

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Faculdade de Tecnologia de São Paulo Curso de
Tecnologia em Materiais

TEMPERABILIDADE DE AÇOS COMUNS E LIGADOS COM TEORES DE CARBONO SIMILARES

Fernanda Nascimento

São Paulo

2019

Fernanda Nascimento

**TEMPERABILIDADE DE AÇOS COMUNS E LIGADOS
COM TEORES DE CARBONO SIMILARES**

Monografia apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Tecnólogo em Materiais pela Faculdade de
Tecnologia de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Marcos D. Xavier

São Paulo

2019

*Dedico este trabalho aos meus familiares, amigos
e professores que contribuíram com apoio,
incentivo e conhecimento nessa jornada.*

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas que me apoiaram durante meu período de estudos, principalmente aos meus familiares e amigos que, mesmo querendo me tirar um pouco do foco para me divertir, foram cruciais para minha estabilidade, força de vontade, firmeza e serenidade.

Aos professores que mesmo com toda dificuldade ou facilidade, passaram o conteúdo de forma que me agregasse mais e mais conhecimento, professores esses que foram pacientes, companheiros, transformadores e capacitados a extrair o nosso melhor de diversas maneiras possíveis, sendo pelo amor ou pela dor.

Agradeço ao meu orientador Marcos Domingues Xavier por, além de ser um excelente profissional e ótima pessoa, ser responsável por grande parte do meu aprendizado em metalurgia e por me orientar neste trabalho.

Ao professor Luis Fernando Maffei Martins por ser responsável pelo meu aprendizado em metalurgia física e tecnologia da conformação plástica, uma das matérias mais complexas, na área de metais, que foram passadas com maestria. Agradeço pelo incentivo, cuidado, dedicação e companheirismo.

Ao professor Sérgio Pamboukian, de soldagem, pelo aprendizado nessa matéria e por soldar uma chapa de apoio para o meu ensaio.

Agradeço ao Caio Rodrigues de Sousa, auxiliar docente, pelo companheirismo, por toda ajuda desde os ensaios e conteúdos de aula até os ensaios, materiais e idéia para este trabalho.

Ao professor Manoel Cavalcante, do SENAI, por fazer a espectroscopia para a caracterização das amostras deste trabalho.

Agradeço ao professor Carlos Nunes pelo aprendizado em preparação de amostras para micrografias.

A Daniela Nascimento, minha irmã, e a Aline Gualberto da Silva pela ajuda com os ensaios, amizade, companheirismo, força e dedicação.

Ao professor Cleber Corrêa Vieira, pelo aprendizado em fundição com interdisciplinaridade, pesquisas de campo e visitas técnicas.

A professora Lilian Satomi Hanamoto, pelo conhecimento compartilhado em química e por ensinar a manusear e escrever artigos técnicos de maneira mais assertiva.

Ao professor Norberto Helil Pasqua e a professora Regina Maria Ricotta, ambos de física, pelo aprendizado e incentivo em toda minha permanência no período de estudos, obrigada pelo companheirismo, dedicação e amor ao trabalho.

Por fim, agradeço a Fatec São Paulo pela infraestrutura e excelência no ensino.

“Sem dados você é apenas mais uma pessoa com uma opinião.”

(William Edwards Deming)

Resumo

Este trabalho tem a função de demonstrar o uso do ensaio Jominy como método de determinação de temperabilidade para diferentes aços, comparando suas propriedades em relação ao seu teor de carbono, sua composição química e microestrutural. Para isso, utilizamos duas amostras de aço com teores de carbono similares e composições químicas diferentes, sendo eles SAE1050 e SAE4340. Foi analisado o comportamento de ambos antes e depois do tratamento térmico com medições de durezas, cortes, análises microestruturais e obtenção de curva de dureza para comparação com a literatura.

Palavras-chave: SAE1050, SAE4340, Temperabilidade, Martensita, Jominy.

Abstract

This paper has the function of demonstrating the use of the Jominy test as a method of determination of temperability for different steels, comparing their properties in relation to its carbon content, its chemical and microstructural composition. For that, we use two steel samples with similar carbon contents and chemical compositions different, being SAE1050 and SAE4340. The behavior of both before and after heat treatment with hardness measurements, cuts, analyzes microstructural structures and obtaining a hardness curve for comparison with the literature.

Keywords: SAE1050, SAE4340, Temperability, Martensite, Jominy.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 – Ferro	2
2.1.1 - Alotropia do Ferro	3
2.2 – Liga Ferro-Carbono	4
2.2.1 – Diagrama de fases Ferro-Carbono	7
2.2.2 – Campos de Fases	9
2.3 - Aço	10
2.3.1 – Classificação dos aços no diagrama Ferro-Carbono	10
2.3.2 – Aços microligados	11
2.3.3 – Classificação dos aços SAE e AISI	15
2.4 – Temperabilidade	17
2.4.1 – Curvas TTT	17
2.4.2 – Tratamentos térmicos	19
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 – Ensaio Jominy	20
3.2 – Medições de dureza	23
3.2.1 – Ensaio Grossman	26
3.3 – Corte	28
3.4 – Micrografias	28
3.4.1 – Lixamento	28
3.4.2- Polimento	29
3.4.3 – Ataque químico	30
3.4.4 – Microscopia	31
3.5 – Composição química	31
3.5.1 – Porcentagem de carbono	31
3.5.2 – Aço SAE1050	32
3.5.3 – Aço SAE4340	33
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 – Medições de dureza	34
4.2 – Metalografias	40
5 - CONCLUSÃO	43
5.1 – Sugestões para trabalhos futuros	44

Lista de Tabelas

Tabela 1: Concentração média de um elemento químico na crosta terrestre.	2
Tabela 2: Classificação dos elementos de liga.	15
Tabela 3: Classificação dos aços segundo a SAE e AISI.	16
Tabela 4: Escalas de dureza Rockwell.	24
Tabela 5: Resultado da análise via combustão com as porcentagens de Carbono e Enxofre das ligas SAE4340 e SAE1050.	32
Tabela 6: Análise de espectroscopia do SAE1050.	32
Tabela 7: Análise de espectroscopia do SAE4340.	33
Tabela 8: Medições de dureza em Rockwell C da amostra SAE4340.	34
Tabela 9: Medições de dureza em Rockwell C da amostra SAE1050.	35
Tabela 10: Medições de dureza Rockwell C das amostras originais.....	38
Tabela 11: Medições de dureza Rockwell C em método Grossman do SAE4340.	39
Tabela 12: Medições de dureza Rockwell C em método Grossman do SAE1050.	39

Lista de Figuras

Figura 1: Comparação da alotropia do ferro e H ₂ O em determinadas faixas de temperatura....	3
Figura 2: Estruturas cristalinas cúbica de corpo centrado (CCC) e cúbica de face centrada (CFC).	3
Figura 3: Átomos de carbono nos interstícios de ligações de átomos de ferro na estrutura CCC.	4
Figura 4: Átomos de carbono nos interstícios de ligações de átomos de ferro na estrutura CFC.	5
Figura 5: Fator de empacotamento da estrutura CCC.	5
Figura 6: Fator de empacotamento da estrutura CFC.....	6
Figura 7: Fator de empilhamento ABC da estrutura CFC.	6
Figura 8: Diagrama de fases ferro-carbono, para teores de carbono de 0 a 6,67%.	7
Figura 9: Diagrama ferro-carbono com suas principais linhas e zona crítica.	8
Figura 10: Diagrama ferro-carbono com seus principais pontos.	9
Figura 11: Classificação dos aços hipoeutetóides, hipereutetóides e eutetóides com suas estruturas e ferros fundidos no diagrama ferro-carbono.	11
Figura 12: (a) Representação de átomo intersticial. (b) Interação entre partícula e discordância.	12
Figura 13: Diagramas TTT do aço (a) SAE1050 e (b) SAE4340.....	18
Figura 14: Dispositivo e corpo de prova para ensaio Jominy com suas dimensões.....	20
Figura 15: Cortadora metalográfica CM80. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.	20
Figura 16: Amostras de SAE1050 e SAE4340 cortadas na cortadora metalográfica CM80. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.	21
Figura 17: Amostra SAE1050 com chapa soldada pelo processo MAG.....	21
Figura 18: Identificação das amostras M e Y.....	21
Figura 19: Forno mufla FLYEVER FE50RPN. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.	22
Figura 20: Amostra SAE1050 sendo transportada do forno ao dispositivo de ensaio Jominy. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.	22

Figura 21: Amostra SAE1050 sendo resfriada no dispositivo Jominy. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.	22
Figura 22: Trilha para medições de dureza no corpo de prova do ensaio Jominy.....	23
Figura 23: (a) Trilha sendo realizada na lixadeira de fita Baldan LFH-2. (b) Amostras chanfradas. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.....	23
Figura 24: Distâncias a serem medidas, em milímetros, as durezas em Rockwell C ao longo do comprimento do corpo de prova.	25
Figura 25: (a) Análise de durezas no durômetro Officine Galileo A -200. (b) Cronômetro do celular ASUS. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.	25
Figura 26: Demonstração das medições de dureza Rockwell C na superfície temperada.	27
Figura 27: Amostras cortadas em faixas de durezas específicas.	28
Figura 28: Politriz lixadeira metalográfica PL02 ET Teclago. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.	29
Figura 29: (a) Pisseta com alumina e politriz com feltro de polimento. (b) Reagente alumina Fortel. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.	29
Figura 30: (a) Nital 2%. (b) Bequer com capsula de vidro. (c) Alcool Etílico 99,5% PA Gaal. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.	30
Figura 31: Secador de amostras. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.	30
Figura 32: (a) Microscópio AXIO Zeiss Vert. A1. (b) Microscópio Olympus BX60M. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.	31
Figura 33: Ilustração de retículo para medição de tamanho de grão de 1 a 10 da ASTM E112.	41
Figura 34: Fotometalografias das amostras cortadas, derivadas da amostra SAE4340, com suas respectivas medidas e aumentos de 100x e 500x.	41
Figura 35: Fotometalografias das amostras cortadas, derivadas da amostra SAE1050, com suas respectivas medidas e aumentos de 100x e 500x.	42

Lista de gráficos

Gráfico 1: Comparação de curva de força versus deslocamento do aço SAE1060, SAE1045 e SAE1020 normalizados.	12
Gráfico 2: Efeito dos elementos de liga na ferrita em relação à dureza.	13
Gráfico 3: Variação de temperatura eutetóide em relação aos elementos de liga adicionados e variação do teor de carbono nos aços hipoeutetóides e eutetóide em relação a porcentagem de elementos de liga.	14
Gráfico 4: Diâmetro crítico do método Grossman.	26
Gráfico 5: Curvas Grossman para o aço SAE1045.....	27
Gráfico 6: Durezas medidas em HRC da amostra SAE1050.	36
Gráfico 7: Durezas medidas em HRC da amostra SAE4340.	36
Gráfico 8: Dureza média da amostra SAE1050.....	37
Gráfico 9: Dureza média da amostra SAE4340.....	37
Gráfico 10: Comparação de durezas médias entre as amostras SAE1050 e SAE4340.....	38
Gráfico 11: Comparação de medidas superficiais da extremidade temperada do SAE4340 e SAE1050.	40

Lista de siglas e abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
Fatec-SP	Faculdade de tecnologia de São Paulo
SAE	Society of Automotive Engineers
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem
EUA	Estados Unidos da América
CCC	Cúbico de Corpo Centrado
CFC	Cúbico de Face Centrada
MAG	Metal Active Gas
TTT	Tempo-Temperatura-Transformação
Al	Alumínio
As	Arsênio
Bi	Bismuto
C	Carbono
Co	Cobalto
Cr	Crômio
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Fe ₃ C	Cementita
H ₂ O	Molécula de Água
HNO ₃	Ácido Nítrico
Mn	Manganês
Mo	Molibidênio
N	Nitrogênio
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
P	Fósforo
Pb	Chumbo
Sb	Antimônio
Si	Silício
Sn	Estanho
Ti	Titânio
V	Vanádio
W	Tungstênio
Zr	Zircônio

Lista de unidades

%	Porcentagem
"	Polegada
atm	Pressão atmosférica
cm	Centímetros
F	Força
h	Horas
HRC	Escala de medida de dureza Rockwell C
KN	Kilo Newton
mm	Milímetros
°	Grau
°C	Grau Célsiu
°F	Fahrenheit
Δl	Deslocamento
μ	Mícron

1 – INTRODUÇÃO

A produção de aço é um importante indicador de desenvolvimento de um país, pois a distribuição do mesmo é essencial para construções de projetos, produtos e processos de pequeno, médio e grande porte.

O aço por obter diversas propriedades, permitiu que através de estudos e pesquisas, fossem descobertas novas características combinadas a outros elementos, ou seja, com a pesquisa e desenvolvimento de aços, descobriu-se que ele, por si só, já havia comportamentos diferentes em relação ao seu teor de carbono e tratamentos térmicos sofridos. A partir daí, havia a necessidade de obtenção de algumas propriedades específicas sem que fossem alterados os teores de carbono, assim nascendo a adição de elementos de liga.[12]

Essas adições proporcionaram melhor qualidade do aço e fizeram com que a gama de produção de produtos derivados do mesmo subissem, com propriedades adequadas às suas determinadas aplicações.

A adição de elementos de liga é caracterizada pela combinação de composição química e estrutural, entre os elementos, para a formação e definição de propriedades de um aço.

Por conta de toda essa diversidade de ligas que foram desenvolvidas, surgiu a necessidade de conhecer suas propriedades características para melhor adequação no mercado, para isso, padronizaram-se métodos pelos quais essas propriedades fossem demonstradas e comparadas à literatura.

O método Jominy é uma delas, onde tem por fim a análise de temperabilidade dos aços.

A temperabilidade do aço é a habilidade de uma liga ser endurecida pela formação de martensita, onde, com o auxílio do ensaio Jominy, possibilita-se obter o conhecimento sobre a profundidade de transformação ou endurecimento de uma liga e a faixa de tempo e temperatura de tratamentos térmicos para a obtenção de determinada resistência mecânica.[1]

Combinado a esses tratamentos térmicos, temos a análise microestrutural para avaliar e explicar os diversos comportamentos obtidos conforme adições e tratamentos.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Ferro

O ferro é um elemento químico de símbolo Fe, número atômico 26 (26 prótons, 26 elétrons e 30 nêutrons) e massa atômica 55,847u. [3]

À temperatura ambiente, o ferro encontra-se no estado sólido e é extraído da natureza sob a forma de minério de ferro, sendo os mais abundantes: hematita e magnetita.

Este metal de transição é encontrado no grupo 8 (anteriormente denominado como VIIIB) na tabela periódica. [3]

É o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre (aproximadamente 5%), demonstrado na tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Concentração média de um elemento químico na crosta terrestre.

% em peso	
O	46,6
Si	27,7
Al	8,1
Fe	5,0
Ca	3,6
Na	2,8
K	2,6
Mg	2,1

Fonte: [11].

O ferro tem sido historicamente importante, pois com ele foram desenvolvidas novas tecnologias, sendo até denominado de Idade do Ferro um período histórico, onde a metalurgia se tornou fonte para a construção de artefatos que proporcionaram a defesa, exploração e conquista de novos territórios.

