

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA**

**ESTUDO COMPARATIVO DA CAMADA DE CEMENTAÇÃO  
E DUREZA DO AÇO SAE 1020 EM DIFERENTES  
TEMPERATURAS E TEMPO**

**FABIO HENRIQUE LACORTE  
MÁRCIO WILLIAM DE SOUZA**

**Pindamonhangaba - SP**

**2017**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA**

**ESTUDO COMPARATIVO DA CAMADA CEMENTAÇÃO E  
DUREZA DO AÇO SAE 1020 EM DIFERENTES  
TEMPERATURAS E TEMPO**

**FABIO HENRIQUE LACORTE  
MÁRCIO WILLIAM DE SOUZA**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba, para  
obtenção do diploma de graduação do curso de  
Tecnólogo em Processos Metalúrgicos.

Área de concentração: Tratamento Térmico

Orientadora: Prof. Msc. Alexandre Sartori

**Pindamonhangaba – SP**

**2017**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA**

**ESTUDO COMPARATIVO DA CAMADA CEMENTAÇÃO E  
DUREZA DO AÇO SAE 1020 EM DIFERENTES  
TEMPERATURAS E TEMPO**

**FABIO HENRIQUE LACORTE  
MÁRCIO WILLIAM DE SOUZA**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba, para  
obtenção do diploma de graduação do curso de  
Tecnólogo em Processos Metalúrgicos.

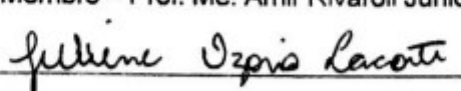
Área de concentração: Tratamento Térmico

Orientador: Prof. Msc. Alexandre Sartori

Comissão Examinadora

  
Orientador – Prof. Me. Alexandre Sartori

Membro – Prof. Me. Amir Rivaroli Junior



Membro - Sra. Juliene Ozorio Lacorte

**Pindamonhangaba, 28 de junho de 2017.**

## DEDICATÓRIA

Dedico à Natália Vilela, pessoa com quem amo compartilhar a vida. Com você tenho me sentido mais vivo de verdade. Obrigado pelo carinho, pela paciência e por sua capacidade de me trazer paz na correria de cada semestre.

*Fabio H.Lacorte*

## DEDICATÓRIA

A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

*Marcio W. de Souza*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, e a minha sobrinha Juliene Lacorte que proporcionaram toda condição necessária para a conclusão desta faculdade, o meu muito obrigado.

Ao Professor Mestre Alexandre Sartori, pelo ensinamento, transmitindo seu conhecimento, contribuindo com dicas e sugestões para um bom direcionamento deste trabalho. Aos professores que fizeram parte da minha formação. Aos auxiliares docentes de laboratório, que nos apoiaram nos laboratórios utilizados e principalmente a bibliotecária Sueli Camargo de Souza, pela carinho e atenção em atender a todos que a procuram, e também pela amizade nestes anos de estudo e com certeza levarei para a vida toda. Aos amigos de classe com quem nesses anos de estudo tive a felicidade de conviver, pela amizade e compartilhamentos de vida. A FATEC Pindamonhangaba e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

*Fabio H. Lacorte*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha esposa, Anete Cristina, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades, quero agradecer também ao meu filho, Flávio William, que embora não tivessem conhecimento disto, mas iluminou de maneira especial os meus pensamentos me levando a buscar mais conhecimentos. E não deixando de agradecer de forma grata e grandiosa meus pais, José Divino e Maria Terezinha, a quem eu rogo todas as noites a minha existência e de onde estiverem com certeza estão muito orgulhosos.

*Marcio W. de Souza*

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá



LACORTE, F.H. e SOUZA, M.W. **Estudo comparativo da camada cementada e a dureza do aço SAE 1020 em diferentes temperaturas e tempo.** 2017. 50p. Trabalho de Graduação (Tecnólogo em Processos Metalúrgicos) – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, 2017.

## RESUMO

O tratamento térmico é essencial para que os melhores resultados sejam alcançados e para que se tenha maior confiabilidade nas propriedades dos materiais a serem utilizados. A cementação é um processo de introdução superficial de carbono no aço, pelo aquecimento entre 900°C e 1000°C, para formar uma camada dura de carbonetos, em conjunto com o processo de têmpera, para que tenha aumento da dureza e manter uma boa tenacidade no núcleo das peças. Nesse tratamento termoquímico, o endurecimento superficial é promovido pelo carbono o qual, nas condições próprias da operação difunde-se a partir da superfície das peças para o seu interior, reagindo com os elementos contidos no aço e formando uma camada cementada de elevada dureza. Neste contexto, este trabalho estudou o efeito do tratamento de cementação, o endurecimento superficial promovido pelo o carbono e avaliou as influências de diferentes temperaturas e tempo no aço SAE 1020 no processo de cementação sólida para a verificação da espessura e dureza cementada em cada amostra. Para isso, foi realizado o tratamento térmico com 12 amostras. Depois os corpos de provas foram cortados e embutidos para avaliação com a utilização do reagente nital 2% para revelar a espessura da camada cementada de cada amostra com auxílio da microscopia óptica e de microdureza Vickers, como estas informações foram preparados 2 gráficos para examinar a variação de cada amostra. Observando os resultados podemos destacar que a dureza e a camada cementada possuem uma tendência de aumentar em maiores temperaturas e tempo.

**Palavras-chave:** Tratamento térmico, dureza, cementação.

LACORTE, F.H. and SOUZA, M.W. **Comparative study of the carburized layer and the hardness of SAE 1020 steel at different temperatures and time.** 2017. 50 p. Undergraduate work (technologist metalurgicos processes) – College of technology of Pindamonhangaba, 2017.

### **ABSTRACT**

The heat treatment is essential for the best results to be achieved and for greater reliability in the properties of the materials to be used. Cementation is a process of superficial introduction of carbon into the steel by heating between 900 ° C and 1000 ° C to form a hard carbide layer, together with the quenching process, so that it increases hardness and maintains good toughness in the core Parts. In this thermochemical treatment, the surface hardening is promoted by the carbon which, under the conditions of the operation diffuses from the surface of the parts into the interior, reacting with the elements contained in the steel and forming a cemented layer of high hardness. In this context, this work studied the effect of the carburizing treatment, the surface hardening promoted by the carbon and evaluated the influences of different temperatures and time in SAE 1020 steel in the solid carburizing process to verify the thickness and cemented hardness in each sample. For this, the heat treatment was performed with 12 samples. After the test bodies were cut and embedded for evaluation using the 2% nital reagent to reveal the thickness of the cemented layer of each sample with the aid of optical microscopy and Vickers microhardness, as this information was prepared 2 graphs to examine the variation of each sample. Observing the results, we can highlight that the hardness and the cemented layer have a tendency to increase in higher temperatures and time.

