

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGA

**ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA CAMADA
CEMENTADA EM FUNÇÃO DO TEMPO E
TEMPERATURA DO AÇO SAE 1020**

**Rodrigo Homem de Melo Santos
Agnaldo de Lima Antunes Júnior**

Pindamonhangaba – SP

2017

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE
PINDAMONHANGA**

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA CAMADA CEMENTADA EM FUNÇÃO DO TEMPO E TEMPERATURA DO AÇO SAE 1020

**Rodrigo Homem de Melo Santos
Agnaldo de Lima Antunes Júnior**

**Monografia apresentada à Faculdade
de Tecnologia de Pindamonhangaba
para graduação, no Curso Superior de
Tecnologia em Processos Metalúrgicos.**

Área de Concentração Metalurgia

Orientador: Alexandre Sartori

Pindamonhangaba – SP

2017

S237e Santos, Rodrigo Homem de Melo.
Estudo da evolução da camada cementada em função do tempo e temperatura do aço SAE 1020 / Rodrigo Homem de Melo Santos; Agnaldo de Lima Antunes Júnior / FATEC Pindamonhangaba, 2017.
54f.; il.

Orientador: Professor Msc. Alexandre Sartori
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2017

1. Tratamentos térmicos. 2. Cementação. 3. Metalografia
4. Metalurgia. 5. Micro dureza. I. Santos, Rodrigo Homem de Melo.
II. Antunes Júnior, Agnaldo de Lima. III. Sartori, Alexandre. IV. Título.

CDD 669

DEDICATÓRIA

Dedicamos à nossas famílias que, apesar de não nos influenciar diretamente nesse trabalho ensinaram-nos o caminho da perseverança e responsabiliza diante dos obstáculos. A minha filha Sofia que é o motivo de eu sempre lutar e querer crescer profissionalmente.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus pelo dom da vida e pelas pessoas que passaram por nossos caminhos e pelos momentos que compartilhamos estudando e nos divertindo durante uma das mais importantes trajetórias de nossas vidas.

A nossos pais que, com muita sabedoria, deram-nos subsídio para uma vida saudável, de responsabilidades e ensinamentos éticos, e que nos incentivaram a estudar para que um dia tivéssemos sucesso.

Aos nossos professores que, de maneira objetiva, ensinaram-nos, passo a passo, os deveres de nosso ofício e que sem sacrifícios não há vitórias.

Aos amigos e colegas de sala, que compartilharam dessa experiência conosco enfrentando os dias cansativos de tanto estudar para as provas, pelos momentos de descontração e principalmente pela amizade e carinho que com todos dividimos.

Ao nosso orientador Alexandre Sartori que, no meio do caminho, abraçou nossa causa e dividiu seu conhecimento para que pudéssemos concretizar nosso trabalho.

A faculdade Fatec de Pindamonhangaba que nos forneceram os equipamentos e laboratório para realizar o nosso experimento.

Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade

Albert Einstein

SANTOS; Rodrigo H.M.; JUNIOR; Agnaldo L. A. **Estudo da Evolução da Camada Cementada em Função do Tempo e Temperatura do Aço SAE 1020**. 2017. 59p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2017.

RESUMO

A cementação é um tratamento térmico largamente utilizado para melhorar características funcionais de aços de baixa liga, como o aço SAE 1020 que tem uma extrema importância nos campos de engenharia pois possui boa resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo a tem uma excelente capacidade de absorve carbono rápido, elevando sua dureza superficial e preservando o seu núcleo tenaz. Para ser realizada a cementação deve ser levado em conta a temperatura e tempo, utilizados no processo. O objetivo desse trabalho foi fazer um estudo comparativo no processo de cementação entre dois tipos de temperatura em relação à três períodos diferentes de exposição ao forno. Obtendo ao final parâmetro para a melhor escolha do processo utilizado levando em consideração o seu uso em relação a custo e benéfico, feitas análises micro gráficas do material antes e após submetê-lo ao processo de cementação avaliando e acompanhando a evolução da camada cementada, feitos os ensaios de micro dureza onde confirmou o comportamento micro estrutural para atestar os resultados esperados em cada um dos corpos de prova, sendo maior em temperaturas mais elevadas.

Palavra-chave: tratamentos térmicos, cementação, micro gráficas, micro dureza.

SANTOS; Rodrigo H.M. ; JÚNIOR; Agnaldo L. A. **Study of the Evolution of Cement Layer in Time and Temperatures Steel SAE 1020**. 2017. 59p. Graduation Work (Course of Metallurgical Processes). Faculty of Technology of Pindamonhangaba.Pindamonhangaba. 2017.

ABSTRACT

Cementation is a heat treatment widely used to improve the functional characteristics of low alloy steels, such as SAE 1020 steel, which is extremely important in the engineering fields because it has good mechanical strength, workability, availability and low cost absorbs fast carbon, raising its surface hardness and preserving its tenacious core. To be carried out the cementation must be taken into account the temperature and time, used in the process. The objective of this work was to make a comparative study in the cementation process between two types of temperature in relation to the three different periods of exposure to the kiln. Getting to the end parameter for the best choice of the process used taking into account its use in relation to cost and beneficial, made micro graphical analyzes of the material before and after submitting it to the cementing process evaluating and following the evolution of the cemented layer, made the micro hardness tests confirmed the micro structural behavior to confirm the expected results in each of the specimens, being higher in higher temperatures.

Keyword: thermal treatments, cementation, micrographs, micro hardness

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Exemplo do esquema de uma Instalação de Alto-Forno.....	19
Figura 2 - Mostra os componentes de um Conversor Bessemer.....	20
Figura 3 -Metalógrafia do aço SAE 1020, com aumento de 200x na superfície do material.....	24
Figura 4 - Mostra as faixas de temperaturas de aquecimento no diagrama Fe-Fe ₃ C para diversos tipos de tratamentos térmicos em aços.....	26
Figura 5 - Ilustração comparativa de resfriamento no processo de tratamento térmico	27
Figura 6- Mostra o esquema comparativo entre a microestrutura formada e o diagrama TTT, com a mudança da concentração e taxa de resfriamento da superfície ao núcleo da peça cementada	28
Figura 7 - Apresenta o diagrama de fase Fe-C.....	31
Figura8 -Comparação de casos em relação à profundidade de penetração do carbono em função da temperatura e do tempo.....	32
Figura 9 - Reação de uma cementação solida.....	34
Figura 10 - Demonstração do esquema de impressão e utilização da formula na aplicação do método Vickers.....	39
Figura 11 -exemplo da importância da micrografia de um aço SAE 1020 de baixo carbono e um aço SAE 1045 de médio carbono.....	41
Figura 12 -foto do tarugo do aço SAE 1020 antes de serem feitos os cortes para análise.....	42
Figura 13- Foto dos corpos de prova do um tarugo do aço SAE 1020 prontos para passarem no processo de cementação.....	43
Figura 14- Foto da caixa com pó utilizado no processo de cementação.....	44
Figura 15-Foto do forno mostrando a temperatura estipulada, durante o tratamento de cementação.....	45
Figura 16 - Foto da amostra embutida à quente em baquelite,.....	46

Figura 17 - Exemplo de uma politriz genérica, lixas e panos utilizados para polimento e foto do processo em si.....	47
Figura 18 - Mostra as marcações no corpo de prova segundo o método Dureza Vickers (HV).....	48
Figura 19 - Foto do penetrador de micro durometro e abaixo a foto capturada das marcações no corpo de prova.....	48
Figura 20- Mostra a metalógrafia do aço SAE 1020, com aumento de 100x na superfície do material antes do processo de cementação.....	53
Figura 21 – Metalógrafia comparativa com aumento de 50x no centro das amostras após cementação, obtidos da temperatura de 870°C.....	54
Figura 22- Metalógrafiacomparativacom aumento de 50x na extremidade das amostras após cementação, obtidos da temperatura de 950°C.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos aços de acordo com a aplicação.....	23
Tabela 2 - Composições de banho de sal para cementação líquida.....	36
Tabela 3 - Conversão de durezas em escala Rockwell, Brinell e Vickers.....	40
Tabela 4 - Dureza de superfície dos corpos de prova cementados em caixa na temperatura de 870°C.....	49
Tabela 5 - Dureza de superfície dos corpos de prova cementados em caixa na temperatura de 950°C.....	50
Tabela 6 - Medição da Camada Cementada nas temperaturas de 870°C e 950°C.....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva da dureza obtida nas amostras de cementação a 870°C.....	51
Gráfico 2 - Curva da dureza obtida nas amostras de cementação a 950°C.....	52
Gráfico 3 - Curva da dureza obtida nas amostras de cementação a 870°C e 950°C.....	52
Gráfico 4 - Curva da camada Cementada obtida nas amostras de cementação a 870°C e 950°C.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAE - Society of Automotive Engineers

ASBNT – Associação brasileira de normas técnicas

TTT – Tempo, temperatura, transformação

Si – Silício

Mn - Manganês

P - Potássio

S - Enxofre

C - Carbono

N – Níquel

Mo – Molibdênio

U – Urânio

Cr – Cromo

W – Tungstênio

B – Bário

Nb – Nióbio

Fe – Ferro

Fe₃C – Cementita

°C - Graus Celsius

Co – Carbono

Co₂ – Dióxido de carbono

O₂ – Oxigênio

HV – Dureza vickers

m m – Milímetros

h – horas

ARBL – Alta resistência baixa liga

Kgf – Kilo grama força

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	PROCESSOS SIDERÚRGICOS	18
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS	21
2.2.1	De acordo com a composição química	21
2.2.2	De acordo com a estrutura	22
2.2.3	De acordo com aplicação	23
2.2.4	O aço SAE 1020	24
2.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS	25
2.3.1	Tratamentos térmicos	25
2.3.2	Tratamentos termoquímicos	29
2.4	CEMENTAÇÃO	30
2.5	TIPOS DE CEMENTAÇÃO	33
2.5.1	Cementação em meio sólido	33
2.5.2	Cementação em meio gasoso	34
2.5.3	Cementação em meio líquido	35
2.6	ENSAIOS MECÂNICOS	37
2.6.1	Ensaio de dureza	38
2.7	METALOGRAFIA	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Materiais	42
3.2	Métodos	42
3.2.1	Tratamento de Cementação	43
3.2.2	Preparação metalográfica	45
3.2.2.1	Embutimento	46
3.2.2.2	Lixamento e polimento	46
3.2.2.3	Ataque químico	47
3.3	Ensaio de microdureza Vickers	47
4	Resultados e discussões	49
4.1	Elevação da dureza	49

4.2	Representação gráfica.....	51
5	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

Os materiais muitas das vezes precisam ser processados ou tratados para obterem as propriedades necessárias, assim satisfazendo as necessidades técnicas e econômicas de um projeto, pois nem sempre estes materiais se encontram com propriedades mistas ou específicas.

Alguns destes projetos necessitam que os materiais tenham em regiões diferentes propriedades, como dureza ou tenacidade. Podemos citar uma engrenagem, por exemplo, que necessita que sua superfície tenha elevada dureza e resistência ao desgaste nas regiões de contato com os outros componentes de uma máquina e seu núcleo tenha ductilidade e tenacidade, para absorver as vibrações e os choques inerentes à transmissão de movimento e eventuais impactos (ABDALLA *etal*, 2008).

O processo de cementação é um dos tratamentos térmicos mais antigos de que se tem registro na história, sendo encontrados artigos de aço tratado do período de 300 anos antes de Cristo, elaborados provavelmente pelos antigos ferreiros romanos. Desde essa época, o homem já se preocupa em desenvolver processos que lhe garantam cada vez maior vida útil, resistência e confiabilidade nos componentes produzidos, buscando sempre a máxima durabilidade durante a aplicação mecânica. Dentre os vários processos de tratamentos térmicos utilizados atualmente, a cementação tem um importante destaque principalmente por permitir a utilização de aços de baixo custo, que após o processo apresentam elevada dureza superficial e excelente tenacidade no núcleo (CHIAVERINI, 2002).

