



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE BOM JESUS DA LAPA
ENGENHARIA MECÂNICA**

MARIA ILZA PEREIRA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO AÇO SAE 1020 APÓS
TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO.**

BOM JESUS DA LAPA

2023

MARIA ILZA PEREIRA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO AÇO SAE 1020 APÓS
TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Mecânica, do Centro
Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, da
Universidade Federal do Oeste da Bahia.

ORIENTADOR: PROF. ME. LUCAS ANINGER DE BARROS ROCHA

BOM JESUS DA LAPA

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

S586

Silva, Maria Ilza Pereira

Caracterização microestrutural do aço SAE 1020 após tratamento térmico de recozimento. / Maria Ilza Pereira Silva. – 2023.

43f.: il.

Orientador: Prof. Me. Lucas Aninger de Barros Rocha
TCC - Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2023.

1. Engenharia Mecânica. 2. Aço – Tratamento Térmico. I. Rocha, Lucas Aninger de Barros. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 620.1

Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO AÇO SAE 1020 APÓS TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Mecânica, do Centro
Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, da
Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Bom Jesus da Lapa, 10 de Julho de
2023.

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou este projeto:

Prof. Me. Lucas Aninger de Barros Rocha

Prof. Me. Filipi Marques de Souza

Prof^a. Dr^a. Bruna Souza

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, que me abençoou grandemente e me deu capacidade para desenvolvê-lo. Dedico aos meus pais: Zenilton Barbosa Silva e Ana Rosa Pereira, que são maravilhosos e sempre me apoiaram e lutaram para minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre presente em minha vida e por me abençoar a ter chegado aqui.

Aos meus Pais, Zenilton Barbosa Silva e Ana rosa Pereira que sempre me apoiaram e lutaram para me ajudar nos estudos e conquistar meus sonhos. Ao meu avô João Benevides e aos familiares e amigos que sempre me apoiaram nessa caminhada.

A meu esposo Pedro Augusto Lelis Neves, por segurar minha mão todas as vezes que pensei em desistir e por me apoiar sempre.

Ao meu orientador, Lucas Aninger de Barros Rocha por ter aceitado a me acompanhar nessa etapa muito importante, por todo conhecimento compartilhado e por todas as vezes que me incentivou durante o curso.

A todos os professores e envolvidos no funcionamento da UFOB que contribuíram para minha formação, em especial ao Professor Anderson Breno que me incentivou a continuar quando eu estava passando por uma fase difícil no curso, agradeço por todas as palavras de conforto e incentivo que me ajudou a prosseguir.

A todos aqui citados, muito obrigada! Por todo conhecimento, por todos os conselhos, por todo apoio que me direcionaram, e assim, tornou possível chegar até aqui.

*O meu corpo e o meu coração poderão fraquejar,
mas Deus é a força do meu coração e a minha
herança para sempre.
(Salmos 73:26)*

RESUMO

SILVA.P; Maria ILZA. **Caracterização microestrutural do aço SAE 1020 após tratamento térmico de recozimento.** 2023. Bahia: Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Bom Jesus da Lapa, 10/07/2023.

O aço ABNT/SAE1020 oferece flexibilidade e por isso é fácil de manipulá-lo independentemente do método que desejar usar, suas propriedades podem ser submetidas a diversos tratamentos térmicos com o objetivo de melhorar um determinado conjunto de propriedades. Dentre estes tratamentos está o tratamento térmico de normalização, têmpera, revenimento, recozimento, entre outros.

O aço SAE 1020 foi submetido a tratamento térmico de recozimento, em que foram preparadas amostras cilíndricas através de corte com técnicas metalográficas, depois passaram pelo processo de seccionamento, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico na superfície, feito com ácido nítrico 10% a fim de analisar a microestrutura obtida e, em seguida, avaliação de alteração de propriedades mecânicas utilizando microdurômetro Vickers, foi necessária uma prática metalográfica adequada tanto na preparação das amostras, quanto no processo de análise. Isso possibilitou uma observação criteriosa da estrutura obtida, tanto na amostra não tratada quanto após o tratamento térmico. Assim, ao realizar a análise micrográfica, foi possível concluir que ocorreram as modificações estruturais aguardadas nas amostras de aço 1020, comprovando a diminuição da dureza na amostra recozida e o aumento dos grãos formando mais ferrita.

PALAVRAS-CHAVE: Aço ABNT/SAE 1020. Dureza. Metalografia. Normalização. Revenimento. Têmpera.

ABSTRACT

SILVA.P; Maria ILZA. **Microstructural characterization of SAE 1020 steel after annealing heat treatment.** 2023. Bahia: Mechanical Engineering, Federal University of West Bahia, Bom Jesus da Lapa, 10/07/2023.

ABNT/SAE1020 steel offers flexibility and is therefore easy to manipulate regardless of the method you wish to use, its properties can be subjected to different heat treatments with the aim of improving a given set of properties. Among these treatments is the heat treatment of normalization, quenching, tempering, annealing, among others. The SAE 1020 steel underwent annealing heat treatment, in which cylindrical samples were prepared by cutting with metallographic techniques, then passing through the process of sectioning, embedding, sanding, polishing and chemical attack on the surface, done with 10% nitric acid. In order to analyze the obtained microstructure and then evaluate the change in mechanical properties using a Vickers microdurometer, it was necessary to have an adequate metallographic practice both in the preparation of the samples and in the analysis process. This allowed a careful observation of the structure obtained, both in the untreated sample and after heat treatment. Thus, when carrying out the micrographic analysis, it was possible to conclude that the expected structural changes occurred in the 1020 steel samples, proving the decrease in hardness in the annealed sample and the increase in grains forming more ferrite.

KEYWORDS: ABNT/SAE 1020 steel. Hardness. Metallography. Normalization. Tempering. Tempering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Diferentes escalas em que a estrutura dos materiais se desenvolve	16
Figura 2 — (a) Estrutura Cúbica de corpo centrado (CCC). (b) Estrutura cúbica de face centrada (CFC).	17
Figura 3 — Diagrama de fases ferro-carbono	18
Figura 4 — Representação esquemática da transformação da austenita em ferrita em condições próximas ao equilíbrio.	19
Figura 5 — Aço IF aquecido a 10 K/s a partir de uma estrutura ferrítica	20
Figura 6 — Aço com C= 0,042%, Mn = 0,2% laminado a quente com alta formalidade	21
Figura 7 — Diagrama TTT	22
Figura 8— Diagrama TTT a partir de medições da porcentagem da transformação em função do logaritmo do tempo	22
Figura 9 — Diagrama de transformação por resfriamento contínuo para uma liga ferro – carbono	23
Figura 10 — Cortadora metalográfica	30
Figura 11 — Embutidora metalográfica EM30D	31
Figura 12 — Lixadeira e Politriz modelo PLF da marca Fortel	32
Figura 13 — Microscópio óptico marca Fortel	33
Figura 14 — Amostras embutidas, lixadas e polidas	34
Figura 15 — Amostras recebendo ataque químico	35
Figura 16 — Amostras após ataque químico	35
Figura 17 — Microscópio óptico	36
Figura 18 — Microdurômetro	37
Figura 19 — Micrografia do aço 1020, sem tratamento (a),(b) e (c) Ampliação de 40x em pontos diferentes.	39
Figura 20 — Micrografia do aço 1020, com tratamento (a),(b) e (c) Ampliação de 40x em pontos diferentes.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1— Fases e microconstituintes dos aço	25
Tabela 2—Resolução média das três principais técnicas de microscopia usadas na engenharia de materiais.	28
Tabela 3— Resultado de Dureza das amostras	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society For Testing And Materials
CCC	Estrutura Cúbica De Corpo Centrado
CFC	Estrutura Cúbica De Face Centrada
HFP	Estrutura Hexagonal compacta
SAE	Society Of Automotive Engineers
TCC	Estrutura Tetragonal De Corpo Centrado
TTT	Temperatua – tempo – transformação

