propriedades em determinada direção. (Novikov, 1994)

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas. As propriedades dos aços dependem, em princípio, da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam a estrutura dos aços, resultando, em consequência, na alteração de suas propriedades. Cada uma das estruturas obtidas apresenta suas características próprias, que se transferem ao aço, conforme a estrutura ou combinação de estruturas presentes. (Chiaverini, 1988)

O tratamento térmico é o método mais propagado na técnica moderna para modificar as propriedades dos metais e ligas. Nas usinas metalúrgicas e de construção mecânica, o tratamento térmico é um dos grupos mais importantes do processo tecnológico de produção de semiprodutos e peças de máquinas. É empregado como operação final para dar ao metal ou liga um conjunto de

propriedades mecânicas e físicas as quais garantem as características necessárias para a utilização das peças. (Novikov, 1994)

Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são os seguintes: — alívio de tensões (oriundas de resfriamento desigual, trabalho mecânico); — aumento ou diminuição da dureza; — aumento da resistência mecânica; — melhora da ductibilidade; — melhora da usinabilidade; — melhora da resistência ao desgaste; — melhora das propriedades de corte; — melhora da resistência à corrosão; — melhora da resistência ao calor; — modificação das propriedades elétricas e magnética. (Chiaverini, 1988)

Em geral, a melhora de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com prejuízo de outras. Por exemplo, o aumento da ductibilidade provoca simultaneamente queda nos valores de dureza e resistência à tração. (Chiaverini, 1988)

É necessário, pois, que o tratamento térmico seja escolhido e aplicado criteriosamente, para que os inconvenientes apontados sejam reduzidos ao mínimo. Não se verifica, pela simples aplicação de um tratamento térmico, qualquer alteração da composição química do aço. (Chiaverini, 1988)

2.7.1 Fatores que influenciam tratamento térmico

Em razão do o tratamento térmico ser um processo que envolve um ciclo de aquecimento e resfriamento, os fatores que têm influência no resultado são: aquecimento, velocidade de aquecimento, temperatura de aquecimento, tempo de permanência à temperatura, ambiente do aquecimento e resfriamento. (Chiaverini, 1996)

2.7.1.1 Aquecimento:

O aquecimento é geralmente realizado a uma temperatura acima da crítica, porque então tem-se completa austenitização do aço, ou seja total dissolução do carboneto de ferro no ferro gama: essa austenitização é, como se viu, o ponto de partida para as transformações posteriores desejadas, as quais se processarão em

função da velocidade de esfriamento adotada. Na fase de aquecimento, dentro do processo de tratamento térmico, devem ser apropriadamente consideradas as velocidades de aquecimento e a temperatura máxima de aquecimento. (Chiaverini, 1996)

2.7.1.2 Velocidade de aquecimento:

A velocidade de aquecimento deve ser adequada à composição e ao estado de tensão do aço. Um aquecimento rápido ou lento influencia no resultado obtido. Se for feito de forma muito lenta, provocará um crescimento excessivo dos grãos de austenita, o que deixa o aço frágil. Se for feito de forma muito rápida em aços ligados ou aços com altas tensões internas, poderá provocar o empenamento ou até mesmo o aparecimento de fissuras. (Chiaverini, 1996)

2.7.1.3 Temperatura de Aquecimento:

A temperatura de aquecimento é determinada pela natureza do processo e dependendo, é evidente, das propriedades e das estruturas finais desejadas, assim como da composição química do aço, principalmente do seu teor de carbono. Quanto mais alta essa temperatura, acima da zona crítica, maior segurança se tem da completa dissolução das fases no ferro gama; por outro lado, maior será o tamanho do grão da austenita. (Chiaverini, 1996)

Esta temperatura depende da composição da liga metálica a ser utilizada. Para obter uma maior segurança na modificação estrutural desejada, mais altas devem ser a temperatura acima da zona crítica. Por outro lado, maior será o tamanho do grão ao final do processo. E isso pode prejudicar as qualidades do material.

2.7.1.4 Tempo de permanência na temperatura de aquecimento:

A influência do tempo de permanência do aço à temperatura escolhida de aquecimento é similar à da máxima temperatura de aquecimento, isto é, quanto mais longo o tempo à temperatura considerada de austenitização, tanto mais completa a dissolução do carboneto de ferro ou outras fases presentes (elementos

de liga) no ferro gama, entretanto maior o tamanho de grão resultante. Procura-se evitar, pois, permanência à temperatura além do estritamente necessário para que se obtenha uma temperatura uniforme através de toda a secção do aço e para que consigam as modificações estruturais mais convenientes. Tempo muito longo pode também aumentar a oxidação ou descarbonetação do material. Sob o ponto de vista de modificação estrutural, admite-se que uma temperatura ligeiramente mais elevada seja mais vantajosa que um tempo mais longo a uma temperatura inferior, devido à maior mobilidade atômica. De qualquer modo, o tempo à temperatura deve ser pelo menos o suficiente a se ter sua uniformização através de toda a secção. (Chiaverini, 1996)

2.7.1.5 Atmosfera do aquecimento:

Nos tratamentos térmicos dos aços, deve-se evitar dois fenômenos muito comuns e que podem causar sérios problemas: a oxidação que resulta na formação indesejada da "casca de óxido" e a descarbonetação que pode provocar a formação de uma camada mais mole na superfície do metal. (Chiaverini, 1996)

Tais fenômenos, de oxidação e de descarbonetação, são evitados pelo uso de uma atmosfera protetora, ou controlada no interior do forno, a qual, ao prevenir a formação da "casca de óxido", torna desnecessário o emprego de métodos de limpeza e, ao eliminar a descarbonetação, para garantir uma superfície uniformemente dura e resistente ao desgaste. (Chiaverini, 1996)

2.7.1.6 Resfriamento:

Este é o fator mais importante, pois ele que determinará efetivamente a estrutura e, em consequência, as propriedades finais dos aços. Viu-se com a curva TTT que pela variação da velocidade de resfriamento pode-se obter desde a perlita grosseira de baixa resistência mecânica e baixa dureza até a martensita que é o constituinte mais duro resultante dos tratamentos térmicos. Por outro lado, a obtenção desses constituintes não é só função da velocidade de resfriamento, dependendo também como se sabe, da composição do aço (teor em elementos de

liga, deslocando a posição das curvas em C), das dimensões (secção) das peças, etc. (Chiaverini, 1996)

Os meios de esfriamento usuais são: ambiente do forno, ar e meios líquidos. O resfriamento mais brando é o realizado no próprio interior do forno e ele se torna mais severo à medida que se passa para o ar ou para um meio líquido, onde a extrema agitação dá origem aos meios de resfriamento mais drásticos ou violentos. (Chiaverini, 1996)

Na escolha do meio de resfriamento, o fator inicial a ser considerado é o tipo de estrutura final desejada a uma determinada profundidade. A secção e a forma da peça influem consideravelmente na escolha do meio. Muitas vezes, por exemplo, a secção da peça é tal que a alteração estrutural projetada não ocorre à profundidade esperada. (Chiaverini, 1996)

É preciso, então, conciliar as duas coisas: resfriar adequadamente para obtenção da estrutura e das propriedades desejadas à profundidade prevista e, ao mesmo tempo, evitar empenamento, distorção ou mesmo ruptura da peça quando submetida ao resfriamento. De qualquer modo, o meio de resfriamento é fator básico no que se refere à reação da austenita e, em consequência, aos produtos finais de transformação.

Os meios de resfriamento mais comumente utilizados são: soluções aquosas, água, óleo e ar. Meios de resfriamento ainda menos severos que óleo, água aquecida ou ar, são banhos de sal ou banhos de metal fundido. (Chiaverini, 1996)

2.7.2 Tipos de Tratamento Térmico:

O tratamento térmico a ser utilizado em uma determinada liga metálica irá depender de quais propriedades queremos melhorar e de que maneira será realizado o processo. Os tratamentos térmicos usuais dos aços são: recozimento, normalização, têmpera, revenido, coalescimento e os tratamentos isotérmicos.

2.7.2.1 Recozimento:

O termo recozimento é usado tanto para designar um tratamento de amolecimento como aquele para aumentar a tenacidade. A palavra recozimento tem uma conotação específica quando utilizada para designar um tratamento térmico para aços, o qual é feito aquecendo o aço até o campo austenítico e, em seguida, resfriando-o lentamente. Esse processo produz uma microestrutura muito mole, já que a pequena velocidade de resfriamento permite a formação de perlita grosseira. (Van Vlack, 1984)

É um tratamento térmico no qual o material é exposto a uma temperatura elevada durante um período de tempo prolongado e então é resfriado lentamente. Em geral, é realizado para (1) aliviar tensões; (2) reduzir a dureza e aumentar a ductilidade e tenacidade; e/ou (3) produzir uma microestrutura específica. Qualquer processo de recozimento consiste em três estágios: (1) aquecimento até a temperatura desejada, (2) manutenção ou “encharque” naquela temperatura, e (3) resfriamento, geralmente até a temperatura ambiente. (Callister, 2018; Costa e Mei, 1988)

É o tratamento térmico realizado com o fim de alcançar um ou vários dos seguintes objetivos: remover tensões devidas aos tratamentos mecânicos a frio ou a quente, diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço, alterar as propriedades mecânicas como resistência, ductilidade etc., modificar as características elétricas e magnéticas, ajustar o tamanho de grão, regularizar a textura bruta de fusão, remover gases, produzir uma microestrutura definida, eliminar enfim os efeitos de quaisquer tratamentos térmicos ou mecânicos a que o aço tiver sido anteriormente submetido. (Chiaverini, 1996)

O recozimento é realizado para melhorar a usinabilidade e a conformabilidade a frio, restaurar a ductilidade, reduzir ou eliminar a não homogeneidade estrutural, refinar o tamanho do grão, aliviar as tensões internas e preparar a estrutura do aço para posterior tratamento térmico. O recozimento não é

aplicado para melhorar propriedades mecânicas de aços ligas da classe perlítica e aços ferramentas. Existem diferentes tipos de recozimento que são aplicados para diferentes finalidades. (K. H. Prabhudev, 1988)

No recozimento, a peça pode ser aquecida entre 500 °C e 900 °C e o resfriamento deve ser feito lentamente. De acordo com a porcentagem de carbono do aço, quanto maior a quantidade de carbono, mais lento será o resfriamento, muitas vezes podendo ser feito até no próprio forno desligado. Esse processo reduz a dureza de uma peça temperada, traz a dureza normal do aço, excluindo outros tratamentos térmicos, e dependendo da forma como for feita, também torna o aço mais homogêneo e melhora sua ductilidade, facilitando o processo de usinagem. (Shackelford, 2008).

2.7.2.2 Alívio de Tensões:

Tensões residuais internas podem se desenvolver em peças metálicas em razão de: (1) processos de deformação plástica, tais como usinagem e lixamento; (2) resfriamento não uniforme de uma peça que foi processada ou fabricada, a uma temperatura elevada, tal como na soldagem ou na fundição. Distorção e empenamento podem resultar se essas tensões residuais não forem removidas. Elas podem ser eliminadas por um tratamento térmico de alívio de tensões, em que a peça é aquecida até a temperatura recomendada, mantida nessa temperatura um tempo suficiente para que uma temperatura uniforme seja atingida, e finalmente resfriada ao ar até a temperatura ambiente. A temperatura de recozimento é, em geral, relativamente baixa, de tal modo que os efeitos resultantes de um trabalho a frio e de outros tratamentos térmicos não sejam afetados. (Callister, 2018)

O alívio de tensões é uma operação de tratamento térmico projetada para aliviar as tensões induzidas no componente, minimizar a distorção durante o tratamento térmico subsequente e evitar a formação de trincas em casos extremos. Este tratamento consiste em aquecer os componentes a uma temperatura próxima da temperatura de transformação mais baixa, e mantê-los por um tempo suficiente nessa temperatura para alcançar uniformidade em todo o componente e, posteriormente, resfriar até a temperatura ambiente em um forno. Este tratamento

não causará nenhuma mudança de fase, mas a recristalização poderá ocorrer. (K. H. Pradhudev, 1988)

2.7.2.3 Normalização:

A normalização consiste na completa austenitização do aço, seguida de resfriamento ao ar. É indicada normalmente para homogeneização da estrutura após o forjamento e antes da têmpera ou revenimento. (Costa e Mei, 1988)

É aplicada a peças de aço fundido, frequentemente sendo utilizada em peças laminadas ou forjadas para refinar a granulação grosseira. A normalização também é empregada como tratamento preliminar à têmpera e ao revenido, produzindo uma estrutura mais uniforme e reduzindo a tendência ao empenamento, facilitando a solução de carbonetos e elementos de liga (Chiaverini, 1996).