Atualmente, é utilizado extensivamente para a produção de aço, liga metálica voltada à produção de ferramentas, máquinas, veículos, elementos estruturais e diversas outras aplicações.

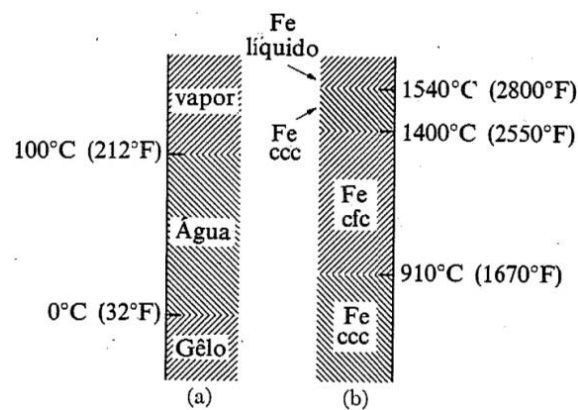
2.1.1 - Alotropia do Ferro

Alguns materiais, sendo metálicos ou não, possuem um fenômeno chamado polimorfismo. Esse fenômeno é caracterizado pela capacidade do material de se obter mais de uma estrutura cristalina.

Quando encontrado em sólidos elementares, essa capacidade é conhecida como alotropia, onde a estrutura cristalina que prevalece, depende da temperatura e pressão externa. Muitas vezes, há mudança de densidade e de propriedades físicas acompanhando a transformação polimórfica. [4]

O Ferro possui alotropia, ou seja, muda sua ordenação atômica conforme a temperatura atingida.

Figura 1: Comparação da alotropia do ferro e H₂O em determinadas faixas de temperatura.

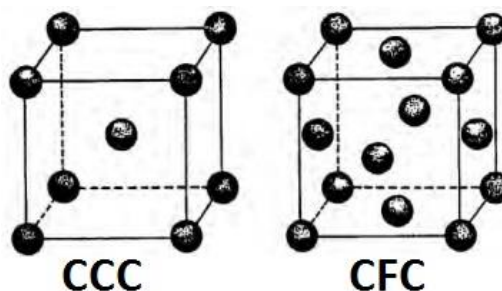


Fonte: [2].

A comparação acima demonstrada [figura 1] foi para melhor entendimento do que acontece com o ferro em determinadas faixas de temperatura com um exemplo cotidiano da água.

Abaixo [figura 2] está a demonstração ilustrativa das estruturas cristalinas:

Figura 2: Estruturas cristalinas cúbica de corpo centrado (CCC) e cúbica de face centrada (CFC).



Fonte: Adaptado de [2].

O ferro a 1 atm e até 912°C possui estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), de 912°C a 1394°C, cúbica de face centrada (CFC) e de 1394°C a 1538°C, que é a sua temperatura de fusão, cúbica de corpo centrado (CCC) e a partir de 1538°C encontra-se no estado líquido.

O ferro nessas diferentes estruturas possui denominações específicas, sendo elas:

- Ferro α (alfa), está na primeira faixa de temperatura, ou seja, até 912°C, com estrutura CCC é denominado Ferrita.
- Ferro γ (gama), se encontra na segunda faixa de temperatura, de 912°C a 1394°C, com estrutura CFC e denominação Austenita.
- Ferro δ (delta), situado no terceiro patamar de temperatura de 1394°C a 1538°C, com estrutura CCC e também chamado de Ferrita. Ele é análogo ao ferro α só diferindo a faixa de temperatura que se apresenta estável.

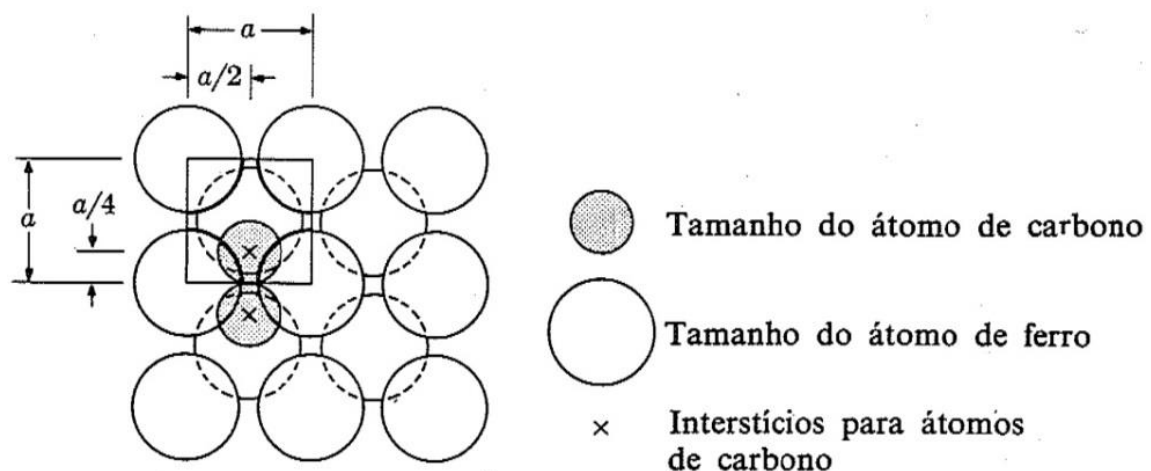
2.2 – Liga Ferro-Carbono

A liga ferro carbono é uma liga binária, ou seja, possui ligação entre dois elementos. Essa liga tem a denominação de aço ou ferro fundido dependendo da porcentagem de carbono dissolvidos no ferro.

O carbono ligado ao ferro, por possuir menores dimensões, se torna um átomo intersticial, ou seja, se liga através de espaços de ligação entre átomos de ferro.

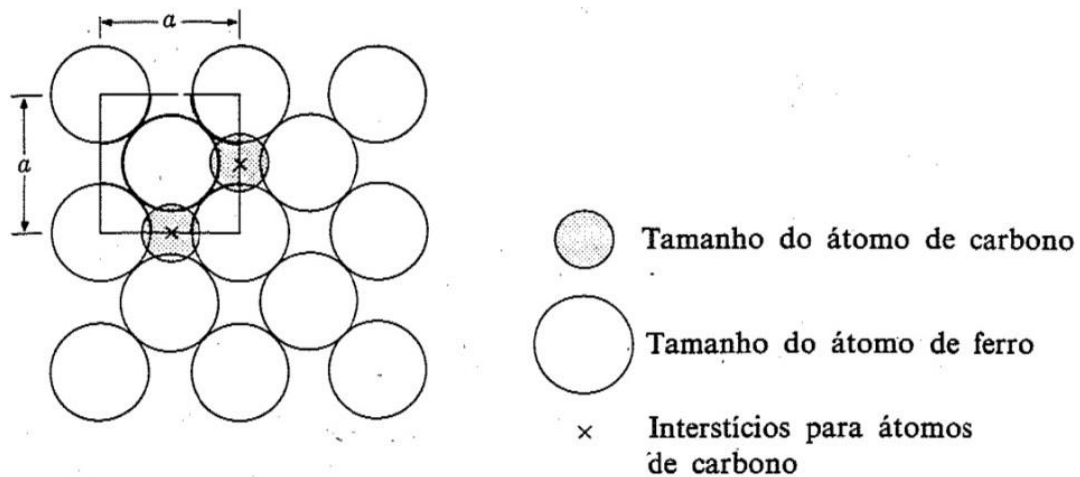
O ferro por possuir alotropia, dissolve o carbono em quantidades diferentes conforme a sua estrutura cristalina.

Figura 3: Átomos de carbono nos interstícios de ligações de átomos de ferro na estrutura CCC.



Fonte: [2].

Figura 4: Átomos de carbono nos interstícios de ligações de átomos de ferro na estrutura CFC.



Fonte: [2].

Nas imagens acima [figura 3 e 4] podemos observar que os interstícios da estrutura CCC são menores que o da CFC, fazendo com que seja mais difícil a solubilidade dos átomos de carbono com o ferro, já na estrutura CFC, podemos analisar que os espaçamentos são maiores, proporcionando maior facilidade de interação do carbono e assim absorvendo maiores quantidades do mesmo.

Inclusive o fator empacotamento é diferenciado em cada tipo de estrutura, sendo na estrutura CCC, com o fator de empacotamento de 0,68 ou 68% contra a estrutura CFC com o fator de empacotamento de 0,74 ou 74%, cabendo assim 4 átomos por célula unitária na estrutura CFC, contra 2 átomos em CCC.

Figura 5: Fator de empacotamento da estrutura CCC.

Cúbica de corpo centrado - CCC



Fonte: [6].

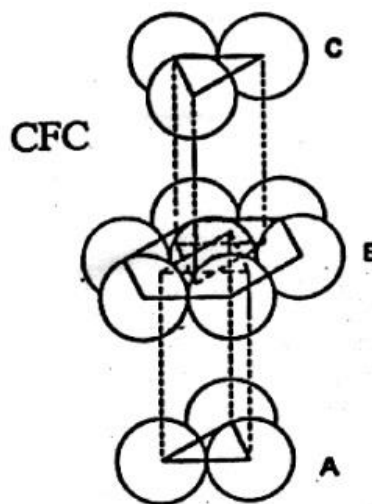
Figura 6: Fator de empacotamento da estrutura CFC.



Fonte: [6].

Os fatores de empacotamento influenciam totalmente na ordenação atômica, ou seja, na forma com que os átomos se empilham, sendo assim, sabemos que átomos de estrutura CFC se empilham em ordenação ABC, o que podemos observar na figura 7 abaixo:

Figura 7: Fator de empilhamento ABC da estrutura CFC.



Fonte: [4].

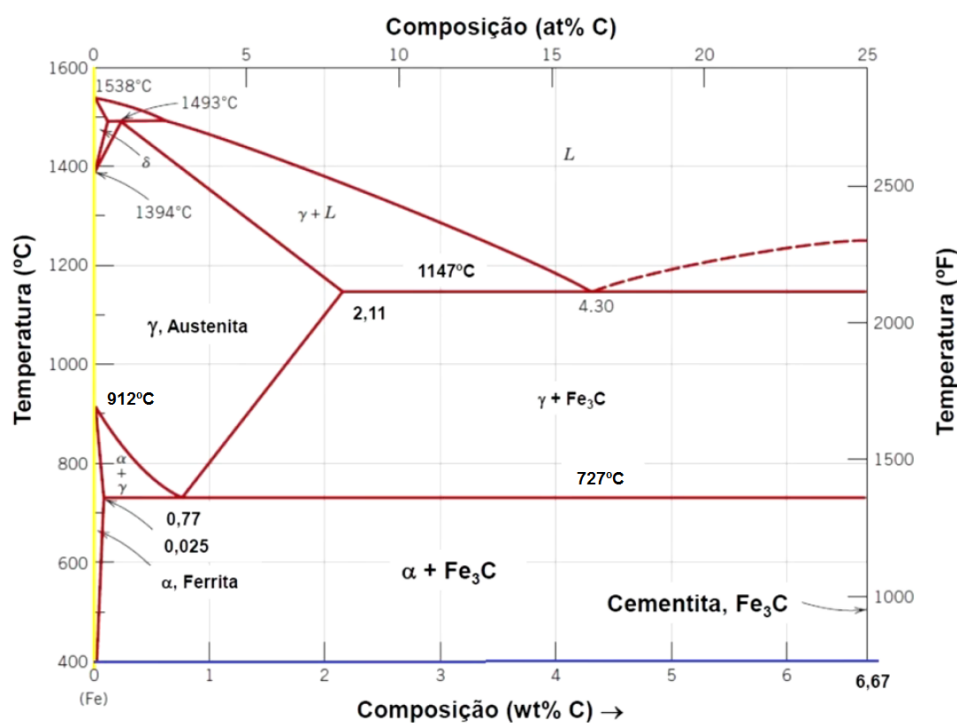
Empilhamentos mais comuns de átomos são o AB, que configuram a estrutura CCC, possuindo apenas duas repetições de ângulos encaixados, e os ABC que são constituídos por três ângulos diferentes de empilhamento, como ocorre com a estrutura CFC.

2.2.1 – Diagrama de fases Ferro-Carbono

O diagrama ferro-carbono é um diagrama binário de fases e tem como objetivo classificar e demonstrar os teores de soluto e solvente da liga e temperaturas de transformação. Além disso, com o estudo do mesmo, são demonstrados pontos cruciais de transformação e microestruturas formadas nos mesmos.

Lembrando que as transformações demonstradas são apenas por resfriamento lento.

Figura 8: Diagrama de fases ferro-carbono, para teores de carbono de 0 a 6,67%.



Fonte: Adaptado de [23].

O diagrama demonstra apenas até 6,67% de carbono, pois acima dessa faixa a liga possui um caráter mais cerâmico, ou seja, perde suas propriedades metálicas como a tenacidade e passa a ser mais duro e frágil, o que não é comercialmente interessante na área metalúrgica.

Na linha da extremidade esquerda, podemos observar as temperaturas de transformação do ferro, onde o ponto mais alto caracteriza a sua temperatura de fusão e nos pontos abaixo, que tocam essa linha, são demonstradas suas temperaturas de faixas de alotropia citadas anteriormente.

Nele também são demonstradas as nomenclaturas e composições das fases de acordo com seu patamar.

Na linha inferior, ou melhor, na linha de base, são demonstradas as porcentagens de teores de carbono de forma crescente da esquerda para a direita. Sendo:

- No ponto 0: 100% de ferro e 0% de carbono;
- No ponto 1: 99% de ferro e 1% de carbono e assim sucessivamente.

A primeira linha na parte superior do diagrama é a linha liquidus, acima dela as ligas se encontram no estado líquido.

Abaixo dela, temos a linha sólidos, onde acima dessa linha há constituintes sólidos + líquidos e abaixo apenas sólidos. A parte reta dessa linha é chamada de patamar eutético, pois, na mesma, situa-se o ponto eutético.

Logo abaixo temos a linha A1 que indica a ocorrência de uma parada durante a transformação. Assim, enquanto a transformação de ferro gama em ferro alfa + cementita não se completa, a temperatura permanecerá constante. Nessa linha temos, o ponto eutetóide a caracterizando, também, como patamar eutetóide.