Uma das alternativas para atingir esta mescla de propriedades é submeter os materiais a tratamento térmicos, como: cementação, têmpera e revenido que, se realizados em condições adequadas, proporcionarão ao material essas características requisitadas (ABDALLA *etal*, 2008).

Neste trabalho foi utilizado como aço para cementação o material ABNT/SAE 1020, sendo uns dos mais comuns encontrados na indústria em geral devido a sua baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade.

A escolha desta liga se deve ao fato de que tem a capacidade de absorver carbono em alta velocidade nas temperaturas de 870°C e 950°C, apresentando uma camada de enriquecimento superficial de carbono uniforme, além de considerável tenacidade e resistência mecânica no núcleo após o tratamento térmico, sendo imprescindível como

meio de melhoria da qualidade, ganho de vida útil e desempenho de componentes mecânicos (CALLISTER, 2002).

Cada vez mais se tem buscado melhorar as características dos aços, tais como resistência mecânica e resistência à fadiga, modificando a microestrutura dos materiais, através da variação de composição química e por processos térmicos para suprir as exigências do mercado, principalmente por aços que apresentem melhores propriedades com menor peso e menor custo (ABDALLA *et al.*, 2008).

A cementação é definida como sendo um processo termoquímico, no qual ocorre a difusão de carbono a partir da superfície do componente, sendo que após um resfriamento rápido (têmpera) em meio adequado, o material irá apresentar uma superfície endurecida e um núcleo tenaz. A cementação consiste, portanto na formação de uma camada superficial de elevado teor de carbono, permanecendo inalterado o percentual de carbono do núcleo (CALLISTER, 2002).

O objetivo deste trabalho é estudar o efeito do enriquecimento em carbono, comparar a evolução da camada cementada e sua dureza na superfície do aço SAE 1020 sem que altere seu núcleo através do tratamento termoquímico em função do tempo e temperatura em diferentes profundidades. Para essa comparação será utilizada a técnica de metalografia. Comprovando que por meio de um processamento termoquímico, a resistência superficial desse material torna-se resistente e o núcleo permanece tenaz, aumentando-lhe a vida útil em sua aplicação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

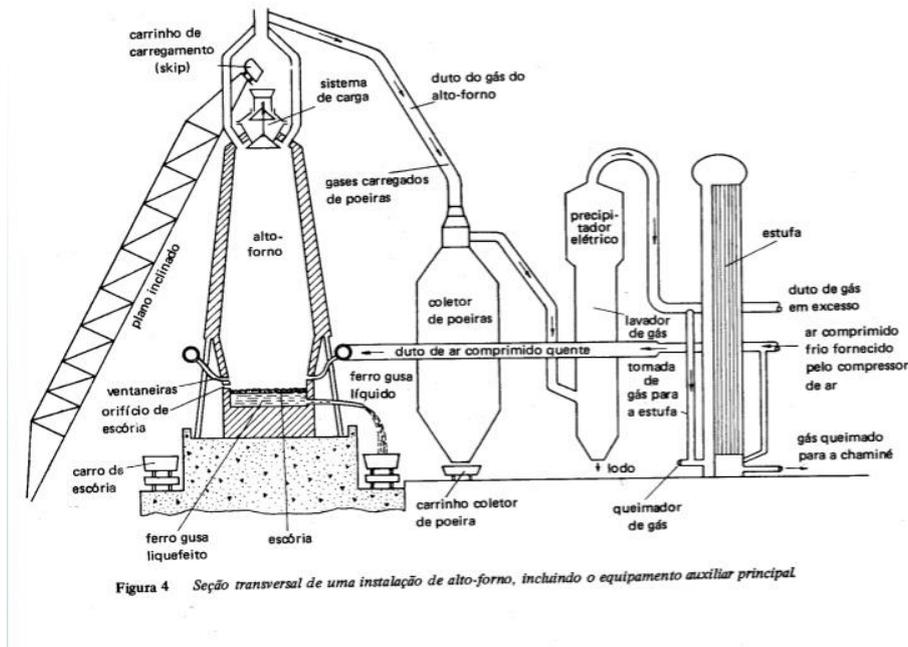
2.1 Processos siderúrgicos

A primeira vez que o homem fez contato com elemento ferro, foi sob a forma de meteoritos, daí a etimologia da palavra siderurgia, cujo radical latino sider significa estrela ou astro (JÚNIOR, 2002).

O principal processo de fabricação de aço consiste na metalurgia ou produção do ferro fundido através de um aparelho utilizado chamado alto-forno conforme Figura 1, que consiste essencialmente na redução dos óxidos dos minérios de ferro, mediante o emprego de um redutor, que é um material à base de carbono, o carvão, o qual atua igualmente como combustível e,

indiretamente, supridor do carbono para as ligas ferro-carbono de alta concentração de carbono que são os principais produtos do alto-forno (CHIAVERINI, 1986).

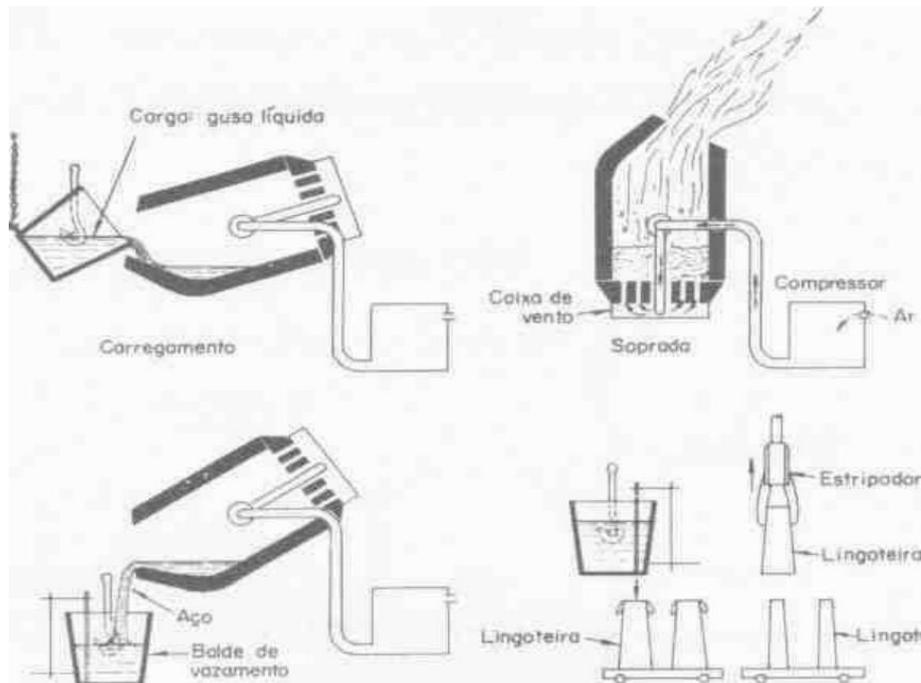
Figura 1 - Seção Transversal de uma Instalação de Alto-Forno



Fonte: (CHIAVERNI, 1986)

Sendo o ferro gusa uma liga ferro-carbono em que o carbono e as impurezas normais (Si, Mn, P e S, principalmente as duas primeiras) se encontram em elevados teores, a sua transformação em aço, que é uma liga de mais baixos teores de C, Si, Mn, P e S, corresponde a um processo de oxidação, no qual a porcentagem é reduzida até valores desejados. Para que o ferro gusa tenha a transformação em aço, é necessária a utilização de agentes oxidantes, os quais podem ser de natureza gasosa (como ar e oxigênio), ou de natureza sólida (como minérios na forma de óxidos). O processo mais comum é o pneumático tradicional que se utiliza dos agentes oxidantes gasosos em um equipamento chamado conversor Bessemer conforme Figura 2 (CHIAVERINI, 1986).

Figura 2 - Seção Transversal Esquemática de um Conversor Bessemer



Fonte: (www.ebah.com.br)

No conversor Bessemer, são realizadas as reações de oxidações dos elementos contidos no ferro gusa ainda líquido, onde o principal elemento, o carbono, possui no seu início, o teor de 4,0 a 4,5% de carbono. Conforme mostra na parte inferior da Figura 2, o conversor passa por três posições típicas no decorrer da operação de obtenção do aço, antes da completa refinação do aço e vazamento para lingotamento (CHIAVERINI, 1986).

O aço é uma liga de ferro carbono, sendo o primeiro elemento metálico encontrado na natureza combinado com oxigênio, formando assim o “minério de ferro”. Já o carbono é obtido a partir do carvão mineral ou vegetal, elementos esses que são ricos em carbono. Os aços possuem geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes do processo de fabricação, isso lhes dão propriedades como: boa resistência, possibilidade de ser forjado, laminado, moldado, perfurado e modificado em suas propriedades por meio de tratamentos térmicos, mecânicos e químicos (ARAÚJO, 1997).

2.2 Classificações dos aços

Os aços podem ser classificados de muitas formas e essas classificações acabam - se entrelaçando umas às outras, pois um mesmo tipo de aço pode estar presente em duas classificações diferentes, como por exemplo, aços inoxidáveis martensíticos podem ser classificados de acordo com a estrutura, recebendo assim a classificação de aço martensítico ou serem classificados de acordo com a composição química que receberia então a classificação de um aço alta liga. Portanto, para uma simplificação deste assunto, no presente trabalho, será adotada a seguinte classificação, utilizada por Chiaverini (2008):

- a) Classificação de acordo com a composição química.
- b) Classificação de acordo com a estrutura.
- c) Classificação de acordo com a aplicação.

2.2.1 Classificação dos aços de acordo com a composição química

Segundo Mila *et al*(2008), são classificados em 2 grupos:

Aços ao carbono: São ligas de ferro e carbono mais elementos residuais provenientes dos processos de fabricação como Mn, S, P e O. O aço ao carbono pode ser separado em aços baixo carbono (0,25% C), aço médio carbono (de 0,25% a 0,50% de C) e aço alto carbono (de 0,50% a 2,14% de C).

Aços Ligas: São aqueles que em cuja composição química além dos elementos residuais dos processos de fabricação contém elementos de liga como Mn, Ni, Mo, V, Cr, W, Si, B e Cr adicionados intencionalmente para alterar, melhorar ou conferir determinadas propriedades aos aços. Este grupo se subdivide em:

Aços baixa liga: Aço baixa liga são aqueles que contêm até 5% em peso de elementos de liga, um exemplo de aço pertencente a esse grupo são os aços ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga) também conhecidos como aços micro ligados, esses aços contêm pequenas adições de elementos de liga < 1%, elementos como Vanádio (V) e Nióbio (Nb), por exemplo, tais elementos são formadores de carbonetos que mesmo em quantidades pequenas provocam um efeito endurecedor pela precipitação de carbonetos finos dispersos na matriz.

Aços média liga: São aços que contêm cerca de 5% a 10% de elementos de liga matriz.

Aços alta liga: São aços que contêm acima de 10% de elementos de liga, fazem parte desse grupo os aços ferramentas e os aços inoxidáveis matriz.

2.2.2 Classificação dos aços de acordo com a estrutura

Segundo Chiaverini (2005), utiliza-se a estrutura cristalina para classificação dos aços neste grupo, e eles ganham então as seguintes definições:

Aços perlíticos: Este tipo de aço contém no máximo 5% de elementos de liga, suas propriedades mecânicas variam em função do teor de carbono, podendo ser melhoradas através dos tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento.

Aços martensíticos: Classificados simplesmente como aços que contêm elementos de liga superiores a 5% e que apresentem dureza elevada e baixa usinabilidade.

Aços austeníticos: Devido aos altos teores de elementos de liga estabilizadores da austenita como níquel, manganês ou cobalto, este tipo de aço apresenta à temperatura ambiente a fase austenítica, aços inoxidáveis não magnéticos e aços resistentes ao calor são pertencentes a esse grupo.

Aços ferríticos: Estes tipos de aço contêm elevados teores de elementos de liga como Cobre, Tungstênio ou Silício e baixos teores de carbono, não são suscetíveis à têmpera, apresentam em predominância estrutura ferrítica com pequenas quantidades de cementita.