A normalização é um tratamento térmico que busca o refino de grão, mas o resfriamento é mais rápido que no recozimento, visando, principalmente, à microestrutura do material, não às propriedades mecânicas, transforma a microestrutura grosseira de peças fundidas, por exemplo, em microestruturas finas, e isso faz com que os carbonetos sejam menores, desta forma, sua dissolução em um tratamento térmico será maior. Por isso, em muitos casos, a normalização é feita antes dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido (Pavanati, 2010)

A normalização é um dos processos de tratamento térmico mais utilizados aplicados em quase todas as peças fundidas, forjadas, etc. A normalização é feita para refinar a estrutura de grãos, melhorar a usinabilidade, aliviar tensões internas e melhorar as propriedades mecânicas de aços estruturais de carbono e baixa liga, etc. (K. H. Prabhudev, 1988)

A normalização tem por objetivo refinar e homogeneizar a estrutura do aço, conferindo-lhe melhores propriedades do que as obtidas no recozimento. O resfriamento, após a austenitização, é geralmente ao ar. Além disso, a normalização melhora as características de usinagem, modifica e refina estruturas dendríticas

fundidas, conferindo ao aço melhores condições para a têmpera posterior. As temperaturas usuais de normalização para os aços-carbonos são as seguintes (Chiaverini, 1996):

- SAE 1015 a 1020: 880°C a 910°C
- SAE 1035: 850°C a 880°C
- SAE 1040, 1045 e 1050: 825°C a 850°C
- SAE 1060: 800°C a 825°C
- SAE 1090: 800°C a 825°C

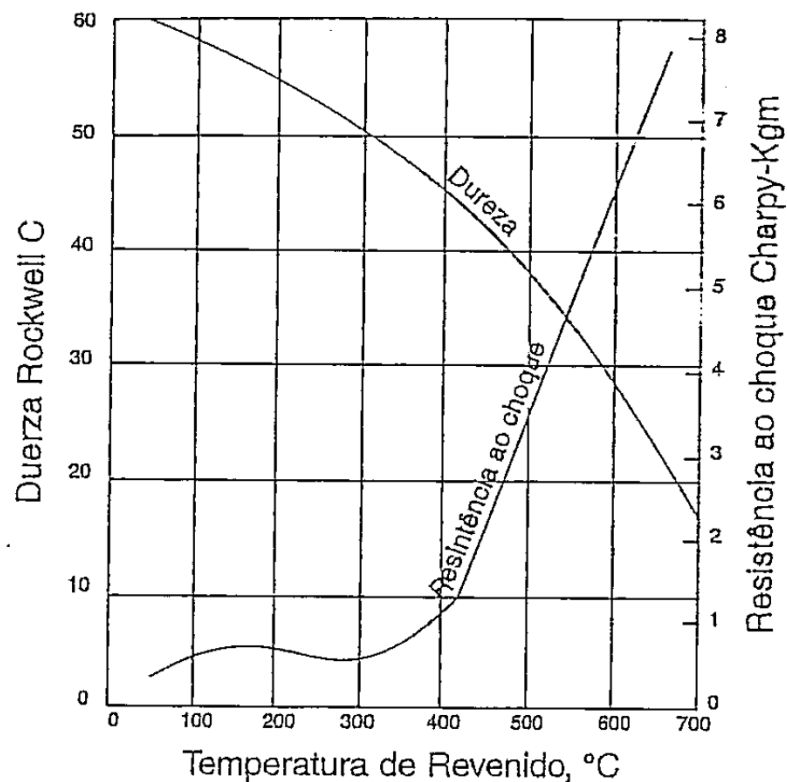
2.7.2.4 Têmpera e Revenido:

A Têmpera consiste no aquecimento do aço até sua temperatura de austenitização, seguido de resfriamento rápido. Os meios de resfriamento utilizados dependem da temperabilidade dos aços (teor de carbono e presença de elementos de liga), da forma e dimensões das peças submetidas à têmpera, porque o que se procura nessa operação é a obtenção da estrutura martensítica, para o que se deve, portanto, fazer com que a curva de resfriamento passe à esquerda do cotovelo da curva em C, como visto na figura 7. Os meios mais comuns de resfriamento são líquidos (água, salmoura, óleo) e gasosos (ar, gases inertes). (Chiaverini, 2006)

Figura 7: Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido

O revenido é o tratamento térmico que normalmente sempre acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta; além de aliviar ou remover as tensões internas, corrige as excessivas durezas e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque, visto na figura 8. (Chiaverini, 2006)

Figura 8: Efeito da temperatura de revenido sobre a dureza e resistência ao choque de um aço 1045 temperado.



(Fonte: Chiaverini)

O aquecimento da martensita durante o revenido permite reajustamentos internos, precipitação de partículas de carbonetos e diversas transformações em temperaturas específicas. A escolha da temperatura de revenido é crucial para obter a combinação desejada de propriedades mecânicas no aço temperado (Chiaverini, 1996).

Em resumo, os tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenido são procedimentos fundamentais para a obtenção de propriedades mecânicas

desejadas em aços. A normalização busca homogeneizar a estrutura, enquanto a têmpera proporciona uma estrutura martensítica com maior resistência. O revenido complementa a têmpera, aliviando tensões internas, ajustando a dureza e melhorando a tenacidade do material. O controle preciso das temperaturas e tempos em cada etapa é essencial para alcançar resultados específicos e garantir o desempenho adequado dos componentes de aço (Chiaverini, 1996; Prabhudev, 1988).

2.8 Ensaios Mecânicos:

Os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função de tensões e/ou deformações. Tensões representam a resposta interna aos esforços externos que atuam sobre uma determinada área em um corpo. (Amauri Garcia, 2012)

A determinação das propriedades mecânicas de um material metálico é realizada por meio de ensaios mecânicos. Há os ensaios são destrutivos, pois promovem a ruptura ou a inutilização do material. Existem ainda os ensaios chamados não-destrutivos, utilizados em componentes para detectar falhas internas do mesmo. (Sérgio Augusto de Souza, 1982)

De acordo com Amauri Garcia, 2012, as duas finalidades mais importantes da execução dos ensaios são:

- Permitir a obtenção de informações rotineiras do produto – ensaios de controle: no recebimento de materiais de fornecedores e no controle final do produto acabado;
- Desenvolver novas informações sobre os materiais – no desenvolvimento de novos materiais, de novos processos de fabricação e de novos tratamentos.

A escolha do ensaio mecânico mais interessante ou mais adequado para cada produto metálico depende da finalidade do material, dos tipos de esforços que esse material vai sofrer e das propriedades mecânicas que se deseja medir. Os

ensaios mecânicos podem também servir para a comparação de materiais distintos e, juntamente com a análise química do material, avaliar a história prévia de um material desconhecido, sem a necessidade de um exame metalográfico mais demorado, isto é, avaliar o tipo de material, o processo de fabricação e sua aplicação possível. (Sérgio Augusto de Souza, 1982)

Existem diversos ensaios para a determinação de propriedades mecânicas dos materiais, como o ensaio de tração, compressão, impacto, fadiga, dureza e outros. Neste presente trabalho, será apresentado apenas o ensaio de dureza.

2.8.1 Ensaio de Dureza:

Ensaio de Dureza consiste na aplicação de uma carga na superfície do material empregando um penetrador padronizado, produzindo uma marca superficial ou impressão. A medida da dureza do material ou da dureza superficial é dada como função das características da marca de impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio realizado. Esse ensaio é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos e elétricos, tratamentos superficiais, vidros e laminados, devido à vantagem de fornecer dados quantitativos das características de resistência à deformação permanente das peças produzidas. É utilizado como um ensaio para o controle das especificações da entrada de matéria-prima e durante as etapas de fabricação de componentes, e em alguns casos em produtos finais. Desenvolvido inicialmente para os materiais metálicos, hoje encontra vasta aplicação também para materiais poliméricos, cerâmicos, semicondutores e filmes finos. (Amauri Garcia, 2012)

Para a definição de dureza de um material, atualmente existem vários ensaios mecânicos, sendo os ensaios por penetração a forma mais aplicada em aços. Quando o aço apresenta maior ductilidade, o material penetrante, (que normalmente é o diamante, em razão da sua alta dureza) penetra mais, quando o material é mais duro, penetra menos. Assim sendo, a definição de dureza é o grau de penetração produzido em um ensaio mecânico de dureza em que a penetração diminui com o aumento da dureza. (Shackelford, 2008)

Os ensaios de dureza são realizados com maior frequência que qualquer outro ensaio mecânico, por diversas razões: (1) Eles são simples e baratos — ordinariamente, nenhum corpo de prova especial precisa ser preparado, e os equipamentos de ensaio são relativamente baratos; (2) O ensaio é não destrutivo — o corpo de prova não é fraturado, tampouco é excessivamente deformado; uma pequena indentação é a única deformação. (3) Com frequência, outras propriedades mecânicas podem ser estimadas a partir dos dados de dureza, como, por exemplo, o limite de resistência à tração. (Callister, 2018)

Os diversos ensaios de dureza existentes possibilitam uma excelente cobertura de todas as gamas usuais de durezas e dimensões encontradas nos aços. Além disso, o ensaio de dureza corretamente escolhido e interpretado é uma ferramenta excelente para o controle indireto das propriedades mecânicas, a baixíssimo custo, comparado com as demais opções existentes. (Costa e Mei, 1988)

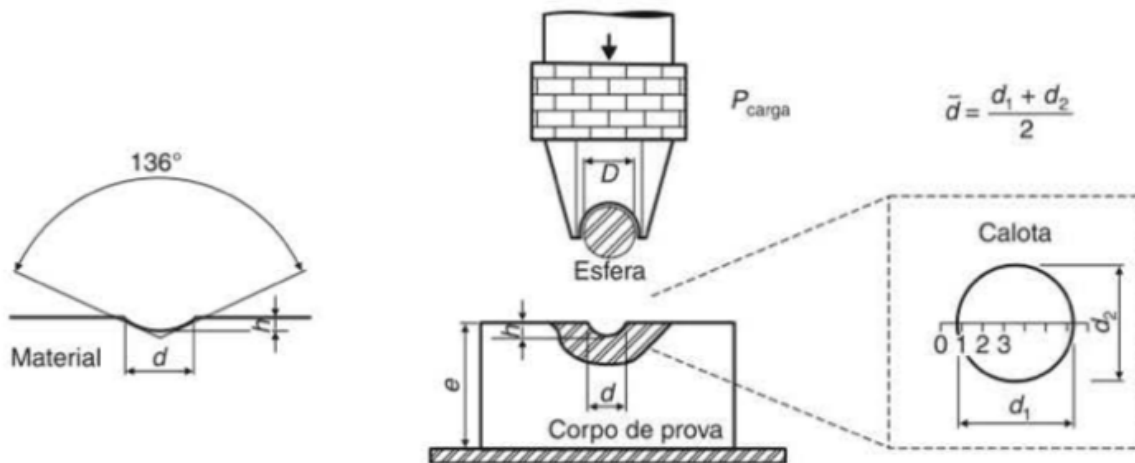
Existem diversos métodos de realizar o ensaio de dureza, sendo o por penetração o mais utilizado atualmente. Os principais tipos de ensaio de dureza são:

1. Dureza Brinell (HB):

A dureza por penetração denominada dureza Brinell e simbolizada por HB, é o tipo de dureza mais usado até os dias de hoje na Engenharia. O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço, de diâmetro D , sobre a superfície plana, polida e limpa de um metal através de uma carga P , durante um tempo (t). Essa compressão provocará uma impressão permanente no metal com o formato de uma calota esférica, tendo um diâmetro (d). (Sergio Augusto de Souza, 1982)

Este ensaio foi inicialmente proposto por James A. Brinell em 1900, e foi o primeiro ensaio de penetração padronizado e reconhecido industrialmente. Consiste em comprimir uma esfera metálica padronizada na superfície do material ensaiado, gerando uma calota esférica, conforme mostra a Figura 9. A dureza Brinell é o quociente da carga normal aplicada pela área da superfície côncava (calota esférica) após a retirada da força. (Amauri Garcia, 2012)

Figura 9: Representação esquemática ensaio dureza Brinell



(Fonte: Amauri Garcia, 2012)

O número de dureza Brinell, HB, é uma função tanto da magnitude da carga quanto do diâmetro da indentação resultante. Esse diâmetro é medido com um microscópio especial de baixo aumento, empregando uma escala que está gravada na ocular. O diâmetro medido é então convertido no número HB apropriado, com o auxílio de um gráfico.