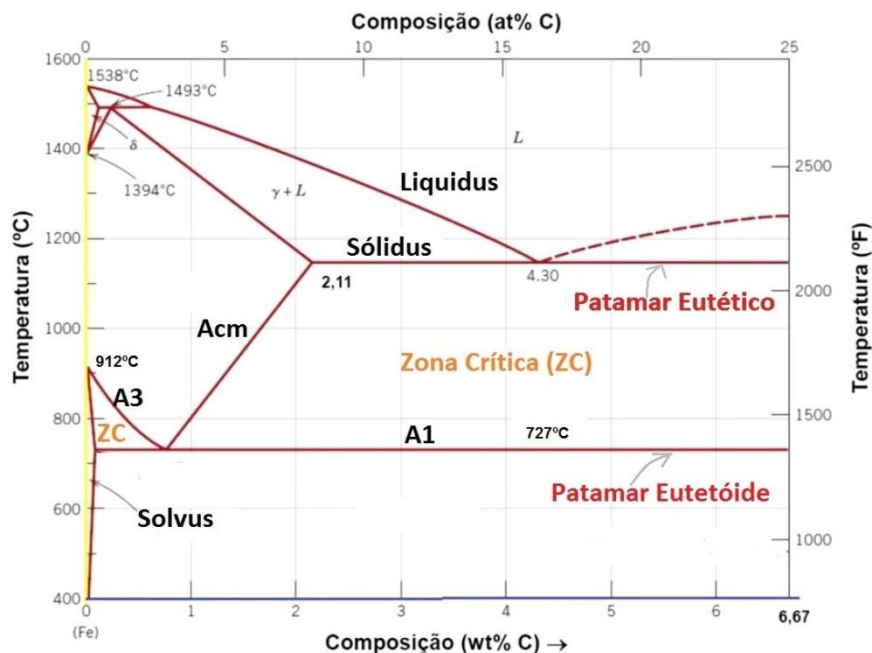
Ligando a linha A1 com a linha sólidos, temos a linha Acm que indica a temperatura de transformação de ferro gama em cementita.

No ponto de intersecção entre a linha A1 e Acm, “nasce” a linha A3, que caminha à esquerda e “morre” no primeiro ponto da faixa de temperatura de alotropia do ferro, na temperatura de 912°C, indicando a temperatura de transformação de ferro gama em alfa.

Abaixo da linha A3, se ligando a temperatura de início da transformação do ferro com o final da linha A1 e a linha base em 0,002% de carbono, temos a linha solvus, que indica a máxima solubilidade do carbono no ferro.

Chama-se zona crítica a região de transição entre a austenita e a região de ferrita + cementita. Esta região é representada no diagrama como a faixa de temperatura entre as linhas A1 e A3 ou A1 e Acm.

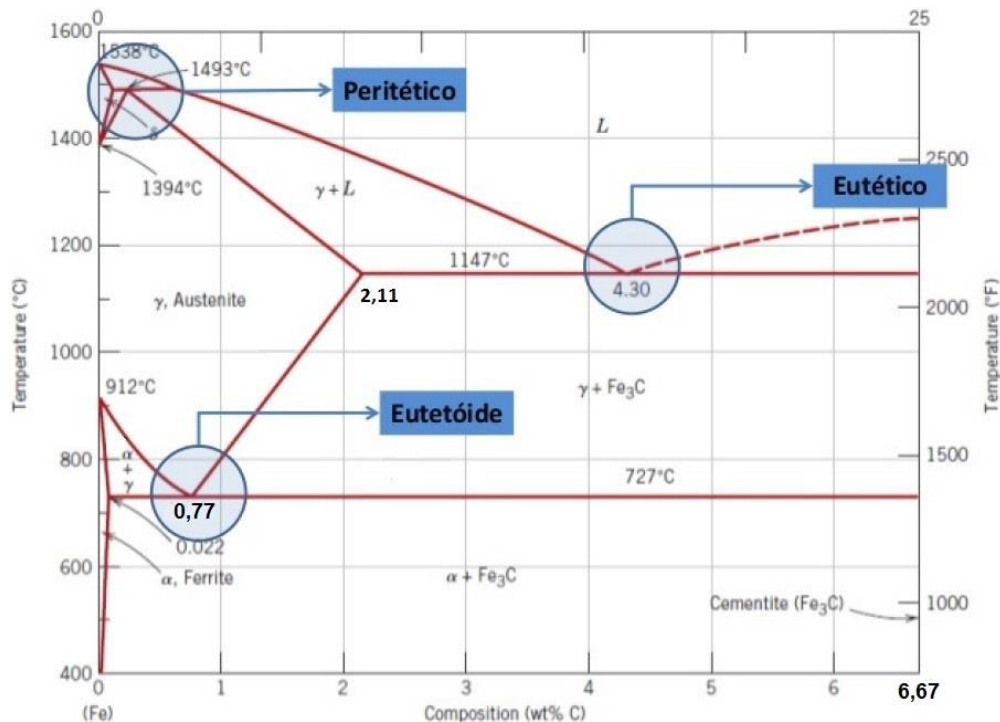
Figura 9: Diagrama ferro-carbono com suas principais linhas e zona crítica.



Fonte: Adaptado de [23].

Na figura 9, podemos observar as principais linhas do diagrama e na figura 10 serão demonstrados os principais pontos do diagrama:

Figura 10: Diagrama ferro-carbono com seus principais pontos.



Fonte: Adaptado de [23].

Podemos observar que existem três pontos principais, sendo eles:

- Eutético: é o ponto onde a liga se encontra no estágio mais fácil de se fundir, sendo ele abaixo da temperatura de fusão do ferro, ocorrendo a transformação de um líquido em uma solução sólida (1 líquido se transforma em 2 sólidos) e vice versa. Sua composição é de 4,3% de carbono.
- Eutetóide: ponto onde é mais fácil a transformação de ferro alfa + cementita em ferro gama, à temperatura abaixo de 912°C, onde 1 sólido se transforma em 2 sólidos. Sua composição é de 0,77% de carbono.
- Peritético: onde 1 sólido + 1 líquido se transforma em 1 sólido (ferro delta + líquido se transforma em ferro gama). Sua composição é de 0,18% de carbono.

2.2.2 – Campos de Fases

O diagrama ferro-carbono possui campos com determinadas fases que são:

- Campo ferrítico (fase α): corresponde à solução sólida de carbono no ferro α com estrutura atômica CCC.

- Campo austenítico (fase γ): onde há solução sólida de carbono no ferro γ com estrutura atômica CFC.
- Campo Perlítico: é uma combinação de ferro (α) e cementita (Fe_3C).

A Cementita (Fe_3C) é um microconstituente composto de ferro e carbono. Esse carboneto forma-se quando o limite de solubilidade do carbono no ferro é ultrapassado.

2.3 - Aço

Aço é uma liga de ferro-carbono, que possui o teor de no mínimo 0,002% de carbono dissolvido no ferro e no máximo 2,11% de C, a partir dessa faixa, de porcentagem de carbono, são considerados ferros fundidos.

Para se obter um aço é necessário que a liga atinja a fase austenítica, onde ocorre a maior solubilização possível do carbono no ferro. Isso ocorre pelo fato de que na estrutura CFC existem mais espaços disponíveis do que na estrutura CCC, por isso ao atingir esse patamar o carbono se aloca entre as partículas de ferro com maior facilidade.

2.3.1 – Classificação dos aços no diagrama Ferro-Carbono

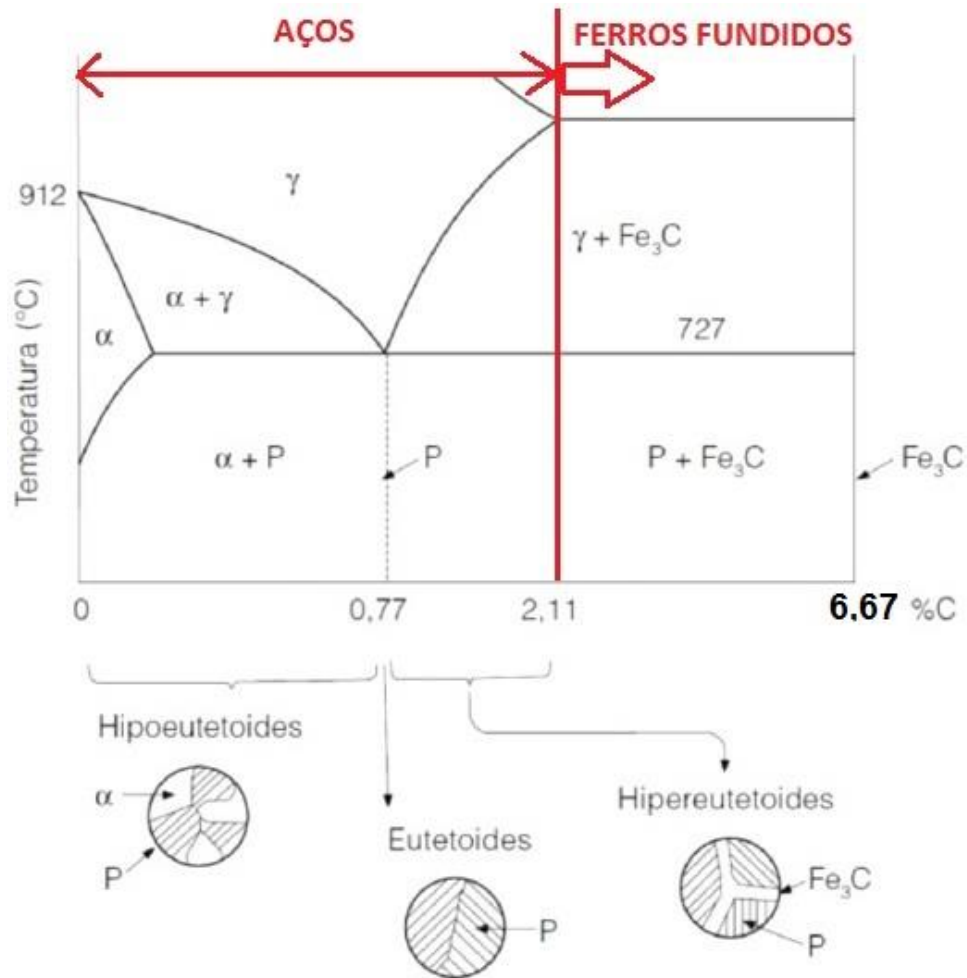
Os aços são divididos em três tipos, sendo eles: hipoeutetóides, eutetóides e hipereutetóides.

Os hipoeutetóides são os aços com a faixa anterior ao ponto eutetóide com teores de 0,002% a 0,77% de carbono. Já os hipereutetóides, são os aços após o ponto eutetóide com teores de carbono em uma faixa de 0,77% a 2,11%.

O ferro comercialmente puro é constituído por ferrita, já os aços hipoeutetóides são constituídos por ferrita e perlita. No caso dos aços eutetóides, sua estrutura é 100% perlítica e os hipereutetóides possuem perlita e cementita. [1]

Vale ressaltar que quanto mais próxima a liga for, em teor de carbono, do ponto eutetóide, maior predominância perlítica ela terá.

Figura 11: Classificação dos aços hipoeutetóides, hipereutetóides e eutetóides com suas estruturas e ferros fundidos no diagrama ferro-carbono.



Fonte: Adaptado de [23].

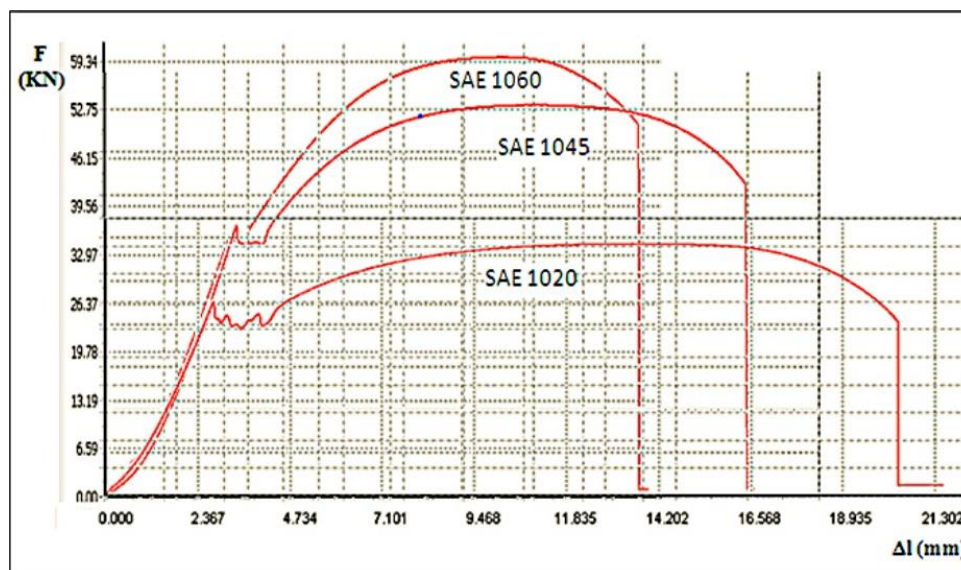
2.3.2 – Aços microligados

Os aços microligados são aços que possuem elementos de liga para melhores propriedades em relação ao seu teor de carbono.

Para se obter uma liga que possua alta dureza e bom alongamento é necessário que se combine propriedades de teores baixos de carbono e alguns elementos acrescidos que possam dar maior resistência mecânica ao mesmo.

Sabendo-se que quanto maior o teor de carbono maior a dureza e menor o alongamento, decidiu-se que para determinadas aplicações que necessitavam de maior alongamento e alta resistência mecânica, não era viável aumentar o teor de carbono do aço, pois ele ficaria frágil e com pouca elasticidade. O que podemos observar no gráfico 1.

Gráfico 1: Comparação de curva de força versus deslocamento do aço SAE1060, SAE1045 e SAE1020 normalizados.

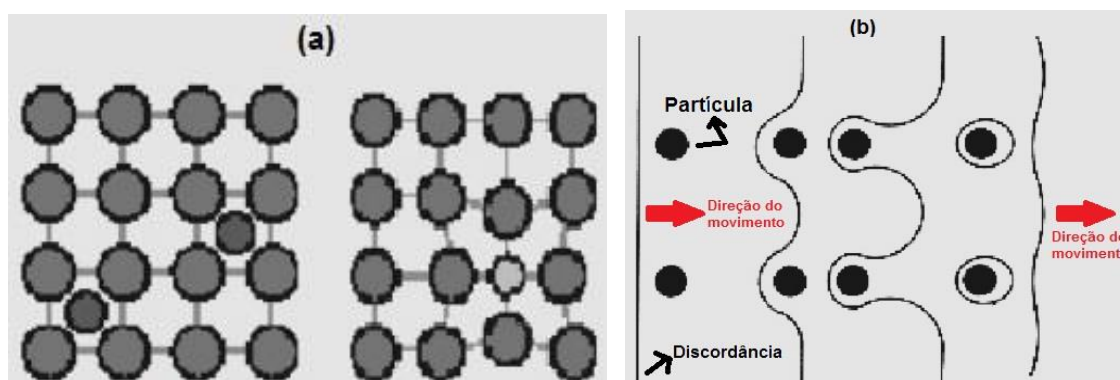


Fonte: [12].

Podemos observar que quanto maior o teor de carbono, maior a resistência mecânica e menor o alongamento.

Foi descoberto que essa propriedade ocorria pelo fato de que o carbono prendia as movimentações das discordâncias. Isso ocorre porque o carbono é um átomo intersticial e ele forma um campo de compressão ao seu redor, atraindo as discordâncias que também possuem campos de tração e compressão, assim as deixando presas a este átomo, o deixando mais estável pela diminuição da tração com o campo compressivo existente na discordância.

Figura 12: (a) Representação de átomo intersticial. (b) Interação entre partícula e discordância.



Fonte: Adaptado de [4].