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Alfa
Δ	Delta
Γ	Gama
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO DA LITERATURA	15
3.1 Aços.....	15
3.2 Estrutura	16
3.3 Estrutura Cristalina	17
3.4 Diagrama ferro-carbono.....	18
3.5 Diagrama temperatura – tempo – transformação.....	21
3.6 Diagrama CCT	23
3.7 Tratamentos térmicos.....	24
3.7.1 Recozimento.....	25
3.7.2 Recozimento isotérmico ou cíclico.....	26
3.7.3 Recozimento para o alívio de tensões ou subcrítico.....	26
3.7.4 Esferoidização.....	26
3.7.5 Têmpera.....	26
3.7.6 Revenimento.....	27
3.8 Metalografia.....	27
3.8.1 Microscopia óptica.....	28
3.8.2 Macrografia.....	29
4. METODOLOGIA	29
4.1. Preparação das amostras metalográficas	29
4.2. Seccionamento.....	30
4.3. Tratamento térmico.....	30
4.4. Embutimento	31
4.5. Lixamento	32
4.6. Polimento.....	33
4.7. Ataques químicos.....	34
4.8. Microscopia ótica	35
4.9. Ensaio de dureza.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
6. CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

O aço é um material composto por ligas de ferro e carbono, possui grande aplicabilidade, suas propriedades mecânicas variam de acordo com os diferentes tipos de materiais e composições, sendo um dos fatores que o faz ser um dos materiais mais utilizados no planeta e engloba diversas funções que partem desde pequenas arruelas até grandes chapas, vergalhões e entre outros, sendo aplicados nas engenharias, porque é um material leve, muito resistente e mais maleável que o ferro. Possuem vários tipos no mercado, um dos mais utilizados é o aço SAE (Society of Automotive Engineers) 1020 devido a sua versatilidade e ao excelente custo benefício em relação aos aços mais ligados para mesmo propósito.

O aço SAE 1020 possui excelente conformabilidade, grande tenacidade e ductilidade, boa soldabilidade, baixa temperabilidade e baixa resistência mecânica. São aços carbonos constituídos basicamente de ferro, carbono, silício e manganês. Outros elementos na composição química (enxofre e fósforo) são resíduos do processo de fabricação e são utilizados em engrenagens, eixos, virabrequins, pinos guia, anéis de engrenagem, colunas, catracas, capas, tubos entre outros (GELSON, 2017).

O aço 1020 oferece flexibilidade e por isso é fácil de manipulá-lo independentemente do método que desejar usar, suas propriedades podem ser alteradas através de diversas opções de tratamentos térmicos como recozimento, cementação, normalização, tempera, revenimento e nitretação. E por fim com a análise metalográfica, é possível relacionar a microestrutura de um material e suas propriedades, bem como verificar as modificações que os tratamentos geram na microestrutura.

Segundo Ribeiro, Costa e Silva (2017) as amostras do aço devem passar pelos seguintes processos: de corte, com a finalidade de diminuir a amostra; embutimento, no qual o material será coberto por uma resina em uma câmara de pressão para ser aquecido; lixamento, para retirar as imperfeições mais grosseiras da amostra; polimento, quando se retira os riscos causados no processo anterior e prepara a amostra para ser atacada e vista em um microscópio; ataque químico utilizando substâncias que atacam a amostra que posteriormente serão lavadas em um jato de água quente inclinado para evitar manchas em sua superfície.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar as modificações microestruturais do aço SAE 1020 através de ensaio metalográfico após tratamento térmico de recozimento.

2.1 Objetivos Específicos

- Analisar as propriedades mecânicas do aço SAE 1020 comercial.
- Produzir variação das propriedades através do tratamento térmico tipo recozimento.
- Demonstrar a variação microestrutural do tratamento térmico através de micrografias processadas.
- Avaliar alterações em propriedades mecânicas do aço após tratamento térmico.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Aços

Os aços são as ligas à base de ferro mais amplamente aplicadas. Uma das características mais importantes que diferencia os aços dos ferros fundidos é a capacidade que os aços têm de serem deformados plasticamente. Atualmente os aços são especialmente valorizados, também pela facilidade de serem reciclados, pela vida relativamente curta quando descartados e pelo consumo específico de energia relativamente baixo em sua produção, fatores que levam a sua caracterização como material de elevada “sustentabilidade” (COLPAERT, 2008).

O aço possui uma natureza complexa e com uma definição não simples, devido o fato que os aços comerciais não têm ligas binárias, mesmo que seus principais componentes seja o ferro e o carbono, há sempre outros elementos secundários causados pelo seu processo de fabricação. O aço, liga ferro-carbono, contém em sua composição química entre 0,008% até 2,11% de carbono, quando o limite é inferior à mínima deve-se a solubilidade do carbono no ferro, em uma temperatura ambiente, e

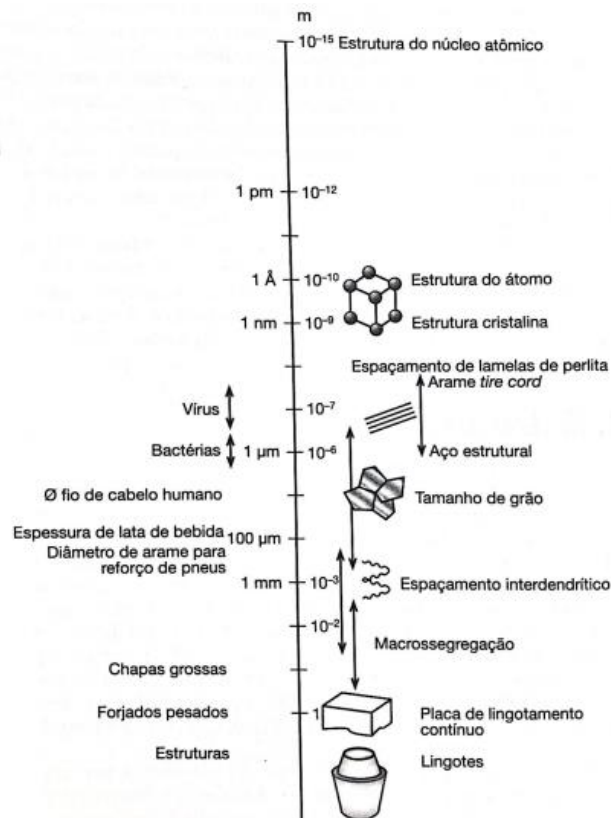
o limite superior a 2,11% é o máximo de carbono que o ferro, à 1148 °C, consegue dissolver (Chiaverini, 1998).

3.2 Estrutura

O conceito de estrutura é fundamental para a engenharia de materiais e metalurgia. Embora a estrutura atômica seja importante para definir alguns aspectos do comportamento do material, a análise clássica começa com a estrutura cristalina. A maioria dos metais e ligas industriais, e quase todo o aço, são usados sob condições nas quais os átomos são regularmente organizados em cristais. Itens feitos de aço raramente consistem em um único cristal ou mesmo em uma única fase. Pela forma como os diferentes cristais se organizam na estrutura policristalina, seu tamanho e forma, e a quantidade de cada fase que pode estar presente, essas características costumam aparecer em uma escala “microestrutural” (Colpaert, 2008).

A figura 1 mostra esquematicamente as características estruturais de aços em cada uma das escalas mencionadas.

Figura 1 – Diferentes escalas em que a estrutura dos materiais se desenvolve.



Fonte: COLPAERT, 2008

3.3 Estrutura Cristalina

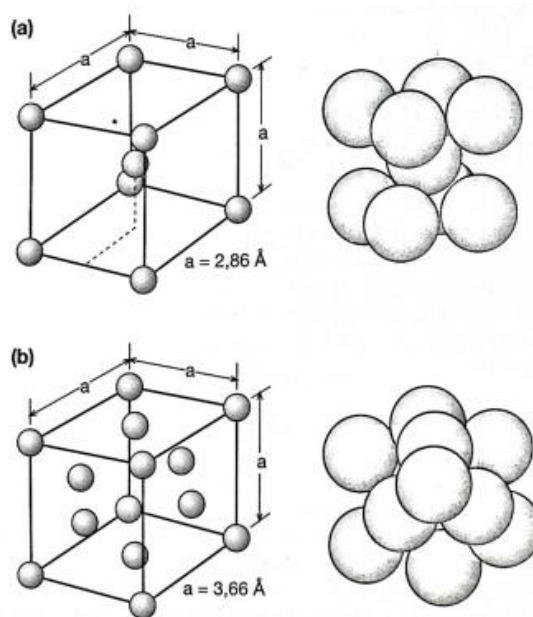
Os metais são formados por um conjunto de átomos compactados e arranjados em ordem, chamados de estrutura cristalina. Os átomos, geralmente, são representados por esferas rígidas semelhantes a bolas de bilhar. Embora esta forma de representação seja bastante simplificada, com ela é possível explicar as propriedades físicas e mecânicas dos metais (Callister, 2013).