A dureza Brinell, representada por HB, corresponde ao quociente da carga aplicada pela área da impressão obtida e é expressa pela equação (1):

$$HB = \frac{P}{A_s} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

onde “P” é o valor da carga aplicada, “D” é o diâmetro do penetrador e “d” é o diâmetro da impressão resultante, ambos em milímetros.

O método Brinell é usado especialmente para metais não ferrosos, ferros fundidos, aços, produtos siderúrgicos em geral e peças não temperadas, é largamente empregado pela facilidade de aplicação, pois pode ser efetuado em qualquer máquina de ensaio de compressão e mesmo em aparelhos portáteis de baixo custo.

Uma das limitações do método Brinell é que ele, além de não poder ser empregado em peças muito finas, não é igualmente aplicável em materiais muito duros (aço duro temperado, metal duro e outros), mais duros ou de dureza idêntica a dos penetradores esféricos, que se formariam durante a aplicação da carga. Além disso, o método é relativamente lento para a produção industrial e a impressão obtida é muito grande para peças acabadas. (Chiaverini, 1986)

O ensaio de dureza Brinell não é adequado para caracterizar peças que tenham sofrido tratamentos superficiais, como cementação, nitretação e outros, pois a penetração pode ultrapassar a camada tratada e gerar erros nos valores obtidos. (Amauri Garcia, 2012)

2. Dureza Vickers (HV):

A escala Vickers foi proposta em 1925 por Smith e Sandland. O nome Vickers é originário da empresa que fabricava as primeiras máquinas deste tipo de ensaio. (Padilha, 2000).

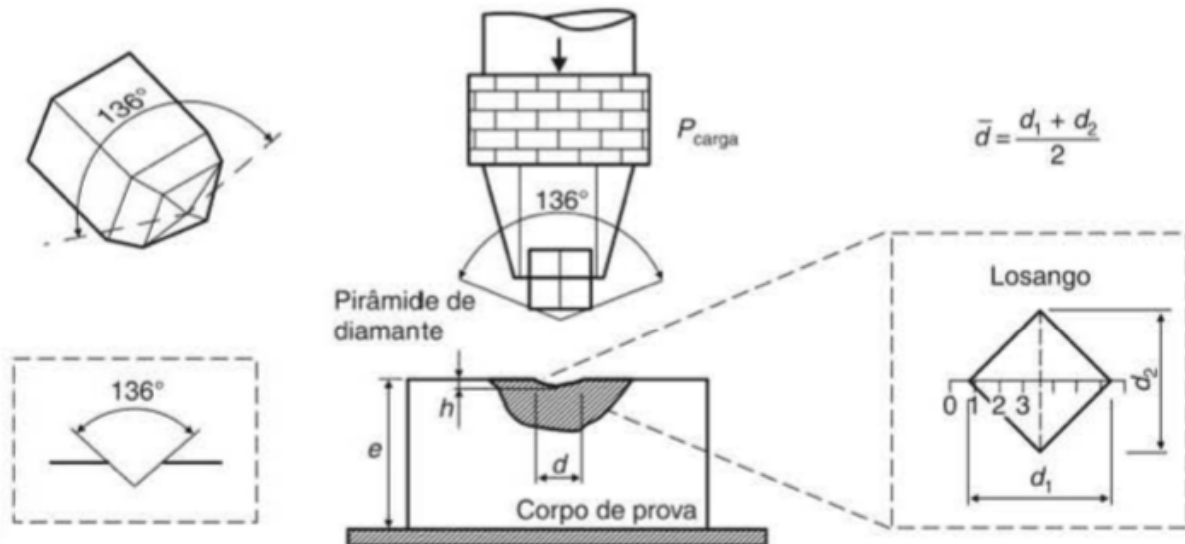
Neste ensaio o penetrador é uma pirâmide de diamantes de base quadrada, com ângulo de 136° entre as faces opostas. Esse ângulo produz valores de impressões semelhantes a dureza Brinell. Como o penetrador é um diamante, ele é praticamente indeformável e como todas as impressões são semelhantes entre si, não importando o seu tamanho, a dureza Vickers é independente da carga, isto é, o número de dureza obtido é o mesmo qualquer que seja a carga usada para materiais homogêneos. A mudança de carga é necessária para se obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível para a medida de suas dimensões no visor da máquina. A forma de impressão é um losango regular, ou seja, quadrada, esquematizado na figura 10, e pela média das suas diagonais tem-se, conforme equação (2). (Sergio Augusto de Souza, 1982)

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

Onde o diâmetro é representado na equação (3),

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3)$$

Figura 10: Representação esquemática Ensaio Dureza Vickers.



(Fonte: Amauri Garcia, 2012)

Na prática, a aplicação da relação que calcula HV é desnecessária, já que existem tabelas que fornecem o valor da dureza Vickers a partir das leituras das diagonais da impressão formada. Sempre que possível recomendam-se as maiores cargas. A designação da dureza é formada pelo valor da dureza seguido pelo símbolo HV e da carga aplicada e pelo tempo de aplicação de carga se este for diferente dos previstos em normas (Amauri Garcia, 2012)

De acordo com Sérgio Augusto de Souza, 1982, as principais vantagens do método Vickers são: (1) escala contínua; (2) impressões extremamente pequenas que não inutilizam a peça; (3) grande precisão de medida; (4) deformação nula do penetrador; (5) existência de apenas uma escala de dureza; (6) aplicação para toda a gama de durezas encontradas nos diversos materiais; (7) aplicação em qualquer espessura de material, podendo medir também dureza superficiais.

O ensaio é, porém, mais demorado e exige uma preparação cuidadosa do material a ser ensaiado para tornar nítida a impressão. Utiliza-se muito a dureza Vickers para pesquisas, estudos e mais especificamente para a determinação de profundidade de têmpera nos aços, profundidade de camadas de proteção superficial, profundidade de descarbonetação nos aços, para lâminas finíssimas, para ensaios de metais muito duros ou muito moles, etc. (Sergio Augusto de Souza, 1982)

É de utilização industrial limitada, em função da demora do ensaio, e de utilização ampla em pesquisa. Exige cuidadosa preparação do corpo de prova para o caso de ensaio com microcarga. É indicado no levantamento de curvas de profundidade de têmpera e de cementação. Aplica-se a qualquer espessura de corpo de prova, desde que não haja ocorrência de deformação no lado oposto ao da superfície ensaiada. (Amauri Garcia, 2012)

3. Dureza Rockwell (HR):

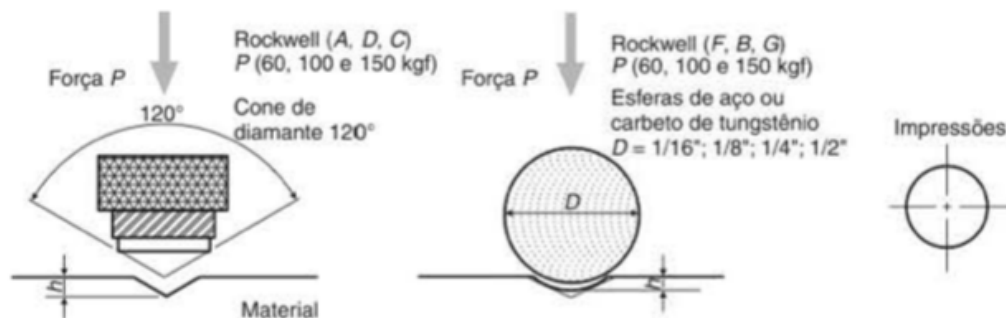
O ensaio recebeu esse nome pelo fato de a sua proposta ter sido feita pela indústria Rockwell, dos Estados Unidos, por volta de 1922. É o método mais utilizado internacionalmente. Esse tipo de ensaio de dureza utiliza-se da profundidade da impressão causada por um penetrador sob a ação de uma carga aplicada em dois estágios (pré-carga e carga suplementar) como indicador da medida de dureza, e não há relação com a área da impressão, como no caso da dureza Brinell. A dureza Rockwell pode ser classificada como comum ou superficial, dependendo da pré-carga e carga aplicadas. (Amauri Garcia, 2012)

É o processo universalmente mais utilizado, devido sua rapidez, facilidade de execução, baixa probabilidade de erros pessoais, capacidade de distinguir pequenas diferenças de dureza em aço temperado e, porque as impressões obtidas apresentam pequenas dimensões, as peças acabadas e prontas para entrar em serviço podem ser ensaiadas sem danos sensíveis na sua superfície. (Chiaverini, 1986)

A dureza Rockwell elimina o tempo necessário para a medição de qualquer dimensão da impressão causada, pois o resultado é lido direta e automaticamente na máquina de ensaio, sendo, portanto um ensaio rápido e livre de erros pessoais. Além disso, utilizando penetradores pequenos, a impressão pode muitas vezes não prejudicar a peça ensaiada e pode ser usada também para identificar diferenças pequenas de dureza numa mesma região de uma peça. A rapidez do ensaio torna-o próprio para usos em linhas de produção, para verificação de tratamentos térmicos ou superficiais e para laboratórios. (Sérgio Augusto de Souza, 1982)

O penetrador tanto pode ser um diamante esferocônico com ângulo de 120° e ponta ligeiramente arredondada como uma esfera de aço endurecido ou carboneto de tungstênio, conforme esquematizado na figura 11. A aplicação da pré-carga é necessária para eliminar a ação de eventuais defeitos superficiais e ajudar na fixação do corpo de prova no suporte, além de causar pequena deformação permanente, eliminando erros causados pela recuperação do material devido à deformação elástica. (Amauri Garcia, 2012)

Figura 11 - Esquema Ensaio de Dureza Rockwell



(Fonte: Amauri Garcia)

Com esse sistema, um valor de dureza é determinado pela diferença na profundidade de indentação resultante da aplicação de uma carga inicial menor, seguida por uma carga principal maior; a utilização de uma carga menor aumenta a precisão do ensaio. (Callister, 2018)

O dispositivo moderno para efetuar medições da dureza Rockwell é automatizado e muito simples de ser usado; a leitura da dureza é direta, e cada medição exige apenas alguns segundos. Esse dispositivo também permite uma variação no tempo de aplicação da carga. Essa variável também deve ser considerada quando se interpretam os dados de dureza. (Callister, 2018)

2.8.2 Microdureza:

Em algumas situações práticas, ocorre a necessidade de determinação da dureza de pequenas áreas do corpo de prova. A medida do gradiente de dureza que se verifica em superfícies cementadas e a determinação da dureza individual de microconstituintes de uma estrutura metalográfica são alguns exemplos dessas situações. O ensaio de microdureza produz uma impressão microscópica e se utiliza de penetradores de diamante e cargas menores que 9,8 N (1 kgf). Os métodos mais utilizados são a microdureza Vickers e a microdureza Knoop (ASTM E384:2008). (Amauri Garcia, 2012)

O termo ‘teste da microdureza’ usualmente se refere a indentações estáticas provocadas por cargas menores que 1 kgf. O indentador pode ser a pirâmide de diamante Vickers ou a pirâmide alongada de Knoop. O procedimento de teste é muito semelhante ao do teste padrão Vickers, exceto que é feito numa escala microscópica, com instrumentos de precisão mais alta. A superfície a ser testada geralmente requer um acabamento metalográfico. Quanto menor a carga de teste, maior o grau de acabamento superficial necessário. Microscópios são usados para medir as indentações; eles normalmente têm aumentos de 500x e medem com precisão de ± 0.5 microns (mm). (“Teste da Microdureza | Medição, controle e ensaios | CIMM”, 2024)

O ensaio de microdureza Vickers é realizado para que materiais com espessuras delgadas possam ter suas durezas determinadas, independente de qual seja seu formato ou suas dimensões. Além disso, superfícies tratadas e materiais de pequeno, médio e grande porte podem passar pelo ensaio de microdureza Vickers, para saber precisamente a dureza efetiva, indicando a profundidade efetiva da

camada tratada por têmpera superficial, cementação, como também nitretação.(CONTROL, 2024)

3. Justificativas

Este trabalho de conclusão tem como justificativa promover estudos que permitam analisar a propriedade mecânica de dureza do aço AISI 1045 sob tratamento térmico é de grande importância por várias razões. Considera-se em primeiro lugar a compreensão do comportamento mecânico. A dureza é uma propriedade mecânica fundamental que está diretamente relacionada à resistência do material à deformação plástica e à penetração. Estudar a dureza do aço AISI 1045 após tratamento térmico nos permite entender como as mudanças na microestrutura afetam suas propriedades mecânicas e, portanto, seu comportamento em diferentes condições de serviço.