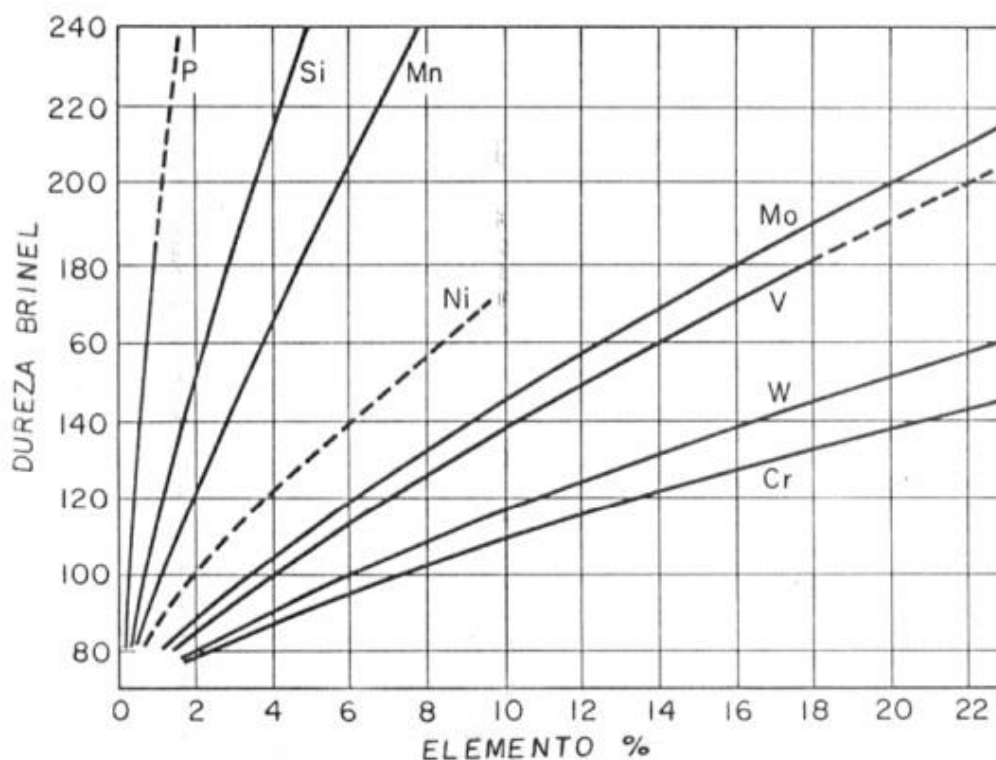
Para que as discordâncias se desvinculem do átomo de carbono intersticial, é necessário que haja uma força maior que a do campo de tração e compressão ali

presentes, ocasionando um deslocamento desse átomo e a liberação de movimentação da discordância, proporcionando então, uma maior resistência à deformação, resultando em maior dureza, pois para que haja deformação plástica é importante que as discordâncias tenham caminhos livres para sua movimentação.

Outro fator que interfere na movimentação das discordâncias é o tamanho de grão, pois a discordância caminha ao longo de um grão e “morre” em seus contornos por haverem diferentes orientações e por ser um local de mais alta energia. Quanto maior o grão, maior mobilidade e menor resistência, quanto menor o grão, menor mobilidade e maior resistência.

Por isso, ao invés de aumentar o teor de carbono, são realizados tratamentos térmicos para mudanças microestruturais e, no lugar do carbono, são adicionados elementos que possuem dimensões mais próximas do ferro, ou seja, átomos substitucionais, assim impedindo o crescimento dos grãos, formando uma granulação mais fina, tornando o material mais resistente mantendo, de certa forma, seu poder de alongamento.

Gráfico 2: Efeito dos elementos de liga na ferrita em relação à dureza.



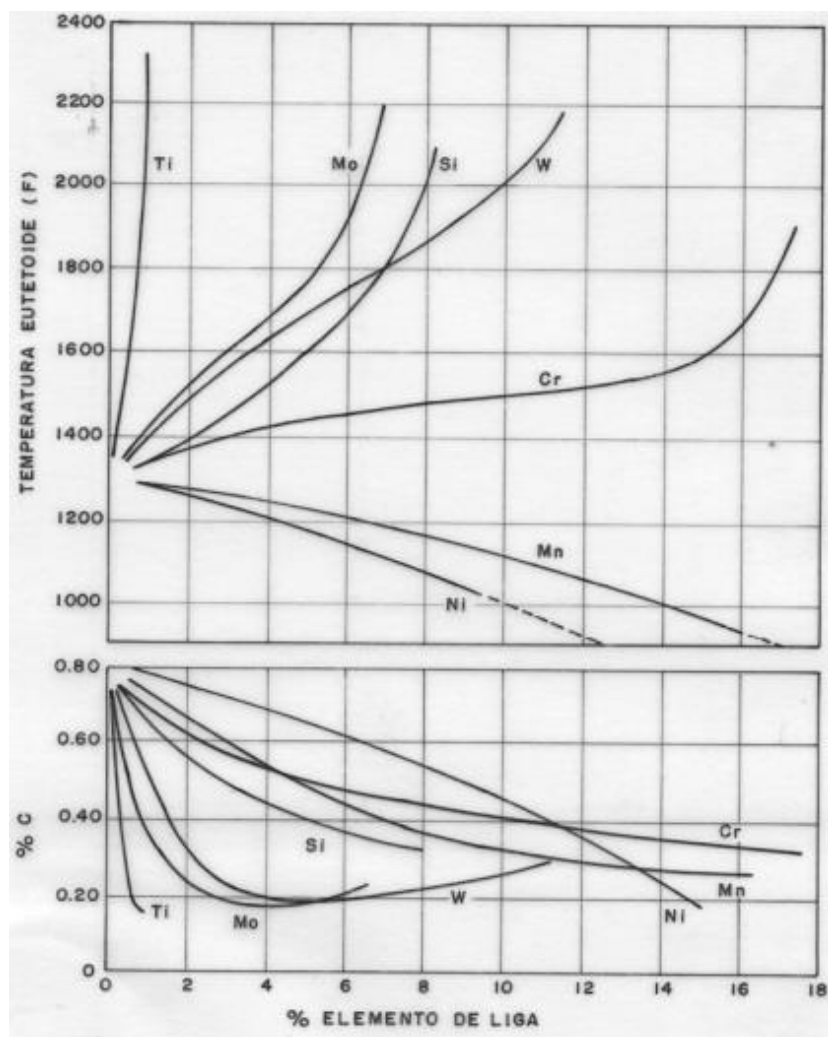
Fonte: [1].

Podemos observar no gráfico 2 que os elementos de liga causam um aumento significativo de dureza.

O que vale lembrar é que elementos de liga gasosos, geralmente são intersticiais e são, de certa forma, prejudiciais ao aço, pois formam inclusões ou espaçamentos nas estruturas como “bolhas” de ar, por exemplo, ocasionando maior fragilidade.

Elementos de liga podem afetar também nas temperaturas de transformação, essas variações ocorrem com o aumento ou diminuição de temperaturas devido a determinada porcentagem de um elemento específico na liga, como podemos observar nos gráfico 3 abaixo:

Gráfico 3: Variação de temperatura eutetóide em relação aos elementos de liga adicionados e variação do teor de carbono nos aços hipoeutetóides e eutetóide em relação a porcentagem de elementos de liga.



Fonte: [1].

O gráfico 3 demonstra que alguns elementos de liga possuem a capacidade de aumentar a temperatura eutetóide e outros de a diminuir, o que se observa, também, é que conforme o aumento de porcentagem de carbono há uma diminuição de porcentagem de elementos de liga.

Essas divergências de temperatura de transformação interferem no posicionamento das curvas TTT e tendo em vista essas alterações, os elementos de liga podem ser divididos em dois grupos, de acordo com o diagrama de equilíbrio binário do ferro-carbono, que são:

- Tipo A – estabilizadores da austenita;
- Tipo B – estabilizadores da ferrita.

Os elementos estabilizadores da austenita tenderão a aumentar a faixa de temperatura na qual essa fase é estável, já os da ferrita aumentarão a faixa de estabilidade da mesma.

Dentre esses dois grupos A e B, consideram-se as seguintes classificações dos elementos de liga: A1, A2, B1 e B2 que serão demonstrados na tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Classificação dos elementos de liga.

Tipo	Característica	Elementos
A ₁	Ao diminuir a temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \alpha$ e aumentar a temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \delta$, esses elementos aumentam a faixa de temperatura para a austenita estável.	Níquel, Manganês e Cobalto
A ₂	O campo austenítico é expandido até a formação de um composto de ferro.	Carbono e Nitrogênio
B ₁	Elementos que restringem a formação da austenita, favorecendo, assim, a expansão do campo ferrítico.	Silício, Cromo, Molibdênio, Fósforo, Vanádio, Titânio e Alumínio
B ₂	O campo austenítico é interrompido pela formação de compostos de ferro.	Boro, Enxofre, Tântalo, Zircônio e Nióbio.

Fonte: Adaptado de [18].

Cada conjunto de elementos de liga apresenta determinada função em relação as propriedades, temperaturas e transformações do aço.

2.3.3 – Classificação dos aços SAE e AISI

A partir do momento que se obteve alta variedade de ligas com teores de carbono, elementos de liga e propriedades diferentes, foi necessário a padronização, através de normas técnicas, de nomenclaturas derivadas de suas composições e propriedades.

Por isso, criaram-se agrupamentos de ligas que haviam comportamentos e composições semelhantes para melhor entendimento, manuseio e distribuição das mesmas.

A Society of Automotive Engineers (SAE) e a American Iron and Steel Institute (AISI), ambas nos EUA, junto com muitas outras associações ao redor do mundo, são responsáveis por essas tais padronizações.

No Brasil, temos a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que é responsável por essas tais padronizações, também. Podemos observar as nomenclaturas dos aços na tabela 3 a seguir:

Tabela 3: Classificação dos aços segundo a SAE e AISI.

Designação		TIPO DE AÇO
SAE	AISI	
10XX	C10XX	Aços carbono comuns
11XX	C11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
13XX	13XX	Aço manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços Níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços Níquel com 5,0% de Ni
31XX	31XX	Aços Níquel Cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E33XX	Aços Níquel Cromo com 3,5 % de Ni e 1,55 Cr
40XX	40XX	Aços Molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços Cromo Molibdênio com 0,50% ou 0,90% de Cr e 0,12% ou 0,20% de Mo
43XX	43XX	Aços Níquel cromo com molibdênio com 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços Níquel Molibdênio com 1,55% ou 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
47XX	47XX	Aços Níquel Cromo Molibdênio com 1,05%de Ni, 0,45% de Cr e 0,20 de Mo
48XX	48XX	Aços Níquel Molibdênio com 3,5 % de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aços cromo com 0,28% ou 0,65% de Cr
50BXX	50BXX	Aços cromo boro com baixo teor de Cr e no mínimo 0,0005% de B
51XX	51XX	Aços cromo com 0,80 a 1,05% de Cr
61XX	61XX	Aço cromo vanádio com 0,8 ou 0,95% de Cr a 0,1% ou 0,15% de v
86XX	86XX	Aços níquel molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
87XX	87XX	Idem
92XX	92XX	Aço silício manganês com 0,85% de Mn e 2,0% de Si
93XX	93XX	Aços silício manganês com 3,25% de Ni, 1,20% de Cr e 0,12% de Mo
94BXX	94BXX	Aço níquel cromo molibdênio com baixos teores de Ni, Mo e no mínimo 0,0005% de B
98XX	98XX	Aço níquel cromo molibdênio com 1,0% de Ni,0,80 de Cr e 0,25% de Mo

Fonte: Adaptado de Sistema de codificação SAE/AISI.

Esses códigos são conhecidos e utilizados mundialmente como nomenclaturas dos aços, algumas outras sociedades no mundo, assim como no Brasil, adotaram suas próprias normas, mas como a SAE e a AISI disseminaram com maior força no

mercado sua nomenclatura, as outras normas se baseiam nelas, ou possuem certa similaridade.

2.4 – Temperabilidade

Temperabilidade é a capacidade de o aço endurecer ou a profundidade de endurecimento.[1]

Esse fenômeno não se refere à máxima dureza obtida em um aço, pois isso depende apenas do seu teor de carbono, mas sim da profundidade de endurecimento que depende, também, do tamanho de grão austenítico e da presença de elementos de liga.

Uma liga que possui alta temperabilidade forma martensita não apenas na sua superfície, mas em um elevado grau em todo o seu interior.

2.4.1 – Curvas TTT

O diagrama TTT (Tempo – Temperatura – Transformação) tem como fim demonstrar o tempo e temperatura de uma transformação de um aço em condições fora de equilíbrio. São demonstradas transformações isotérmicas e o que acontece com as microestruturas a partir do resfriamento, essas microestruturas não são previstas no diagrama de equilíbrio, assim como a estrutura bainítica e martensítica, por exemplo.

Esse diagrama é individualizado para cada aço, pois conforme sua composição difere o tempo de transformação.

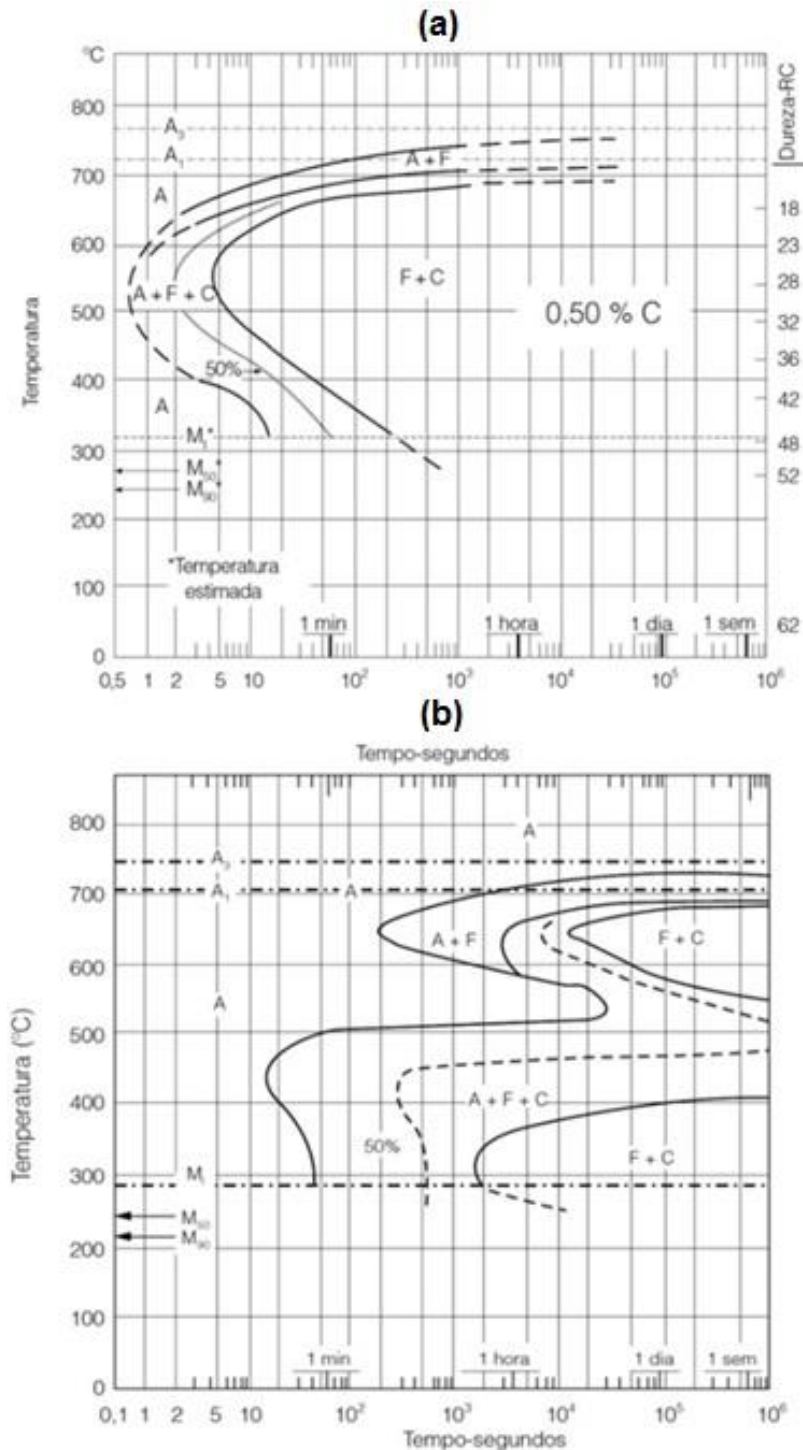
Existem dois tipos de transformações, as difusionais e adifusionais. Conforme as reações caminham para a parte adifusional, de cima para baixo no diagrama, há aumento de dureza.