Os átomos têm diferentes raios atômicos e que a organização espacial desses átomos ocasiona diferentes estruturas cristalinas (CALLISTER et al., 2013).

As estruturas compactadas, CFC e HFP (hexagonal compacta) são mais comuns, como também as CCC não-compactas. O ferro nestes casos é polimormo, ou seja, têm duas estruturas cristalinas conforme o ambiente em que se encontra. Em baixas temperaturas, até 910 °C, tem uma estrutura não-compacta (CCC), acima desta temperatura tem estruturas compactas (CFC), porque se encontra mais estável. Em temperaturas de 1394 °C, fica totalmente estável até o seu ponto de fusão em 1535 °C. Assim sendo, as diferentes fases do ferro são estáveis a depender das faixas de temperatura e de pressão (Colpaert, 2008).

Como pode ser visto na figura 2.

Figura 2 – (a) Estrutura Cúbica de corpo centrado (CCC). (b) Estrutura cúbica de face centrada (CFC).



Fonte: COLPAERT,2008.

3.4 Diagrama ferro-carbono

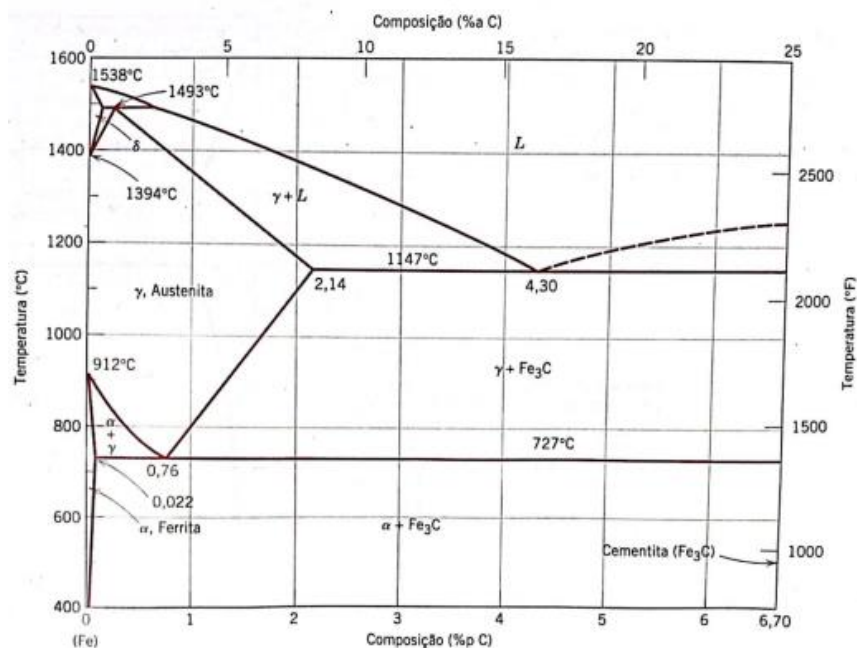
Dependendo da temperatura, o ferro tem em equilíbrio a pressão atmosférica, duas estruturas cristalinas diferentes (CCC e CFC), além de poder se apresentar no estado líquido. Os elementos de liga adicionados ao ferro podem estabilizar uma ou outra estrutura, além de formar novas fases importantes, nos aços (COLPAERT, 2008).

O diagrama de ferro-carbono (aço), demonstra a relação existente entre as composições químicas com a temperatura e as fases presentes da liga de aço, tendo pontos fundamentais e importantes para um estudo delas (Chiaverini, 1998).

O ferro puro quando aquecido, sofre duas mudanças na estrutura cristalina antes de fundir. À temperatura ambiente, a forma estável chamada ferrita, ou ferro α , tem uma estrutura cristalina CCC. A ferrita sofre transformação polimórfica em austenita CFC ou ferro γ a 912°C (1674°F). Essa austenita persiste até 1394°C (2541°F), quando a austenita CFC reverte para a fase CCC, chamada ferrita δ , e finalmente funde a 1538°C (2800°F) (Callister, 2018).

Na Figura 3 ficam evidentes todas essas mudanças no diagrama de fases:

Figura 3 - Diagrama de fases ferro-carbono.



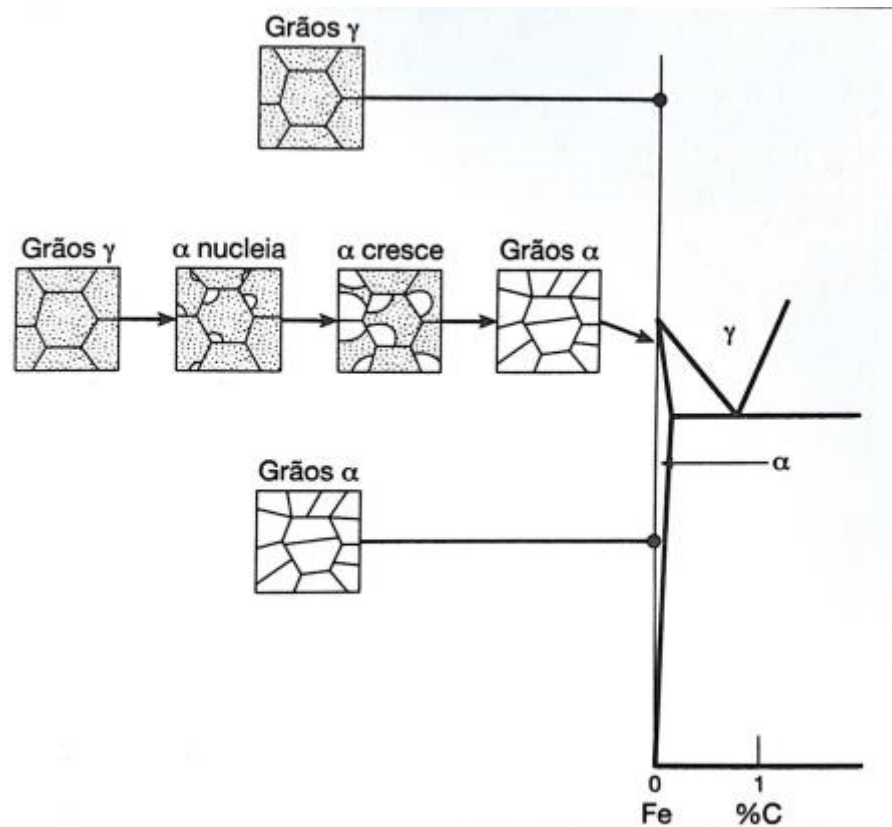
Fonte: CALLISTER (2015).

Um aspecto importante, ao se analisar o diagrama do ferro-carbono, é observar as fases presentes nele, estas fases podem ser: Ferrita (α), Ferrita (δ), Austenita e Cementita.

A Ferrita (α) é uma solução sólida de carbono em ferro CCC, existente até a temperatura de 912°C. Nesta faixa de temperatura, a solubilidade do carbono ferro é muito baixa, chegando ao máximo de 0,020% a 727°C (SILVA, André; MEI, Paulo; 2010).

As ferritas são aços ou ferro puros que possuem um teor de carbono abaixo do limite de solubilidade em fase CCC, na temperatura ambiente. A formação da ferrita é oriunda da austenita com a fase CFC, γ , em condições a um rente equilíbrio (Colpaert, 2008). Conforme a figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática da transformação da austenita em ferrita em condições próximas ao equilíbrio.



Fonte: COLPAERT,2008

Ferrita (δ): Para pequenos teores de carbono, acima de 1994°C, o ferro muda novamente para cúbico de corpo centrado, dando origem a ferrita δ , que é a solução sólida do carbono em ferro CCC, sendo estável até 1538°C, quando o ferro se liquefaz.