Outro ponto importante é a seleção de tratamentos térmicos adequados. O aço AISI 1045 é frequentemente utilizado em aplicações que exigem uma combinação específica de propriedades mecânicas, como resistência, tenacidade e dureza.

Cabe também ressaltar que estudos como esse podem produzir a otimização de processos de fabricação, compreender como diferentes parâmetros de tratamento térmico, como temperatura, tempo e meio de resfriamento, afetam a dureza do aço AISI 1045 permite otimizar os processos de fabricação para garantir a obtenção das propriedades desejadas com eficiência e custo otimizado.

Pode ser essencial para garantir a qualidade e a confiabilidade dos produtos fabricados com esse material. Uma compreensão aprofundada das propriedades mecânicas do material permite prever seu desempenho em serviço e evitar falhas prematuras.

Dependendo da aplicação específica, pode ser necessário para alcançar uma determinada faixa de dureza no aço AISI 1045. Estudar como diferentes tratamentos térmicos afetam a dureza do material ajuda a determinar os processos mais adequados para atender aos requisitos de projeto e desempenho do produto final.

Em resumo, estudar a análise da propriedade mecânica de dureza do aço AISI 1045 sob tratamento térmico é essencial para entender seu comportamento mecânico, otimizar processos de fabricação, garantir qualidade e confiabilidade, e atender às necessidades específicas de diferentes aplicações industriais.

4. Objetivos:

4.1 Geral

Estudar os efeitos das temperaturas de austenitização/têmpera e revenido na propriedade mecânica de dureza de um aço de carbono comum AISI 1045.

4.2 Específicos

- 1- Fazer tratamento térmico do aço AISI 1045 nas temperaturas especificadas para tratamento térmico de austenitização/têmpera e revenido;
- 2- Avaliar a propriedade mecânica de dureza do aço AISI 1045 para cada uma das condições de tratamento térmico e correlacionar com as microestruturas.
- 3- Avaliar a resposta ao tratamento térmico de endurecimento desse aço.

5. Metodologia

O trabalho foi realizado no Laboratório de Preparação Metalográfica e de Amostras e no laboratório de Metalurgia do pó, localizados no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM), no Departamento de Engenharia Mecânica, da UFPE, Campus Recife, entre os meses de março e novembro de 2023.

A seguir são descritas as etapas, técnicas e materiais utilizados, assim como será relatado todo o método, as técnicas utilizadas, as características de cada equipamento e os passos fundamentais para a realização deste trabalho.

5.1 Preparação Metalográfica:

Inicialmente, foram recebidas seis de tarugos do aço AISI 1045, tendo cada um com o comprimento de 30mm e diâmetro de 1 1/4" (31,75 mm). Com esses tarugos, foram feitos alguns processos, que serão descritos a seguir:

5.1.1 Corte das Amostras:

Cada tarugo foi cortado em comprimentos menores de aproximadamente 5 mm a fim de facilitar os tratamentos térmicos. No total, foram cortadas 15 amostras. A figura 12 mostra o tarugo inicialmente e o resultado do corte.

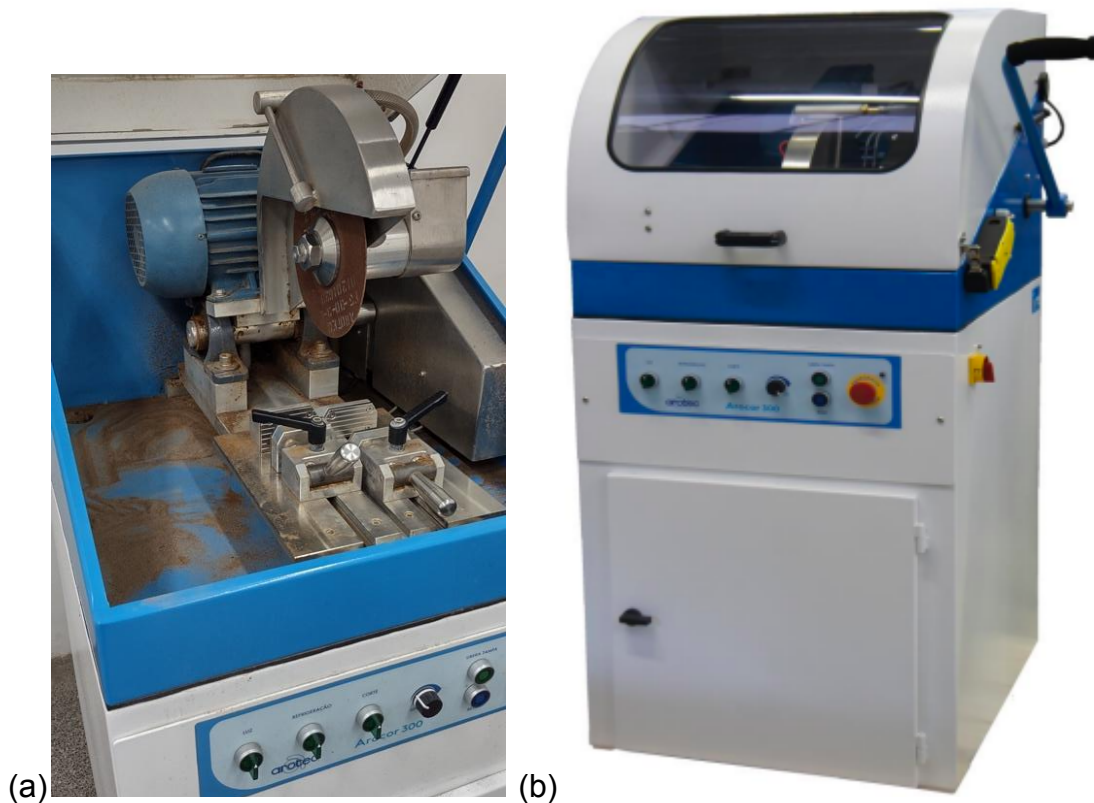
Figura 12 - Exemplo das amostras geradas a partir do corte dos tarugos de aço.



(Fonte: Autor)

Para realizar os cortes, foi utilizada uma máquina policorte Arotec, AROCOR-300, localizada no Laboratório de Preparação Metalográfica e de Amostras localizado no INTM, figura 13. O corte é feito com discos de cortes abrasivos sob refrigeração, possibilitando obter secções com boa qualidade sem grandes modificações na microestrutura da amostra.

Figura 13 - Equipamento utilizado para realização dos cortes do aço.



(Fonte: (a) Autor; (b) Arotec)

Os discos de corte são específicos em função da dureza do material a ser cortado. De maneira geral, para materiais moles de baixo carbono, utilizam-se discos duros e para materiais duros, utilizam-se discos moles. Para aços até 0,45%C, como o aço em questão, utiliza-se o disco 3045 (30 a 45 HRc). Durante as operações de corte, deve-se ter o máximo de cuidado para não modificar a microestrutura da amostra. O corte não deve ser contínuo, para não haver excessivo aquecimento por falta de refrigeração. (Regis Almir Rohde, 2010)

5.1.2 Tratamentos Térmicos:

Os tratamentos térmicos realizados foram feitos utilizando o forno W-One da EDG Equipamentos do Laboratório de Metalurgia do Pó, mostrado na figura 14.

Figura 14 - Forno W-One



(Fonte: Autor)

a. Recozimento:

Este tratamento consistiu em aquecer as amostras por 30 minutos a 850°C. Dado o tempo, o forno foi desligado e as amostras foram resfriadas lentamente dentro do próprio forno. Este processo de resfriamento levou cerca de 24 horas.

b. Têmpera:

O processo de tempera consistiu em aquecer a amostra por 15 minutos em uma faixa de temperaturas variando entre 820°C e 850°C, depois resfriá-la rapidamente em água. Esta etapa foi feita com algumas amostras sendo aquecidas a 820°C e outras a 850°C.

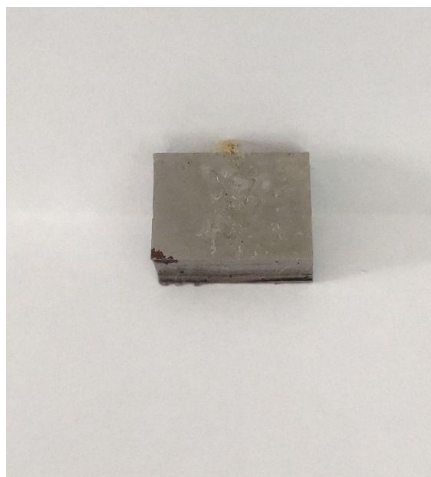
c. Revenimento:

Após realizar a têmpera nas amostras, foi feito o tratamento de revenimento. Este consistiu em aquecer a amostra por cerca de 15 minutos em temperaturas variando de 150 a 550°C e resfriá-la até a temperatura ambiente.

5.1.3 Corte Amostras Termicamente Tratadas para Embutimento

Após realizar os tratamentos térmicos, uma amostra de cada etapa foi novamente cortada para o embutimento. A figura 15, mostra a amostra após o novo corte.

Figura 15: Amostra cortada para embutimento



(Fonte: Autor)

5.1.4 Embutimento:

Esta etapa é realizada a fim de facilitar o manuseio da amostra, agora em pequenas dimensões, e evitar danificar a lixa ou pano de polimento. O embutimento consiste em circundar a amostra com um material adequado, formando um corpo único. Este processo pode ser a frio e a quente, dependendo de qual tipo de amostra será embutida. (Regis Almir Rohde, 2010)

Para este trabalho, foi realizado embutimento a quente. A amostra foi embutida em um material termoendurecível, no nosso caso este material é a baquelite. O processo é realizado por meios de prensas de embutimento que

utilizam pressão e aquecimento para efetuar a polimerização.(Regis Almir Rohde, 2010)

O procedimento foi realizado no Laboratório de Preparação Metalográfica e de Amostras localizado no INTM, utilizando a Prensa de Embutimento Automático Pre-40 da Arotec, indicada na figura 16.