Ele possui curvas com o formato de cotovelo e em sua primeira curva é onde começam as transformações difusionais. Na parte inferior onde se situam as linhas M, ocorrem as transformações adifusionais, conhecidas como martensíticas, o que caracteriza a letra M como indicadora de início dessas tais transformações.

Conforme o teor de carbono aumenta e a presença de elementos de liga também, essa curva se desloca para a direita, posição crescente do tempo, fazendo com o que se retarde o tempo de início de transformação da austenita.

O diagrama TTT tem relação com o diagrama de equilíbrio de ferro carbono e ele está demonstrando o que ocorre na zona crítica desse diagrama.

Figura 13: Diagramas TTT do aço (a) SAE1050 e (b) SAE4340.



Fonte: Adaptado de [1].

Podemos observar que no aço SAE1050 o tempo de início de transformação da austenita é mais curto que na liga SAE4340, isso é devido ao fato de que no SAE4340 há a presença de elementos de liga que é um dos fatores que afetam na posição da curva TTT, sendo eles a composição química, o tamanho de grão da austenita e a homogeneidade da mesma.

2.4.2 – Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos são conjuntos de operações de aquecimento e resfriamento sobre condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as propriedades de um aço. [1]

As propriedades do aço são dependentes de sua estrutura e dos tratamentos térmicos que a modificam, em maior ou menor escala, conferindo em alterações de suas propriedades.

O objetivo dos tratamentos térmicos são:

- Remoção de tensões internas;
- Aumento ou diminuição da dureza;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhora da ductilidade;
- 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 magnéticas.

Os principais tratamentos são o recozimento, a normalização, a têmpera, o revenimento e o coalescimento dos grãos. Alguns tratamentos obedecem ao equilíbrio do diagrama de equilíbrio ferro-carbono e outros não.

O recozimento é um tratamento de equilíbrio, onde possui um resfriamento lento no forno, permitindo a difusão atômica, engrossa a microestrutura, reconfigura tratamentos térmicos anteriores e diminui a dureza do material.

A normalização também é um tratamento de equilíbrio, que possui um resfriamento lento ao ar, permitindo a difusão atômica, refina a microestrutura e aumenta a dureza do material não temperado, sendo seu objetivo principal o aumento da tenacidade.

A têmpera é um tratamento fora de equilíbrio, com resfriamento rápido em água, óleo ou salmoura, é uma transformação adifusional, desobedece ao diagrama de equilíbrio, há formação de grãos aciculares com estrutura chamada martensítica, possui alta dureza e baixa tenacidade. A velocidade elevada de transformação da martensita (aproximadamente à velocidade do som) faz com que se dificulte a realização de estudos experimentais de nucleação e crescimento.

Revenimento é um tratamento feito para diminuir a resistência mecânica dos aços temperados, alivia tensões, corrige excessivas durezas e fragilidade do material, aumentando, assim, sua ductilidade e tenacidade pela precipitação de carbonetos.

O coalescimento nada mais é que um tratamento que tem como objetivo melhorar a conformabilidade e usinabilidade do material, geralmente aços hipereutetóides, que podem ser esferoidizados por processos de aquecimento e resfriamento em tempos longos. Nesse processo há a formação de carbonetos globulares e uma matriz ferrítica.

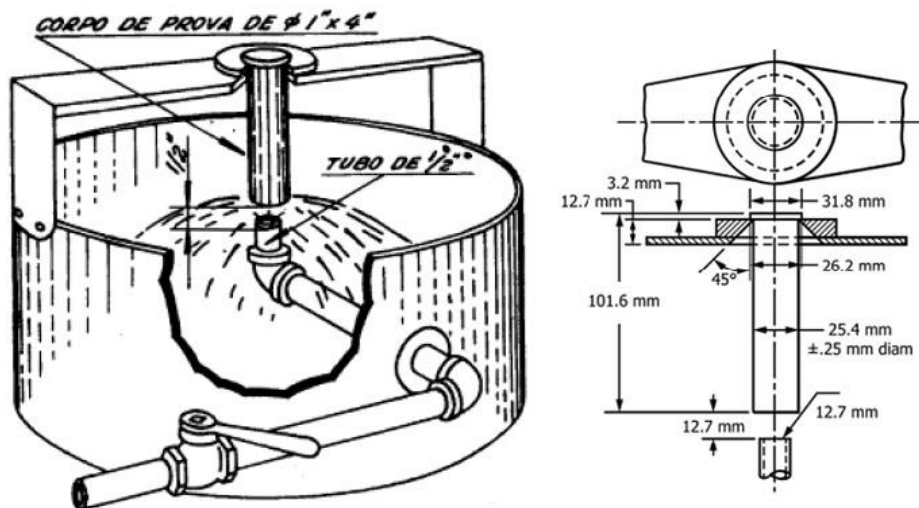
3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Ensaio Jominy

O ensaio Jominy tem como objetivo avaliar a temperabilidade dos aços.

Seu funcionamento consiste em obter um corpo de prova cilíndrico com dimensões de 1" (25,4mm) de diâmetro e 4" (101,6mm) de comprimento, sendo aquecido até sua temperatura austenítica e em seguida, por meio de um dispositivo apropriado, dirige-se um jato de água, com quantidades adequadas, em uma de suas extremidades.

Figura 14: Dispositivo e corpo de prova para ensaio Jominy com suas dimensões.



Fonte: Adaptado de [1] e [13].

De acordo com as especificações anteriormente citadas, foram cortadas duas amostras de barras de aço SAE1050 e aço SAE4340.

Figura 15: Cortadora metalográfica CM80. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 16: Amostras de SAE1050 e SAE4340 cortadas na cortadora metalográfica CM80. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.



Fonte: Acervo do autor.

Após o corte foram soldadas chapas na parte superior das amostras para que ficassem fixas no dispositivo Jominy. A solda foi feita com depósito de material pelo processo MAG, porém o material ali depositado e a mudança de microestrutura ali presente foram desprezíveis em relação ao ensaio feito após este processo, pois não interferiu nos resultados.

Figura 17: Amostra SAE1050 com chapa soldada pelo processo MAG.



Fonte: Acervo do autor.

Realizadas as soldas, as amostras foram identificadas com a letra M (para o SAE1050) e Y (para o SAE4340), denominação adotada para simplificar e identificar as amostras com maior facilidade.

Figura 18: Identificação das amostras M e Y.



Fonte: Acervo do autor.

Feita as identificações, as amostras foram levadas ao forno por 1h em uma temperatura de 840°C. Isso foi feito para que os aços chegassem a fase austenítica como pré-requisitado. A temperatura de austenitização foi baseada na tabela de aços da Villares [24].

Figura 19: Forno mufla FLYEVER FE50RPN. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.



Fonte: Acervo do autor.

Após 1h de forno as amostras foram retiradas com a ajuda de uma pinça, luvas de proteção térmica e óculos de proteção ótica (EPIs), e levadas ao dispositivo Jominy, em média de 1 segundo, para o início do ensaio.

Figura 20: Amostra SAE1050 sendo transportada do forno ao dispositivo de ensaio Jominy. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 21: Amostra SAE1050 sendo resfriada no dispositivo Jominy. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.

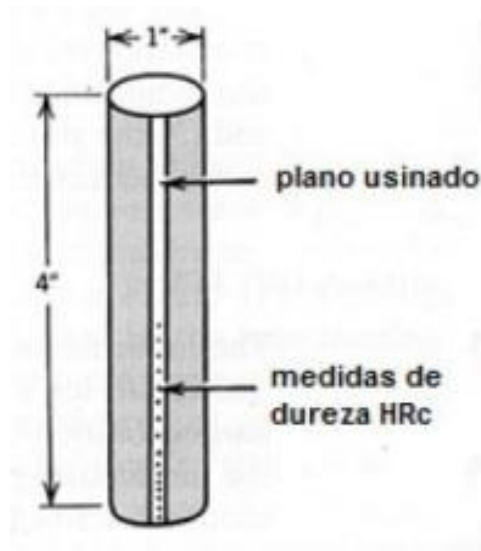


Fonte: Acervo do autor.

3.2 – Medições de dureza

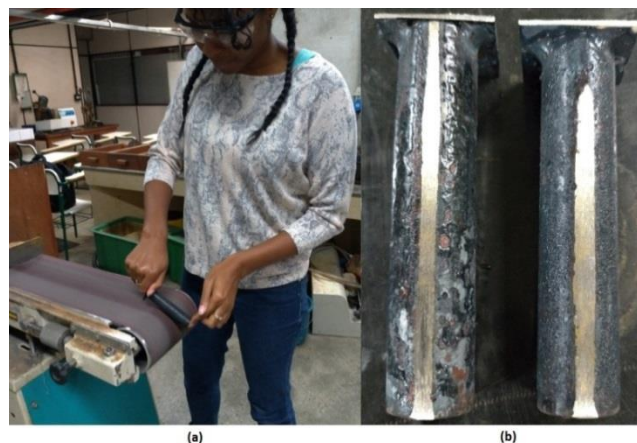
Após efetuado o ensaio Jominy, é necessário fazer uma trilha achatada de no máximo 0,015" (0,38mm) ao longo do comprimento do corpo de prova para realizar as medições de dureza.

Figura 22: Trilha para medições de dureza no corpo de prova do ensaio Jominy.



Fonte: [4]

Figura 23: (a) Trilha sendo realizada na lixadeira de fita Baldan LFH-2. (b) Amostras chanfradas. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.



Fonte: Acervo do autor.

Com a trilha realizada, são medidas as durezas pelo método Rockwell C, pois é o método apropriado para fazer medições em aços temperados.

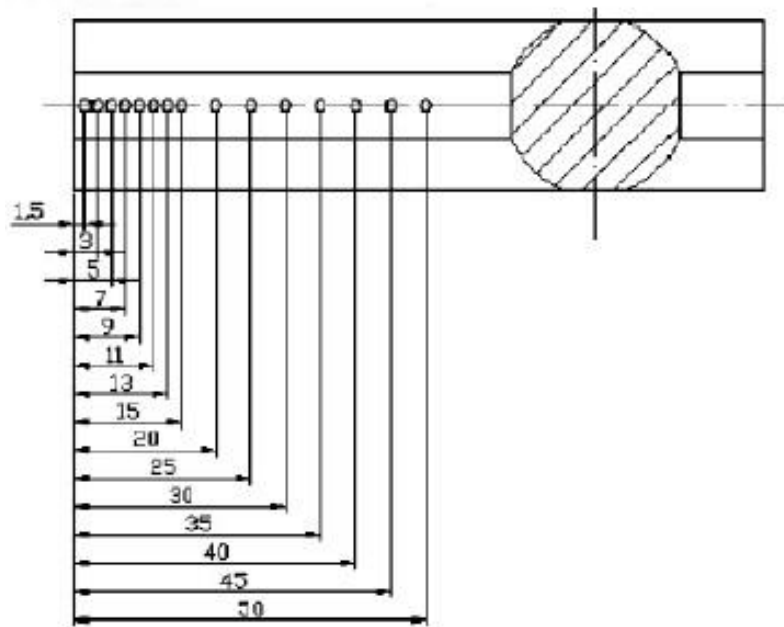
Tabela 4: Escalas de dureza Rockwell.

ESCALA DE DUREZA ROCKWELL NORMAL E APLICAÇÕES					
ESCALA	COR DA ESCALA	CARGA MAIOR	PENETRADOR	FAIXA DE UTILIZAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO
A	preta	60	diamante cone 120°	20 a 88 HRA	Carbonetos, folhas de aço com fina camada superficial endurecida
C	preta	150	diamante cone 120°	20 a 70 HRC	Aço, titânio, aços com camada endurecida profunda, materiais com HRB>100
D	preta	100	diamante cone 120°	40 a 77 HRD	Chapas finas de aço com média camada endurecida
B	vermelha	100	esfera aço 1,5875 mm	20 a 100 HRB	Ligas de cobre, aços brandos, ligas de alumínio, ferro maleável etc.
E	vermelha	100	esfera aço 3,175 mm	70 a 100 HRE	Ferro fundido, ligas de alumínio e de magnésio
F	vermelha	60	esfera aço 1,5875 mm	60 a 100 HRF	Ligas de cobre recozidas, folhas finas de metais moles
G	vermelha	150	esfera aço 1,5875 mm	30 a 94 HRG	Ferro maleável, ligas de cobre-níquel-zinco e de cobre-níquel
H	vermelha	60	esfera aço 3,175 mm	80 a 100 HRH	Alumínio, zinco, chumbo
K	vermelha	150	esfera aço 3,175 mm	40 a 100 HRK	Metais de mancais e outros muito moles ou finos

Fonte: Acervo do autor.

Feita a trilha e a escolha do método correto de medida de dureza, deve-se medir as durezas ao longo do comprimento do corpo de prova com as seguintes medidas demonstradas na figura 24.

Figura 24: Distâncias a serem medidas, em milímetros, as durezas em Rockwell C ao longo do comprimento do corpo de prova.



Fonte: [21]

Foram realizadas três medidas em cada faixa de comprimento nos corpos de prova na escala Rockwell C com o tempo de 15 segundos cronometrados.

Figura 25: (a) Análise de durezas no durômetro Officine Galileo A -200. (b) Cronômetro do celular ASUS. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.



Fonte: Acervo do autor.