**Keywords:** Heat Treatment, Hardness, Carburizing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO .....	20
FIGURA 2 - CAIXA PARA CEMENTAÇÃO.....	23
FIGURA 3 - MECANISMO DA CEMENTAÇÃO .....	27
FIGURA 4 - REAÇÃO NO INTERIOR DA CAIXA DE CEMENTAÇÃO.....	27
FIGURA 5 - DIAGRAMA DE FERRO CARBONO .....	28
FIGURA 6 - TRANSFORMAÇÃO DA FERRITA EM AUSTENITA.....	29
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS MICROESTRUTURAS PARA UMA LIGA Fe-C EUTETÓIDE .....	30
FIGURA 8 - DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA PARA UM AÇO EUTETÓIDE.....	31
FIGURA 9 - CURVAS CCT PARA O AÇO ABNT 1020.....	32
FIGURA 10 - ETAPAS DE PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA .....	33
FIGURA 11 - MICROSCÓPIO ÓTICO .....	35
FIGURA 12 - DUREZA VICKERS .....	36
FIGURA 13 - FORNO MUFLA GRION .....	37
FIGURA 14 - CAIXA PARA CEMENTAÇÃO.....	38
FIGURA 15 - EMBUTIDORA A QUENTE .....	39
FIGURA 16 - POLITRIZ.....	40
FIGURA 17 - MICROSCÓPIO ÓTICO .....	40
FIGURA 18 - MICRODURÔMETRO .....	41
FIGURA 19 - CEMENTAÇÃO DE 900°C E 1000°C/4 HORAS .....	42
FIGURA 20 - CEMENTAÇÃO DE 900°C E 1000°C/8 HORAS .....	42
FIGURA 21 - CEMENTAÇÃO DE 900°C E 1000°C/12 HORAS .....	43
FIGURA 22 - CEMENTAÇÃO DE 900°C E 1000°C/16 HORAS .....	43
FIGURA 23 - CEMENTAÇÃO DE 900°C E 1000°C/20 HORAS .....	43
FIGURA 24 - CEMENTAÇÃO DE 900°C E 1000°C/24 HORAS .....	43

## LISTAS DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS.....	18
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO SAE 1020 .....	19
TABELA 3 - TEMPERATURA E TEMPO DE APLICAÇÃO DO PROCESSO DE CEMENTAÇÃO COM A MEDIDA DA DISTÂNCIA E DUREZA.....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAE	Society Automotive of Engineers
AISI	American Iron Steel Institut
CCC	Cubo de corpo centrado
CFC	Cubo de face centrado
CCT	Continuos Colling Transformation
TRC	Transformação por resfriamento continuo
TTT	Temperatura, tempo, transformação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.1	PROCESSO DE OBTENÇÃO DO AÇO .....	16
2.2	AÇO .....	17
<b>2.2.1</b>	<b>Aço SAE 1020</b> .....	19
2.3	TRATAMENTO TÉRMICO .....	20
<b>2.3.1</b>	<b>Tratamentos Termoquímicos</b> .....	21
<b>2.3.2</b>	<b>Cementação</b> .....	22
<b>2.3.3</b>	<b>Cementação em meio sólido</b> .....	23
<b>2.3.4</b>	<b>Cementação Gasosa</b> .....	24
<b>2.3.5</b>	<b>Cementação Líquida</b> .....	25
<b>2.3.6</b>	<b>Mecanismo da Cementação</b> .....	26
2.4	DIAGRAMA DE FERRO CARBONO.....	28
2.5	DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÕES ISOTÉRMICAS .....	30
2.6	ENSAIOS.....	33
<b>2.6.1</b>	<b>Ensaio Metalográfico</b> .....	33
<b>2.6.2</b>	<b>Microdureza</b> .....	36
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	37
3.1	AÇO SAE 1020 PARA CEMENTAÇÃO .....	37
3.2	TRATAMENTO TÉRMICO .....	37
3.3	PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA .....	39
3.4	ENSAIO DE MICRODUREZA .....	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	42
4.1	MICROSCOPIA ÓTICA .....	42
4.2	MEDIÇÃO DA CAMADA CEMENTADA .....	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	46

# 1 INTRODUÇÃO

Na indústria metal-mecânica, os tratamentos térmicos dos metais têm grande importância, principalmente nos aços, pois fazem com eles possam assumir uma grande variedade de propriedades. Dentro desse grupo de processos estão os tratamentos termoquímicos, sendo um dos mais antigos e mais importantes processo de endurecimento superficial, sendo imprescindível como meio de melhoria da qualidade e ganho de vida útil. Os processos termoquímicos lidam com muitas reações e atmosferas ricas em substâncias que se deseja inserir nos componentes para melhorar as propriedades mecânicas. No desenvolvimento do processo de cementação engenheiros e especialistas procuram combinar os parâmetros de processo de tal maneira que se consiga reduzir cada vez mais o tempo de cementação, diminuir os gastos do processo e ao mesmo tempo em que se mantém a qualidade do produto final (WENDT, 2010).

A cementação consiste em introduzir maior quantidade de carbono em superfícies de aço com baixos teores desse elemento. É indicada para aços-carbono ou aços-ligas cujo teor original de carbono seja inferior a 0,25%. O tratamento aumenta esse teor até em torno de 1%, assegurando uma superfície dura e um núcleo tenaz (VALE, 2011). Esse processo transforma a liga metálica através da variação da temperatura, possibilita ainda a variação da composição química da liga.

O presente trabalho tem como objetivo o tratamento termoquímico de cementação, em diferentes temperaturas de 900°C e 1000°C para comparar as diferentes durezas e espessuras da camada no aço SAE 1020 que obteve no tratamento. O processo estudado será o de cementação sólida. As amostras foram acondicionadas em caixa metálica, imersas em carvão vegetal e carbonetos de bário como substâncias ativadoras que forma uma camada rica em carbono, cuja profundidade é em função do tempo de exposição ao patamar de altas temperaturas. Nesse trabalho demonstrou que com a temperatura de 1000°C se tem um ganho maior na dureza superficial, reduzindo o tempo de tratamento, em relação aos tratamentos com menor temperatura. O trabalho estabeleceu uma comparação entre os parâmetros de processo atualmente encontrados na literatura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROCESSO DE OBTENÇÃO DO AÇO

O ferro é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, onde entra na proporção de 4,2%. Entre todos os metais, o ferro é o mais produzido e o que está mais presente em nossas vidas. Inúmeros minerais têm ferro como componente essencial, mas somente os óxidos apresentam grandes concentrações. Os principais minerais que contêm ferro são: hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), goethita ( $\text{FeO}/\text{OH}$ ) e siderita ( $\text{FeCO}_3$ ). As formações ferríferas compostas de hematita e sílica, denominadas itabiritos, se constituem nos maiores depósitos de ferro (DNPM, 2009).

Os principais produtos gerados com a exploração do minério de ferro são os granulados e os finos, divididos em “sinter feed” e “pellet feed”, sendo esses dois últimos mais direcionados para alto-forno ou redução direta (LEONI, 2012).

Nos processos de redução direta, as temperaturas empregadas não fundem a carga e o produto obtido é sólido, o ferro-esponja ou *Direct Reduced Iron* (DRI), que é empregado em fornos elétricos em usinas semi-integradas. Em uma atmosfera redutora, formada pelo monóxido de carbono ou por uma mistura contendo monóxido de carbono (CO) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), a redução dos óxidos ocorre na fase sólida. Este processo utiliza gás natural ou carvões não-coqueificáveis para prover agentes redutores ao processo. Já no processo de redução indireta, submete-se a carga metálica a temperaturas elevadas no interior do alto-forno, que resulta na fusão da mesma e na obtenção do ferro-gusa líquido. O ferro-gusa obtido apresenta um elevado teor de carbono (aproximadamente 4%), sendo necessária uma etapa posterior de refino para adequação a composição química do aço e para remoção de impurezas como silício, fósforo e enxofre. As impurezas são oriundas do coque e do minério de ferro e são levadas ao ferro-gusa devidas às condições termodinâmicas no interior do alto-forno. Este processo caracteriza uma redução carbotérmica, que é a redução química de um mineral com o emprego de monóxido de carbono (CO) oriundo de uma substância carbonácea, geralmente nas formas de coque e carvão vegetal para a produção de um metal (NTCm, 2017).

A aciaria é uma etapa fundamental para a produção do aço. Nesse setor, ocorrem as operações necessárias para fusão da matéria prima, refino e solidificação do aço. O material solidificado segue na forma de tarugos para o processo de laminação. Em uma moderna usina siderúrgica integrada, o processo que vai das matérias-primas ao produto final é constituído pelas seguintes etapas principais: redução do ferro a partir de seu minério para obtenção de



ferro gusa; a conversão desse produto intermediário em aço; o lingotamento do aço para sua solidificação em forma conveniente para as etapas seguintes; e, por fim, a conformação do metal para obtenção do produto de interesse (MOURÃO et al. 2007).