Aços carbídico: São aqueles que contêm quantidades relativamente altas de carbono e de elementos formadores de carbonetos tais como tungstênio, cromo, manganês, titânio, nióbio e zircônio, sua estrutura formada por carbonetos dispersos na matriz que pode ser do tipo sorbítico, martensítico ou austenítico, depende de sua composição química.

Segundo Pereira (2004), além das citadas anteriormente, existem mais dois tipos:

Aços bifásicos (dual-phase steels): Aços bifásicos são aqueles que contêm baixos teores de carbono e têm em sua constituição macroestrutural as estruturas ferrita e martensita que são obtidas pelo tratamento térmico de têmpera intercrítica. Estes aços apresentam elevada resistência mecânica devido à microestrutura martensítica, porém apresentam também uma boa conformação e ductilidade devido à presença da microestrutura ferrítica. Abre-se aqui um parêntese para deixar registrado que aços bifásicos também podem conter teores de bainita, perlita e austenita retida.

Aços multifásicos: Aços multifásicos são aqueles cuja constituição é uma matriz ferrítica contendo dispersões de segunda fase como martensita e bainita, e também austenita retida em frações volumétricas acima de 5%.

2.2.3 Classificação dos aços de acordo com a aplicação

Na classificação dos aços de acordo com a aplicação considera-se para que fins esses aços serão utilizados, a Tabela 1 representa uma relação dos tipos de aços

pertencentes a esse grupo sem detalhamento sobre cada um, apenas com especial atenção aos aços para cementação, classificação na qual se encontra o aço objeto do presente trabalho, não que tal assunto não seja interessante, mas simplesmente por não ser objetivo deste estudo no presente momento (CHIAVERINI, 2005).

Tabela 1 - Classificação dos aços de acordo com a aplicação.

Aços para fundição	Aços para nitretação
Aços Estruturais	Aços para ferramentas e matrizes
Aços para trilhos	Aços resistentes ao desgaste
Aços para tubos	Aços resistentes a corrosão
Aços para barras, arames e fios	Aços resistentes ao calor (Aços refratários)
Aços para mola	Aços para fins elétricos
Aços para usinagem fácil	Aços para fins magnéticos
Aços para cementação	Aços Ultra Resistentes
Aços sinterizados	Aços criogênicos
Aços para produtos planos	

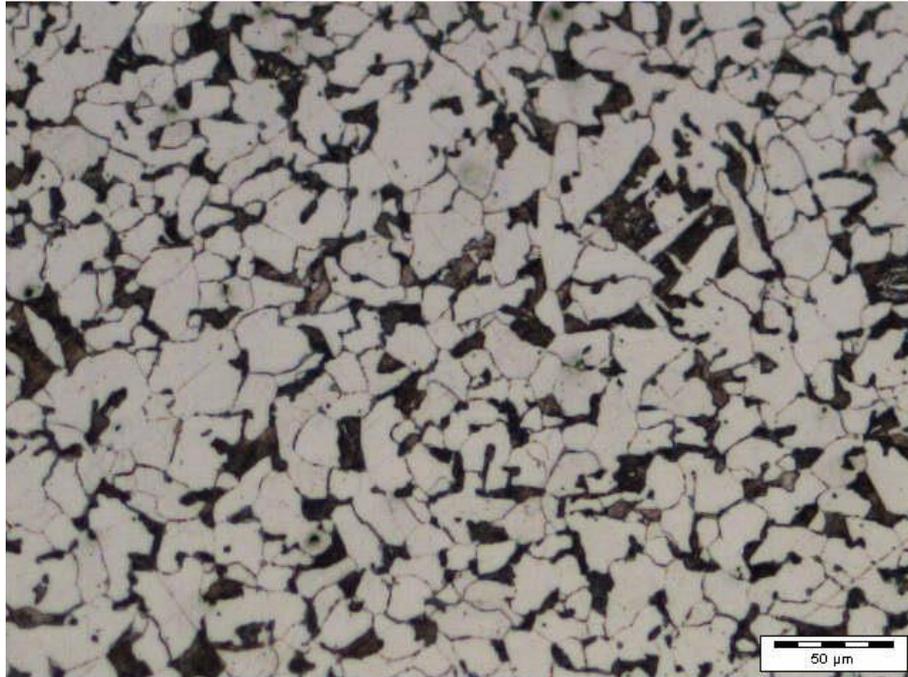
Fonte: (CHIAVERINI, 2005).

2.2.4 O aço SAE 1020

O aço carbono SAE 1020 é um dos aços mais utilizado, devido a sua baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade, porém sua usinagem é relativamente pobre. Este tipo de aço pode ser aplicado em cementação com excelente relação custo benefício comparado com aços utilizados para o mesmo propósito. A microestrutura presente neste aço no seu estado normalizado é perlita fina e ferrita como apresentado na Figura 3. Este aço é indicado para parafusos, trefilados duros, chassis, discos de roda, peças em geral para máquinas e veículos submetidos a esforços pequenos

e médios. É um aço altamente tenaz, particularmente indicado para fabricação de peças que devam receber tratamento superficial para aumento de dureza, principalmente cementação. Utilizado ainda para eixos em geral, forjados (ARCELOR MITAL, 2013).

Figura 3 – Mostra a microestrutura do aço SAE 1020 na condição inicial – ataque com nital 2% e aumento de 200x



Fonte: os autores.

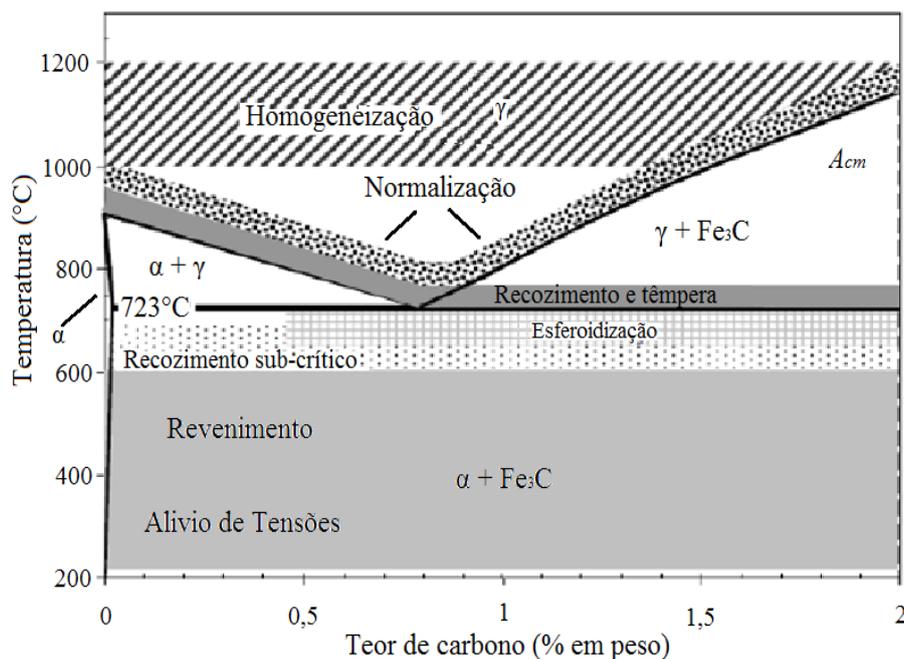
2.3 Tratamentos térmicos e termoquímicos

2.3.1 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos têm como objetivo fundamental alterar as propriedades mecânicas dos metais sem que seja afetada ou alterada a composição química dos mesmos, através de aquecimento e resfriamento controlados em diversas faixas de temperatura. Com o processo de aquecimento e resfriamento dos metais, ocorrem modificações microestruturais, ou seja, alteram-se quantidade, tipo, fração volumétrica e morfologia das fases presentes no metal (MILAN *etal*, 2008).

A temperatura de aquecimento imposta no processo dependerá do material e da transformação de fase ou microestrutura/propriedade desejada. Normalmente submete-se o material a ser tratado, a uma temperatura de austenitização, a fim de eliminar os efeitos causados de processos de fabricação anteriormente, porém, é importante salientar que temperaturas muito altas podem obter crescimento de grão, oxidação dos contornos de grão, etc. E em temperaturas muito baixas, pode ocorrer de o material não ser completamente austenitizado, causando em ambos os casos situações prejudiciais ao comportamento e aplicabilidade da peça fabricada nestas condições do material. A Figura 4 mostra as diferentes faixas de temperaturas de aquecimento e tipos de tratamento térmicos normalmente realizáveis (MILAN *et al*, 2008).

Figura 4 -Faixas de temperaturas de aquecimento no diagrama Fe-Fe₃C para diversos tipos de tratamentos térmicos em aços.

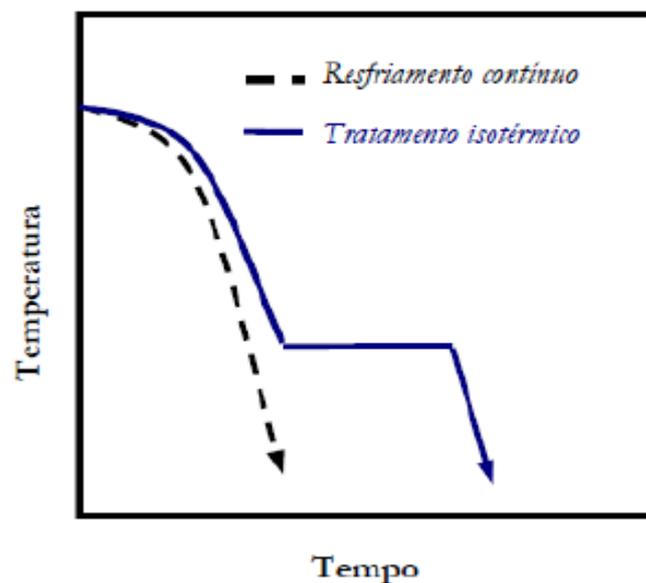


Fonte: (Milan et al, 2008).

Já o resfriamento, pode ser dividido em resfriamento contínuo e resfriamento isotérmico. O resfriamento contínuo ocorre de maneira que não tenha mudanças bruscas na taxa de resfriamento, ou seja, a redução da temperatura acontece de modo contínuo sem formação

de patamares. No caso dos resfriamentos isotérmicos, apresentam um ou mais patamares de temperaturas. A Figura 5 mostra os dois tipos de resfriamento que ocorrem no processo de tratamento térmico dos metais (MILAN *et al*, 2008).

Figura 5 - Tipos de resfriamento no processo de tratamento térmico.



Fonte: (Milan *et al*, 2008).

Os tratamentos térmicos de resfriamento contínuo são têmpera, revenimento ou alívio de tensões, homogeneização, recozimento, recozimento subcrítico, esferoidização e normalização. Os de resfriamentos isotérmicos são principalmente o de austêmpera e martêmpera. Os resfriamentos podem ocorrer em água, salmoura, óleo, sais fundidos ou ar, dependendo da taxa de resfriamento desejada (MILAN *et al*, 2008).

Destes iremos aplicar neste trabalho, o tratamento térmico de têmpera resfriado em óleo, e em temperatura ambiente

De acordo com Chiaverini (2008), a têmpera é o tratamento térmico que se realiza nos aços cementados. Após temperar esses aços deve-se levar em conta que o material apresenta duas secções distintas, uma correspondente à camada cementada, de alto teor de carbono, muito dura e de alta temperabilidade e outra, central, de baixo teor de carbono e dúctil. Portanto o aço apresenta duas temperaturas críticas, o que significa que, no aquecimento para têmpera, a temperatura crítica do núcleo pode não ser atingida eventualmente.

O tratamento térmico de Têmpera nos aços tem como objetivo a obtenção de microestrutura que proporcione propriedades de dureza e resistência mecânica elevada (CHIAVERINI, 2008).