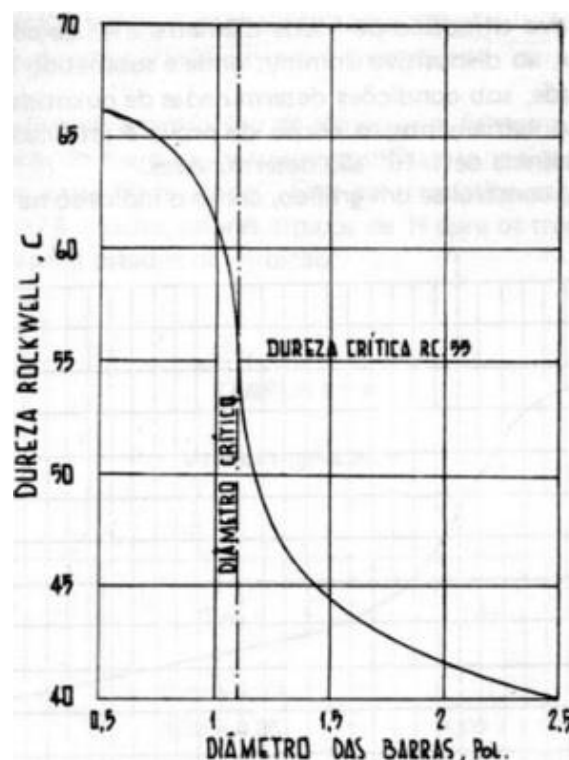
3.2.1 – Ensaio Grossman

No método Grossman, são utilizadas as mesmas barras cilíndricas do método Jominy, austenitizadas e temperadas, diferindo apenas na medição de dureza.

A medição de dureza é realizada em secções transversais da barra, sendo do centro à superfície. Obtém-se um gráfico com a abscissa representada pelas distâncias do centro e a ordenada com valores de dureza Rockwell C medidas.

Graficamente, o diâmetro da barra onde há a queda mais brusca de dureza é o diâmetro crítico, ele representa no mínimo 50% de martensita. A linha que cruza esse diâmetro na horizontal é a faixa de dureza crítica demonstrada no gráfico 4:

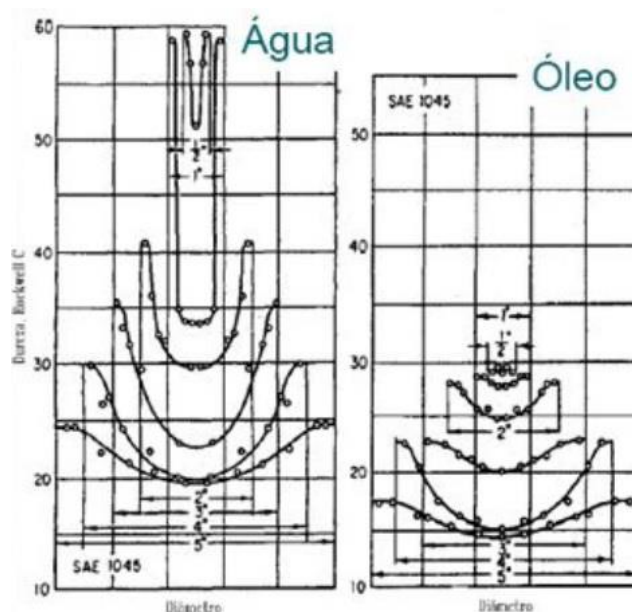
Gráfico 4: Diâmetro crítico do método Grossman.



Fonte: [25]

No ensaio Grossman são obtidas curvas em “u” que dependem da composição química do material ou o meio em que foi resfriado. No exemplo a seguir observa-se a curva em “u” formada em um aço SAE1045.

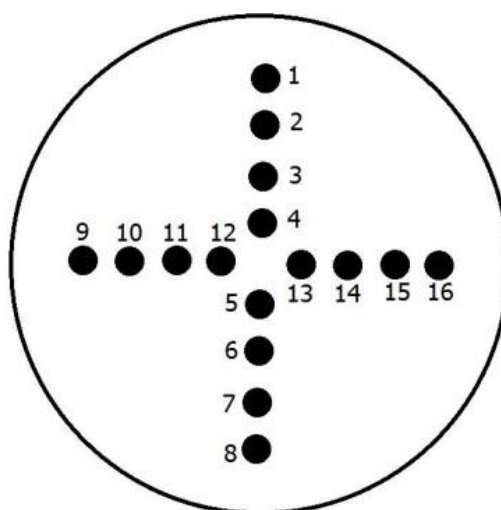
Gráfico 5: Curvas Grossman para o aço SAE1045.



Fonte: [25]

Foram realizadas 16 medidas na extremidade temperada das amostras ensaiadas no dispositivo Jominy. Sendo 16 medidas em ambas as amostras, demonstradas na figura 26 abaixo:

Figura 26: Demonstração das medições de dureza Rockwell C na superfície temperada.



Fonte: [25]

Após as medições em Rockwell C, foram montadas tabelas com suas respectivas durezas superficiais e um gráfico de comparação dos valores do SAE4340 e SAE1050.

3.3 – Corte

Realizadas as medições de dureza, é necessário que se monte um gráfico de comportamento das mesmas.

Analisando o gráfico, faz-se os cortes de acordo com os picos comportamentais da amostra em relação as medidas realizadas anteriormente.

Foram feitos três cortes das amostras com a cortadora metalográfica CM80 [figura 15], sendo eles a uma distância de 1,5cm, 3cm e 4,5cm da extremidade temperada, totalizando seis amostras.

Figura 27: Amostras cortadas em faixas de durezas específicas.



Fonte: Acervo do autor.

3.4 – Micrografias

Após efetuado o corte das amostras, é interessante saber o que causou comportamentos diferentes em valores, ou faixas dos mesmos, distintos ao longo do comprimento da peça. Por isso, são realizadas as micrografias, para explicar o comportamento em função de sua microestrutura.

3.4.1 – Lixamento

Para se obter uma micrografia, o primeiro processo é o lixamento, feito em lixas de granulação mais grossa a mais fina. Chegando na granulação mais fina, é feito o polimento.

Esse lixamento é feito através de politizes que possuem um sistema de rotação e abastecimento de água alcalina para que não se obtenham mudanças microestruturais na amostra em processo de lixamento.

Figura 28: Politriz lixadeira metalográfica PL02 ET Teclago. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.



Fonte: Acervo do autor.

Foi feito o lixamento com as lixas de granulação 150, 220, 320, 400, 600 e 1000, sucessivamente nessa ordem de grandeza, lembrando que o tamanho de grão é inversamente proporcional ao número da lixa, ou seja, numeração maior, grão menor e numeração menor, grão maior.

3.4.2- Polimento

O polimento deve ser feito na politriz com um pano de polir (feltro) e um material abrasivo, sendo ele solução aquosa de alumina, pasta de diamante ou óxido de cromo.

O tempo deve ser controlado, pois o excesso do mesmo, no polimento, faz com que haja contaminação através dos abrasivos na amostra.

Neste trabalho foi feito o polimento na politriz [figura 27], com feltro e o reagente usado para o polimento foi a alumina, com granulação de 1 μ .

Figura 29: (a) Pisseta com alumina e politriz com feltro de polimento. (b) Reagente alumina Fortel. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.



Fonte: Acervo do autor.

3.4.3 – Ataque químico

O ataque químico nada mais é que submeter a superfície polida a uma solução levemente corrosiva como, por exemplo, o nital.

Essa imersão deve obedecer a faixa de tempo de 0 a 10 segundos e deve ser feita sem que haja contato da superfície da amostra com o fundo do recipiente onde se encontra a solução ácida.

Se a amostra ficar mais que 10 segundos, pode resultar em uma queima, chamada de superataque, onde os contornos ficam muito mais grossos possibilitando uma difícil identificação. Quando isso ocorre é recomendado que volte ao lixamento.

Após a imersão deve-se lavar a amostra em água corrente, borrifar álcool e fazer a secagem a quente.

Foi feita a imersão em Nital 2% (2ml HNO₃ + 98ml Álcool Etílico), lavado em água corrente e borrifado álcool 99,5% PA.

Figura 30: (a) Nital 2%. (b) Bequer com capsula de vidro. (c) Alcool Etílico 99,5% PA Gaal. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.



Fonte: Acervo do autor.

Após isso foi feita a secagem a ar quente no secador de amostras.

Figura 31: Secador de amostras. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.



Fonte: Acervo do autor.

3.4.4 – Microscopia

Na microscopia analisaremos as microestruturas por meio de um microscópio óptico fotônico em fotomicrografias com diferentes aumentos.

Foram utilizados dois microscópios para essa análise micrográfica demonstrados na figura 31.

Figura 32: (a) Microscópio AXIO Zeiss Vert. A1. (b) Microscópio Olympus BX60M. Laboratório de Materiais para Construção Mecânica, Fatec-SP.



Fonte: Acervo do autor.

3.5 – Composição química

A composição química é um dos componentes de caracterização de um material, por isso, foram feitas espectroscopias e análise via combustão para realizar a caracterização dos materiais utilizados neste trabalho.

Ambos experimentos foram realizados no SENAI Osasco.

3.5.1 – Porcentagem de carbono

As amostras contidas neste trabalho são os aços SAE4340 e SAE1050.

A análise de combustão foi feita por não haver alta confiabilidade na análise de espectroscopia em relação ao teor de carbono, sendo mais específica para a detecção de elementos de liga. Na análise de combustão especifica-se mais assertivamente a detecção de Carbono e Enxofre.

Tabela 5: Resultado da análise via combustão com as porcentagens de Carbono e Enxofre das ligas SAE4340 e SAE1050.

Liga	Carbono	Enxofre
SAE4340	0,4307%	0,0206%
SAE1050	0,5025%	0,0148%

Fonte: Acervo do autor.

3.5.2 – Aço SAE1050

Tabela 6: Análise de espectroscopia do SAE1050.

Elemento	%
Si	0,251
Mn	0,697
P	0,019
Cr	0,045
Mo	0,001
Ni	0,040
Al	0,006
Co	0,001
Cu	0,040
Nb	0,044
Ti	0,008
V	0,020
W	0,011
Pb	0,002
Sn	0,002
Sb	0,019
Zr	0,022
Bi	0,005
As	0,003
N	0,005

Fonte: Acervo do autor.

3.5.3 – Aço SAE4340

Tabela 7: Análise de espectroscopia do SAE4340.

Elemento	%
Si	0,243
Mn	0,888
P	0,025
Cr	1,060
Mo	0,220
Ni	0,014
Al	0,034
Co	0,004
Cu	0,033
Nb	0,033
Ti	0,012
V	0,034
W	0,009
Pb	0,005
Sn	0,002
Sb	0,011
Zr	0,024
Bi	0,005
As	0,002
N	0,008

Fonte: Acervo do autor.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Medições de dureza

As medições de dureza em Rockwell C, seguidas de suas respectivas distâncias em milímetros a partir da extremidade temperada realizadas nas amostras SAE1050 e SAE4340, deste trabalho, estão demonstradas nas seguintes tabelas 8 e 9:

Tabela 8: Medições de dureza em Rockwell C da amostra SAE4340.

MEDIÇÕES				
Medida (mm)	1	2	3	Média
1,5	48	47	49	48
3	42	41	41	41
5	32	30	32	31
7	29	29	28	29
9	31	23	25	26
11	33	31	33	32
13	29	28	29	29
15	30	27	27	28
20	25	23	20	23
25	27	18	19	21
30	24	20	22	22
35	20	19	20	20
40	17	17	18	17
45	16	15	16	16
50	19	15	15	16

Fonte: Acervo do autor.

Tabela 9: Medições de dureza em Rockwell C da amostra SAE1050.

MEDIÇÕES				
Medida (mm)	1	2	3	Média
1,5	53	53	52	53
3	49	50	49	49
5	33	33	32	33
7	29	34	30	31
9	26	34	32	31
11	26	26	27	26
13	27	28	28	28
15	26	25	27	26
20	23	23	22	23
25	22	20	21	21
30	24	23	24	24
35	20	21	20	20
40	19	19	19	19
45	18	18	17	18
50	19	18	18	18

Fonte: Acervo do autor.

As medidas em Rockwell C possuem uma faixa de 20 a 70HRC. Analisando as medidas de dureza das amostras SAE4340 e SAE1050, podemos observar que, em ambas, as três últimas medições saem fora da faixa de dureza coberta pela especificação.

Abaixo serão demonstrados graficamente o comportamento das medições nos gráficos 4, 5, 6, 7 e 8:

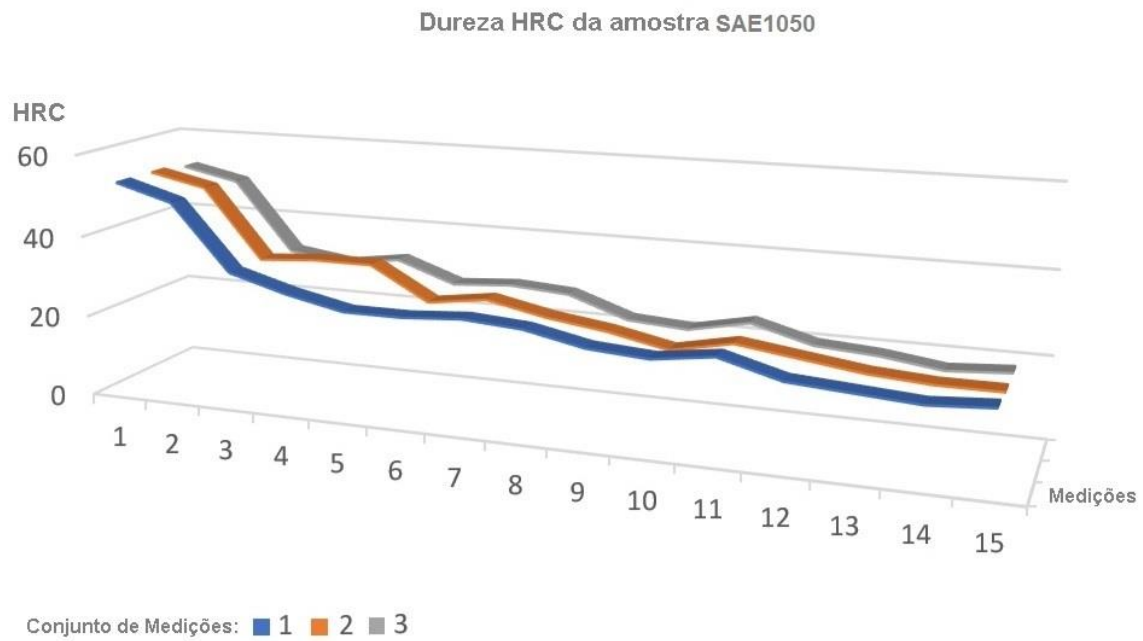


Gráfico 6: Durezas medidas em HRC da amostra SAE1050.
Fonte: Acervo do autor.