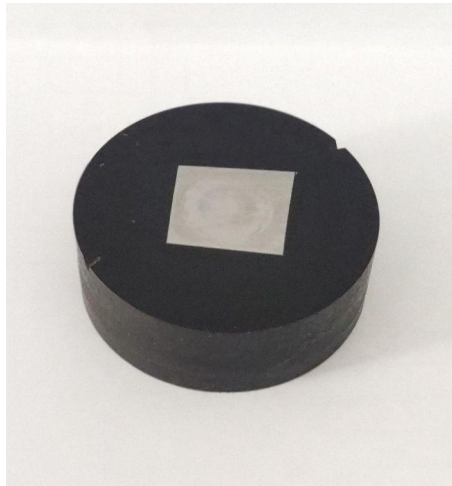
Figura 16 - Máquina utilizada para realizar o embutimento das amostras.



(Fonte: Autor)

As amostras foram inseridas na prensa, já cortadas em formato retangular, com a face a ser analisada em contato com o êmbolo inferior da máquina de embutimento, que está untado com uma película desmoldante. Após isso, é colocado o baquelite em pó e acionado o funcionamento da máquina. Em cerca de 30 minutos, a amostra está pronta para as etapas seguintes. Amostra embutida na figura 17.

Figura 17: Amostra Embutida



(Fonte: Autor)

5.1.5 Lixamento:

Operação que tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento. Existem dois processos de lixamento: manual (úmido ou seco) e automático. (Regis Almir Rohde, 2010)

Este processo é realizado para preparar a superfície de cada amostra para análise micrográfica. Ele consiste na remoção da camada de material que teve sua estrutura alterada pelo corte da amostra e remoção de riscos e marcas mais profundas da superfície, dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento.

O processo foi realizado de forma manual, utilizando uma máquina de lixamento semiautomático úmido Politriz/Lixadeira Metalográfica Aropol VV-PUR da Arotec, figura 18.

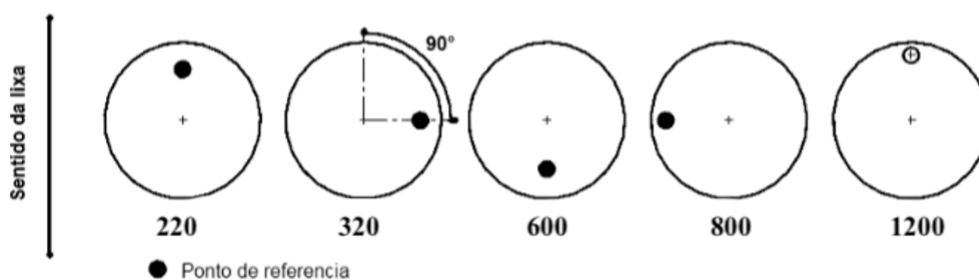
Figura 18 - Máquina de lixamento tipo marca utilizada para o lixamento das amostras.



(Fonte: Autor)

A técnica de lixamento consiste em lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometrias cada vez menores, mudando de direção em 90 graus a cada lixa subsequente até que os riscos da lixa anterior tenham desaparecido, como mostra a figura 19. Neste processo, foram utilizadas as lixas com as seguintes granulometrias: 220#, 320#, 600#, 800# e 1200#. (Regis Almir Rohde, 2010)

Figura 19: Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados.



(Fonte: Adaptado Regis Almir Rohde, 2010)

5.1.6 Polimento:

É uma operação realizada após o lixamento que visa o acabamento superficial espelhado. Para este processo, utiliza-se partículas abrasivas extremamente finas que as utilizadas nas lixas. Normalmente são utilizadas pasta de diamante, aluminas e outros. (Regis Almir Rohde, 2010)

Antes de realizar esta etapa, deve ser feita uma limpeza na superfície da amostra, de modo a deixá-la sem traços de abrasivos, solventes, poeiras, etc. Isso pode ser feito por lavagem com água, álcool etílico, fréon líquido e outros líquidos de baixo ponto de ebulição para rápida secagem. (Regis Almir Rohde, 2010)

O polimento foi feito de forma mecânica utilizando uma politriz semi-automática Tegramin-25 da Struers, figura 20. Foi utilizado um pano de polimento montado em um disco giratório com uma pasta diamantada de $1\mu\text{m}$ e um lubrificante para reduzir o atrito entre a peça e o pano. Em média, para cada amostra, foi necessário cerca de 40 minutos para obter uma superfície bem polida.

Figura 20: Máquina de polimento Tegramin-25

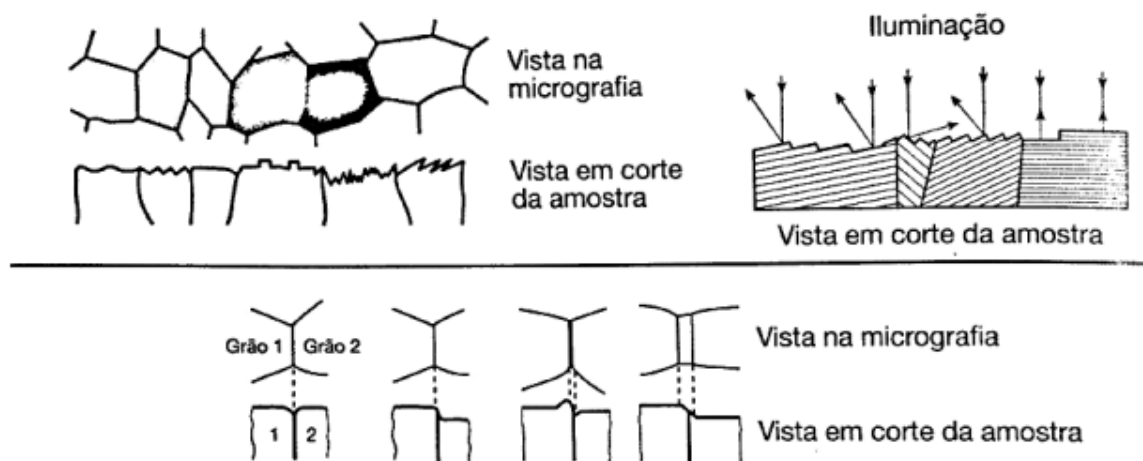


(Fonte: (a) Autor; (b) Struers)

5.1.7 Ataque Químico:

O ataque químico tem como objetivo revelar a microestrutura de uma amostra sob a luz de microscópio ótico utilizando reagentes químicos (ASM, 2004). Contrastes entre os constituintes podem ser observados devido a um método de corrosão localizada que como consequência modifica a forma de reflexão da luz na superfície amostra. Em outras palavras, ataques químicos criam uma superfície que refletirá a luz em diferentes direções, estes desvios causados na luz incidente podem ser causados por um desnível, por uma deposição de camada ou pela orientação dos cristais (Figura 21). (COLPAERT, 2008).

Figura 21: Contraste criados devido a ataques químicos



(Fonte: Colpaert, 2008)

O ataque químico visa permitir a identificação (visualização) dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura. Um reagente ácido é colocado em contato com a superfície da peça por certo tempo. O reagente causará a corrosão da superfície. Os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes microestruturais que se deseja contrastar na análise metalográfica. (Regis Almir Rohde, 2010)

Para o ataque químico são usados soluções aquosas ou alcoólicas de ácidos, bases e sais, bem como sais fundidos e vapores. O método mais utilizado é o ataque por imersão, que consiste em imergir a superfície da amostra na solução de ataque. No caso de micrografia de ferro não ligado e de aço baixa liga utiliza-se

uma solução de álcool etílico e ácido nítrico concentrado, nital. Neste trabalho, foi usado uma solução nital a 2%.(Regis Almir Rohde, 2010)

5.2 Análise De Dureza:

A análise de dureza pode ser feita utilizando diversas técnicas, a escolhida para este trabalho foi o ensaio de Microdureza Vickers, de acordo com ASTM E384 / E384M - 21 (2021), O ensaio foi realizado no laboratório de Microscopia Ótica localizado no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) utilizando o Microdurômetro DuraScanG5 da EMCO TEST, figura 22. Todo o ensaio foi feito em acordo com a norma ASTM-E384 (Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials).

Figura 22: Microdurômetro DuraScanG5

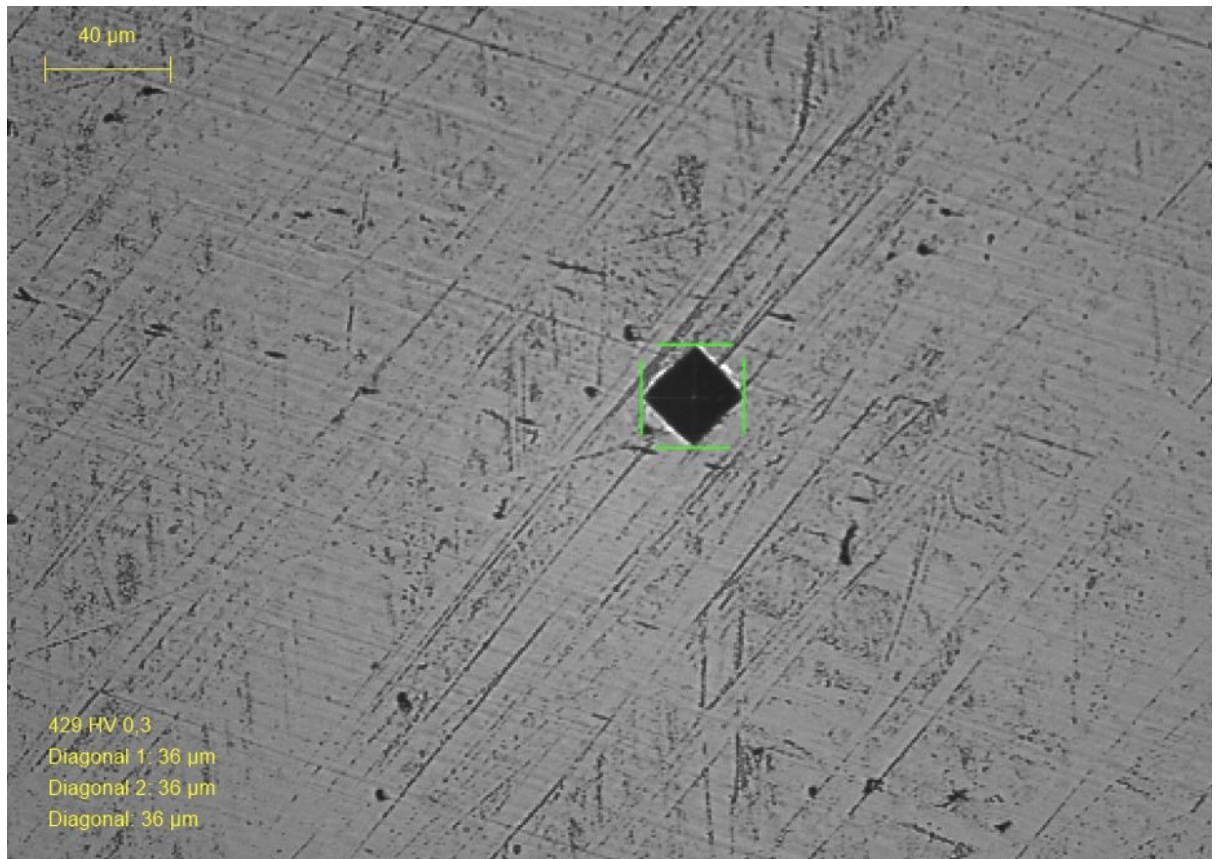


(Fonte: EMCO-Test)

5.2.1 Ensaio de Microdureza Vickers:

O ensaio consistiu em comprimir um penetrador de forma de pirâmide, confeccionado de diamante, de base quadrada, com ângulo entre faces de 136° submetida a determinada carga. A indentação vista no microscópio é de um losango regular, figura 23.

Figura 23: Exemplo da marca da indentação deixada na peça em escala microscópica.



(Fonte: Autor)

Através da imagem da indentação no microscópio foi realizado a medição das duas diagonais, obtendo-se o valor da dureza Vickers (HV) utilizando a equação 4

$$HV = 1,8544 F/d^2 \quad (4)$$

onde: F é o valor da carga aplicada em quilograma-força (Kgf) e d é o valor médio dos dois diâmetros de cada indentação, em milímetros (mm).