Normalmente, as plantas siderúrgicas que utilizam como matéria prima o minério de ferro realizam a operação de redução a partir de altos fornos, mas há também outros processos para isso. O ferro gusa segue em estado líquido para o refino em conversor LD, no qual a composição química sofre os ajustes necessários. O lingotamento finaliza a etapa de produção do aço.

No caso de siderúrgicas semi integradas, a rota mais tradicional de produção do aço tem início na fusão da carga metálica – combinação de sucata e ferro gusa – e correção da composição de alguns elementos químicos em forno elétrico a arco. Na sequência, acontece a operação de vazamento do forno para uma panela, que é levada ao forno panela para refino e ajuste de composição química final. Após essa etapa, o aço está pronto para o processo de lingotamento contínuo (NUNES, 2009).

## 2.2 AÇO

Segundo Chiaverini (1988), aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação. Distingue do ferro fundido, que também é uma liga ferro e carbono, mas com o teor de carbono entre 2,11% a 6,67%. O carbono é o principal elemento endurecedor em relação ao ferro, mas outros elementos, como o manganês, o silício e o fósforo participam igualmente do ajuste do nível de resistência do aço (PORTAL METÁLICA, 2017).

O aço é um dos mais importantes materiais metálicos usados na indústria mecânica. É usado na fabricação de peças em geral. Obtém-se o aço abaixando-se a porcentagem de carbono do ferro gusa. (SENAI, 1996). A grande gama de aplicações do aço carbono se deve ao baixo custo de obtenção, associado à grande versatilidade de propriedades que pode – se obter a partir de pequenas mudanças na composição química, tratamentos químicos e/ou no processamento e, principalmente da elevada ductilidade aliada com grande tenacidade e elevada dureza (CEFET-SP, 2001).

Os aços podem ser classificados em: aços-carbono, aços de baixa liga sem tratamento térmico e aços de baixa liga com tratamento térmico. Os tipos de aço estruturais são

especificados em normas brasileiras e internacionais ou em normas elaboradas pelas próprias siderúrgicas (SILVA, 2012).

Há diversas instituições que definem normas para designação de aços de acordo com o teor de carbono e dos elementos de liga. Baseando-se nas normas SAE (*Society of Automotive Engineers*) e AISI (*American Iron and Steel Institute*, os dois últimos algarismos (xx) desses códigos indicam o teor de carbono em 0,01%. Exemplo: um aço SAE 1020 tem 0,20 % de carbono. Enquanto que os primeiros algarismos indicam o grupo que o aço pertence em função dos elementos de liga que o constitui, apresentado na Tabela 1 representa alguns desses códigos de designação (LEANDRO, 2009).

Tabela 1 - Classificação dos aços

SAE	AISI	Tipos de Aço
10XX	C10XX	Aços-carbono comuns
11XX	C11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil com alto S
13XX	13XX	Aços manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços-níquel com 3, 5% de Ni
25XX	25XX	Aços-níquel com 5% de Ni Aços-níquel-cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
31XX	31XX	Aços-níquel-cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr Aços-níquel-cromo com 3,5% de Ni e 1,55% de Cr
33XX	E33XX	Aços-níquel-cromo com 3,5% de Ni e 1,55% de 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% de Mo
43XX	43XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,80% de Ni, 0,50% ou 0,80% de Cr e 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços-níquel-molibdênio com 1,55% ou 1,80% de Ni
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
51XX	51XX	Aços-cromo com 0,80% a 1,05% de Cr
61XX	61XX	Aços-cromo-vanádio com 0,80% ou 0,95% de Cr e 0,10% ou 0,15% de V

<b>86XX</b>	<b>86XX</b>	Aços-níquel-cromo-molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
<b>87XX</b>	<b>87XX</b>	Idem
<b>92XX</b>	<b>92XX</b>	Aços-silício-manganês com 0,85% Mn e 2,0% de Si
<b>93XX</b>	<b>93XX</b>	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 3,5% de Ni, 1,2% de Cr e 0,12% de Mo
<b>98XX</b>	<b>98XX</b>	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,05% de Ni, 0,80% de Cr e 0,25% de Mo
<b>50BXX</b>	<b>50BXX</b>	Aços-cromo-boro com baixo teor de Cr e no mínimo 0,0005% de B
<b>94BXX</b>	<b>94BXX</b>	Aços-níquel-cromo-molibdênio com baixos teores de Ni, Cr, Mo e, no mínimo, 0,0005% de B

Fonte: Spectru (2017)

### 2.2.1 Aço SAE 1020

O aço SAE 1020 é um dos aços ao carbono mais comum utilizado como aço para cementação com excelente relação custo benefício comparado com aços mais ligados para o mesmo propósito. Possui excelente plasticidade e soldabilidade. Após cementação é beneficiado, mas possui menor capacidade de endurecimento. É utilizado em componentes mecânicos de uso como engrenagens, eixos, virabrequins, eixos-comando, pinos guia, anéis de engrenagem, colunas, catracas, capa (GGD METALS, 2016). Aços carbono para estruturas e soldagem: SAE/AISI 10XX, onde a mesma designação anterior é utilizada para representar o teor de carbono, entretanto, são aços que apresentam teor de enxofre mais baixo a fim de gerar uma menor fração volumétrica de inclusões de sulfetos. Estes aços apresentam teor de manganês que varia entre 0,30 e 1,00%, além de fósforo e enxofre com teores máximos de 0,030 e 0,020 respectivamente (SCHEID, 2010).

A composição química do aço SAE 1020 apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição SAE 1020

<b>Composição</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>
<b>(%) Peso</b>					
<b>Aço SAE 1020</b>	0,20	0,45	< 0,030	< 0,05	0,020

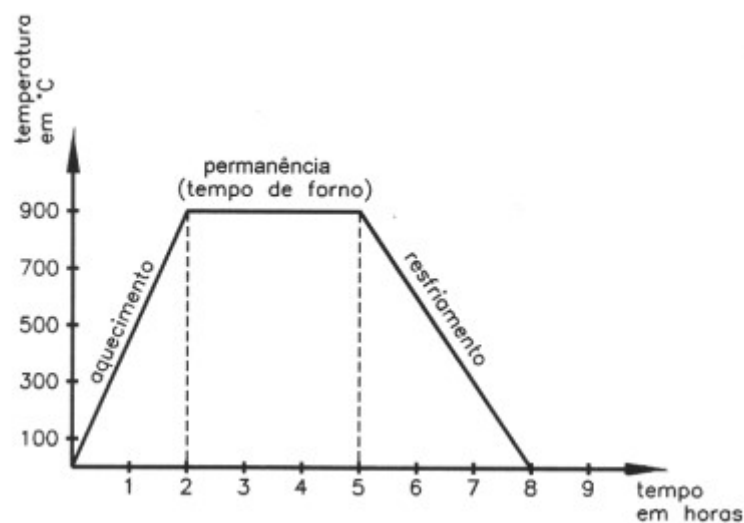
Fonte: ARCELOR MITTAL (2013)

Este aço apresenta como característica uma excelente forjabilidade e soldabilidade. Mesmo com um teor máximo de carbono de 0,23%, sem pré-aquecimento necessário para a vasta maioria de estruturas soldadas. Quando as maiorias das operações de fabricação consistem em algum tipo de usinagem, o aço SAE 1020 não é recomendado devido a usinabilidade é ser notavelmente pobre (CHIAVERINI, 2003). Outros exemplos de aplicabilidade e indicação para o aço SAE 1020 são para: parafusos, trefilados duros, longarinas, 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. Desta maneira o aço SAE 1020 possui uma larga aplicação sendo utilizado de maneira eficaz e eficiente (MONTEIRO, 2011).

### 2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Segundo Colpaert (2008), os tratamentos térmicos consistem essencialmente em aquecer o material a certa temperatura, permanecer no forno por um período de tempo e esfriá-lo em determinadas condições, de acordo com a Figura 1.