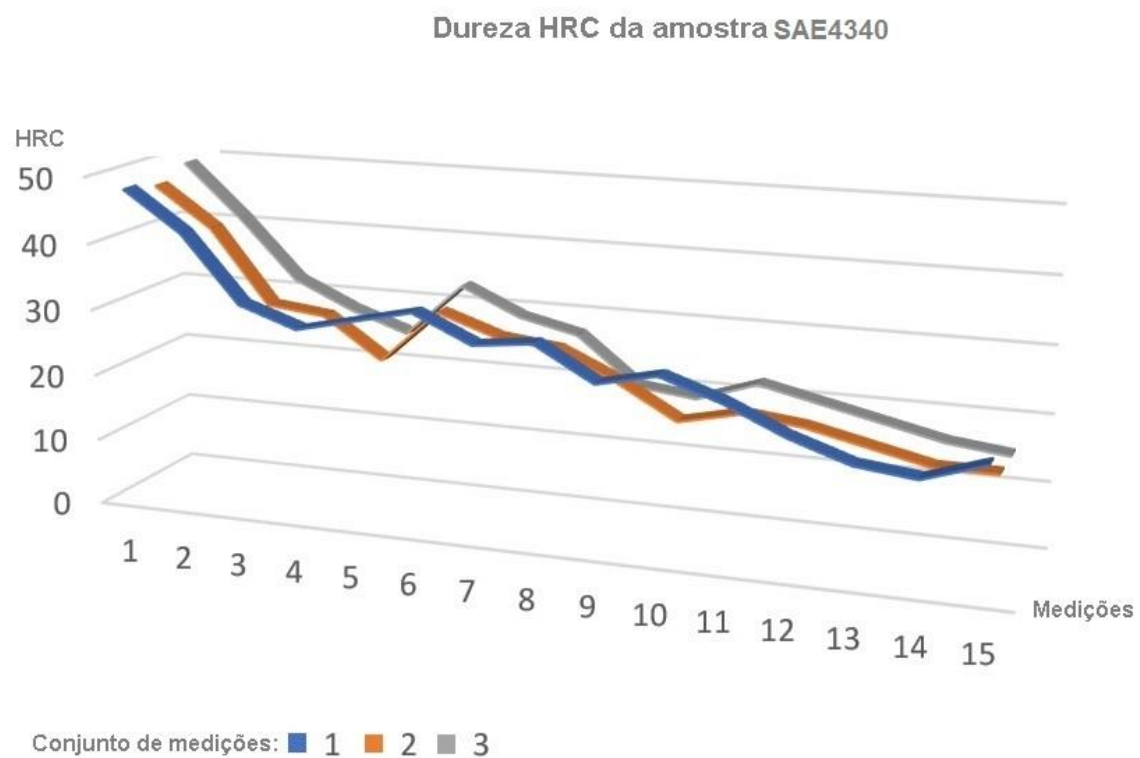


Gráfico 7: Durezas medidas em HRC da amostra SAE4340.
Fonte: Acervo do autor.

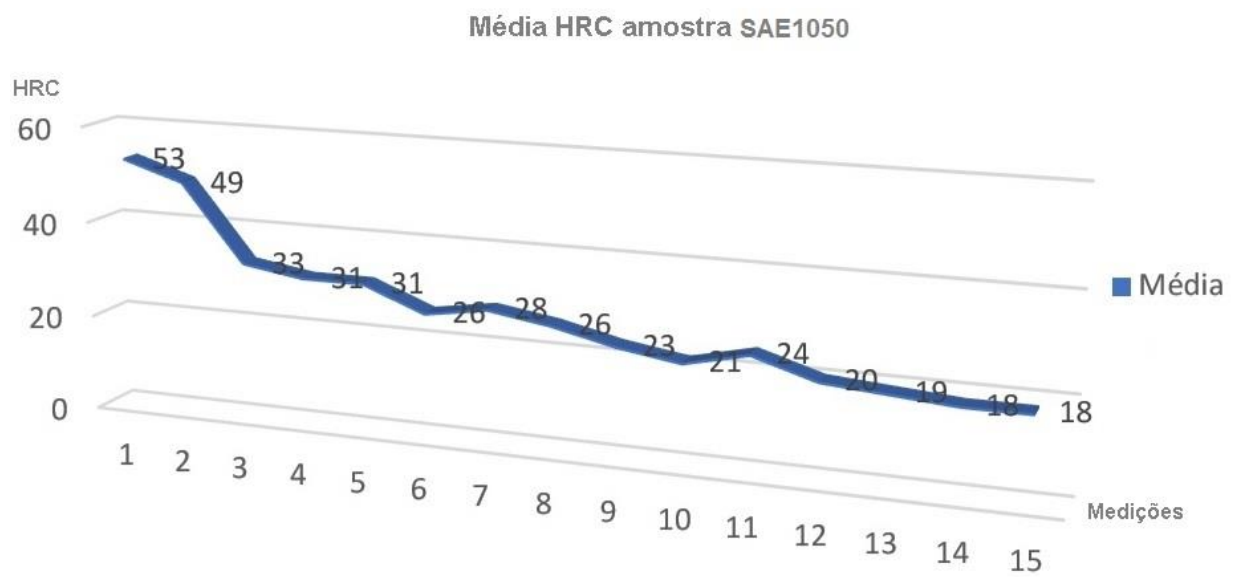


Gráfico 8: Dureza média da amostra SAE1050.
Fonte: Acervo do autor.

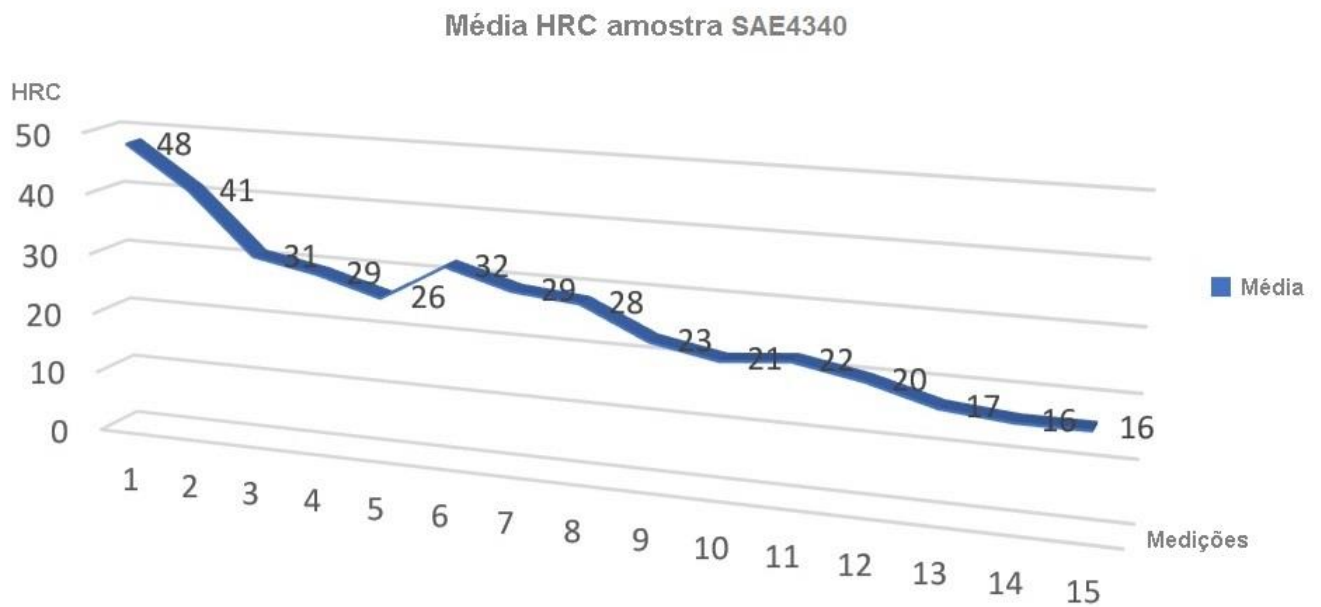


Gráfico 9: Dureza média da amostra SAE4340.
Fonte: Acervo do autor.

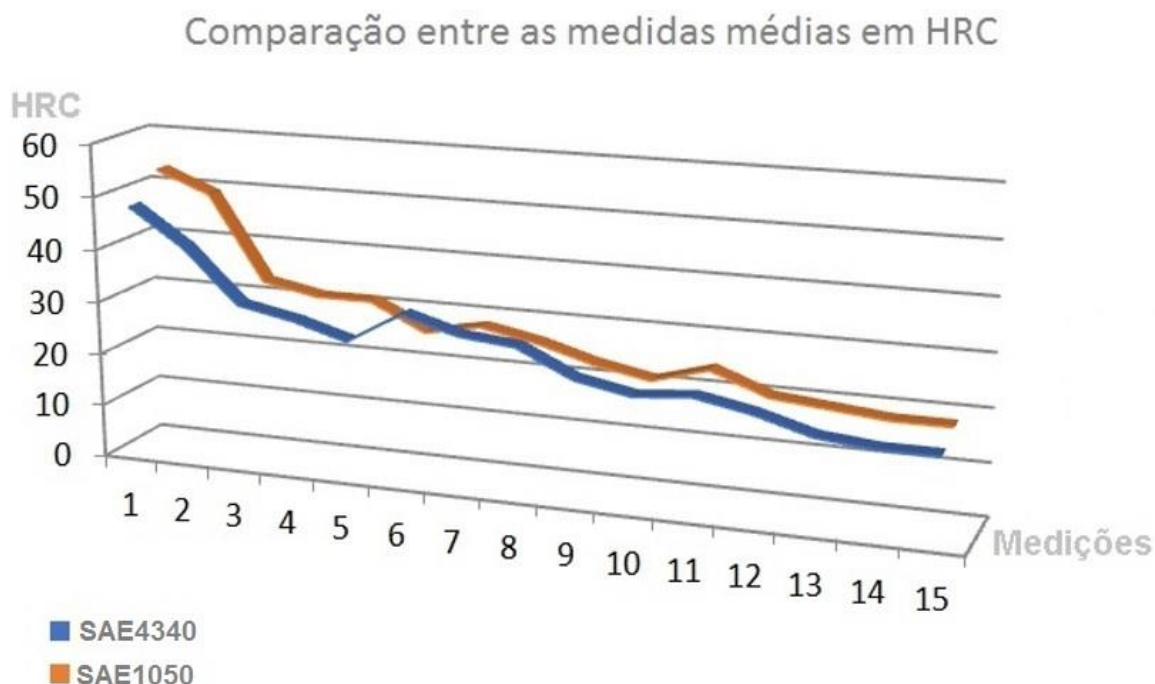


Gráfico 10: Comparação de durezas médias entre as amostras SAE1050 e SAE4340.
Fonte: Acervo do autor.

Como podemos observar nos gráficos acima, houve uma queda de dureza conforme foi se afastando da extremidade temperada, havendo apenas poucas diferenças entre as amostras SAE1050 e SAE4340.

Na amostra SAE4340, podemos notar que a dureza diminuiu com certa resistência, ou seja, caiu, porém permaneceu com maior valor que na amostra SAE1050 em uma faixa entre as medições 4 e 9 (de 5 a 15mm). Esse fenômeno é explicado pela extensão maior de formação de martensita, que foi beneficiada pela presença de elementos de liga.

Na tabela 10, temos as medições de dureza das amostras originais, ou seja, antes de passarem por qualquer tratamento térmico.

Tabela 10: Medições de dureza Rockwell C das amostras originais.

Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média
SAE1050	12	14	13	13
SAE4340	17	16	17	17

Fonte: Acervo do autor.

Podemos observar que as medidas das amostras originais se assemelham as medidas da extremidade inversa à extremidade temperada.

Já na tabela 11 e 12, podemos observar as medições do método Grossman.

Tabela 11: Medições de dureza Rockwell C em método Grossman do SAE4340.

Medição	HRC
1	54
2	56
3	57
4	59
5	57
6	53
7	51
8	59
9	59
10	58
11	59
12	59
13	54
14	55
15	54
16	57

Fonte: Acervo do autor.

Tabela 12: Medições de dureza Rockwell C em método Grossman do SAE1050.

Medição	HRC
1	54
2	55
3	56
4	55
5	55
6	55
7	56
8	55
9	54
10	56
11	53
12	54
13	55
14	54
15	55
16	56

Fonte: Acervo do autor.

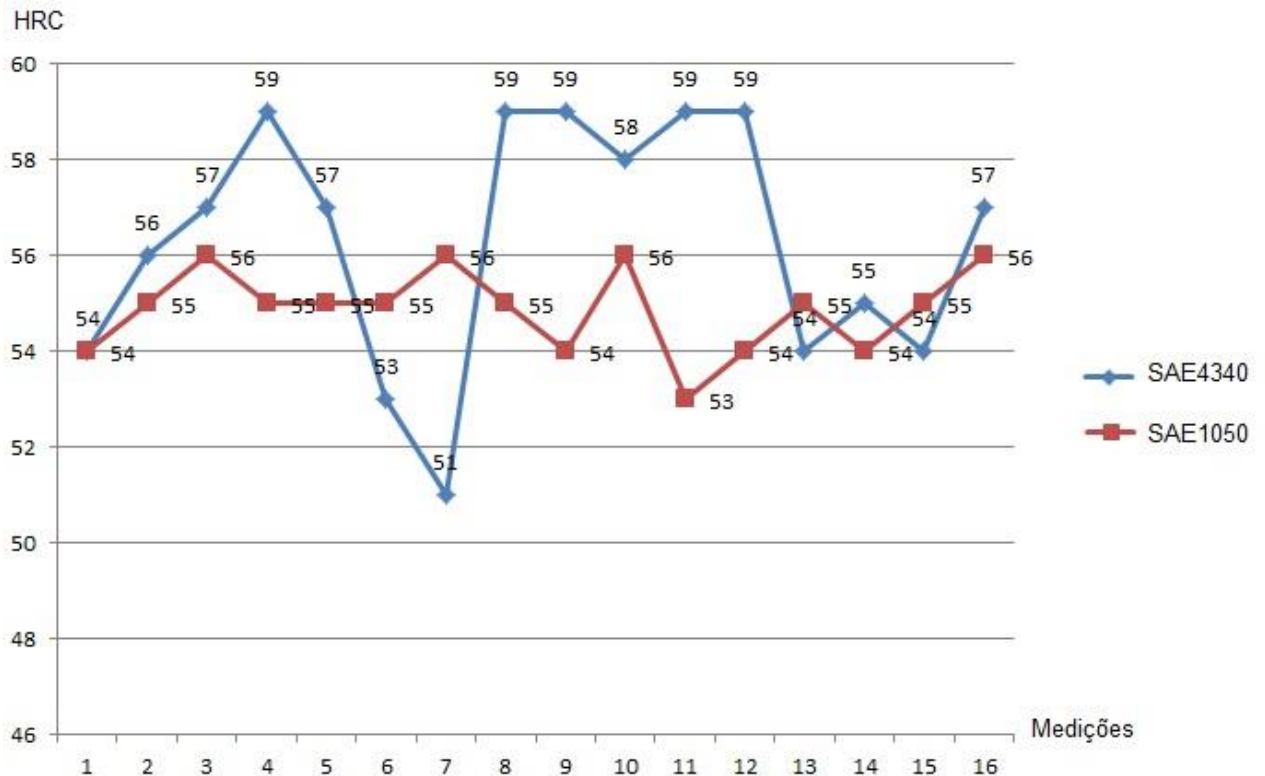


Gráfico 11: Comparação de medidas superficiais da extremidade temperada do SAE4340 e SAE1050.

Fonte: Acervo do autor.