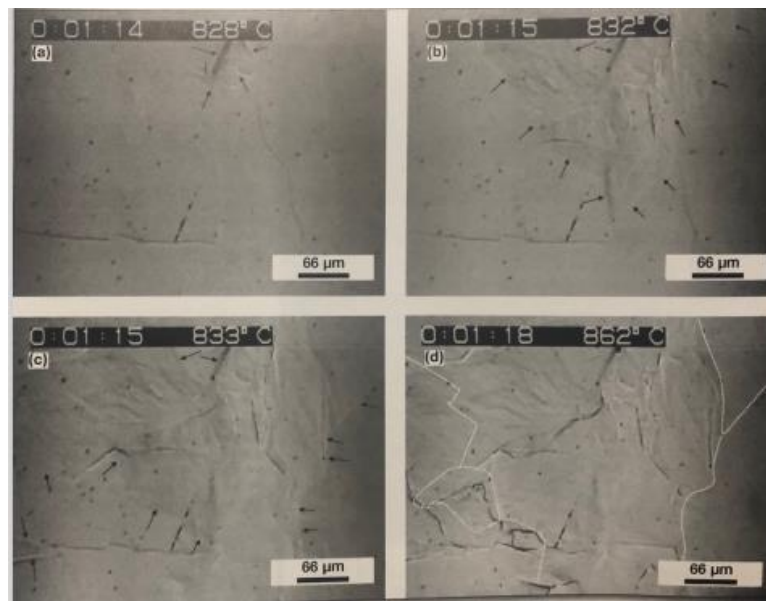
Tendo o ferro uma estrutura CCC, a solubilidade do carbono é baixa, atingindo ao máximo de 0,09% C a 1495°C (SILVA, André; MEI, Paulo; 2010).

A Austenita (γ) é uma solução sólida de carbono em ferro CFC, existindo entre as temperaturas de 727 e 1495°C, e com solubilidade máxima de carbono no ferro de 2,11% a 1148°C (SILVA, André; MEI, Paulo; 2010).

O aquecimento da ferrita em aços Fe-C leva à formação da fase CFC, chamada “austenita”. A austenita, em ferro puro e ligas Fe-C, só é observável diferentemente em microscópios que possam operar a temperatura elevada, onde esta fase é estável, (COLPAERT,2008).

Na Figura 5 apresenta um exemplo de formação de austenita a partir da ferrita em aço.

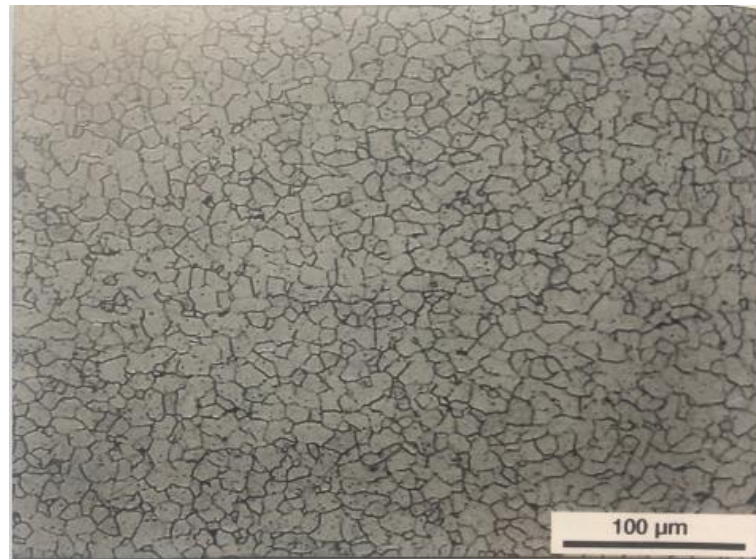
FIGURA 5 – Aço IF aquecido a 10 K/s a partir de uma estrutura ferrítica.



Fonte: Colpaert,2008.

Já a cementita Fe_3C começa a aparecer na estrutura do aço quando a solubilidade do carbono na ferrita é excedida. Aços para conformação, de baixo teor de carbono, normalmente apresentam a cementita distribuída ao longo do produto, como uma segunda fase dispersa (COLPAERT,2008) como mostrado na Figura 6.

FIGURA 6 - Aço com C= 0,042%, Mn = 0,2% laminado a quente com alta formabilidade.



Fonte: Colpaert,2008.

A cementita é um carboneto de ferro com estrutura ortorrômbica e de alta dureza. A cementita dá origem a um eutetoide de extrema importância nos estudos dos aços, a perlita (SILVA, André; MEI, Paulo; 2010).

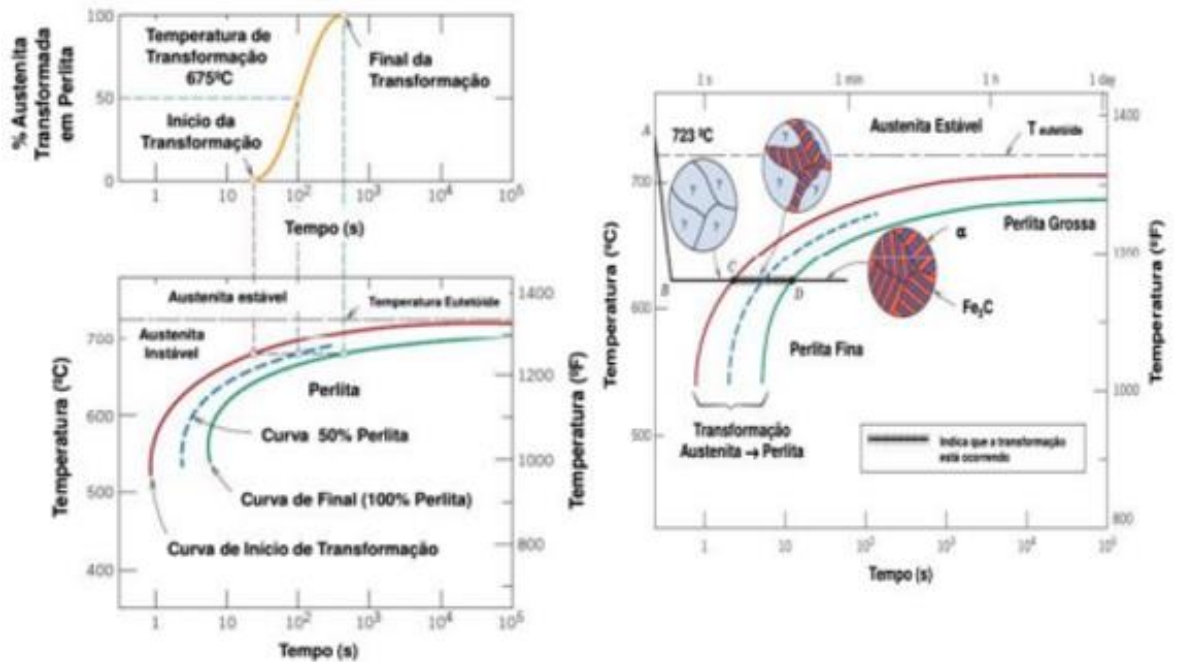
Por fim, a perlita: É um microconstituente formado através da combinação entre as fases da ferrita e cementita, sendo que as espessuras das lamelas de ferrita são superiores às da cementita. (Souza et., 2015, CASLLISTER, 2008 e PANDOLFO, 2009).

3.5 Diagrama temperatura – tempo – transformação

Para Krauss (1980) e Barreiro (1985) curva C ou TI (transformação isotérmica), é o diagrama TTT (temperatura-tempo-transformação). Com este diagrama é possível determinar o tempo para cada temperatura, o início e fim das transformações isotérmicas da austenita em outros constituintes.