Figura 1 - Processo de tratamento térmico



Fonte: Tschiptchin (2016)

De acordo com Pascoali (2008), as propriedades das ligas metálicas dependem, em princípio, de sua microestrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a microestrutura das ligas, resultando, em consequência na alteração, de suas propriedades.

Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são os seguintes:

- Remoção de tensões,
- Aumento ou diminuição da dureza,
- Aumento da resistência mecânica,
- Melhora de 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 magnética.

O benefício trazido pelos tratamentos térmicos aos aços é muito grande, pois esses materiais respondem muito bem aos diferentes ciclos de tratamento utilizados. Num mesmo aço, dependendo do tratamento térmico, pode-se obter níveis de resistência mecânica, dureza, ductilidade e tenacidade muito variadas (TSCHIPTCHIN, 2016).

### **2.3.1 Tratamento Termoquímicos**

Os tratamentos termoquímicos podem ser definidos de acordo com Chiaverini (2003) como o endurecimento superficial dos aços pela modificação parcial da sua composição química nas secções que se deseja endurecer. Os tratamentos termoquímicos mais utilizados são: cementação, nitretação e carbonitretação.

A superfície de um material é a região de contato do mesmo com o ambiente de trabalho, constituindo-se geralmente na zona de maiores solicitações mecânica e/ou físicas. O uso de revestimentos ou camadas podem resultar em materiais compostos com características superiores, nos quais o substrato garante a resistência mecânica e a sustentação da camada, que será a responsável pelo desempenho e/ou a corrosão (CHEN, CHAO, LIU, 2012).

Objetivo, normalmente, é o de aumentar a dureza e a resistência ao desgaste superficial, ao mesmo tempo em que o núcleo do material se mantém dúctil, embora possa ser aplicado com outros propósitos, como o de aumentar a resistência a fadiga, à corrosão, à oxidação em altas temperaturas (COSTA e SILVA e MEI, 2006). A modificação parcial da composição química, seguida geralmente de tratamento térmico apropriado, produz também uma modificação da estrutura do material, resultante, em resumo, numa modificação igualmente parcial das propriedades mecânicas (CHIAVERINI, 1977).

### **2.3.2 Cementação**

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).

Um aço cementado é um aço de baixo carbono (no máximo 0,25% C), contendo ou não elementos de liga, tratado termoquimicamente de forma a se obter teor de carbono próximo de 0,8% na superfície (TSCHIPTCHIN, 2016). A profundidade de penetração do carbono depende da temperatura e do tempo, sendo rápida a princípio, decrescendo após um tempo. 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 (CHIAVERINI, 1977). O uso de aços de baixo carbono se consegue melhor tenacidade e resistência ao choque, além de uma melhor difusão de carbono no processo (CUNHA, 2000).

Cementação é um processo no qual uma liga ferrosa austenitizada é levada a um meio com potencial de carbono suficiente para causar a sua absorção pela superfície e, por difusão, a temperaturas da ordem de 850°C – 950°C, causando um gradiente de concentração de carbono entre e o interior do material (CADIOLLI, 1998).

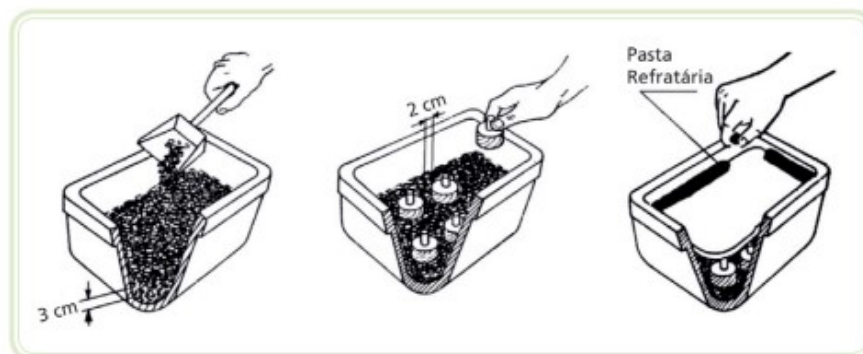
Para a indústria metal-mecânica a técnica de cementação, sendo este um dos mais antigos e mais importantes processos de endurecimento superficial das ligas ferrosas, sendo imprescindível como meio de melhoria da qualidade, ganho de vida útil e desempenho de componentes mecânicos (BAUMGARTEN, 2003). Atualmente essa técnica é muito usada

em escala industrial no tratamento de peças automotivas principalmente eixos e engrenagens, peças submetidas à esforços de atrito e desgaste.

### 2.3.3 Cementação em meio sólido

A cementação em meio sólido ou em caixa de acordo com a Figura 2, é feita colocando-se a peça dentro de uma caixa metálica de aço liga resistente ao calor e dentro é colocado as chamadas misturas carburizantes, 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 ( $\text{CO}_2$ ). 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 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 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 amolecimento da superfície (CHIAVERINI, 2003).

Figura 2 - Caixa para cementação



Fonte: Vale (2011)

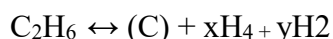
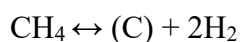
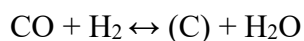
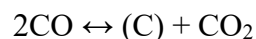
### 2.3.4 Cementação Gasosa

O processo mais utilizado industrialmente é a cementação gasosa com o carbono sendo fornecido por hidrocarbonetos gasosos, geralmente metano e propano. Pode-se considerar que este tipo de cementação ocorre devido a cinco etapas principais (FOPPA, 2009):

- Reações químicas homogêneas na fase gasosa;
- Difusão gasosa até a superfície do metal;
- Absorção de gases na superfície do metal;
- Reações químicas heterogêneas entre gases e o metal;
- Difusão no estado sólido do carbono na estrutura do metal.

Destas cinco etapas as duas últimas são de maior importância, sob determinadas condições uma ou outra pode controlar a cinética total. A partir do estudo das reações químicas heterogêneas têm-se condições de controlar quantitativamente o processo através da medição e controle dos parâmetros dessas reações. (FOPPA, 2009).

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 17 carbonáceas podem provir tanto de óxidos de carbono (CO) como de hidrocarbonetos (gás natural, propano, etano, metano e etc). Esses gases, ao serem decompostos, liberarão carbono (C) que atuará na cementação do aço (CHIAVERINI, 2003). As reações fundamentais do processo são, conforme as equações:



As reações acima mostram que tanto os hidrocarbonetos quanto 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

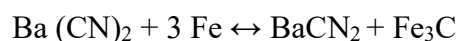


nitrogênio para diluir os hidrocarbonetos. O hidrogênio, mesmo atuando na descarbonetação, também favorece a cementação, pois ajuda a regenerar e formar monóxido de carbono acelerando, assim, o processo. Além desse fator, os gases diluidores atuam garantindo a movimentação dos gases no interior do forno e principalmente gerando pressões positivas em todos os pontos, não havendo a necessidade de adicionar mais gases contendo hidrocarbonetos. 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 para proceder a cementação (CHIAVERINI, 2003).

### 2.3.5 Cementação Líquida

Geralmente se utilizam sais fundidos, ricos em carbono, à base de cianeto e de carbonato, em geral. A temperatura deve ser de 930°C a 950°C. Nessa temperatura, os sais se tornam líquidos, pois se fundem por volta de 650°C. Em seguida, as peças pré-aquecidas a 400°C são mergulhadas em banho fundido. A função do pré-aquecimento é a de eliminar água e evitar choque térmico. Resfria-se a peça em salmoura com 10 a 15% de cloreto de sódio (NaCl), ou em óleo de têmpera (VALE, 2011).