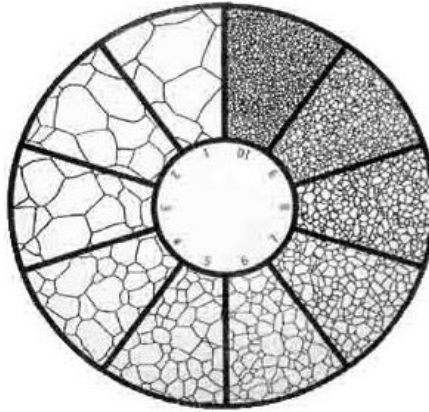
Podemos observar que na extremidade temperada de ambas as amostras a dureza é maior do que apresentada nos trilhos de medição Jominy. O SAE4340 apresenta picos maiores dureza em relação à amostra SAE1050 em sua superfície.

4.2 – Metalografias

As metalografias foram feitas com o aumento de 100x e 500x. Houve uma certa dificuldade por possuir falta de equipamento que fizesse a fotografia da microestrutura para que se obtivessem imagens com melhor qualidade, por isso, as fotos foram feitas através da câmera de um celular da marca ASUS, que por não ser um equipamento apropriado, acabou interferindo na baixa qualidade das fotomicrografias, porém, mesmo com todos os percalços é possível que as fotometalografias sejam analisadas e interpretadas.

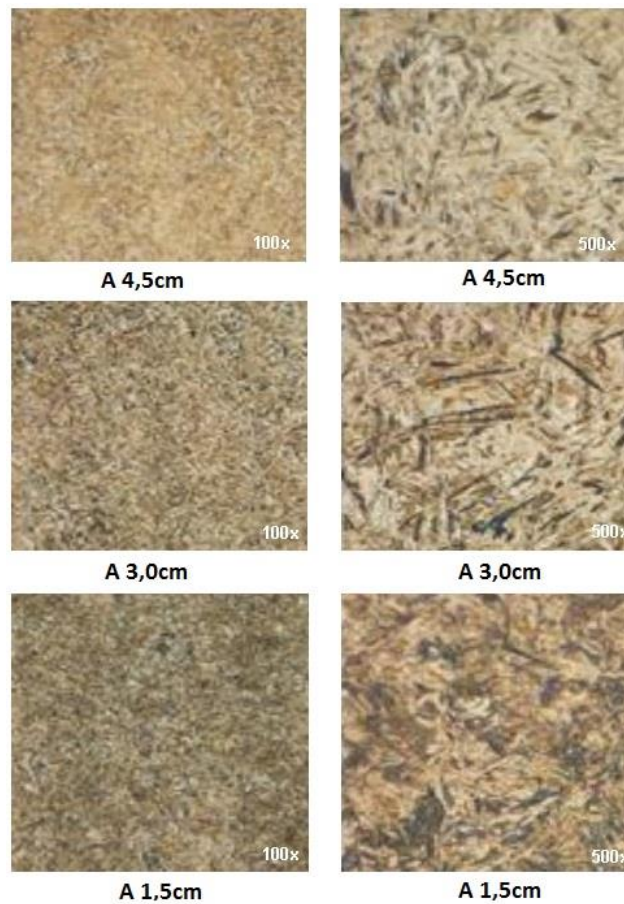
Foram efetuadas análises de tamanho de grão com a ajuda de um retículo para medição de tamanho de grão de 1 a 10 da ASTM E112. Vale ressaltar que nesse retículo temos as medições dos grãos que são inversamente proporcionais, ou seja, número menor = grão maior, número maior = grão menor.

Figura 33: Ilustração de retículo para medição de tamanho de grão de 1 a 10 da ASTM E112.



Fonte: [16]

Figura 34: Fotometalografias das amostras cortadas, derivadas da amostra SAE4340, com suas respectivas medidas e aumentos de 100x e 500x.

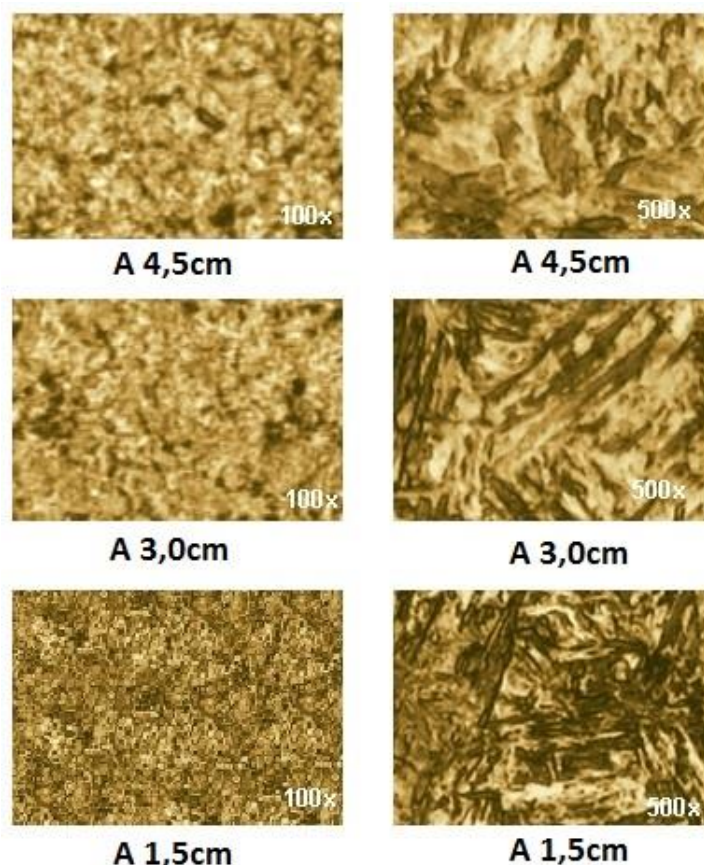


Fonte: Acervo do autor.

Podemos observar que a microestrutura da amostra SAE4340 possui uma granulação muito fina, por isso constatamos que seu tamanho de grão é 10. O que foi

observado, também, é que há presença de martensita em todas as extensões metalografadas, diferindo apenas que ela vai se dissipando conforme a distância da extremidade temperada vai aumentando.

Figura 35: Fotometalografias das amostras cortadas, derivadas da amostra SAE1050, com suas respectivas medidas e aumentos de 100x e 500x.



Fonte: Acervo do autor.

Observou-se que a granulação da amostra SAE1050 possui a numeração 9 em seu primeiro corte e 8 nas demais amostras, onde o grão aumentou de tamanho devido a dissipação, também, da martensita.

Dentre as duas amostras, constata-se que a presença de martensita é maior na amostra SAE4340 do que na amostra SAE1050, em ambas a martensita é presente e vai se dissipando conforme se afasta da extremidade temperada.

Embora o reticulado não seja adequado para a análise de grãos martensíticos, podemos afirmar que a granulação da amostra SAE4340 é mais fina que a granulação da amostra SAE1050.

5 - CONCLUSÃO

Segundo os resultados, conclui-se que a temperabilidade, que é a capacidade de endurecimento de um aço, ou seja, da profundidade de formação da martensita, é maior na amostra SAE4340 em relação à amostra SAE1050, pois com as medições feitas ao longo do comprimento das amostras em Rockwell C, demonstrou-se que a dureza na faixa de 5 a 15mm da extremidade temperada das amostras é maior na amostra SAE4340, conferindo maior profundidade de martensita em sua extensão de comprimento, o que pôde ser analisado nas fotometalografias efetuadas.

Embora o esperado seria que o SAE4340, por ser um aço microligado, apresentasse maior dureza, foi observado que ele possui menor dureza em sua extensão como um todo, comparado a amostra do SAE1050.

O que pode ser levado em consideração para este fenômeno é que o tempo de encharque não foi suficiente para a amostra SAE4340, não dissolvendo os carbonetos de forma eficaz, fazendo com que não houvesse maior probabilidade de endurecimento.

Analisando a superfície temperada, nota-se que a amostra SAE4340 possui maiores picos de dureza em relação ao SAE1050.

Na microestrutura, nota-se que na amostra SAE1050 há presença de martensita grosseira, já na amostra SAE4340 a martensita é mais fina, por possuir grãos mais finos, derivados da presença de seus elementos de liga.

Microestruturalmente, observou-se que a presença da martensita é notória e ao longo do comprimento da amostra, onde essa microestrutura se modifica sutilmente, é demonstrada uma grande mudança de comportamento em relação às propriedades mecânicas, pois as durezas em ambas as amostras diminuíram de uma extremidade a outra, conferindo que a presença da martensita é um forte constituinte para o aumento de dureza de um material.

5.1 – Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros é proposto que se utilize o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para observar se há a presença de perlita no comprimento do material para explicar o fenômeno do pequeno aumento de dureza da amostra SAE4340, utilizando as mesmas faixas de tempo e temperaturas utilizados neste trabalho.

Outro fator que deve-se levar em consideração é a temperatura de encharque. Fica como sugestão analisar as temperabilidades das amostras com temperaturas de encharque e tempos diferentes, sendo assim utilizando tempos maiores ou menores com a mesma temperatura ou o mesmo tempo com temperaturas diferentes.

Sugiro que se façam mais cortes ao longo da amostra para assim obter comparações mais claras a respeito do que ocorre em relação à microestrutura e propriedades obtidas através da mesma.

REFERÊNCIAS

- [1] CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica – Materiais de Construção Mecânica**. Volume 3 - 2ª edição. McGraw Hill LTDA, 1986.
- [2] LAWRENCE H. Van Vlack; FERRAO, LUIZ P. C. **PRINCIPIOS DE CIENCIA DOS MATERIAIS**. Editora Edgard Blucher LTDA. São paulo 1970.
- [3] ATKINS, Peter; JONES, Loretta. **Princípios De Química**. 3ª Edição. Editora Bookman. Porto Alegre, 2001.
- [4] CALLISTER, William D. Junior. **Ciência e engenharia de materiais – Uma introdução**. 5ª Edição. LTC. 2002, Rio de Janeiro.
- [5] ASM Handbook. **The materials Information Company**. Copyright © 1988 ASM International. Volume 15. <http://dl.iran-mavad.com/pdf94/ASM%20Handbook-v15_iran-mavad.com.pdf> Acessado em: Mai.2019.
- [6] MAFFEIS, Luis F. M. **METALURGIA FÍSICA E TECNOLOGIA DA CONFORMAÇÃO PLÁSTICA**. <<http://www.maffeis.eng.br/wp-content/uploads/2017/08/TCP-MF-aula-2.pdf>> Acessado em: Mai.2019.
- [7] SCHEID, Adriano. **A Elaboração do Aço**. <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM049/Aula%201.pdf>> Acessado em: Mai.2019.
- [8] GORNI, Antonio A. . **AÇOS FERRÍTICOS COM ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA E BOA CONFORMABILIDADE**. <http://www.gorni.eng.br/Gorni_CongCCM_CFF_Out2009.pdf> Acessado em: Mai.2019.
- [9] PASCOALI, Suzy. **Tecnologia dos Materiais I**. <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/a/a1/Aru_suzy_apostila_tecnologia_dos_materiais.pdf> Acessado em: Mai.2019.
- [10] RUCHERT, Cassius O. F. T . **AÇOS E FERROS FUNDIDOS**. <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2125206/mod_resource/content/1/LOM3022-MIQ-4-%20A%C3%87OS%20E%20FERROS%20FUNDIDOS%20Mod%20Cassius.pdf> Acessado em: Mai.2019.

- [11] MATÉRIAS-PRIMAS MINERAIS. **INTRODUÇÃO AO SISTEMA TERRA CONCEITOS DE MINERALOGIA E PETROLOGIA.**
<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4622174/mod_resource/content/0/PMI%203103_Aula%203_Introducao%20Sistema%20Terra%20e%20Mineralogia.pdf> Acessado em : Mai.2019.
- [12] NEWTON PAIVA , Centro Universitário. **INC 0108 – EFEITO DA TAXA DE RESFRIAMENTO NA CONSTITUIÇÃO DA PERLITA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS COMUNS.**
<<http://npa.newtonpaiva.br/iniciacaocientifica/?p=261>> Acessado em: Mai.2019.
- [13] ASTM. **Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel1.**
<http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/embaptotita.pdf> Acessado em: Jun.2019.
- [14] MACHADO, Jonas da P.;SANTOS, Matheus B.**Estudo comparativo da temperabilidade e dureza dos aços SAE4340 temperados ao maçarico.**
<<http://bd.centro.iff.edu.br/bitstream/123456789/2041/1/Texto.pdf>> Acessado em: Mai.2019.
- [15] KRELLING, Anael. **TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS.** <
<http://joinville.ifsc.edu.br/~anael.krelling/T%C3%A9cnico%20em%20Mec%C3%A2nica%20Integrado/TTT/2%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos%20e%20Termoqu%C3%ADmicos.pdf>>
Acessado em: Mai.2019.
- [16] TESTMAT. **RETÍCULO PARA MEDIÇÃO DE TAMANHO DE GRÃO 1 À 10 ASTM E112.** <<http://www.testmat.com.br/produto/reticulo-para-medicao-de-tamanho-de-grao-5/>> Acessado em: Jun.2019.
- [17] TSCHIPTSCHIN, André P;SINATORA, Amilton; GOLDENSTEIN, Hélio. **Efeito dos elementos de liga nos aços PMT-2402 – Metalografia de Tratamentos Térmicos** <<http://www.pmt.usp.br/pmt2402/capitulo8.pdf>> Acessado em: Mai.2019.
- [18] VASCONCELOS , Maria F. L. **ESTUDO DOS EFEITOS DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA NA MICROESTRUTURA DOS AÇOS CARBONO, AÇOS BAIXA LIGA E AÇOS ALTA LIGA.** <
http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/33362/1/2018_tcc_mflvasconcelos.pdf>
Acessado em: Mai.2019.

[19] **Estrutura cristalina.** <<http://www.fem.unicamp.br/~caram/capitulo3.pdf>>
Acessado em: Abr.2019.

[20] PERUCH, Luiz G. R.; PERUCH, Fábio. **DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO E REALIZAÇÃO DO ENSAIO JOMINY MONITORADO, PARA OBTENÇÃO DAS CURVAS DE RESFRIAMENTO.**
<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi2h4me8vXiAhXxHLkGHVomB_YQFjAAegQIABAB&url=http%3A%2F%2Frepositorio.satc.edu.br%2Fhandle%2Fsatc%2F343&usq=AOvVaw0I7JlmGoX3u3IIISDr33BGC> Acessado em: Abr.2019.

[21] OLIVEIRA, José C. M. **LEVANTAMENTO DA CURVA DE TEMPERABILIDADE E CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DO AÇO SAE 1140.**
<http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/305-035.pdf> Acessado em: Mai.2019.

[22] CANALE, Lauralice. **TEMPERABILIDADE.**
<<https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=1874842>> Acessado em: Mai.2019.

[23] ROLLO, João M. D. A. **DIAGRAMA FERRO CARBONO.** <
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4449566/mod_resource/content/0/Aula04%20-%20Diagrama%20de%20Fases%20Ferro%20Carbono.pdf> Acessado em: Mai.2019.

[24] SOUZA, José H. **Tabela de Aços Villares JH-MAT.** <
<https://pt.scribd.com/document/369539428/1-Tabela-de-Acos-Villares-JH-MAT>> Acessado em: Jun.2019.

[25] Ramos, Alfeu Saraiva. **TEMPERABILIDADE.** <
<https://slideplayer.com.br/slide/83268/>> Acessado em: Jun.2019