A peça a ser temperada é aquecida a temperatura de austenitização e em seguida submetida a um resfriamento brusco formando uma estrutura martensítica, que depende da composição química para se formar. Em geral, quanto maiores os teores de carbono e elementos de liga presente no material, maior a temperabilidade e conseqüentemente menor a taxa de resfriamento necessária.

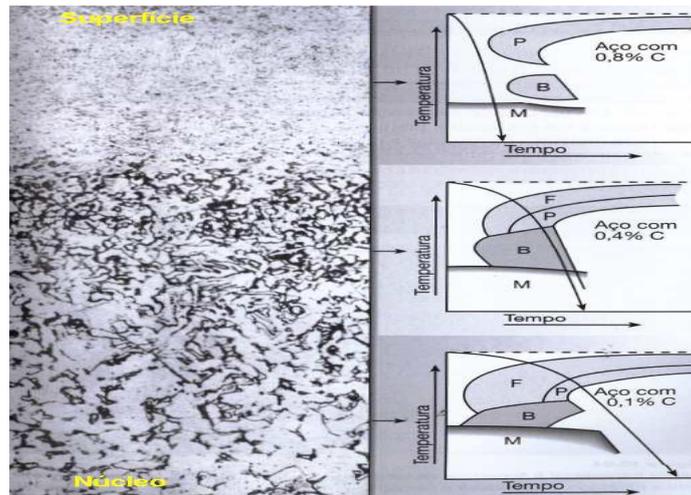
Os meios de resfriamentos mais utilizados são em água e óleo, podendo ser realizada com as seguintes técnicas:

- Têmpera direta, que consiste em se temperar imediatamente após a cementação;
- Têmpera simples, em que o aço após a cementação é esfriado ao ar e em seguida é aquecido e temperado.

Após a cementação, o material é temperado para, assim, atingir os objetivos do processo (elevada dureza superficial, maior resistência a abrasão, aumento da resistência a fadiga).

A microestrutura formada varia da superfície para o interior do núcleo, pois há um gradiente de concentração de carbono e uma taxa de resfriamento decrescente neste sentido, como pode ser melhor visualizada na Figura 6, (COLPAERT, 2008).

Figura 6 – mostra o esquema comparativo entre a microestrutura formada e o diagrama TTT, mostrando a mudança da concentração e taxa de resfriamento da superfície ao núcleo da peça cementada.



Fonte: (COLPAERT, 2008).

Geralmente após cementação e têmpera realiza-se o revenimento, no qual, utiliza-se de baixas temperaturas, entre 135°C e 175°C, para alívio das tensões (CHIAVERINI, 2008). O revenimento é um tratamento térmico realizado após a têmpera com o objetivo de reduzir a fragilidade decorrente ao seu resfriamento brusco. Este tratamento consiste em aquecer o material até uma determinada temperatura e mantendo-a ao tempo requerido neste patamar, o resfriamento é geralmente é feito ao ar. O principal fator do revenimento é propiciar um aumento da ductilidade e tenacidade do material, no qual a estrutura foi afetada pelo resfriamento, transformação de fase e, portanto, deformação plástica (MILAN *etal*, 2008).

Ao passo que a estrutura do material se transforma em martensita gera-se uma grande tensão e discordâncias consideráveis, resultando em um material extremamente frágil e praticamente sem aplicações, no entanto, o revenimento pode provocar um rearranjo estrutural e reduzir o número de discordâncias presentes na microestrutura, aumentando assim, a ductilidade, tenacidade, diminuindo um pouco a dureza e a resistência mecânica (MILAN *etal*, 2008).

2.3.2 Tratamentos termoquímicos

Em geral, estes tratamentos são usados quando a combinação de um núcleo tenaz com uma superfície de elevada resistência ao desgaste é desejada. Engrenagens, pinos móveis,

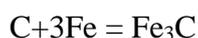
eixos de comando são alguns exemplos de peças em que a combinação ideal de propriedades é obtida alterando-se a composição química da superfície do aço e submetendo a peça a um tratamento térmico (COLPAERT, 2008).

Segundo Colpaert (2008) a maior parte dos tratamentos termoquímicos envolve a adição de carbono e/ou nitrogênio. Por serem solutos intersticiais, difundem-se com relativa rapidez no aço, viabilizando a realização destes tratamentos. Tratamentos envolvendo a introdução de boro na superfície do aço também são empregados. Há alguns aços especialmente adequados aos tratamentos termoquímicos. Os tratamentos mais usuais são:

- Cementação (ou carbonetação) em que se introduz carbono na superfície do aço a temperaturas acima de 900 °C, normalmente.
- Nitretação, em que o nitrogênio é introduzido no aço entre 500 e 590 °C.
- Carbonitretação, derivada da cementação, em que carbono e nitrogênio são introduzidos no aço a temperaturas na faixa entre 800 e 900 °C.
- Cianetação (um tipo de carbonitretação) em que carbono e nitrogênio são absorvidos pela imersão do aço em um banho contendo cianetos fundidos.
- Nitrocarburação, que envolve a introdução de carbono e nitrogênio no aço na condição ferrítica, como a nitretação.

2.4 Cementação

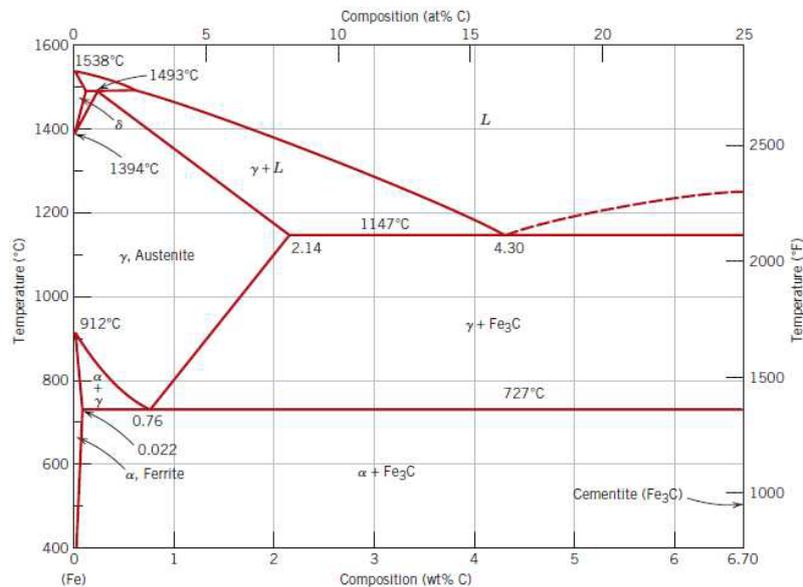
Segundo Chiaverini (2008), para que ocorra o processo de cementação, os aços devem possuir baixo teor de carbono, pois quando aquecidos a elevadas temperaturas (de austenitização), na presença de um meio carbonetante, o carbono desse meio reage com o ferro do aço, de acordo com a reação simples:



O processo de cementação é um processo clássico de endurecimento superficial, isto é, o enriquecimento superficial de carbono de certos aços, aquecidos convenientemente em contato com substâncias ricas em carbono. A cementação, além de ser a aplicação de carbono em aços com baixo teor de carbono, a mesma só ocorre para aços austeníticos, pois a austenita é a estrutura que apresenta elevada solubilidade para o carbono em sua estrutura cristal estável. Consiste na introdução de carbono na superfície do aço, de modo

que este, depois de temperado, apresente uma superfície mais dura. Para que isso ocorra, é necessário que o aço, em contato com a substância capaz de fornecer carbono, seja aquecido a uma temperatura que a solução do carbono no ferro seja fácil. Para isso, a temperatura deve ser superior à zona crítica (850° a 950°C), ou seja, onde o aço se encontra na fase austenítica (γ), a qual apresenta maior solubilidade de carbono em relação a ferrita (fase α), como pode ser observado na Figura 7.(PETERSON, 2013).

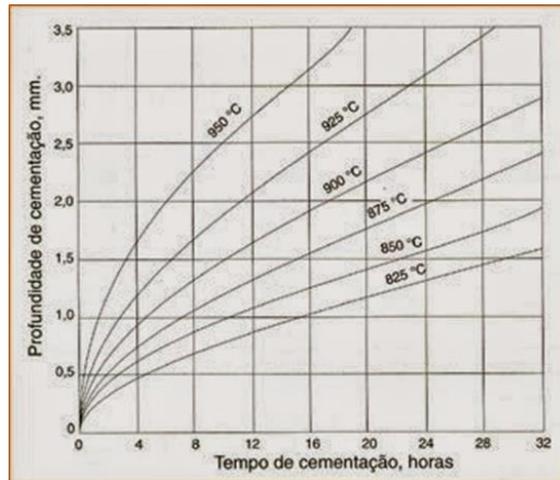
Figura 7 -Diagrama de fase Fe-C. Observa-se que na região da fase austenítica a solubilidade máxima de C é de 2,14% (1147 °C), enquanto que a ferrita apresenta solubilidade máxima de 0,022% de C (727 °C).



Fonte: (CALLISTER,2008).

A profundidade de penetração do carbono depende da temperatura e do tempo, sendo rápida a princípio, decrescendo após um tempo, o que pode ser visto na Figura 8. Essas curvas permitem verificar também que as temperaturas mais elevadas favorecem a penetração de carbono. Essas profundidades são geralmente entre 0,25 a 2,5 mm e as peças mecânicas que são fortemente solicitadas têm uma profundidade de cementação maior (PETERSON, 2013).

Figura 8 - profundidade de penetração do carbono em função da temperatura e do tempo



Fonte: (PETERSON, 2013)

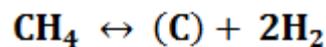
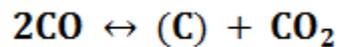
A cementação é um processo que depende quase que exclusivamente da taxa de difusão de carbono para a superfície da peça. Uma das variáveis que influenciam na difusão do carbono é o meio em que a substância carbonácea está e que determina o tipo de cementação feita. Os principais tipos de cementação são: em meio sólido (em caixa), líquido (banho de sal) e gasoso (CHIAVERINI, 2005).

Segundo Peterson (2013), foram estabelecidos alguns fatores que influenciam sobre as velocidades de enriquecimentos do carbono na superfície dos aços, usando como prerrogativa que a cementação é influenciada pela fonte de suprimento de carbono, os fatores são:

- a) Teor inicial de carbono no aço – quanto menor o teor de carbono no aço, maior a velocidade de carbonetação.
- b) Coeficiente de difusão do carbono no aço – é fundamental para a cementação, pois o enriquecimento superficial de carbono é um fenômeno de difusão, isto é, de movimento relativo de carbono no interior do aço. O que é visado na carbonização é a solução do carbono no ferro gama. Este coeficiente de difusão, é uma função da temperatura e da concentração de carbono. Sendo não afetado por impurezas, tamanho de grão e nem de elementos de ligas nos teores que são usualmente encontrados nos aços ligas para cementação.
- c) Temperatura – é o fator mais importante além de afetar a difusão acelerando-a com a sua elevação, também na concentração de carbono na austenita e na velocidade de reação de carbonetação na superfície do aço.

d) Concentração de carbono na austenita – elementos de ligas tendem a deslocar a linha de solubilidade da austenita no diagrama Fe-C para esquerda, diminuindo os limites de concentração ou a solubilidade do carbono no ferro na austenita, contudo essa influência é relativamente pequena para os teores usuais nos aços-ligas para cementação, com exceção do níquel.

e) Natureza do agente carbonetante ou gás de carbonetação – a reação de transferência ocorre na superfície do aço. Os agentes supridores de carbono mais comuns são CO e CH₄ e as reações que ocorrem na superfície do aço podem ser representadas por:



Onde (C) representa o carbono dissolvido no ferro na superfície do aço. A velocidade de reação do gás na superfície, em função da temperatura, depende da natureza do gás: temperaturas crescentes deslocam a reação (1) para a esquerda e a reação (2) para a direita.

f) Velocidade de fluxo de gás – esse fator influencia a velocidade de reação na superfície e, dependendo da natureza do gás, pode ser decisiva, pois, com alguns gases de cementação pode se ter alguma deposição indesejada ou insuficiente de carbono na superfície do material, exigindo melhor controle na velocidade de fluxo.