Foram feitas 10 indentações em cada amostra utilizando a técnica de mapeamento, que consiste em formato de matriz, esquematizado na figura 24. Foi utilizada uma pré-carga de 0,3 HV. De cada indentação foi medida as diagonais com a ajuda do microscópio óptico, em seguida a média das diagonais foi calculada. Como foram efetuadas 10 indentações, foi calculado o valor médio e o desvio padrão para cada amostra.

Figura 24: Esquema matriz de indentações



(Fonte: Autor)

5.3 Análise Metalográfica:

Há diversas técnicas usuais para observar a estrutura dos aços e ferros fundidos em escala microscópica. (Colpaert, 2008). Neste trabalho, a análise da microscopia foi realizada utilizando a Microscopia Ótica e a Microscopia Eletrônica de Varredura.

Dentre as diversas técnicas de observação da microestrutura dos aços, a mais comum é a microscopia ótica. Neste caso, emprega-se luz visível que incide sobre a amostra e é refletida até o observador. A resolução que pode ser obtida em uma imagem depende do comprimento de onda da radiação empregada. (Colpaert, 2008).

A Microscopia Ótica foi realizada no Laboratório de Microscopia Óptica do INTM utilizando um microscópio modelo Axio da marca Zeiss, figura 25, com ampliações de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x.

Figura 25: Microscópio Zeiss, modelo Axio.



(Fonte: INTM)

Enquanto a microscopia ótica se baseia na interação da luz com a amostra, permitindo a observação de relevo, cor e polarização, principalmente, a microscopia eletrônica aproveita o grande número de fenômenos de interação entre elétrons e metais para extrair informações importantes de uma amostra. (Colpaert, 2008)

A M.E.V foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura no INTM utilizando o microscópio de modelo Tescan Mira 3 da marca Oxford, figura 26, com ampliações de 200x, 500x, 1000x, 2000x, 4000x e 5000x. Foi feito utilizando a técnica de espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) a caracterização química e análise elementar das amostras

Figura 26: Microscópio eletrônico de Varredura.



Fonte: INTM

6. Resultados Da Microdureza:

Nesta seção, apresentaremos os resultados obtidos do teste de microdureza realizado a cada etapa do processo e da microscopia realizada nas amostras. Com base nos resultados, foram gerados gráficos mostrando os valores obtidos pelo teste de microdureza Vickers, que foi realizado utilizando uma matriz de 10 indentações.

Durante todo o estudo, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers nas amostras em cada etapa do processo. Inicialmente, o teste foi feito com a amostra recebida, sem qualquer tipo de tratamento térmico realizado. Os valores de cada medida, a média e o desvio padrão estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Dureza da Amostra Recebida

Indentação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MÉDIA	Dp
Dureza (Hv)	245	236	246	243	253	234	267	251	268	252	250	11,4

Com base nos resultados obtidos, geramos um gráfico com os valores obtidos.

Figura 27: Resultados do teste microdureza amostra como recebida



(Fonte: Autor)

Antes de realizar os tratamentos de têmpera e revenido, que são os objetivos deste trabalho, todas as amostras passaram por um tratamento de recozimento a 850°C por 30 minutos, seguido de resfriamento no próprio forno. Esse procedimento foi adotado para garantir que, caso a amostra recebida tivesse algum tipo de tratamento térmico anterior, ela fosse restaurada a um estado sem tratamento.

Uma das amostras foi selecionada do grupo para análise da dureza após o recozimento. Os resultados obtidos no teste de microdureza Vickers, assim como a média e o desvio padrão estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Dureza Amostra recozida

Indentação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MÉDIA	Dp
Dureza (Hv)	156	163	156	157	157	159	158	159	168	165	160	4,1

Figura 28: Resultados do teste microdureza amostra recozida



(Fonte: Autor)

Prosseguindo com o estudo, foram realizadas têmperas nas amostras, aquecendo-as a 820°C e 850°C por 15 minutos e resfriando-as bruscamente em água. Este processo tem como objetivo aumentar a dureza do material, o que pode ser observado nos resultados obtidos no teste de microdureza. Os resultados estão apresentados na tabelas 4 para amostras temperadas a 820°C e na tabela 5 para amostras temperadas a 850°C.

Amostra temperada a 820°C

Tabela 4: Dureza Amostra Temperada a 820°C

Indentação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Dp
Dureza (Hv)	620	647	706	684	684	625	635	671	675	688	664	29,6

Figura 29: Resultados do teste microdureza amostra temperada a 820°C



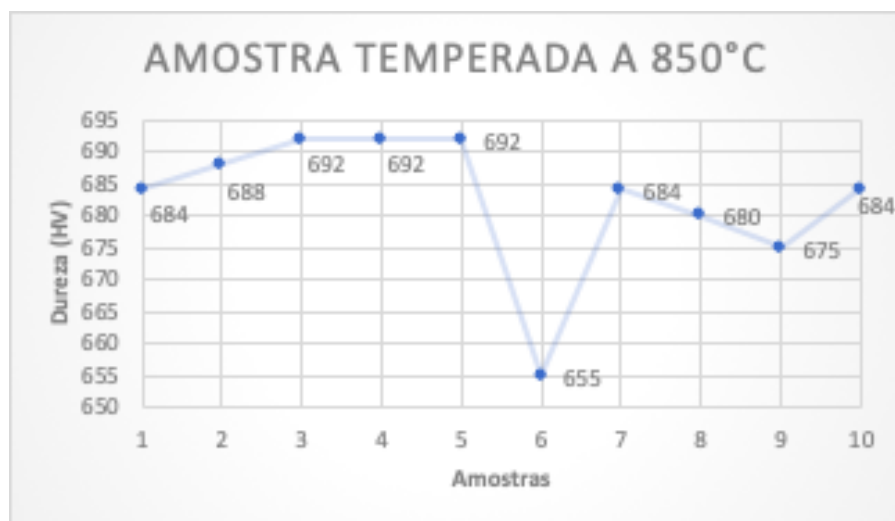
(Fonte: Autor)

Amostra temperada a 850°C

Tabela 5: Dureza Amostra Temperada a 850°C

Indentação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Dp
Dureza (Hv)	684	688	692	692	692	655	684	680	675	684	683	11,2

Figura 30: Resultados do teste microdureza amostra temperada a 850°C



(Fonte: Autor)

Após a têmpera, as amostras passaram pelo tratamento de revenimento. Este processo foi realizado nas seguintes temperaturas 150°C, 250°C, 350°C, 450°C

e 550°C, foi observado comportamento da dureza com o aumento da temperatura de revenimento do aço temperado e chega a valores próximos da temperatura crítica do aço, de 727 °C.

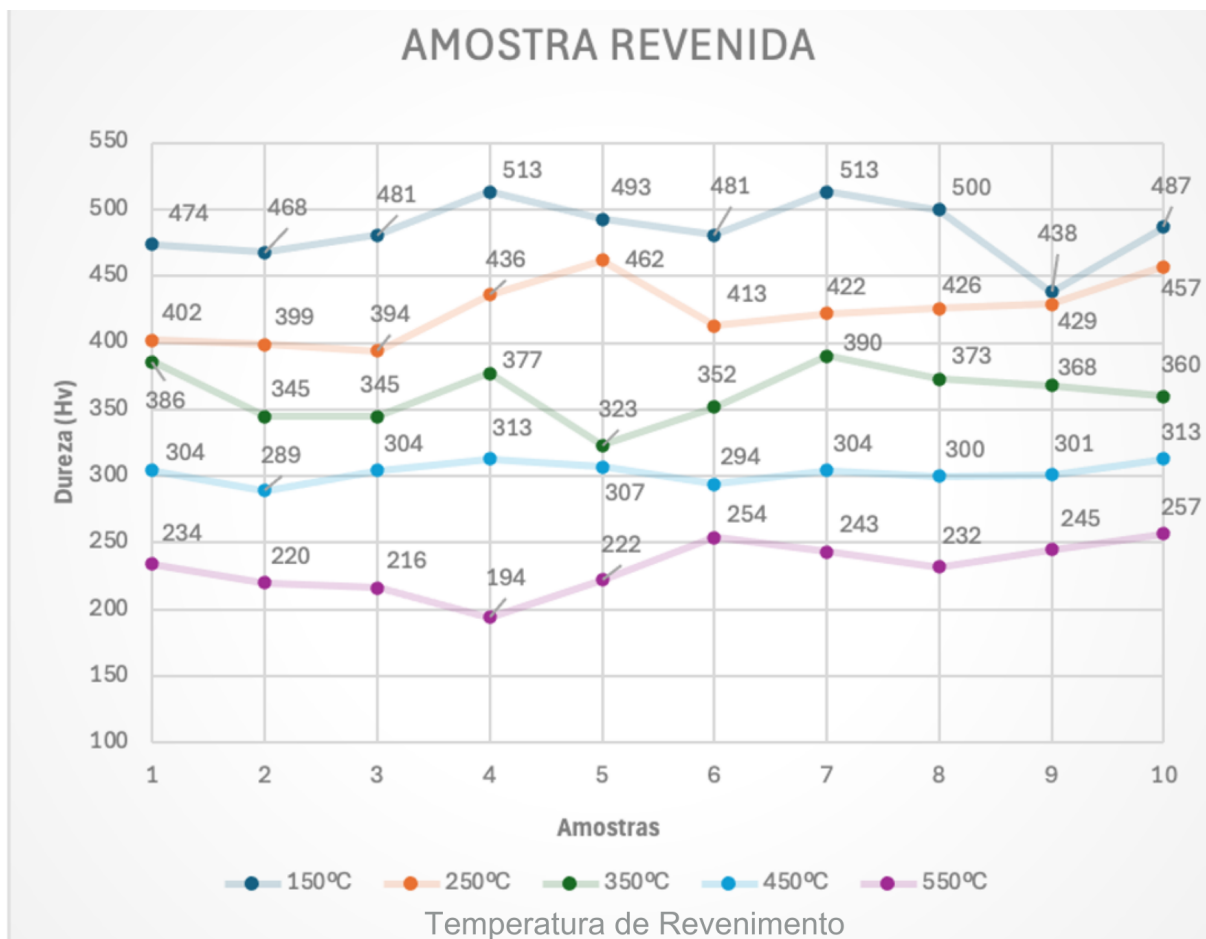
Após o tratamento e a preparação metalográfica das amostras, foi realizado o teste de microdureza. Os valores obtidos no ensaio de microdureza das amostras revenidas estão descritos nas tabelas 6 e 7, assim como a média e o desvio padrão, de acordo com a temperatura de revenimento.