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 acima de Ac1 (um pouco acima de A1) 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. A principal reação que ocorre nesse tipo de banho na presença de ferro, de acordo com a equação:

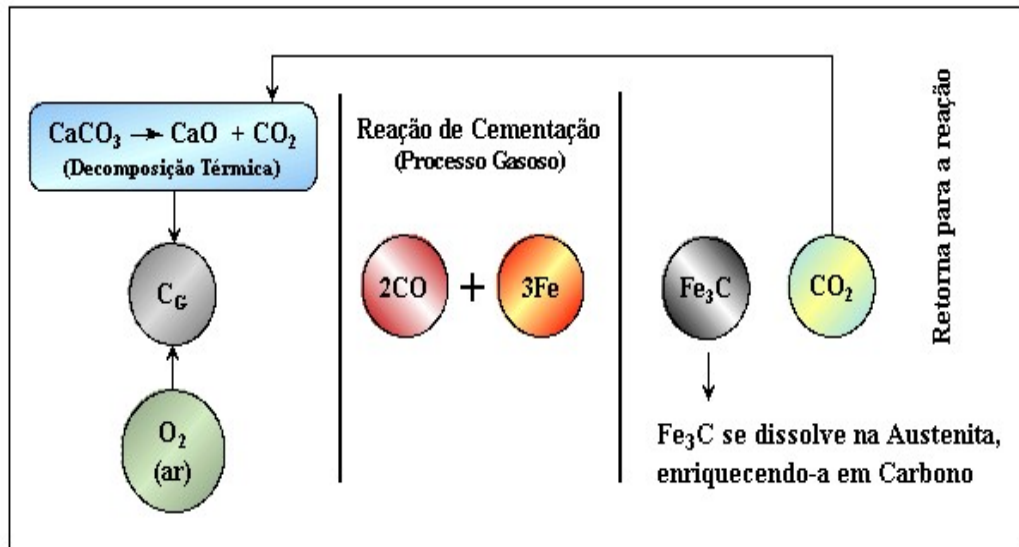


Após o tratamento de cementação, que ocorre geralmente entre 900°C e 955°C, a peça é retirada do banho e resfriada rapidamente para que ocorra a têmpera. A peça é resfriada normalmente em água ou em óleo, sendo a água o meio mais drástico de resfriamento (ASM HANDBOOK, 1990). Existem alguns estudos para 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 19 graduais, porém em altas temperaturas existe a possibilidade de crescimento de grão excessivo e um desgaste acelerado equipamento (CHIAVERINI, 2003). 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 (ASM HANDBOOK, 1990).

### **2.3.6 Mecanismo da Cementação**

O princípio fundamental do processo de cementação sólida se baseia na formação através de reações termoquímicas do gás monóxido de carbono (CO) e sua reação com a microestrutura austenítica (Fe  $\gamma$ ), promovendo em elevada temperatura (850°C a 1050°C) a difusão do carbono a partir da superfície em direção ao núcleo do material. De acordo com a Figura 3 esquematiza a formação da atmosfera cementante, através das reações termoquímicas de dissociação do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) formando CO<sub>2</sub> e a reação entre o carbono do granulado (C<sub>G</sub>) e o oxigênio, ambos promovendo a formação do gás “CO”. Portanto, é importante definir que o processo de cementação sólida é na realidade controlado por mecanismos de reação entre a superfície do material (ferro  $\gamma$ ) e o gás cementante formado (processo gasoso) (ASM HANDBOOK, 1991).

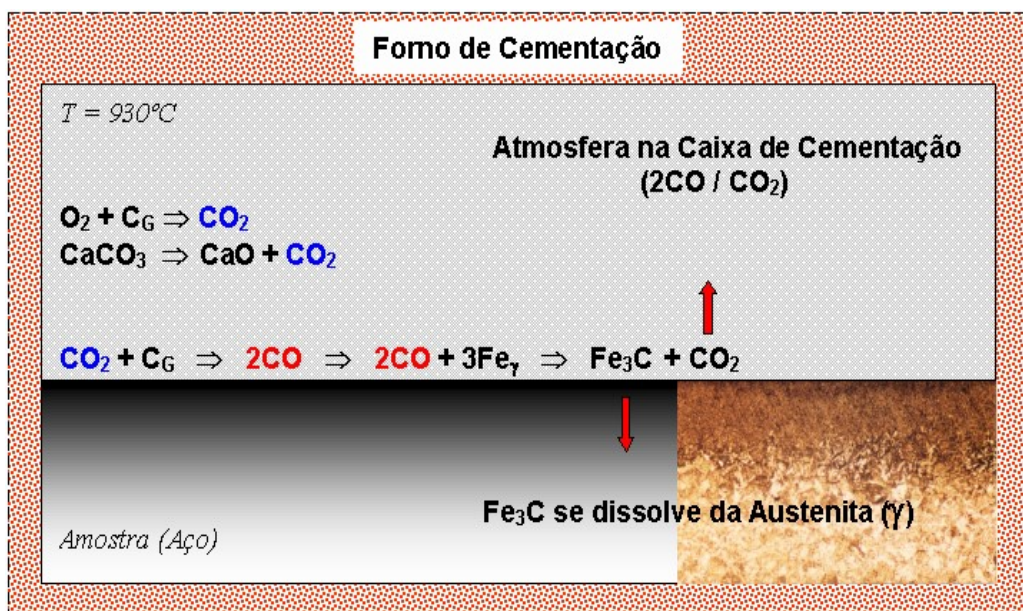
Figura 3 - Mecanismo da cementação



Fonte: ASM HANDBOOK (1991)

De acordo com a Figura 4 esquematiza as reações que ocorrem no interior da caixa de cementação, mostrando o estágio inicial de formação do gás CO<sub>2</sub>, sua interação com o carbono do granulado (C<sub>G</sub>) gerando o monóxido de carbono (CO) e por fim a reação de interface que resulta na difusão do carbono monoatômico para o interior do material, ocorrendo a sua dissolução na austenita (ASM HANDBOOK, 1991; CHIAVERINI, 1988).

Figura 4 - Reação no interior da caixa de cementação



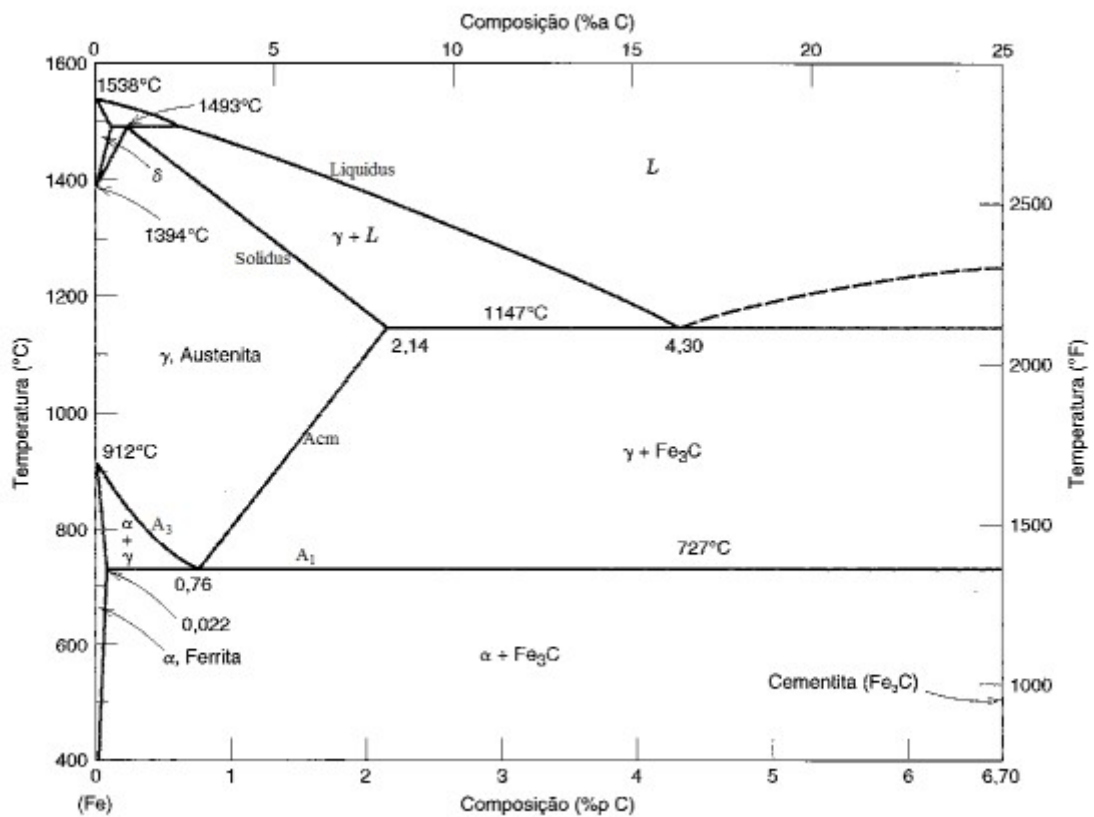
Fonte: Baumgarten (2003)