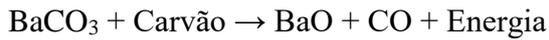
2.5 Tipos de cementação

2.5.1 Cementação em meio sólido

A cementação em meio sólido ou em caixa, é feita colocando-se a peça dentro de uma caixa metálica feita de aço liga resistente ao calor e dentro é colocado as chamadas misturas carburizante, que são compostas basicamente por carvão vegetal e ativadores que podem ser carbonatos alcalinos ou alcalino-terrosos. Essa caixa é posta em um forno a temperaturas em torno de 900°C e, nessa temperatura, o oxigênio presente no ar se combina com o carbono do carvão vegetal gerando dióxido de carbono (CO₂). O dióxido de carbono se combina com o carbono do carvão incandescente gerando monóxido de carbono (CO) que, por sua vez, irá se combinar com o ferro contido no aço dando origem a cementita (Fe₃C) mais dióxido de carbono. Os ativadores irão ajudar a aumentar a velocidade de reação e enquanto houver carbono para que reaja com o dióxido de carbono

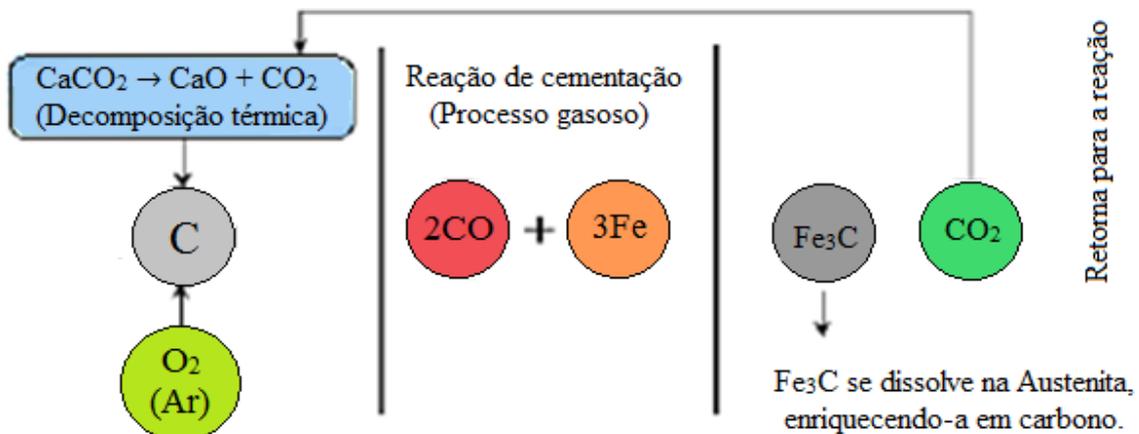
a cementação continuará acontecendo. A peça deve ser resfriada rapidamente para que não ocorra o amolecimento da superfície (CHIAVERINI, 2005).

As reações principais para a cementação sólida conforme a Figura 9 são:



(C) é o carbono nascente, que é absorvido pelo aço

Figura – 9 Reação de uma cementação sólida



Fonte: (PETERSON, 2013).

2.5.2 Cementação em meio gasoso

A cementação gasosa tem a mesma finalidade que a cementação sólida, porém o meio em que é feito é em atmosfera rica em gases carburizantes. Os gases ricos em substâncias carbonáceas podem provir tanto de monóxidos de carbono como de hidrocarbonetos (gás natural, propano, etano, metano e etc.). Esses gases, ao serem decompostos, liberarão carbono que atuará na cementação do aço (CHIAVERINI, 2005).

Os hidrocarbonetos e o monóxido de carbono, durante a cementação, podem se decompor quase que completamente em carbono e hidrogênio, possibilitando a geração de pontos moles na superfície do aço devido à deposição de carbono livre na mesma. Para evitar esse problema utiliza-se gases do tipo hidrogênio e nitrogênio para diluir os hidrocarbonetos. O hidrogênio, mesmo atuando na descarbonetação, também favorece a cementação, pois ajuda a regenerar e formar monóxido de carbono acelerando, assim, o processo. Além desse fator, os gases diluidores atuam garantido a movimentação dos gases no interior do forno e principalmente gerando pressões positivas em todos os pontos, não havendo a necessidade de adicionar mais gases contendo hidrocarbonetos (CHIAVERINI, 2005).

Esse processo tem propriedades superiores ao do tratamento de cementação em meio sólido. Na cementação gasosa não há perda de eficiência do agente carburizante com o tempo, é mais limpo, tendo um melhor controle do processo, crescimento mais rápido da camada, diminuindo o tempo de cementação e menor deformação na peça. Como pontos negativos tem-se um aumento da complexidade do processo, instalações mais caras e necessidade de uma mão de obra mais qualificada pra proceder a cementação (CHIAVERINI, 2005).

2.5.3 Cementação em meio líquido

Segundo Chiaverini (2005), existem dois processos de tratamentos de cementação distintos: um acontece a baixas temperaturas, entre 840°C e 900°C, e o outro a altas temperaturas, entre 900 e 955°C. A composição química dos dois banhos também são diferentes como se pode ver na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Composições de banho de sal para cementação líquida

Constituinte	Composição do banho, %	
	Camada de pequena espessura Baixa temperatura (840° a 900°C)	Camada de grande espessura Alta temperatura (900° a 955°C)
Cianeto de Sódio	10 a 23	6 a 16
Cloreto de Bário	0 a 40	30 a 55
Outros sais alcalinos	0 a 10	

		0 a 10
Cloreto de Potássio	0 a 25	0 a 20
Cloreto de Sódio	20 a 40	0 a 20
Carbonato de Sódio	30 máx.	30 máx.
Aceleradores outros que compostos de metais alcalinos ferrosos*	0 a 5	0 a 2
Cianato de Sódio	1,0 máx.	0,5 máx.

*Dentre esses aceleradores, incluem-se dióxido de manganês, óxido de boro, fluoreto de sódio e carboneto de silício

Fonte:(CHIAVERINI, 2005).

O processo que utiliza baixas temperaturas visa produzir menores tamanhos de camada, entre 0,13 a 0,25 mm por conter maiores teores de cianeto ocorre também o enriquecimento de nitrogênio na superfície da peça. O processo de cementação (em altas temperaturas) em meio líquido consiste em aquecer a peça imersa em um sal fundido com substâncias, as quais irão promover o enriquecimento do teor de carbono na superfície da peça. Nesse tipo de tratamento o objetivo é obter camadas que variam de 0,5 até 3,0mm. Após o tratamento de cementação, que ocorre geralmente entre 900°C e 955°C, a peça é retirada do banho e resfriada rapidamente para que ocorra a têmpera. A peça é resfriada normalmente em água ou em óleo, sendo água o meio mais drástico de resfriamento. Existem alguns estudos para a cementação em altas temperaturas (acima de 950°C), pois ocorre mais rapidamente e torna o gradiente do carbono entre a superfície e o núcleo mais gradual, porém em altas temperaturas existe a possibilidade de crescimento de grão excessivo e um desgaste maior do equipamento (CHIAVERINI, 2005).

O sal fundido pode conter quantidades de cianeto que podem causar o enriquecimento superficial por nitrogênio junto com o carbono (carbo-nitretação ou cianetação). Para que se tenha apenas carbono na parte externa da peça, aumenta-se o teor de carbono do sal e diminui-se o teor de nitrogênio. Como todo processo, a cementação em banho de sal tem pontos positivos e negativos, cujas vantagens principais são: maiores taxas de difusão devido ao meio líquido, menores tempos de tratamento, boa proteção quanto

descarbonetação e oxidação da peça, bom controle de profundidade da camada, possibilidade de produzir cementação localizada, minimização de empenamento, e desnecessidade de pré-aquecimento das peças (CHIAVERINI, 2005).

Existem, também, algumas desvantagens relacionadas ao tratamento como, necessidade de exaustão dos fornos devido aos cianetos (são venenosos a altas temperaturas), necessidade de limpeza das peças após o tratamento, possibilidade de ocorrer oxidação ou descarbonetação da peça se resfriada ao ar e o sal deve ser tratado para ser descartado (gradual, porém em altas temperaturas existe a possibilidade de crescimento de grão excessivo e um desgaste acelerado equipamento (CHIAVERINI, 2005).

2.6 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos são utilizados para determinar certas características e os comportamentos dos materiais (CALLISTER, 1999).

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de ensaios cuidadosamente programados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Dentre os fatores a serem considerados nos ensaios incluem-se a natureza da carga aplicada, a duração de aplicação dessa carga e as condições ambientais. A carga pode ser de tração, compressão ou cisalhamento, e a sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou então flutuar continuamente (CALLISTER, 1999).

A determinação das propriedades mecânicas de um material metálico é realizada por meio de vários ensaios. Geralmente esses ensaios são destrutivos, pois promovem a ruptura ou a inutilização do material. Nesta categoria de ensaios destrutivos, estão classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão, dureza, entre outros (CALLISTER, 1999).

Destes, o ensaio de dureza visa determinar as propriedades mecânicas do material com muita frequência e na qual utilizaremos neste trabalho.

2.6.1 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça pela aplicação de pressão com uma ponta de penetração. A medida da dureza do

material ou da dureza superficial é dada como função das características da marca de impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio de dureza realizado. Esse ensaio é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, tratamentos superficiais, vidros e laminados devido à vantagem de fornecer dados quantitativos das características de resistência à deformação permanente das peças produzidas. É utilizado como um ensaio para o controle das especificações da entrada de matéria prima e durante as etapas de fabricação de componentes (PADILHA, 2004).

Observe-se que os resultados fornecidos pela medida de dureza devem variar em função de tratamentos sofridos pela peça. Há métodos para se determinar a dureza como Brinell, Rockell, Vickers e Shore. Os valores utilizados para cada método estão representados na Tabela 3. A dureza Vickers é um método semelhante ao ensaio de dureza Brinell, já que também relaciona carga aplicada com a área superficial da impressão. O penetrador padronizado é uma pirâmide de diamante de base quadrada e com ângulo de 136° entre faces opostas como mostra na Figura 10. Este ângulo foi escolhido em função de sua proximidade com o ângulo formado no ensaio Brinell entre duas linhas tangentes as bordas da impressão e que partem desta impressão (PADILHA, 2004).

O ensaio é aplicado a todos os materiais com quaisquer durezas, especialmente materiais muito duros, ou corpos de prova muito finos, pequenos e irregulares. A expressão utilizada da dureza Vickers é, de acordo com Padilha (2004),

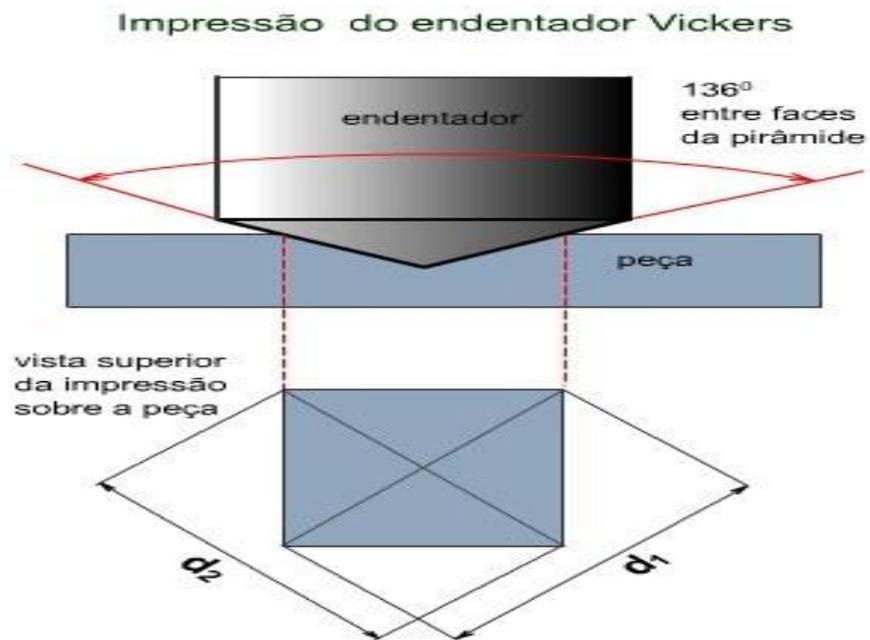
$$HV = 1,8544Q/L^2 \text{ (1:8)}$$

Onde: Q = carga (Kgf ou N);

L^2 = área da superfície piramidal (mm).