Amostras temperadas a 820°C e Revenida:

Tabela 6: Resultado teste microdureza das amostras Temperadas a 820°C e Revenida

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Dp
150°C	474	468	481	513	493	481	513	500	438	487	485	22,4
250°C	402	399	394	436	462	413	422	426	429	457	424	23,2
350°C	386	345	345	377	323	352	390	373	368	360	362	20,9
450°C	304	289	304	313	307	294	304	300	301	313	303	7,5
550°C	234	220	216	194	222	254	243	232	245	257	232	19,3

Figura 31: Resultado do revenimento nas amostras temperadas a 820°C



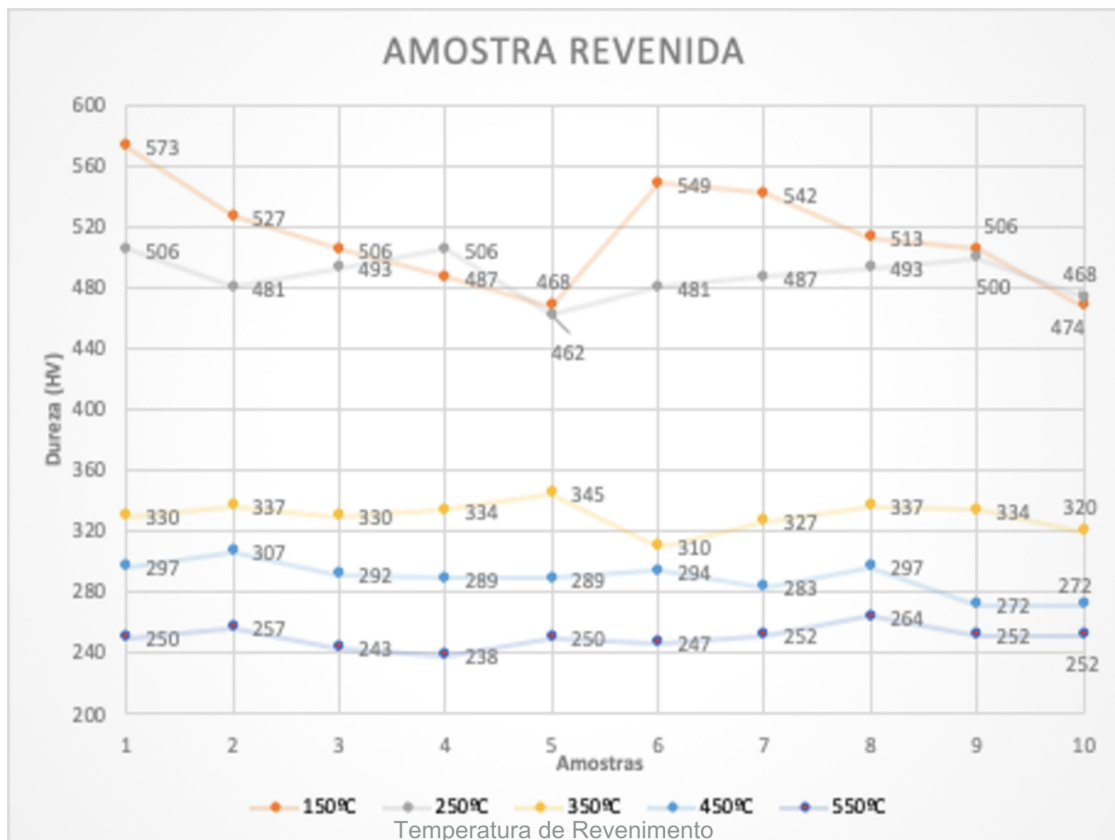
(Fonte: Autor)

Amostras temperadas a 850°C e Revenida:

Tabela 7: Resultado teste microdureza das amostras Temperadas a 850°C e Revenida

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Dp
150°C	573	527	506	487	468	549	542	513	506	468	514	34,6
250°C	506	481	493	506	462	481	487	493	500	474	488	14,2
350°C	330	337	330	334	345	310	327	337	334	320	330	9,8
450°C	297	307	292	289	289	294	283	297	272	272	289	11,1
550°C	250	257	243	238	250	247	252	264	252	252	251	7,1

Figura 32: Resultado do revenimento nas amostras temperadas a 850°C



(Fonte: Autor)

7. Resultados Da Microscopia Ótica E Eletrônica De Varredura:

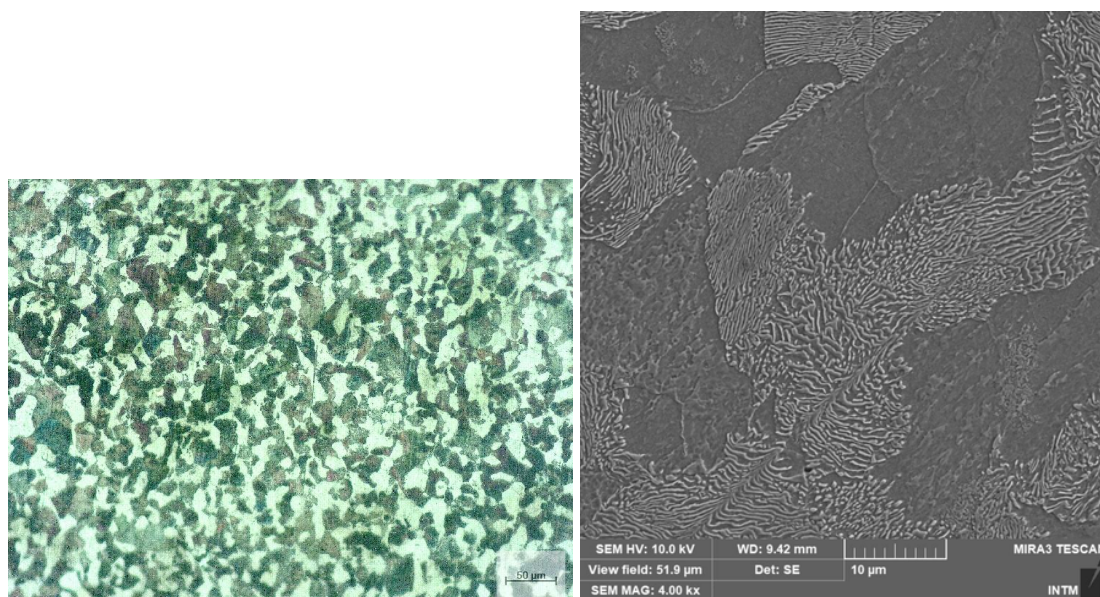
Nesta seção iremos apresentar as imagens obtidas a partir da microscopia ótica e da microscopia eletrônica de varredura. Porém, por indisponibilidade do equipamento no período em que estava sendo realizada a análise, não foi possível fazer com todas as amostras.

AMOSTRA COMO RECEBIDA

As amostras como recebidas apresentaram, em sua estrutura, áreas claras que indicam a presença de grãos de ferrita e áreas escuras que correspondem a grãos de perlita. Segundo Colpaert, essa característica é típica de aços hipoeutetóides, especialmente aqueles com médio teor de carbono.

Ilustrado na Figura 33, temos a M.O. ampliada em 200 vezes e M.E.V ampliada em 4000 vezes da amostra como recebida.

Figura 33: (a) Microscopia Ótica da Amostra como Recebida; (b) M.E.V da Amostra como Recebida



(Fonte: Autor)

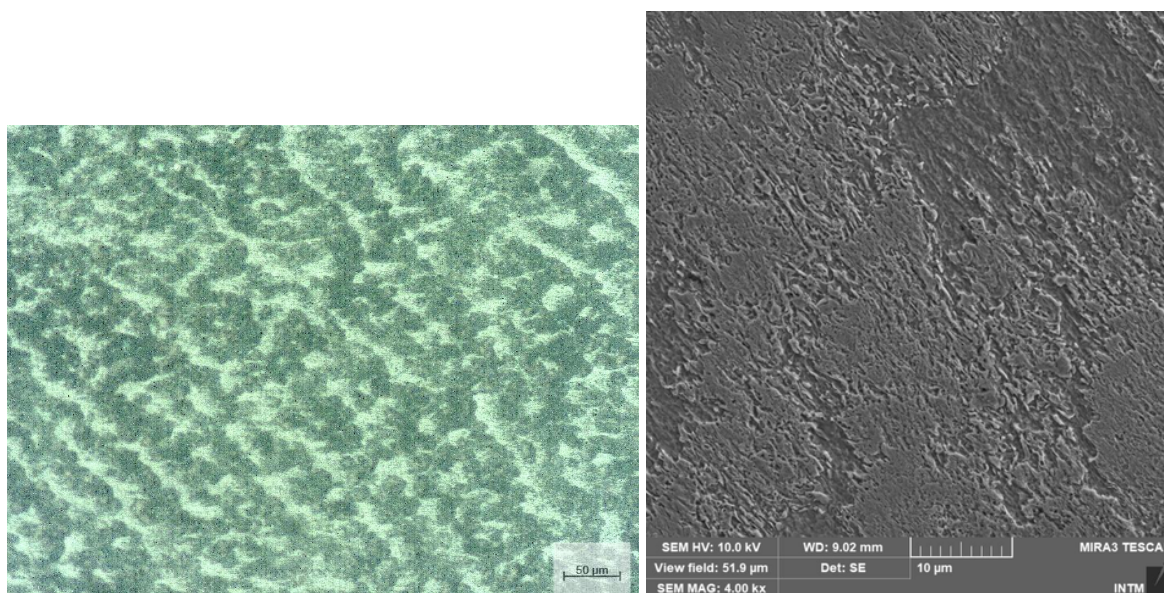
AMOSTRA RECOZIDA

Num aço hipoeutetóide, com teor de carbono inferior a 0,77%, o resultado do resfriamento lento é a formação de uma certa quantidade de ferrita proeutetóide até que a austenita remanescente transforme-se em perlita. (Chiaverini, 1996)

A Figura 34 ilustra a microestrutura da amostra tratada termicamente no processo de recozimento, através da M.O e da M.E.V. Nela, observamos a formação de ferrita e perlita, como visto na amostra sem tratamento. No entanto a amostra recozida apresenta uma concentração maior de grãos ferríticos devido ao crescimento destes e grãos perlíticos grosseiros devido ao resfriamento lento.

Essas observações corroboram com as condições propostas por Chiaverini (2005), pois com o tratamento de recozimento é esperado redução de tensões e de dureza no material, apresentando uma tendência a aumento de ductilidade e tenacidade dos aços como visto através dos resultados do teste de microdureza apresentado anteriormente.

Figura 34: (a) Microscopia Ótica da Amostra Recozida; (b) M.E.V da Amostra Recozida

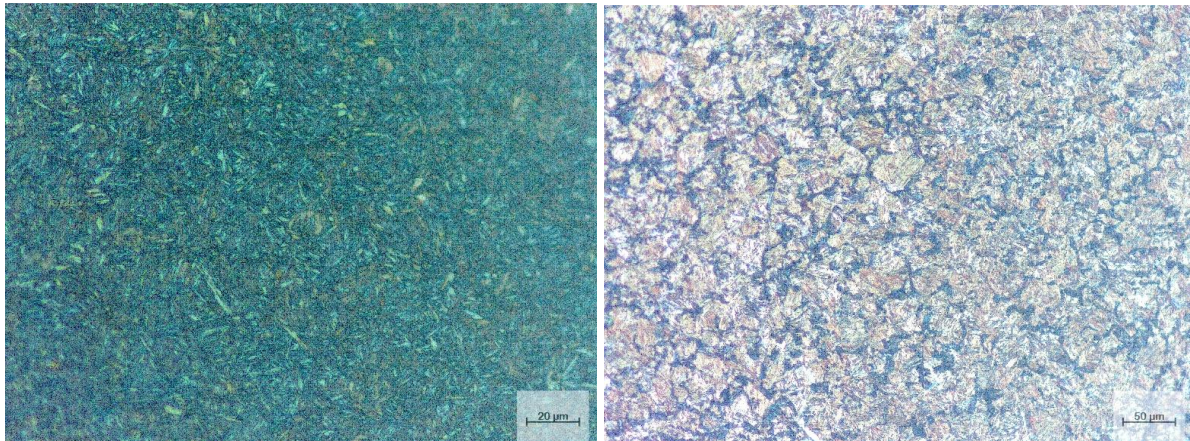


(Fonte: Autor)

AMOSTRA TEMPERADA

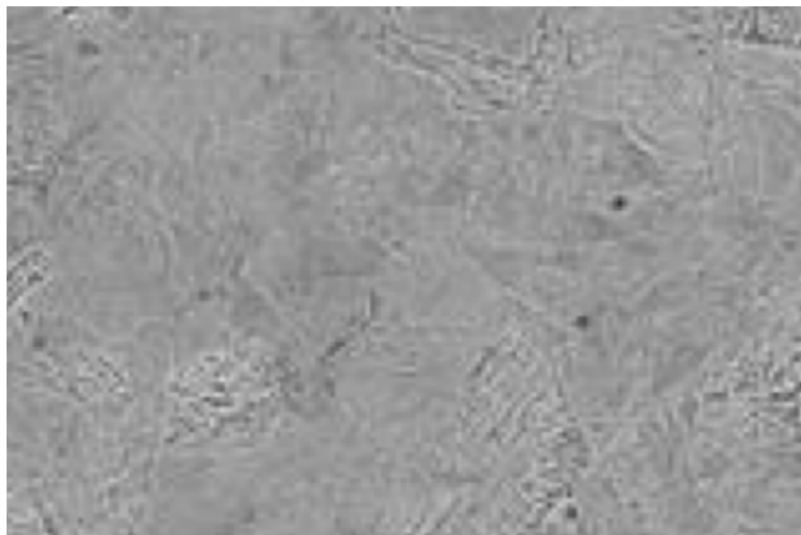
Foram observadas nas amostras submetidas ao tratamento térmico de têmpera resfriada em água. Como proposto por Chiaverini (2005), neste caso o uso de água no processo de resfriamento é compreendido como mais brusco. As amostras apresentaram uma microestrutura martensítica com grãos alongados e seções com formatos de agulha, estas condições são definidas pela severidade do resfriamento. A formação da martensita confere ao aço uma grande dureza. A martensita é uma fase dura e quebradiça. A figura 35, apresenta a M.O. do aço temperado a 820°C e a 850°C e a figura 36 apresenta a M.E.V. de um aço temperado resfriado em água.