## 2.4 DIAGRAMA DE FERRO CARBONO

Em se tratando do ferro como matéria prima, fatores como abundância do material, o baixo custo de produção e a possibilidade de se obter inúmeras propriedades através da adição de outros elementos de liga, conferem uma vasta gama de aplicações ao metal. Ligado com o carbono, o comportamento das variedades alotrópicas do ferro e a solubilidade do carbono nele variam de forma característica, dependendo da temperatura e do teor de carbono. Isto pode ser visto em forma de diagrama, chamado diagrama de equilíbrio ferro-carbono, de acordo com a Figura 5 (SANTOS, 2015).

Aços e ferros fundidos são produtos siderúrgicos comuns, compostos basicamente por ligas ferro carbono, com teores de carbono entre 0,008% e 6,7%, entre outros elementos, aços possuem de 0 a 2,3% de teor de carbono enquanto ferros fundidos apresentam teores variando de 2,3 a 6,7% (COLPAERT, 2008).

Figura 5- Diagrama de ferro carbono

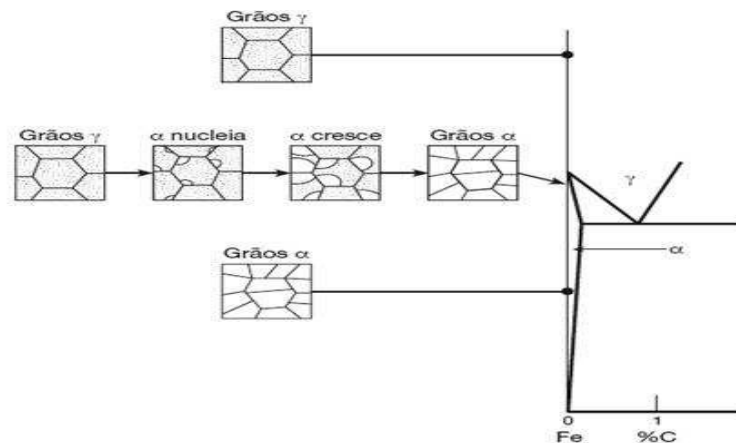


Fonte: Callister (2002)

Com base neste diagrama Fe-C, temos algumas definições de termos utilizados:

**Ferrita ( $\alpha$ ):** é a solução sólida do carbono em ferro alfa (CCC), existente até 912°C, com solubilidade máxima de carbono de 0,022% à 727°C. A formação da ferrita da austenita é mostrada de acordo com a Figura 6 (CALLISTER, 2002).

Figura 6- Transformação da ferrita em austenita



Fonte: Callister, (2002)

**Austenita:** A formação da austenita se dá pelo aquecimento do ferro puro, ou do ferro carbono. Nesta fase o arranjo atômico é estável na forma de CFC. Esta fase apresenta uma solubilidade máxima de 2,14 % de carbono a uma temperatura de 1147 °C e só é possível de ser observada em microscópios em que se possa operar em temperaturas elevadas, pois a mesma só é estável a uma temperatura acima de 727°C. A austenita apresenta boa resistência mecânica, uma notável tenacidade e não é eletromagnética (COLPAERT, 2008).

**Cementita:** é o carboneto de ferro ( $Fe_3C$ ) com estrutura ortorrômbica e de alta dureza. A cementita faz parte de estrutura perlítica

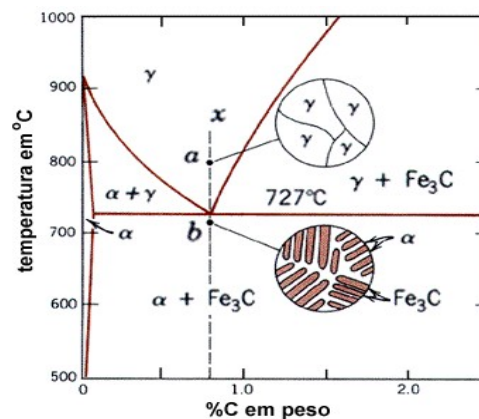
**Grafita:** a variedade alotrópica do carbono (estrutura cristalina hexagonal).

Ainda utilizando o diagrama ferro carbono para aços produzidos por meio de resfriamento lento e no qual as condições de equilíbrio são mantidas continuamente pode-se obter três estruturas intermediárias, sendo elas: Os aços hipoeutetóides, eutetóide e hipereutetóides (COLPAERT, 2008).

No diagrama de fases é possível classificar os aços carbono quanto à quantidade de carbono presente em sua composição, sendo os aços compostos por 0,77% de carbono os aços eutetóides, os aços com teores abaixo de 0,77% de carbono os hipoeutetóides e os aços com

teores acima de 0,77% de carbono os hipereutetóides. Os aços eutetóide, ao serem resfriados, partindo do campo austenítico (ferro  $\gamma$ ) passam pelo ponto eutetóide na temperatura de 727°C. Nesse ponto, a austenita se transformará em ferrita mais cementita. Essas duas fases se encontrarão dispostas em lamelas intercaladas e essa microestrutura é denominada como perlita, lembrando que se está tratando de estados de equilíbrio e que o resfriamento é extremamente lento (CHIAVERINI, 2003). Essa transformação pode ser vista de acordo com a Figura 7 abaixo:

Figura 7 - Representação esquemática das microestruturas para uma liga Fe-C eutetóide



Fonte: Callister, (2002)

## 2.5 DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÕES ISOTÉRMICAS

Nos tratamentos térmicos, as fases dos aços e seus constituintes são acompanhados através da utilização de diagramas que abordam curvas referentes à temperatura, tempo e transformação, as chamadas curvas TTT (SANTOS, 2015).