Conforme Padilha (2004), como Q é dado em Kgf ou N e L em mm, a dimensão da dureza Vickers é N/mm^2 ou Kgf/mm^2 . Esse tipo de dureza fornece, assim, uma escala continua de dureza (de HV = 5 até VH = 1000Kgf/mm²) para cada carga usada. Entretanto, para cargas muito pequenas, a dureza pode variar de uma carga para outra, sendo então necessário mencionar a carga usada toda vez que ensaiar um metal.

Figura – 10 mostra o esquema de aplicação do método Vickers.



Fonte: (CIMM, s.d.).

Onde: $d_1 + d_2 = D$

Tabela 3 - Conversão de durezas em escala Rockwell, Brinell e Vickers.

Dureza Rockwell "C"	Dureza Brinell	Dureza Vickers	Dureza Rockwell "A"	Dureza Rockwell "B"	Dureza Rockwell "D"	Dureza Shore
HRC	HB	HV	HRA	HRB	HRD	HS
68	---	940	85,6	---	76,9	97
67	---	900	85,0	---	76,1	95
66	---	865	84,5	---	75,4	92
65	739	832	83,9	---	74,5	91
64	722	800	83,4	---	73,8	88
63	705	772	82,8	---	73,0	87
62	688	746	82,3	---	72,2	85
61	670	720	81,8	---	71,5	83
60	654	697	81,2	---	70,7	81
59	634	674	80,7	---	69,9	80
58	615	653	80,1	---	69,2	78
57	595	633	79,6	---	68,5	76
56	577	613	79,0	---	67,7	75
55	560	595	78,5	---	66,9	74
54	543	577	78,0	---	66,1	72
53	525	560	77,4	---	65,4	71
52	512	544	76,8	---	64,6	69
51	496	528	76,3	---	63,8	68
50	481	513	75,9	---	63,1	67
49	469	498	75,2	---	62,1	66
48	455	484	74,7	---	61,4	64
47	443	471	74,1	---	60,8	63
46	432	458	73,6	---	60,0	62
45	421	446	73,1	---	59,2	60
44	409	434	72,5	---	58,5	58
43	400	423	72,2	---	57,7	57
42	390	412	71,5	---	56,9	56
41	381	402	70,9	---	56,2	55
40	371	392	70,4	---	55,4	54
39	362	382	69,9	---	54,6	52
38	353	372	69,4	---	53,8	51
37	344	363	68,9	---	53,1	50
36	336	354	68,4	(109,0)	52,3	49
35	327	345	67,9	(108,5)	51,5	48
34	319	336	67,4	(108,0)	50,8	47
33	311	327	66,8	(107,5)	50,0	46
32	301	318	66,3	(107,0)	49,2	44
31	294	310	65,8	(106,0)	48,4	43
30	286	302	65,3	(105,5)	47,7	42
29	279	294	64,7	(104,5)	47,0	41
28	271	286	64,3	(104,0)	46,1	41
27	264	279	63,8	(103,0)	45,2	40
26	258	272	63,3	(102,5)	44,6	38
25	253	266	62,8	(101,5)	43,8	38
24	247	260	62,4	(101,0)	43,1	37
23	243	254	62,0	100,0	42,1	36
22	237	248	61,5	99,0	41,6	35
21	236	243	61,0	98,5	40,9	35
20	236	238	60,5	97,8	40,1	34
(18)	219	230	---	96,7	---	33
(16)	212	222	---	95,5	---	32
(14)	203	213	---	93,9	---	31
(12)	194	204	---	92,3	---	29
(10)	187	196	---	90,7	---	28
(8)	179	188	---	89,5	---	27
(6)	171	180	---	87,1	---	26
(4)	165	173	---	85,5	---	25
(2)	158	160	---	83,5	---	24
(0)	152	160	---	81,7	---	24

Fonte: site Eugenia Parafusos (2013)

2.7 Metalografia

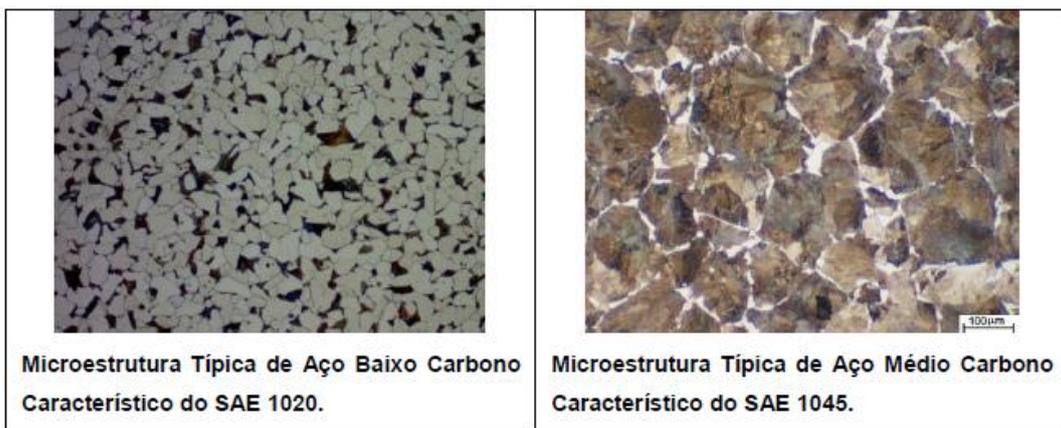
A metalografia estuda produtos metalúrgicos, com auxílio do microscópio, visando à determinação de seus constituintes e de sua textura. Este estudo é realizado em superfícies previamente preparadas, ou seja, polidas e atacadas por um reativo adequado.

Os metais, de forma geral, são agregados cristalinos, cujos cristais são chamados de grãos. Esses grãos podem ser evidenciados na Figura 11, onde as linhas delimitam as dimensões dos mesmos.

Com auxílio de uma técnica apropriada, consegue-se tornar visível a microestrutura do material, evidenciando os diversos grãos formados por ele. Assim é possível identificar suas naturezas e respectivas porcentagens, suas dimensões, arranjos e formatos, interpretando os dados que constituem, portanto, o escopo do exame micrográfico dos metais (COLPAERT, 2008).

A análise química do material revela do que se compõe o metal, os exames macro e micrográfico fornecem preciosas informações sobre como o metal adquiriu as propriedades que apresenta. Tais informações interessam muito, aos fabricantes, e de forma geral, aos consumidores de produtos metálicos entre outros (COLPAERT, 2008).

A Figura 11 - mostra duas micrografias diferentes para exemplo, observadas na metalógrafados metais.



Fonte: (COLPAERT, 2008)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Foi utilizado um pequeno tarugo de aço SAE 1020 com diâmetro de 20 mm. Todos os procedimentos e materiais para esse estudo foram realizados nas dependências da Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, bem como os equipamentos e laboratórios.

3.2 Métodos

Foram retirados seis corpos de prova de um pequeno tarugo com cerca 20 mm de diâmetro, conforme mostrado na Figura 12, com a finalidade de comparar a espessura da camada cementada em diferentes tempos e temperaturas após o tratamento termoquímico de cementação. Foi realizado a metalografia antes do processo de cementação conforme mostra a Figura 13.

Figura 12- tarugo do aço SAE 1020.



Fonte: os autores

3.2.1 Tratamento de Cementação

Para realizar o tratamento termoquímico de cementação sólida foram separadas as 6 amostras do tarugo e identificadas com as numerações de 1 a 6, e divididas em 2 grupos para submeter as temperaturas de 870°C e 950°C, nos períodos de 4h, 14h e 24h. Conforme mostra a Figura 14. Após isso foram colocadas em uma caixa com pó para cementação para dar início ao tratamento conforme a figura 15.

Figura 13 - Corpos de prova de um tarugo do aço SAE 1020.



Fonte: os autores

Figura 14 - Caixa com pó de diamantina para o processo de cementação.





Fonte: os autores.

O tratamento de cementação foi realizado em um forno tipo mufla, na temperatura de 870°C e 950°C, nos períodos de 4h, 14h e 24h. Conforme mostra a Figura 16.

Figura 15 – Mostra a temperatura do forno durante o tratamento de cementação.



Fonte: os autores.

Após 4, 14 e 24 horas de teste, as amostras foram retiradas e resfriadas lentamente no próprio ambiente, e identificadas novamente.

3.2.2 Preparação Metalográfica

Para técnica de metalografia, foram cortadas as amostras nas dimensões de 6 x 22mm e preparados corpos de prova para análise da microestrutura, três corpos de provas cementados na temperatura de 870°C e três na de 950°C.

A preparação das amostras foi feita pelos seguintes procedimentos:

3.2.2.1 Embutimento

Foi feito o embutimento dos corpos de prova como pode ser visto na Figura 17, com a finalidade de fixá-las em uma superfície consistente para facilitar os procedimentos metalográficos e análise.

Figura 16 - Amostra embutida à quente em baquelite para facilitar os procedimentos metalográficos.



Fonte: os autores

3.2.2.2 Lixamento e polimento

Para essa técnica os corpos de prova foram submetidos à lixamento em lixas circulares nas granulometrias de: 180, 240, 320, 480, 600, 1000, 1200, 1500 e 2000.

Para o polimento das amostras, foi utilizada uma politriz circular, um pano para polimento conforme a Figura 18. Foi empregada a técnica de contra rotação pressionando e girando o corpo de prova em sentido oposto ao giro do equipamento, obtendo uma amostra livre de riscos.

Figura 17 - Amostra de uma politriz, alguns tipos de lixas e panos para polimento e aplicação pratica do polimento.



Fonte: os autores

3.2.2.3 Ataque químico

Com o objetivo de conceder uma melhor visualização, tanto da estrutura em si quanto aos contornos dos grãos, a superfície do material foi atacada com o nital 2%, que é uma solução de ácido nítrico a 2% em álcool etílico, para a revelação da camada cementada.

3.3 Ensaio de microdureza vickers

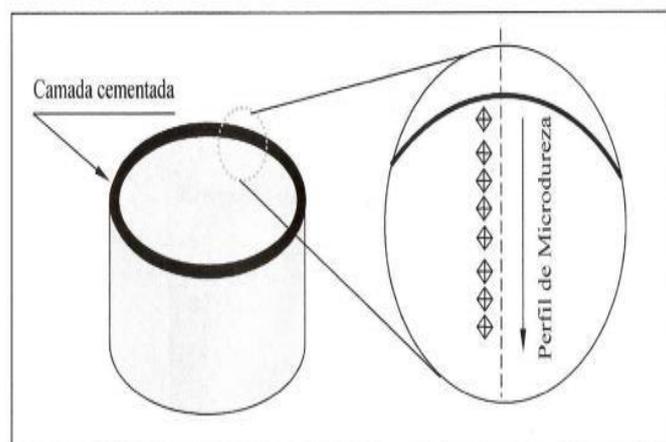
Para realizar este tipo de ensaio, foi necessário seguir alguns procedimentos, para que não ocorram resultados errôneos.

Foram realizadas as medições partindo das extremidades para o centro dos corpos de prova, conforme está ilustrado com maior clareza na Figura 19. Cada impressão ocorreu

em intervalos de 0,3 em 0,3mm, cobrindo toda camada cementada, conforme mostra a Figura 20.