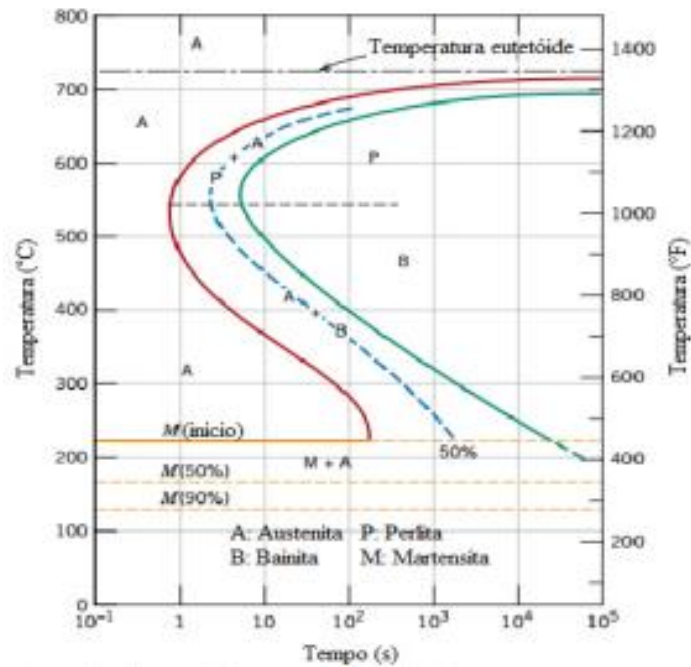
As Figuras 7 e 8 representam o diagrama TTT e suas relações com o tempo e as microestruturas esperada.

Figura 7 – Diagrama TTT



Fonte: DOS SANTOS, Hedipo (2021).

Figura 8 - Diagrama TTT a partir de medições da porcentagem da transformação em função do logaritmo do tempo.



Fonte: DOS SANTOS, Hedipo (2021).

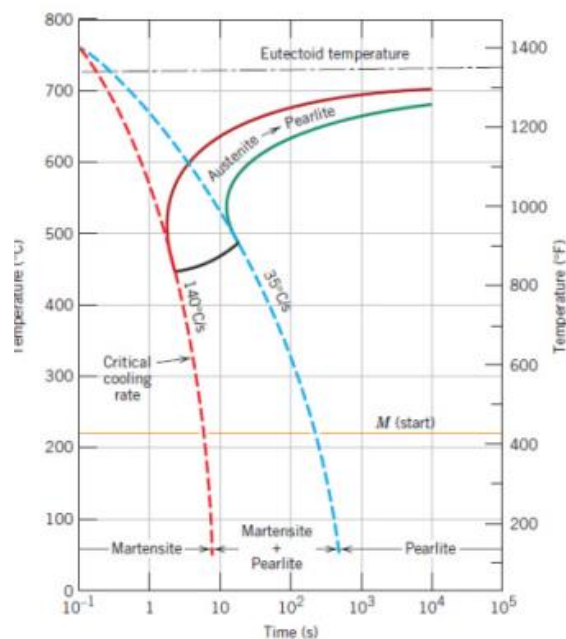
Dos Santos (2021), relata que a presença de elementos de liga como: Cr, Ni, Mo e W, pode causar alterações significativas nesses diagramas, como alterações nos valores de temperatura de início (M_s) e de fim (M_f) e o aumento ou diminuição

das regiões de austenita e bainita. As regiões mais importantes no diagrama de equilíbrio Fe-C são a região austenítica e a região crítica localizada entre as linhas de transformação. Essas linhas delimitam a transformação da austenita no resfriamento e a substituição da austenita no aquecimento. E as linhas de início (Ms) e de fim (Mf), que são as linhas que determinam o início e o fim da transformação de difusão martensítica.

3.6 Diagrama CCT

Dos Santos (2021) relata que no resfriamento contínuo o tempo que leva para a reação começar e terminar é retardado, e a curva se desloca para tempos mais longos e temperaturas mais baixas. A transição começa após um período de tempo correspondente à interseção da curva de resfriamento e da curva de início da reação e termina na interseção da curva e da transição. Como o diagrama é muito importante na engenharia pelo simples fato de usar resfriamento contínuo. Isso o torna favorável para qualquer tratamento térmico. Na Figura 9 abaixo, apresenta um diagrama CCT.

Figura 9 - Diagrama de transformação por resfriamento contínuo para uma liga ferro - carbono.



Fonte: DOS SANTOS, Hedipo (2021).

3.7 Tratamentos térmicos

Tratamento térmico é um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento. O tratamento térmico é bastante utilizado em aços de alto teor de carbono ou com elementos de liga. (REBECHI,2011).

Segundo Trindade et al. (2017) o aquecimento geralmente é feito a uma temperatura crítica porque neste ponto o aço está totalmente austenitizado, ou seja, o carboneto de ferro está completamente dissolvido no ferro gama: esta austenitização do aço é o ponto de partida para outras transformações necessárias, que exigirão uma posição dependente da taxa de resfriamento usada. Durante o estágio de aquecimento, deve-se levar em consideração a taxa de aquecimento e a temperatura máxima de aquecimento.

Resfriamento, este é o fator mais importante, pois ele que determinará efetivamente a estrutura e, em consequência, as propriedades finais dos aços. Os meios de resfriamento mais usados são: ambiente do forno, ar e meios líquidos. O resfriamento que menos se tem uma mudança drástica é o realizado no interior do forno e ele se torna mais severo à medida que se passa para o ar ou para um meio líquido, em que a extrema agitação dá origem aos meios de resfriamento mais drásticos ou violentos (TRINDADE et al. 2017).

Segundo Bortoleto (2010), as estruturas dos aços estão ligadas as suas propriedades, assim sendo os tratamentos térmicos que determinarão as modificações das propriedades dos aços. As tensões internas de origem da fabricação do aço, são os principais alvos para a aplicação deste processo, uma vez que elas visam modificá-las, como a redução ou aumento da dureza do material ou sua resistência mecânica e a melhoria da ductilidade, usinabilidade e resistência ao desgaste e à corrosão.

Os tratamentos térmicos dos aços podem ser realizados desde temperaturas abaixo de 0°C (tratamento térmico subzero), até as denominadas temperaturas de austenitização, que em alguns tipos de aços podem ultrapassar 1000°C (SILVA, André; MEI, Paulo; 2010).

Para Rebechi (2011), o tratamento térmico é específico para o propósito da microestrutura desejada, que é responsável pelas mudanças das propriedades

mecânicas, como também a melhora da próxima etapa produtiva ou uso final. A tabela 1 mostra brevemente os possíveis microconstituintes ou fases que se formam durante os ciclos de aquecimento e resfriamento nos tratamentos térmicos dos aços.

Tabela 1 – Fases e microconstituintes dos aços

Fase (microconstituente)	Estrutura Cristalina	Características
Ferrita (Ferro α)	CCC - Cúbica de corpo centrado	Fase relativamente mole a baixas temperaturas. Estável no equilíbrio.
Austenita (Ferro γ)	CFC - Cúbica de fase centrada	Fase relativamente mole a temperatura intermediária. Estável no equilíbrio.
Cementita (Fe_3C)	Ortorrômbica complexa	Fase metaestável de elevada dureza.
Perlita		Misturar lamelar de ferrita e cementita.
Martensita	TCC – Tetragonal de corpo centrado (Solução supersaturada de C na ferrita)	Fase metaestável de elevada dureza. Morfologia em ripas para aços com teores abaixo de 0,6% de C. Morfologia mista para teores intermediários.
Bainita		Estrutura metaestável. Mistura muito fina não lamelar de ferrita e cementita. Classificadas como Bainita superior e inferior, diferem uma da outra pela dureza e morfologia.

Fonte: REBECHI, (2011).

Os principais tratamentos térmicos aplicados aos aços são recozimento, têmpera, normalização e revenimento.

3.7.1 Recozimento

Segundo Chiaverini 1988, um dos objetivos do tratamento térmico é reduzir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço, ajustar o tamanho do grão, ajustar a estrutura de fusão original, produzir uma microestrutura bem definida, entre outros.

O recozimento total ou pleno consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica, durante o tempo necessário, seguido de um resfriamento muito lento com uma velocidade de resfriamento relativa ao forno ou deixando que o aço esfrie junto com

ele. (CHIAVERINI 1988).

3.7.2 Recozimento isotérmico ou cíclico

É o aquecimento do aço nas mesmas condições que para o recozimento total. Depois o aço é resfriado rapidamente até uma temperatura dentro da porção superior do diagrama de transformação isotérmico, até se produzir a transformação completa (CHIAVERINI 1988).

3.7.3 Recozimento para o alívio de tensões ou subcrítico.

É o aquecimento do aço a temperaturas abaixo do limite inferior da zona crítica com o objetivo de aliviar as tensões de solidificação ou de operações de transformação mecânica a frio ou de endireitamento (CHIAVERINI 1988).