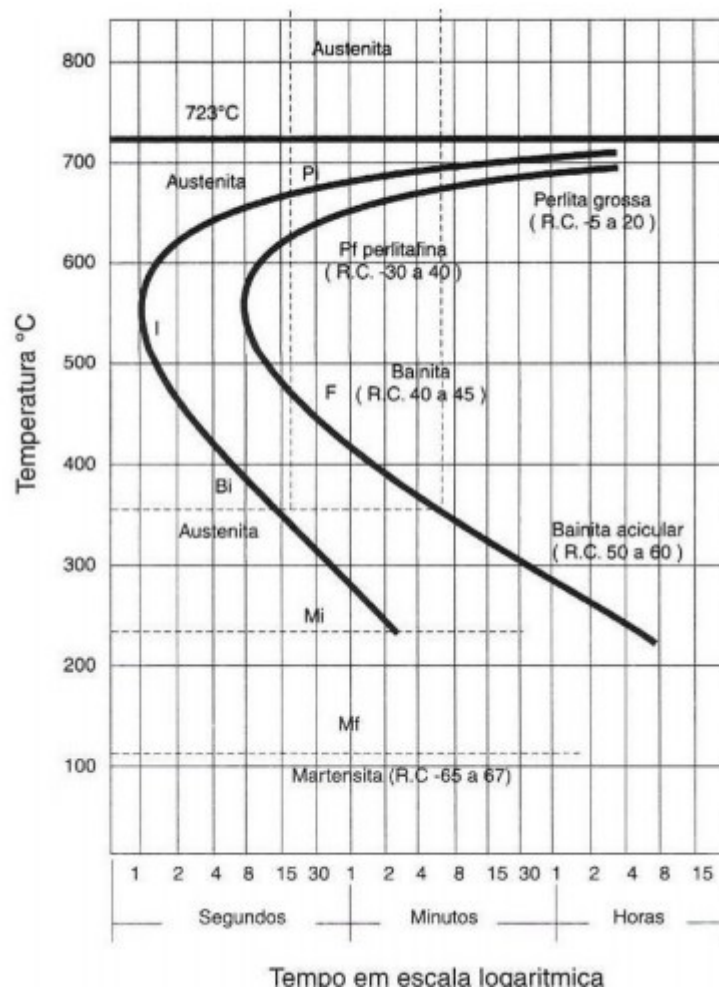
Para se obter determinada propriedade mecânica no aço é necessário prever qual será a microestrutura final do aço. Para isto é de extrema importância conhecer as curvas TTT (temperatura, tempo, transformação) e CCT ou TRC (transformação por resfriamento contínuo) do material estudado. Pois a partir delas que se traçam os tratamentos térmicos adequados para determinado projeto. Estas curvas geralmente são encontradas na literatura para os aços que são vendidos comercialmente (COLPAERT, 2008).

Ao analisar a curva TTT do aço eutetóide de acordo com a Figura 8 tem-se, na parte superior da curva (“cotovelo”), a região onde ocorre a formação de estruturas perlíticas.

Quanto maior o tempo para resfriar o aço, maior será o espaço interlamelar, e este fator irá alterar diretamente as propriedades mecânicas finais do aço (COLPAERT, 2008).

Na região abaixo do primeiro cotovelo é o local pelo qual se forma estruturas bainíticas. Estas estruturas normalmente são obtidas a partir de tratamentos isotérmicos e não possuem forma lamelar. Os seus constituintes são do equilíbrio, porém sua morfologia e combinação não são (ELISEI, 2004).

Figura 8 - Diagrama de transformação isotérmica para um aço eutetóide



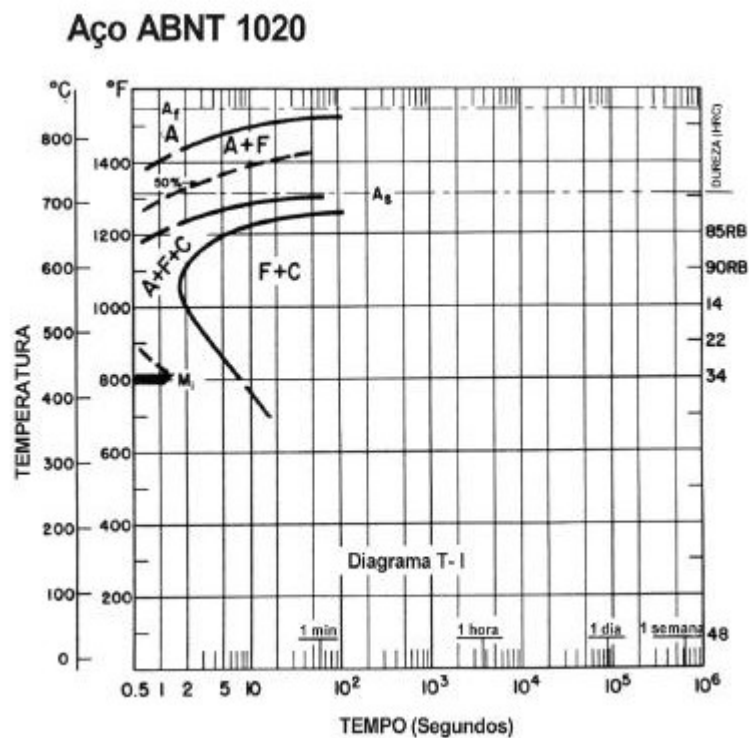
Fonte: Chiaverini, (2003)

Como as velocidades de resfriamento na prática podem ser bem mais altas do que as necessárias para manter o equilíbrio termodinâmico, em certas condições pode não haver tempo suficiente para a movimentação de átomos que permita a formação das fases constantes do diagrama de equilíbrio (ferrita e cementita) (CHIAVERINI, 2003). Nesses casos, podem

ser formadas novas fases, em equilíbrio metaestável, denominadas bainita e martensita. A bainita é uma estrutura formada por cementita em forma de agulhas e ferrita altamente distorcida devido ao teor de carbono acima da composição de equilíbrio. A bainita é resultante da transformação da austenita em temperaturas abaixo daquelas necessárias para a formação da perlita (CHIAVERINI, 2003).

De acordo com a Figura 9 é mostrada, de forma esquemática uma curva TTT de um aço hipoeutetóide ( $\% C < 0,77$ ). No caso dos aços hipoeutetóides as curvas TTT deslocam-se para a esquerda, o que significa que as transformações são mais rápidas, dificultando a obtenção de estruturas martensíticas e bainíticas, favorecendo a formação de perlita. Isso ocorre devido aos menores teores de carbono exigindo menos movimentos de difusão. As temperaturas de início e fim da transformação martensítica deslocam-se para cima (Chiaverini, 1988).

Figura 9 - Curvas CCT para o aço ABNT 1020



Fonte: ASM International, (1991)



## 2.6 ENSAIOS

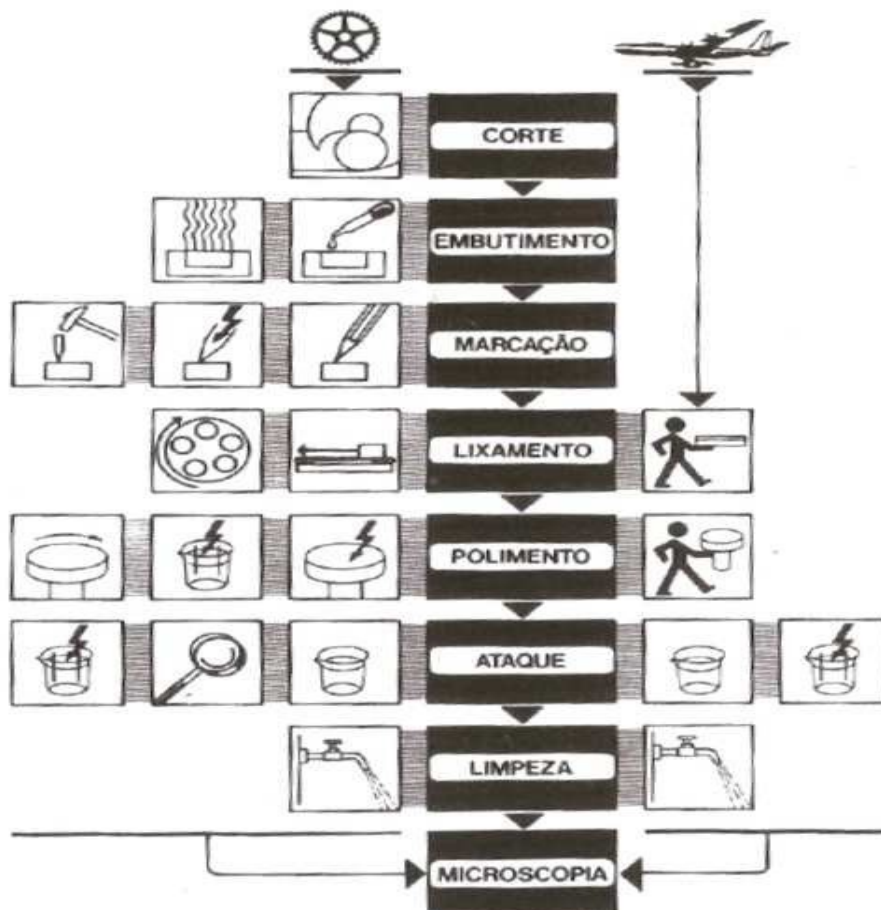
### 2.6.1 Ensaio Metalográfico

Os três estágios básicos utilizados no ensaio metalográfico são:

- Preparação de uma superfície plana e polida;
- Ataque;
- Observação através de um instrumento óptico ou eletrônico.