Figura 35: (a) Microscopia Ótica da Amostra Temperada a 820°C; (b) Microscopia Ótica da Amostra Temperada a 850°C



(Fonte: Autor)

Figura 36: Aspecto micrográfico de aço temperado: Martensita



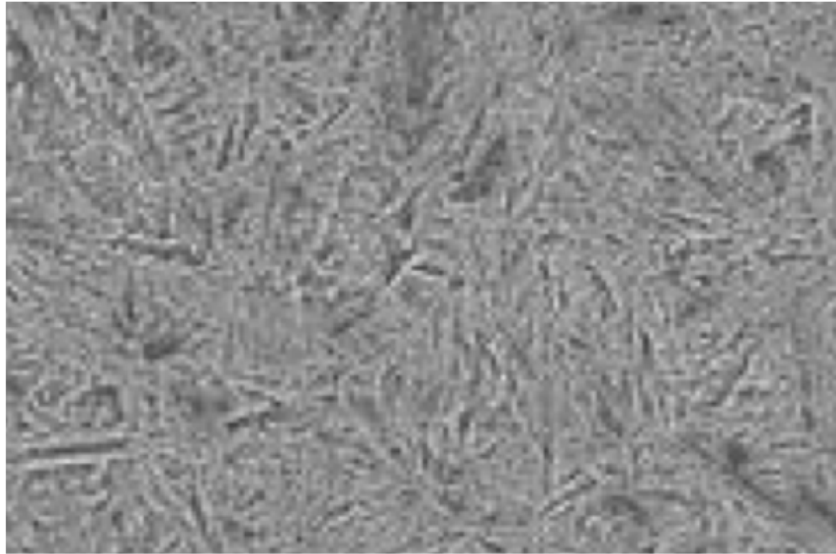
(Fonte: Posco: High Carbon Steel)

AMOSTRA REVENIDA

De acordo com o estudo, o revenimento é o tratamento térmico que consiste em reaquecer o aço abaixo da zona crítica e resfriado, geralmente, em ar. É realizado normalmente após o tratamento térmico de têmpera, tendo como objetivo aliviar as tensões internas e reduzir a fragilidade da martensita. Além de aliviar ou remover as tensões internas, corrige a excessiva dureza do material, aumentando a ductibilidade e a resistência ao choque.

A martensita revenida é mais tenaz que a martensita primária. E por essa razão, todo o aço temperado deverá ser revenido. A dureza após o revenimento dependerá da especificação exigida. Quanto mais próxima a temperatura de revenimento for da temperatura crítica, maior será a queda de dureza. A microestrutura resultante após o tratamento é apresentada na figura 37.

Figura 37: M.E.V de um aço 1045 Temperado e Revenido



(Fonte: Posco: High Carbon Steel, 2024)

8. Discussão:

Ao analisar os resultados obtidos, destaca-se a importância dos tratamentos térmicos, pois eles influenciam significativamente as propriedades mecânicas do material. Em geral, observou-se um aumento na dureza em relação ao estado inicial e a mudança dos microconstituintes encontrados no aço. Isso é relevante porque demonstra a eficácia dos tratamentos térmicos em melhorar as propriedades mecânicas do material, o que pode ter diversas aplicações práticas na indústria e na engenharia de materiais.

Analisando as etapas sequencialmente, observa-se que a dureza diminuiu após o tratamento de recozimento, conforme era esperado devido ao crescimento dos grãos da ferrita e da formação da perlita grosseira. Este é um dos objetivos principais desse tipo de tratamento térmico. Além disso, este tratamento possibilitou

que o material retornasse a um estado não tratado, caso houvesse recebido um tratamento previamente. Se interrompido o experimento nesta etapa, o material resultante teria baixa dureza, porém com melhorias na propriedade de ductilidade.

Materiais que apresentam uma boa ductilidade são geralmente utilizados em aplicações que demandam flexibilidade e resistência a danos, como fios, cabos, estruturas de construção, componentes de máquinas, entre outros. O aço AISI 1045, na condição de recozido, quando o aço sofre uma certa deformação a frio, neste caso na forma de trefilado.

Após o recozimento, processo que eliminou qualquer possível tratamento térmico prévio, foi realizada a têmpera nas amostras. Este procedimento tem por objetivo aumentar a dureza superficial do aço com a formação da martensita, microconstituente mais duro, porém o material perde sua ductilidade. Materiais que apresentam uma alta dureza, são mais resistentes a riscos, impactos e desgaste, sendo assim adequados para uso em engenharia, construção e aplicações industriais. Por exemplo, ferramentas e componentes sujeitos a desgaste intenso, como matrizes de corte e molde de injeção. São utilizados no processo de fabricação de ferramentas, na indústria automobilística são usados em componentes mecânicos que sofrem muitos esforços, como eixos, engrenagens e rolamentos.

Após os testes com as amostras temperadas, vimos que houve um aumento considerável da dureza no material. A dureza passou de um valor médio de 160 Hv após o recozimento para 663 Hv, com amostra temperada a 820°C, e 684 Hv, com amostra temperada a 850°C. Esses valores estão dentro do esperado visto que o objetivo principal deste tratamento é aumentar a dureza superficial do aço.

Logo após as amostras serem temperadas elas passam pelo tratamento de revenimento, pois como há uma mudança brusca da temperatura no processo de têmpera, podem gerar tensões internas que podem posteriormente trazer prejuízo ao material. Este tratamento auxilia a atenuar as tensões geradas, além de corrigir a dureza para objetivada e melhorar a ductilidade e tenacidade do material.

9. Conclusão:

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, no teste de microdureza e considerando que os tratamentos térmicos têm o potencial de alterar as propriedades mecânicas dos materiais, observamos que, em praticamente todas as etapas do processo, houve um aumento na dureza do material em comparação com o estado inicial.

Além disso, analisando os resultados de todas as amostras, podemos destacar a que obteve o melhor resultado após os tratamentos térmicos de acordo com o objetivo deste trabalho. De acordo com todos os resultados do teste de microdureza obtidos, podemos destacar que a amostra que recebeu o tratamento de têmpera a 850 °C e posteriormente revenida a 150 °C apresentou uma melhor dureza, que na sua média apresentou um valor de 514 Hv.

Com isso, podemos afirmar que o trabalho fornece informações úteis para futuras pesquisas e aplicações industriais, ajudando a orientar a escolha dos tratamentos mais adequados para atingir as propriedades desejadas nos materiais.

10. Referências Bibliográficas:

ASM International, **ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**, 2002.

American Society M, **Metallography and Microstructures**, Vol 9. ASM international, 2004.

ASTM E384/E384M-2, **"Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials"**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 172: Critério de Classificação dos Aços**. Rio de Janeiro, 2000.

AVNER, S. H., **Introduction to Physical Metallurgy**. McGraw-Hill Education, 1995.

BHADESHIA, H. K. D. H., **Bainite in Steels: Theory and Practice**. Maney Publishing, 2015.

CALLISTER Jr., W. D., & Rethwisch, D. G., **Materials Science and Engineering: An Introduction**. Wiley, 2014.

CALLISTER, Jr. William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CHIAVERINI, V., **Tecnologia Mecânica. Vol. 1, 2 e 3**. 2ª edição. Makron Books. São Paulo, 1986.

CHIAVERINI, V., **Aços e Ferros fundidos**. 7º Edição , Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 1996.

CHIAVERINI, V., **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. 2º Edição , Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2008.

COLPAERT, H., **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo, Edgard Blucher, 2008.

Constituintes estruturais de equilíbrio dos aços. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/processoscorte_arquivos/FerroAcoConceitos.pdf>. Acesso em: Julho de 2024.

CONTROL, M. **Ensaio de microdureza vickers.** Disponível em: <<https://www.mcontroleng.com.br/ensaio-microdureza-vickers>>. Acesso em: 23 jul. 2024.

CORRÊA, E. C. S. **Tecnologia de Tratamentos Térmicos.** Notas de aula. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFETMG). Belo Horizonte, 2011.

DIETER, G. E., **Mechanical Metallurgy.** McGraw-Hill Education, 1988.

FREITAS, Brenda, J. M. **Estudo da influência das temperaturas de austenitização na dureza dos aços AISI d6 e SAE 1045.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, p.89. 2016.

GALLO, Giulliano B. **Influência do Tratamento Térmico sobre a Tenacidade de um Aço AISI SAE 1045 com Médio Teor de Carbono Avaliado por Ensaios de Impacto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, p. 115, 2006.

GARCIA, A., Spim, J. P. & Santos, C. A., **Ensaio dos Materiais.** LTC. Rio de Janeiro, 2012.

GROOVER; MIKELL, P. **Introdução aos processos de fabricação.** 1^{ed.}, Gen LTC. Rio de Janeiro, 2014.

Neolider, **História e Importância do Aço: Conheça mais sobre nossa principal matéria prima.**, 2019. Disponível em: <https://neolider.net.br/historia-e-importancia-do-aco/>. Acesso em: Fevereiro de 2024.

LUZ, Gelson. **Aço SAE 1045 Propriedades Mecânicas e Composição Química.** BlogMateriais,2017.Disponível:<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sa-e-1045-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: Março de 2024.

MARTINS, Marcelo. **Temperabilidade Jominy e influência do revenido sobre a dureza - um estudo em aços estruturais nacionais**. Universidade Federal de Santa Catarina, p.115, 2002.

Sacchelli. **Microestrutura dos aços na indústria metalúrgica**. Disponível em: <<https://sacchelli.com.br/microestrutura-dos-acos-na-industria-metalurgica/>>. Acesso em: Agosto de 2024.

NOVIKOV, I., **Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais**, Rio de Janeiro, Editora UFRJ , 1994.

PADILHA, A. F., **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**. Hemus.São Paulo, 1997.

PAVANATI, Henrique C. **Introdução à tecnologia dos materiais**. Instituto Federal de Santa Catarina, p.171, 2010.

PORTER, D. A., Easterling, K. E., & Sherif, M. Y., **Phase Transformations in Metals and Alloys**. 3rd edition. CRC Press, 2009.

POSCO. POSCO. **High Carbon Steel Catalog**. Disponível em: <<https://www.posco.co.kr/homepage/docs/eng7/jsp/s91a0000001i.jsp>>. Acesso em: set. 2024.

PRABHUDEV, K.H. **Handbook of Heat Treatment of Steels**. [S. l.]: Tata McGraw-Hill, 1988. v. 762.

ROHDE, Regis Almir. **METALOGRAFIA PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS: Uma abordagem prática Versão-3.0**. Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais (LEMM): URI Campos Santo Angelo, 2010.

SHACKELFORD, James F. **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros**. 6^a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SILVA, A. L., MEI, P. R., **Aços e Ligas Especiais**, 2^a ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2006.

SOUZA., S. A., **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos**. 5ª edição. Editora Edgar Blücher Ltda. São Paulo, 1982.

SMITH, W. F., & Hashemi, J., **Foundations of Materials Science and Engineering**. McGraw-Hill Education, 2006.

Teste da Microdureza | Medição, controle e ensaios | CIMM. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6560-teste-da-microdureza>. Acesso em: Julho de 2024

VAN VLACK, L. H., **Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais**, 4ª. ed. Rio de Janeiro, Campus, 1984.