3.7.4 Esferoidização

É o aquecimento e resfriamento em condições a produzir uma forma globular ou esferoidal de carboneto no aço para melhorar a usinabilidade e trabalhabilidade a frio os aços, principalmente os de médio a alto teor de carbono (CHIAVERINI 1988).

3.7.5 Têmpera

O tratamento térmico da têmpera, consiste em aquecer o aço acima da temperatura de austenitização, mantê-lo nesta temperatura, até que a austenita esteja uniformizada e posteriormente resfriá-lo suficientemente rápido, obtendo assim, a martensita (FARIAS,2009 e SILVA, André; MEI, Paulo; 2010).

De acordo Chiaverini, (1988) a normalização é quando um aço é aquecido em uma temperatura acima da zona crítica e depois resfriado ao ar tranquilo. Isto tem como objetivo refinar a granulação de peças de aço fundido, peças forjadas ou laminadas. Trata-se de um tratamento preliminar à têmpera e ao revenido, assim vai possuir uma estrutura uniforme, facilita a solução de carbonetos, reduz o empenamento e elementos de liga.

3.7.6 Revenimento

Segundo Smith (1993), o revenimento é um tratamento térmico complementar à têmpera realizado em etapas. Sua finalidade é melhorar as propriedades do aço temperado, como reduzir a dureza e aumentar a tenacidade. No revenimento temos uma grande dependência da temperatura, em seu comportamento durante os processos térmicos e em várias etapas facilita possíveis modificações como: transformação de martensita tetragonal em martensita cúbica, segregação de carbono, precipitação de carbeto, decomposição de austenita retida, a recuperação da matriz ferrítica e a recristalização da matriz ferrítica.

3.8 Metalografia

A metalografia, normatizada pela norma ASTM E407-99, é a ciência que estuda e caracteriza o comportamento microestrutural e elementos constituintes dos metais, ligas e outros materiais. Apresenta-se como a mais importante técnica de análise microestrutural dos metais, sendo possível definir as fases e a orientação cristalográfica dos grãos presentes (VANDER VOORT, 2004)

Segundo Andrade Filho (2004) a metalografia não se limita ao controle de qualidade, mas também é uma ferramenta para a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais, uma técnica fácil de usar, simples e rápida que permite ampla análise dos materiais estudados.

Na metalografia, utilizam-se reagentes para o ataque da superfície a ser analisada. Esses reagentes têm por finalidade a corrosão localizada de certas fases do material ou a diferença de potencial de regiões da superfície (ASM HANDBOOK ,2004)

Existem diversos materiais nos quais a metalografia é utilizada, entre eles está o aço. Definido como uma liga ferro-carbono que contém entre 0,008% e 2,11% em peso de carbono presente em sua composição, os aços podem ser classificados em dois grandes grupos: aços carbono e aços ligados (CHIAVERINI, 1998). Conforme a disposição dos elementos químicos na microestrutura do material, pode haver incidência de modificação de fases e/ou formação de fases diferentes, tais como os carbonetos, precipitações de C₂MX, em que há a ligação química iônica de um elemento metálico ao carbono (LIMA; FERRARESI, 2009).

ASM Handbook (2004) relata que a metalografia é a ciência que estuda e caracteriza a microestrutura dos materiais. Esta técnica é usada com a aplicação de microscopia. Basicamente, existem três tipos de microscópios amplamente utilizados na engenharia de materiais, a saber: microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e microscopia eletrônica de transmissão.

Colpaert (2008) diz que as técnicas de metalografia (eletrônica, macrografia e microscopia óptica) pode-se separar em dois grupos: macroscópio que permite o aumento de até 10 vezes na visualização dos materiais e microscópio que pode ter valores de aumento muito maiores.

As suas grandezas de resolução são apresentadas na Tabela 2. Dentre os tipos, a microscopia óptica é a mais utilizada na metalografia.

Tabela 2 - Resolução média das três principais técnicas de microscopia usadas na engenharia de materiais

Técnica	Resolução (A)
Microscopia óptica (reflexão e transmissão)	3000
Microscopia eletrônica de varredura	200
Microscopia eletrônica de transmissão:	
a) Réplicas	50
b) Lâmina fina	3

Fonte: BEPPLER, Rhafael (2016).

3.8.1 Microscopia óptica

De acordo com Colpaert (2008), a microscópica óptica estuda os metais e suas ligas, com o uso de um microscópio, com a finalidade de determinar seus componentes, usa-se um reagente químico em uma superfície anteriormente polida. As amostras precisam, ser previamente lixadas e para isto utiliza lixas granulometrias menores e após o lixamento são polidas com o uso de alumina ou pasta de diamante.

Finalizados os processos de lixamento e polimento, é feito o ataque químico na superfície escolhida, sendo importante nesta etapa, a seleção do reagente mais adequado para o material analisado, pois cada reagente destaca e detalha tipos específicos de microconstituintes (COLPAERT,2008).

3.8.2 Macrografia

Para Colpaert (2008), a análise de uma macroestrutura metálica de superfície plana, anteriormente lixada e com o ataque químico realizado, tem o nome de macrografia. O reagente de iodo é um dos químicos mais usados na macrografia, porque além da facilidade na aplicação possui uma flexibilidade em sua utilização. O reativo de iodo tem como composição:

Iodo sublimado: 10 g;

Iodeto de potássio: 20 g;

Água: 100 ml

Na maior parte das situações, este ensaio é feito a olho nu, sem instrumento auxiliar, ou com o uso de uma lupa, desde que não exceda a ampliação de 10 vezes. (COLPAERT 2008).

4. METODOLOGIA

Neste trabalho, foi utilizado o aço SAE 1020, possui alta tenacidade e é adequado para receber tratamentos térmicos superficiais, resultando diversas variações de propriedades.

Esse aço é aplicado em chapas automobilísticas, perfis estruturais, placas para produção de tubos, construção civil, porcas, longarinas, disco de rodas, eixos, peças para máquinas em geral, flandres e indústria de óleo e gás (BRANCO, 2007).

4.1 Preparação das amostras metalográficas.

A técnica de ensaio micrográfico pode ser dividida nas seguintes fases: escolha e localização da seção a ser analisada; obtenção de uma superfície plana e polida na seção selecionada; ataque da superfície por um reagente químico adequado; exame ao microscópio para a observação e obtenção de fotografias (COLPAERT, 2008). Cada uma dessas etapas pode ser realizada utilizando diferentes métodos e podem variar de acordo com as propriedades específicas do material. Deve-se realizar cada uma das fases de preparação com grande cuidado, pois cada etapa pode afetar os estágios posteriores (PETZOW, 2001).

4.2 Seccionamento

As amostras para análise metalográfica foram retiradas de uma barra de aço 1020 disponível no laboratório de Engenharia Mecânica, foi realizado um corte a 90 graus no corpo de prova, resultando em uma amostra com dimensão de 20 milímetros de comprimento e diâmetro de 18 milímetros e outra amostra com dimensão de 50 milímetros de comprimento e diâmetro de 18 milímetros. O corte foi feito com auxílio de uma cortadora metalográfica de bancada CM40 - Teclago, do Laboratório Metalografia da UFOB, figura 10.

Figura 10 - Cortadora metalográfica



Fonte: Autor, 2022.

A operação de seccionamento por serramento com cortadora metalográfica não gera calor suficiente para alterar a microestrutura do material. Entretanto, durante a operação de corte, é importante haver o cuidado para não ocorrer excessivo aquecimento do material, controlando a velocidade de corte e avanço durante o seccionamento.

4.3 Tratamento térmico

Foi selecionada a amostra com 50 milímetros de comprimento e diâmetro de 18 milímetros para passar pelo tratamento térmico de recozimento.

A amostra foi levada ao forno a uma temperatura de 875°C por um período de 2 horas, ao finalizar esse tempo a amostra permaneceu dentro do forno fechado para

um resfriamento lento e natural. A Figura 11 apresenta a amostra tratada.

Figura 11- Aço 1020 após recozimento



Fonte: Autor,2023.

Em seguida, a amostra passou pela cortadora novamente resultando em 10 milímetros de comprimento, para ser utilizada no embutimento.

4.4 Embutimento

Após o seccionamento, as amostras foram submetidas ao embutimento a quente.