Foi utilizado um penetrador através de um microdurometro Vickers, modelo Mitutoyo HM com carga de (Hv1 Kgf)

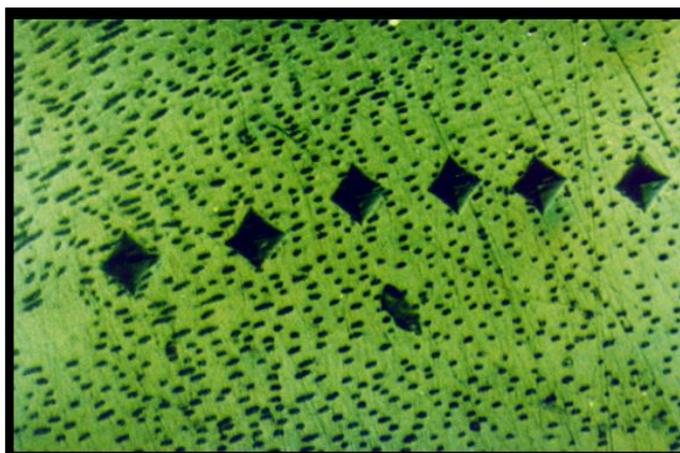
Figura 18 - Disposição das marcações de dureza Vickers (HV).



Fonte: os autores

Figura 19 - penetrador de microdurômetro





Fonte: os autores

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Elevação da dureza

Tabela 4 - Dureza de superfície dos corpos de prova cementados em caixa na temperatura de 870°C

Temperatura de Cementação 870°C				
Distância em relação à superfície (mm)	C.P	1	2	3
	Tempo	4h	14h	24h
		Dureza Atingida (Hv)		
0,3		703	743	870
0,6		617	621	832
0,9		486	533	739
0,12		303	425	500
0,15		303	311	421
0,18			311	349
0,21				321
0,24				321

Fonte: os autores

Tabela 5 - Dureza de superfície dos corpos de prova cementados em caixa na temperatura de 950°C

Temperatura de Cementação 950°C				
Distância em relação à superfície (mm)	C.P	1	2	3
	Tempo	4h	14h	24h
		Dureza Atingida (Hv)		
0,3		719	796	880
0,6		598	687	730
0,9		436	575	760
0,12		306	460	727
0,15		306	319	613
0,18			319	497
0,21				453
0,24				325

Fonte: os autores

No corpo de prova tratado à 870 °C um houve uma dureza resultante significativa até 0,6 mm, porém, houve uma diminuição considerável posteriormente, mantendo-se pelo restante do ensaio.

No corpo de prova de número dois, a dureza obtida manteve-se relativamente alta até 0,9 mm, entretanto a exemplo do primeiro, a dureza cai drasticamente até o final da faixa analisada.

No terceiro corpo de prova, a dureza se mantém alta em boa parte do material, diminuindo somente a partir de 0,12 mm.

Com estes resultados podemos fazer uma comparação entre as três situações apresentadas. No caso dos dois primeiros, o número um seria mais viável sua utilização, pois a dureza obtida está no mesmo patamar do segundo, o que faria com

que houvesse uma vantagem com relação aos custos de tempo no forno. Já no terceiro caso, a camada Cementada obtida foi maior que as outras, dando-lhe uma maior resistência,

Sendo mais adequada perante as outras situações à ambiente de trabalho mais severos, porém seu processo torna-se mais custoso devido à necessidade de um maior tempo para atingir tais efeitos.

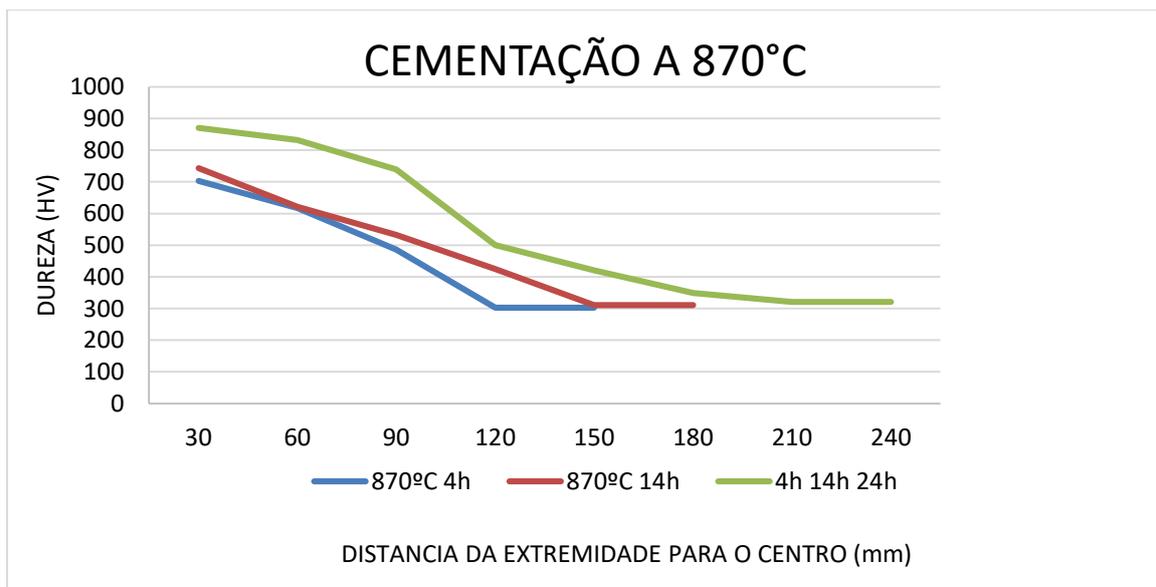
A seguir são apresentados os resultados obtidos na análise de microdureza Vickers (HV), em diversas profundidades a partir da superfície, que resultam nos perfis de endurecimento do processo de cementação do aço SAE1020.

As Tabelas 4 e 5 a seguir, apresentam a relação dos gráficos plotados, avaliando as diferentes variáveis. São considerados nestes resultados os efeitos das temperaturas e tempos de cementação.

4.2 Representação gráfica

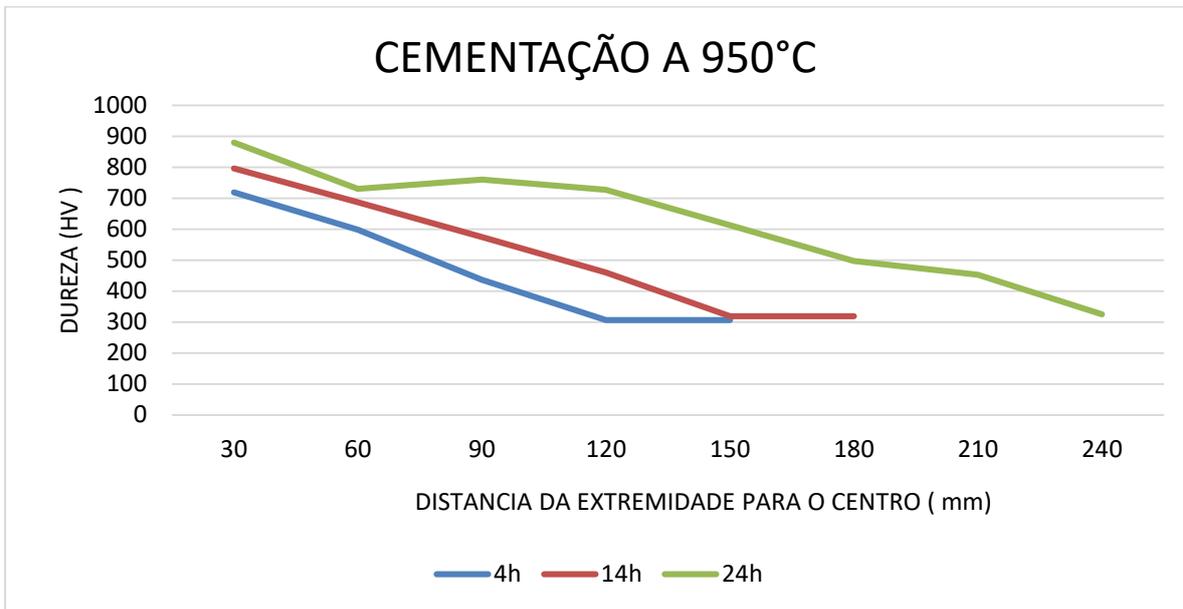
Com o objetivo de representar as durezas obtidas na camada cementada, foram confeccionados os Gráficos 1, 2, e 3 para melhor entendimento em termos de escala quantitativo

Gráfico 1 - Curva da dureza obtida nas amostras de cementação a 870°C



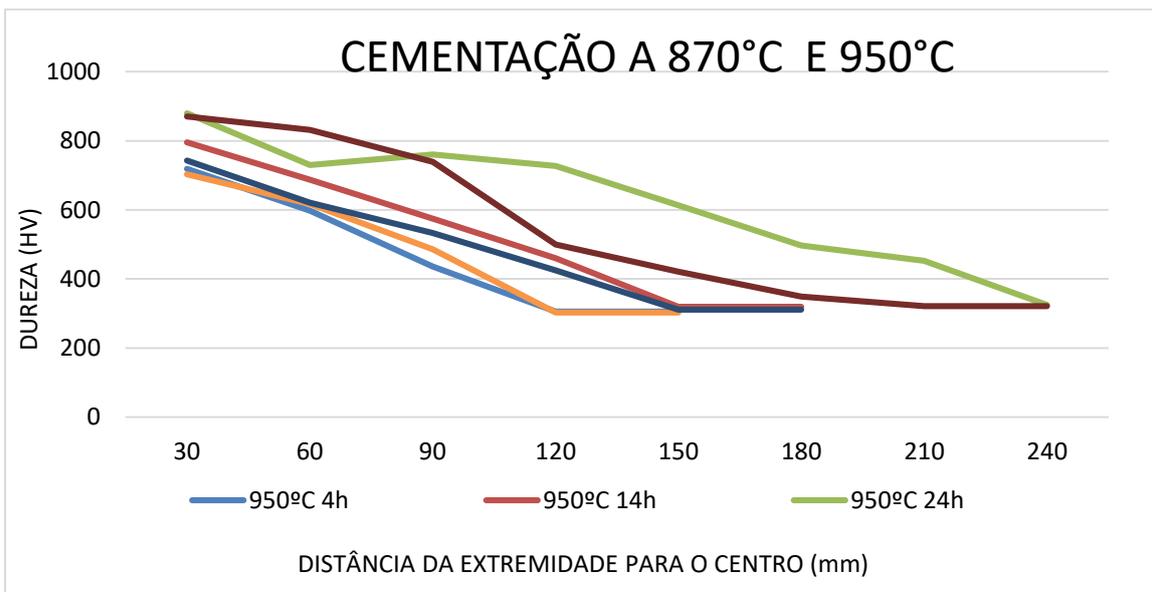
Fonte: os autor

Gráfico 2 - Curva da dureza obtida nas amostras de cementação a 950°C



Fonte: os autores

Gráfico 3 - Curva da dureza obtida nas amostras de cementação a 870°C e 950°C

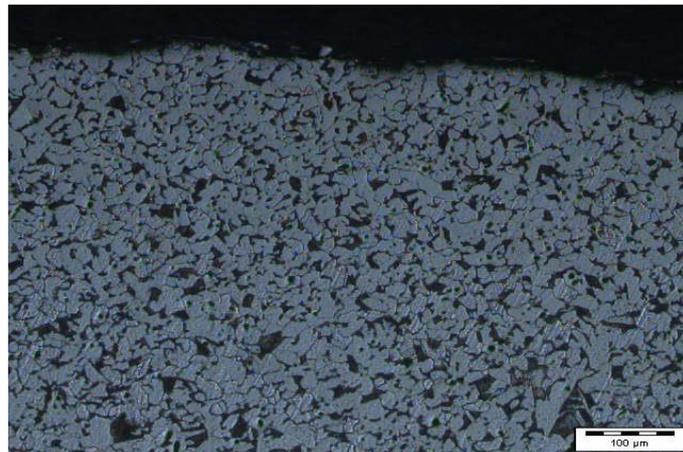


Fonte: os autores

Os resultados das durezas obtidas, dadas em Vickers, no qual foram medidas partindo da extremidade superficial para o sentido do centro, em que a primeira medida foi na superfície da amostra e seguindo um eixo rumo ao seu núcleo, conforme explicado anteriormente. O valor da dureza inicial das amostras é de 303 HV. É possível notar claramente que as durezas vão aumentando de acordo com a sequência das amostras. A dureza superficial é maior que a dureza do seu núcleo, e entre elas existem uma variável de transição onde decresce sentindo ao núcleo conforme, mostra o Gráfico 3.

Todas as amostras obtiveram os resultados esperados de microestrutura com o auxílio da metalografia a análise feita após o ataque evidenciou a composição e o contorno do grão do aço SAE 1020 antes do processo de cementação como mostra na Figura-20, e após evidenciou que as amostras possuíam um núcleo com matriz ferrítica e perlita fina como mostra na Figura-21, e sua superfície martensítica como mostra na Figura-22.

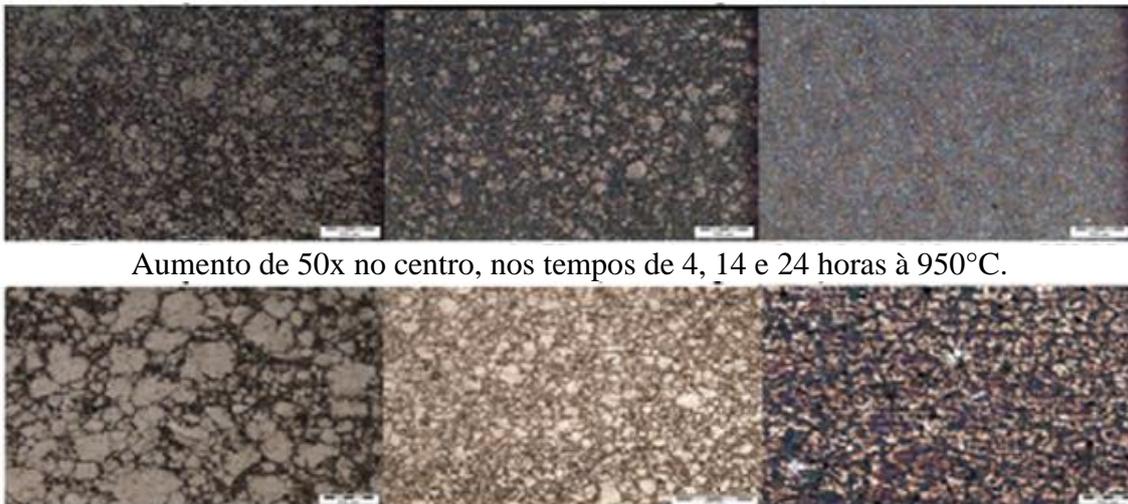
Figura 20 – Metalografia do aço SAE 1020, com aumento de 100x na superfície do material antes do processo de cementação.



Fonte: os autores.

Resultados da metalografia no centro e na borda das amostras após a cementação

Figura 21– Cementação no centro das amostras, nas duas temperaturas.
Aumento de 50x no centro, nos tempos de 4, 14 e 24 horas à 870°C.



Fonte: os autores.

Figura 22 – Cementação na extremidade das amostras nas duas temperaturas
Aumento de 50x na camada cementada, nos tempos de 4, 14 e 24 horas à 870°C.



Aumento de 50x na camada cementada, nos tempos de 4, 14 e 24 horas à 950°C.



Fonte: os autores

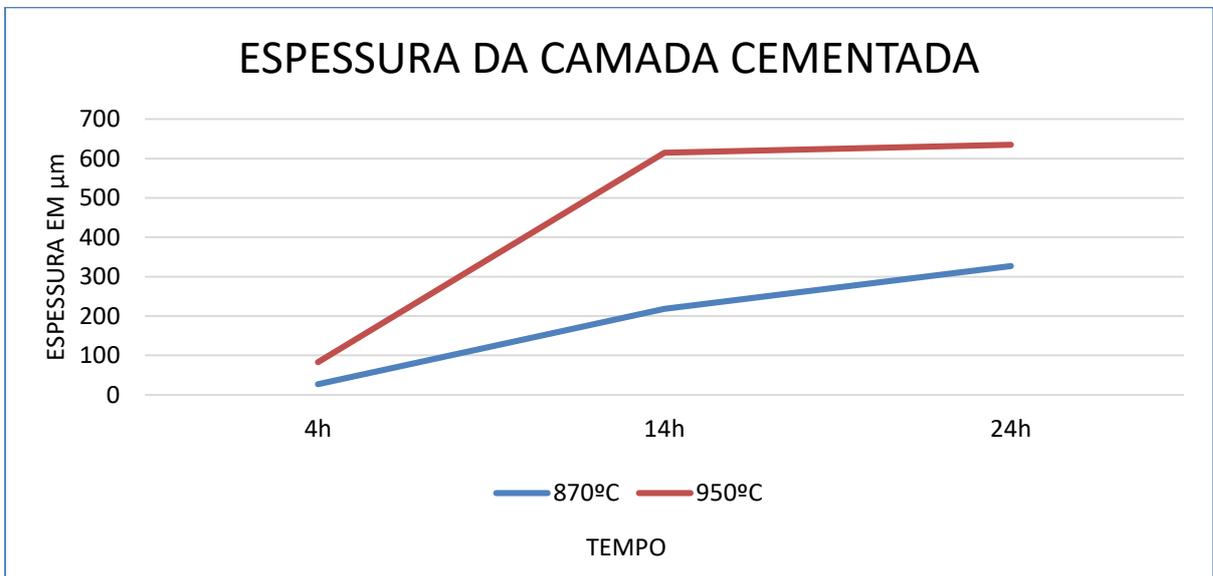
Analisando as medidas das camadas cimentadas das amostras da Figura – 22 elaboramos uma tabela e o gráfico para melhor entendimento da evolução da camada plotados na Tabela – 6 e no Gráfico – 4.

Tabela 6 - Medição da camada cimentada nas temperaturas de 870°C e 950°C

Tempo em horas	Medição da Profundidade Camada Cimentada (µm)	
	870°C	950°C
4	26,634	82,821
14	217,918	615,131
24	326,877	634,833

Fonte: os autores

Gráfico 4 - Curva da camada cimentada obtida nas amostras de cementação a 870°C e 950°C



Fonte: os autores

De acordo com os dados da Tabela 6, de fato a espessura ou profundidade da camada cementada aumenta ao longo do tempo de exposição a uma determinada temperatura, na qual utilizamos 870°C e 950°C, evidenciando nos resultados obtidos das espessuras mostradas no gráfico 4, que mostra a correlação exponencial da evolução da camada cementada.

5 CONCLUSÃO

A temperatura do forno utilizada no processo de cementação influencia na espessura final da camada cementada, onde a temperatura de 950°C apresentou espessuras maiores em relação aos corpos de prova cementados à 870°C.

O período de exposição ao forno também tem grande parcela nessa diferença de espessura, pois houve um aumento significativo da mesma, de acordo com a aplicação de um tempo maior, havendo diferença entre todos os corpos de prova comparados à mesma temperatura.

Não houveram mudanças relevantes na microestrutura do núcleo das amostras, preservando assim, as propriedades mecânicas do material, porém, as que foram submetidas à temperatura de 950°C resultaram num tamanho de grão um pouco maior que as outras.

Com relação à dureza obtida na camada cementada, concluiu-se que os corpos de prova que permaneceram mais tempo no forno tiveram valores maiores que os outros, fato que ocorreu em ambas as temperaturas utilizadas. Destacando-se a diferença entre os períodos de 14 e 24 horas, onde foi encontrada maior discrepância.

Quando comparados os corpos de prova que permaneceram no forno o mesmo período, resultaram em uma dureza maior os que foram submetidos à uma temperatura maior.

5.1 Trabalhos futuros

Como proposta para futuros trabalhos relacionados ao tema, poderiam ser utilizados temperatura e tempo diferentes, aplicado também em um caso de um produto específico, podendo verificar sua eventual alteração na prática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, A. J. ; ANAZAWA, R. M.; HASHIMOTO, T. M.; PEREIRA, M. S.; SOUZA, G. A; CARRER, G. R; SILVA, O. M. M. **Caracterização Macroestrutural de Aços Multifásicos Por Microscopia Óptica Com a Utilização de Diferentes Ataques Químicos**. 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Porto de Galinhas PE. 2008.

ARAÚJO, L. A., **Manual de Siderurgia**. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. Volume 1.

ARCELOR MITTAL. **Guia Do Aço**. Catálogo. São Paulo. 2013. Disponível Em: <http://brasil.arcelormittal.com.br/> Acesso em 01 de junho 2016.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ªed. *Salt Lake City: Ltc*. 2002.

CALLISTER, W. D. JR. Ligas Metálicas: Aços. In:_____ **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 5ª ed. *Salt Lake City: Ltc*. 1999. P 247 - 251

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica. In: _____**Materiais de Construção Mecânica**. 2ª ed. São Paulo: *McGraw-Hill*, 1986. Vol. III

CHIAVERINI, V. Aços Para Cementação. In:_____ **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª ed. São Paulo: Abm. 2005. p. 229 – 303.

PEREIRA, M. S.; ABDALLA, A. J.; MEI, P. R. ; HASHIMOTO, T. M. **Desenvolvimento de Novos Aços Para a Indústria Automobilística em Consonância Com o Projeto ULSAB-AVC**. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Porto Alegre- RS. 2004.

CHIAVERINI, V. Tratamento Termo Químicos. In:_____ **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª ed. São Paulo: Abm. 2008. p. 129 – 143.

COLPAERT, H. O Aço Como Material. In:_____ **Metalógrafia Dos Produtos Siderúrgicos Comus**. 4ª ed. São Paulo: *Blucher*. 2008. P. 1 – 7.

COLPAERT, H. Técnica Metalográfica: Macrografia. In:_____ **Metalógrafia Dos Produtos Siderúrgicos Comus**. 4ª ed. São Paulo: *Blucher*. 2008. P. 37 – 60.

COLPAERT, H. Técnica Metalográfica: Microscopia Eletrônica e outras Técnicas Avançada . In:_____ **Metalógrafia Dos Produtos Siderúrgicos Comus**. 4ª ed. São Paulo: *Blucher*.2008. P. 83 – 91.

COLPAERT, H. Tratamentos Térmicos Convencionais: cementação. In: _____ **Metalógrafia Dos Produtos Siderúrgicos Comus**. 4ª ed. São Paulo: *Blucher*. 2008. P. 319 – 323.

JÚNIOR, J. H. N. **Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes autorredutores**. Dissertação (Mestrado) - Puc . Rio de Janeiro. 2002.

MILAN, M; MALUF, O.; SPINELLI, D.; BOSE, W. **Metais: uma Visão Objetiva – Ligas Metálicas de Engenharia**. 1. ed. São Paulo: Editora, 2008.

PADILHA, A. F. *et al.* Técnicas Indiretas: Medidas de Micro dureza. In: _____ **Técnicas de análise Micro Estrutural**. 1ªed. Brasil: *Hemus*. 2004. P. 161 – 163.

PETERSON. **Tratamento termoquímico – cementação**. Artigo. Mecânica blog. 2013. Disponível em: <<http://www.mecanicablog.com.br> >Acesso em: 16 de abril 2016

EMPRESA EUGENIA. **Tabela de Conversão de Durezas**. Disponível em: <www.eugeniaparafusos.com.br/informações/durezas>. Acesso em 10 junho 2016.

EBAH. **Sequencia operacional do conversor Bessemer**. Disponível em: <<http://w.ebah.com.br/content/ABAAABOXkAK/2a-aco>>. Acesso em 16 de abril 2016.

CIMM. **Teste da microdureza**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6560-teste-da-microdureza#.WXS0HIjyvIU>. Acesso em 13 março 2017.