Esta etapa foi realizada para facilitar o manuseio, evitar a danificação da lixa e do pano de polimento e abaulamento da superfície, que acarreta dificuldades ao se observar às amostras. Foi utilizado desmoldante e resina fenólica (baquelite) para o embutimento realizado na embutidora metalográfica EM30D do Laboratório de Metalografia da UFOB, figura 12.

Figura 12- Embutidora metalográfica EM30D



Fonte: Autor, 2022.

4.5 Lixamento

Esse processo tem como objetivo a remoção de riscos e deformações provenientes do seccionamento do material e a realização de uma superfície plana cuja profundidade de deformação seja suficientemente fina, de tal forma que permita seu desaparecimento após a posterior etapa de polimento. A técnica consiste no lixamento da amostra, sucessivamente, com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente, até desaparecerem os traços da lixa anterior (PETZOW, 2001).

Neste estudo, para o processo de lixamento foram utilizadas lixas d'água com diferentes granulometrias: 150, 220 e 230, sucessivamente. Esse procedimento foi realizado em uma lixadeira e Politriz modelo PLF da marca Fortel, no laboratório de metalografia da UFOB, figura 13.

Figura 13 - Lixadeira e Politriz modelo PLF da marca Fortel



Fonte: Autor, 2022.

4.6 Polimento

A finalidade desta etapa do processo mecânico é obter uma superfície plana, sem riscos e com alta refletividade. A existência de riscos atrapalha o exame da superfície da amostra. Quando o polimento remove os riscos no material sem remover também a parte encruada subjacente, a superfície pode atingir um acabamento aparentemente satisfatório (com brilho especular e sem arranhões visíveis), com aparência bem polida. Porém, quando se ataca esta amostra, o resultado do ataque não é uniforme, pois o reagente corrói preferencialmente as regiões mais encruadas da superfície, resultando em micrografias que apresentam heterogeneidades artificiais (COLPAERT, 2008). De acordo com a norma ASTM E 407 (2007) um polimento de extrema qualidade é requisito essencial para a realização de ataque colorido, pois o mesmo poderá revelar defeitos decorrentes do processo de polimento, mesmo que esses não sejam visíveis com iluminação de campo claro.

Para o polimento, primeiro foi realizada uma operação de limpeza por lavagem com água e álcool etílico, e assim foi utilizado a politriz modelo PLF e marca Fortel, do laboratório de metalografia da UFOB, usando os respectivos panos de polimento metalográfico com alumina líquida.

A avaliação qualitativa da superfície polida será controlada com auxílio do microscópio óptico de bancada objetivando-se uma superfície plana e com ausência de riscos. Nesta etapa, a limpeza das amostras foi feita com água destilada e secagem com ar frio forçado. A Figura 14 apresenta as amostras após passar pelos processos

de embutimento, lixamento e polimento.

Figura 14 - Amostras embutidas, lixadas e polidas.



Fonte: Autor, 2023.

4.7 Ataques químicos

De acordo com Vander Voort (1999) e Petzow (2001), a superfície de um metal polido reflete corretamente a luz uniformemente e não permite distinguir os componentes microscópicos de sua estrutura. A microestrutura só pode ser revelada por ataques apropriados. Para obter condições de contraste bem definidas após o ataque químico, algumas medidas devem ser tomadas: o polimento da superfície deve ser eficaz, a amostra a ser atacada deve ter sido limpa, os reagentes devem ter sido selecionados, a preparação e as condições de ataque devem ser cuidadosamente controladas.

Para atingir os objetivos deste trabalho foi utilizado o reagente Nital 10%, solução composta de 90% de álcool etílico e 10% de ácido nítrico, foi aplicado na superfície das amostras por um período de 2 minutos e em seguida lavado com água corrente e seco de modo natural. A Figura 15 apresenta as amostras recebendo o ataque químico.

Figura 15 - Amostras recebendo ataque químico.



Fonte: Autor,2023.

A figura 16 apresenta as amostras após a finalização do ataque químico com a peça já lavada.

Figura 16 - Amostras após ataque químico



Fonte: Autor,2023.

4.8 Microscopia ótica

Após o ataque químico, as amostras (com e sem tratamento térmico) foram analisadas utilizando o microscópio óptico – Kontrol com a lente de 40x e com o auxílio do computador foram capturadas imagens de cada amostra. A Figura 17 apresenta o microscópio óptico do laboratório de Engenharia Mecânica.

Figura 17 - Microscópio Óptico



Fonte: Autor,2023.

4.8 Ensaio de Dureza

A dureza Vickers é uma medida da resistência que um material apresenta à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada, quando submetida a uma carga específica. O valor da dureza Vickers (HV) é calculado dividindo-se a carga aplicada pela área da impressão deixada no corpo de ensaio. Essa medida fornece informações sobre a capacidade do material em resistir a deformações plásticas localizadas.

Nesse ensaio foi obtido 10 medidas da dureza de cada amostra utilizando o instrumento de precisão DIGIMESS do laboratório de Engenharia Mecânica, em seguida foi calculada a média e comparada ambas amostras. A figura 18 apresenta o instrumento de ensaio.

Figura 18 - microdurômetro



Fonte: Autor,2023.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O aço 1020, quando não passa por tratamento térmico, apresenta uma estrutura cristalina composta por ferrita e perlita. Essa estrutura é relativamente macia e possui baixa resistência à tração. Em relação à dureza, o aço 1020 não tratado é considerado relativamente baixo. Já o aço 1020 tratado com o processo de recozimento passa por um aquecimento em uma temperatura específica, seguido por um resfriamento lento. Esse procedimento permite que o aço fique mais macio, relaxando as tensões internas e refinando sua estrutura cristalina. Durante o recozimento, os átomos de carbono têm a oportunidade de se difundir e formar grãos maiores.

Como resultado do recozimento, o aço 1020 adquire uma microestrutura mais refinada e maior ductilidade. No entanto, a dureza do aço 1020 tratado com recozimento é menor em comparação com o aço não tratado. Isso acontece porque a estrutura refinada e os grãos maiores resultantes do recozimento tornam o aço mais suscetível a deformações plásticas, o que reduz sua dureza. A Tabela 3 apresenta os resultados da dureza das amostras.

Tabela 3 – Resultado da dureza das amostras

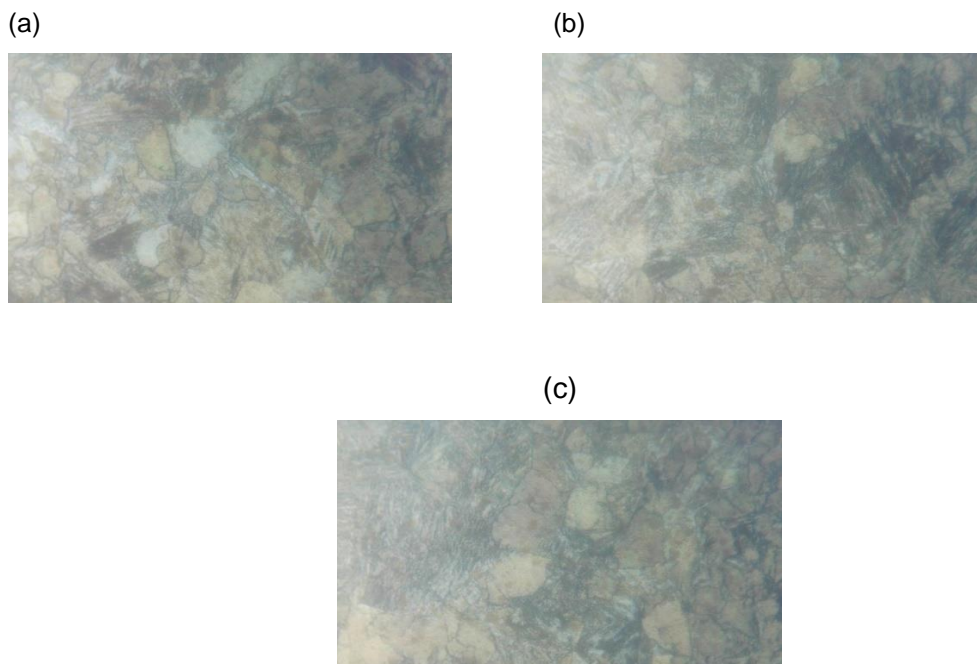
Resultado de Dureza para amostra recozida		Resultado de Dureza para amostra não tratada	
1	126,2 HV	1	268,3 HV
2	114,6 HV	2	281,7 HV
3	112,8 HV	3	288,7 HV
4	120,2 HV	4	346,9 HV
5	126,2 HV	5	288,8 HV

6	118,3 HV	6	281,7 HV
7	130,5 HV	7	281,7 HV
8	147,3 HV	8	356,6 HV
9	142,2 HV	9	268,3 HV
10	120,2 HV	10	274,9 HV
Média	115,85 HV	Média	293,77 HV

Fonte: Autor, 2023.

Com base na figura 19, é possível observar, por meio da lente de aumento de 40x do microscópio óptico, a microestrutura granular do aço 1020 sem tratamento térmico e seus microconstituintes. A microestrutura apresenta grãos de Ferrita (α) (fase clara) e grãos de Perlita (fase escura). Essas características são evidentes após o ataque químico realizado.

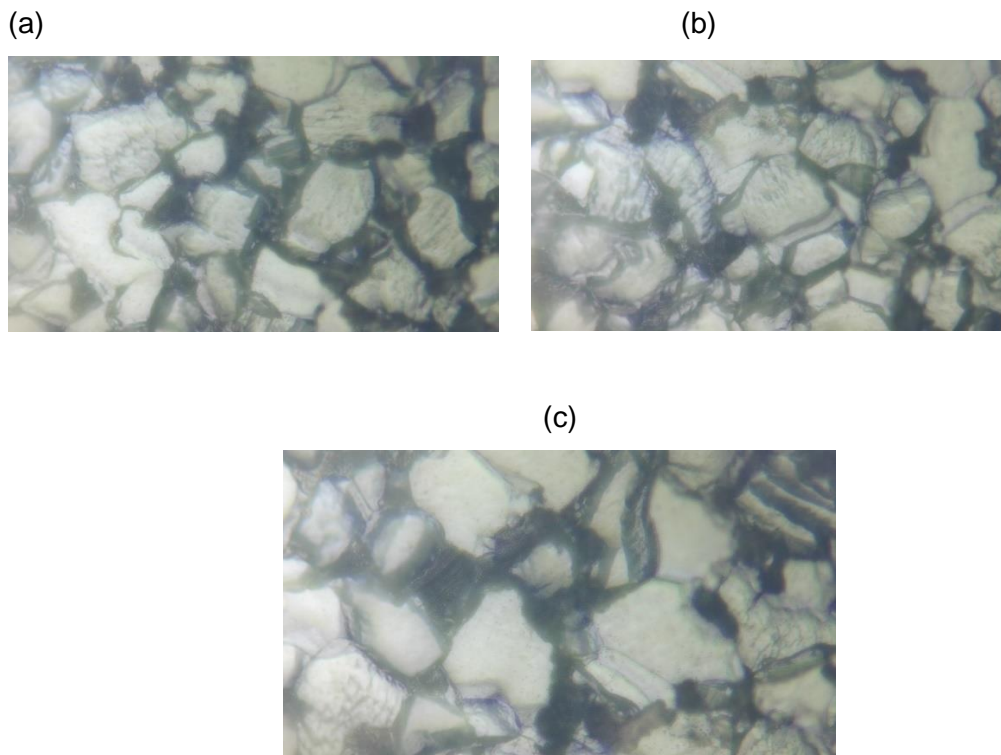
Figura 19 - Micrografia do aço 1020, sem tratamento (a),(b) e (c) Ampliação de 400x em pontos diferentes.



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 20 exibe a microestrutura da amostra que foi submetida a um tratamento de recozimento após o ataque químico. Observa-se nas figuras que houve uma diminuição dos grãos de Perlita, resultando em uma parcial esferoidização da mesma, e um aumento dos grãos de Ferrita (α).

Figura 20 - Micrografia do aço 1020, com tratamento (a),(b) e (c) Ampliação de 400x em pontos diferentes.



Fonte: Autor, 2023.

Com isso, a microdureza foi reduzida em média 177,92 HV, quando comparada com a amostra não tratada.

6. CONCLUSÃO

A caracterização microestrutural dos materiais é de extrema importância para explicar suas propriedades e comportamento, através da análise e observação das fases e constituintes presentes nas amostras. Para obter resultados satisfatórios na análise micrográfica, foi necessária uma prática metalográfica adequada tanto na preparação das amostras, quanto no processo de análise. Isso possibilitou uma observação criteriosa da estrutura obtida, tanto na amostra não tratada quanto após o tratamento térmico. Assim, ao realizar a análise micrográfica, foi possível concluir que ocorreram as modificações estruturais aguardadas nas amostras de aço 1020. Portanto, embora que para uma melhor caracterização diferentes ensaios devem ser realizados, os resultados foram considerados satisfatórios, visto que houve alterações na dureza e na microestrutura das amostras.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 407: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. 2007.
- BARREIRO, José Apraiz. **Tratamientos térmicos de los aceros**. Dossat, 1985.
- BEPPLER, Rhafael; GALIOTTO, Alexandre. **Comparação metalográfica do ataque por oxidação do aço SAE 1045 e SAE 4140**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 22.Anais..., 2015, Campos dos Goytacazes: ABCM, 2015. p. 1 – 6.
- BORTOLETO, Eleir Mundim. **Modelamento numérico-computacional das transformações de fase nos tratamentos térmicos de aços**. 2010. Dissertação apresentada à Escola Politecnica da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Mestre em Engenharia.
- BRANDON, D.; KAPLAN, W. D. **Microstructural Characterization of Materials**. 3ed.Chichester: John Wiley & Sons.1999. 409p.
- CALLISTER, W. D. J; RETHWISCH, D. G; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2015
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998.
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Bluchter, 2008. 652 p. Revisão técnica André Luiz V. da Costa.
- DOS SANTOS, Hepino Pereira. **Caracterização Microestrutural dos aços 1020, 1045, 5160, 8620 após os determinados tipos de tratamentos térmicos de têmpera, revenimento, normalização e recozimento**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título Bacharel em Engenharia Metalúrgica.
- FARIAS,A. **Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço ABNT cementado**. 2009.191 páginas. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- LIMA, Aldemi Coelho; FERRARESI, Valtair Antonio. **Análise da Microestrutura e da**

- Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira.** Soldagem & Inspeção, Goiânia, v. 14, n. 2, p.140-150, abr. 2009.
- LUZ, Gelson. Aço SAE 1020 Propriedades e Fornecedores do Aço 1020. **Blog Materiais**,2017. Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 08 de outubro de 2022.
- KRAUSS, George. Steels: heat treatment and processing principles. 6. ed. Ohio: ASM International, 2000.
- PADILHA, Angelo F.; AMBROZIO FILHO, Francisco. Técnicas de análise microestrutural. Brasil: Hemus, 2004. 190 p.
- PANDOLFO, D. **Estudo da tenacidade ao impacto de um aço 1020 submetido a tratamentos térmicos.** 2009. 98 páginas. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- PETZOW, G. Metallographic Etching: Techniques for Metallography, Ceramography, Plastography. 2.ed. Ohio, American Society for Metals. ASM International, 2001. 240p.
- REBECHI, João Guilherme. Correlações numéricas entre taxas de resfriamento, microestruturas e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do aço AISI/SAE 4140. 2011.
- RIBEIRO, J; COSTA, D; SILVA, M; **Carecterização Microestrutural do Aço SAE 1080 Após Diferentes Tratamentos Térmicos**, EDITORA 2017.
- SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais.** 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- SMITH, William Fortune. Structure and properties of engineering alloys. McGraw-Hill Book Co., xiv+ 512, 23 x 16 cm, illustrated(16. 95), 1993.
- TRINDADE, Denisson R..et al. Estudo e Avaliação do Tempo de Permanência a Temperatura no Tratamento Térmico de Têmpera do Aço Sae 1045. 2017.
- VANDER VOORT, G. F. (Asm International) (Ed.). HANDBOOK: metallography and microstructures. Materials Park, Ho: ASM Handbook, 2004. 2733 p. Volume 9.
- VANDER VOORT, George F. Color Metallography. Microscopy Today, Illinois, v. 1, n. 1, p.22-27, nov. 2005.
- VANDER VOORT, G. F. Metallography, Principles and Practice. New York: McGraw-Hill, 1999. 752p.