A preparação de uma superfície plana e polida segue uma sequência de seccionamento ou corte embutimento, marcação, lixamento, polimento, ataque e limpeza, de acordo com a imagem 10.

Figura 10: Etapas de preparação metalográfica



Fonte: Fazano (1980)

Segundo Colpaert (2008), esta preparação pode ser dividida em oito partes, sendo elas:

- Lixamento e Polimento

O objetivo desta etapa é retirar a deformação causada pelo corte da amostra, e também deixar a superfície da amostra o mais plano possível. A preparação da superfície a ser analisada se dá por meio do lixamento da mesma em lixadeiras manuais ou motorizadas com lixas de carboneto de silício. A sequência de lixas mais comumente utilizadas é: 180, 240, 320, 400, 600 e 1200 mesh. A cada lixa utilizada a superfície deve ser rotacionada em 90°. Para evitar o aquecimento da amostra durante este processo se utiliza água para fazer a refrigeração da mesma. No caso de materiais que reagem com a água, se deve utilizar um líquido refrigerante específico para o mesmo.

Após a amostra ser lixada deve se fazer o polimento da mesma. O intuito desta etapa é obter uma amostra plana, livre de riscos e com alta refletividade. O polimento pode ser feito em politrizes manuais ou automáticas, no qual sobre o disco giratório se coloca um pano de polimento, que podem ser de papel, feltro, lã. Sobre este pano se deposita uma leve camada de abrasivo. Os abrasivos mais utilizados para o polimento são, alumina, pasta de diamante e sílica coloidal. O polimento com pasta de diamante geralmente é utilizado para um polimento mais grosseiro. Logo é o primeiro abrasivo utilizado após o lixamento. Neste se gira 90° a amostra e faz o polimento com a amostra fixa, e para fazer a lubrificação se utiliza soluções a base de álcool. Após o polimento com pasta de diamante se utiliza alumina, este é recomendado para um polimento mais fino e o polimento final. Porém quando o intuito é obter imagens com alta qualidade, se recomenda fazer um polimento mais fino, e para isto se utiliza sílica coloidal. O lubrificante utilizado tanto para a sílica quanto para a alumina deve ser a água destilada, e nesta etapa deve-se movimentar a amostra no sentido contrário a rotação do pano para evitar a formação de defeitos de polimento popularmente chamados cometas.

Para determinar se amostra esta livre de riscos deve-se após o polimento lavá-la em água corrente esfregando um algodão em sua face e para facilitar a secagem despejar um pouco álcool na amostra e secar com um auxílio de um secador de cabelo e analisar no microscópio ou no estereoscópio numa ampliação pequena. Se ao analisar, não conter mais nenhum risco na amostra, ela está pronta para que o ataque químico possa ser realizado.

- Ataque químico

Para o ataque químico são utilizadas soluções aquosas ou ácidos, bases e sais, bem como sais fundidos. As condições de ataque, tais como composições químicas, temperaturas e

tempos, podem ser variadas para atingir as mais diversas finalidades de contraste. Um dos reagentes mais utilizados para aço em ataque químicos é o nital.

O nital é constituído de 1 a 5ml de  $\text{HNO}_3$  (ácido nítrico) e 99 a 95ml de etanol (álcool etílico). Para metalografia normalmente utiliza-se uma concentração de 2%. Este reagente é recomendado na revelação de estruturas de baixo e médio teor de carbono quando necessitamos de acentuado contraste entre perlita, cementita e ferrita.

- Microscópio Óptico

Técnicas de observação da microestrutura dos aços e ferros fundidos, a mais comum é a microscopia ótica, de acordo com a Figura 11. Emprega-se luz visível que incide sobre a amostra e é refletida até ao observador. A resolução que pode ser obtida em uma imagem depende do comprimento de onda da radiação empregada. Para a luz visível de cor verde, isto resulta em uma resolução de 220 a 250 nm que corresponde a um aumento máximo da ordem de 1400 vezes.

Figura 11 - Microscópio ótico



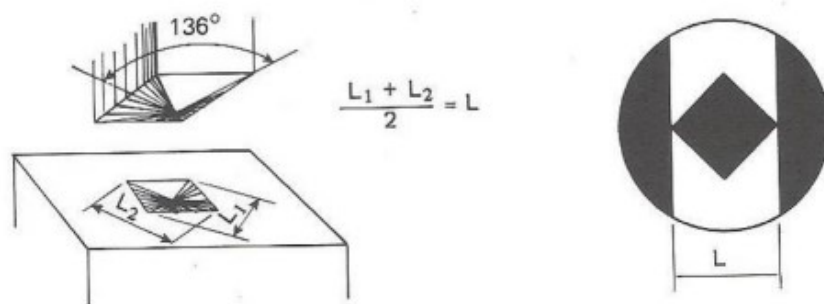
Fonte: Autores

## 2.6.2 Microdureza

Os ensaios de dureza são baseados na penetração na superfície do material pela aplicação de uma carga através de um penetrador. A dureza de um material, embora haja diversas definições, podem ser definidos como uma resistência à penetração ou resistência à deformação plástica (SOUZA, 1982).

No ensaio de dureza Vickers a forma da impressão é a de um losango regular, onde as duas diagonais devem ser medidas, como mostra de acordo com a Figura 12, por um microscópio acoplado ao aparelho de medição, a média entre essas duas medidas utilizadas para determinação da dureza Vickers é dada pela seguinte equação (GARCIA, 1999).

Figura 12 – Dureza vickers



Fonte: Souza (1982)

Este tipo de dureza relaciona a carga aplicada com a área superficial da impressão. O penetrador padronizado é uma pirâmide de diamante de base quadrada e com um ângulo de 136° entre faces opostas, devido a forma do penetrador o teste também é conhecido como teste de dureza de pirâmide de diamante. O ensaio é aplicável em todos os materiais metálicos com quaisquer durezas, especialmente materiais muito duros, ou corpos de prova muito finos, pequenos e irregulares (GARCIA, 1999).

Segundo Zaiden e Pettersen (2010), o ensaio de microdureza é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, vidros e laminados, pela vantagem de fornecer dados quantitativos das características de resistência à deformação permanente das peças produzidas. A medida da microdureza de um material é dada em função da marca da impressão superficial da carga aplicada.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 AÇO SAE 1020 PARA CEMENTAÇÃO

Os corpos de provas utilizados no experimento foi o aço SAE 1020. Todos os corpos de prova foram retirados da mesma barra para evitar variações na composição química e consequentemente nos resultados obtidos após o tratamento de cementação. A barra foi doada pela FATEC para a fabricação das amostras, o material estava inicialmente 150 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro, a mesma foi dividida em 12 partes iguais, com a qual deu origem a 12 corpos de prova com 20 mm de diâmetro. Foram utilizadas 12 amostras no experimento sendo 6 cementadas por 900°C, as 6 amostras restantes foram tratadas por 1000°C, todas realizadas com 4, 8, 12, 16, 20 e 24 horas de banho.

#### 3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

Os seis primeiros corpos de provas foram tratados a temperatura de 900°C e as outras 6 amostras foram cementadas a temperatura de 1000°C, todas com o mesmo período de tempo. Para a realização do trabalho foi empregado um forno mufla marca da grion, de acordo com a Figura 13.

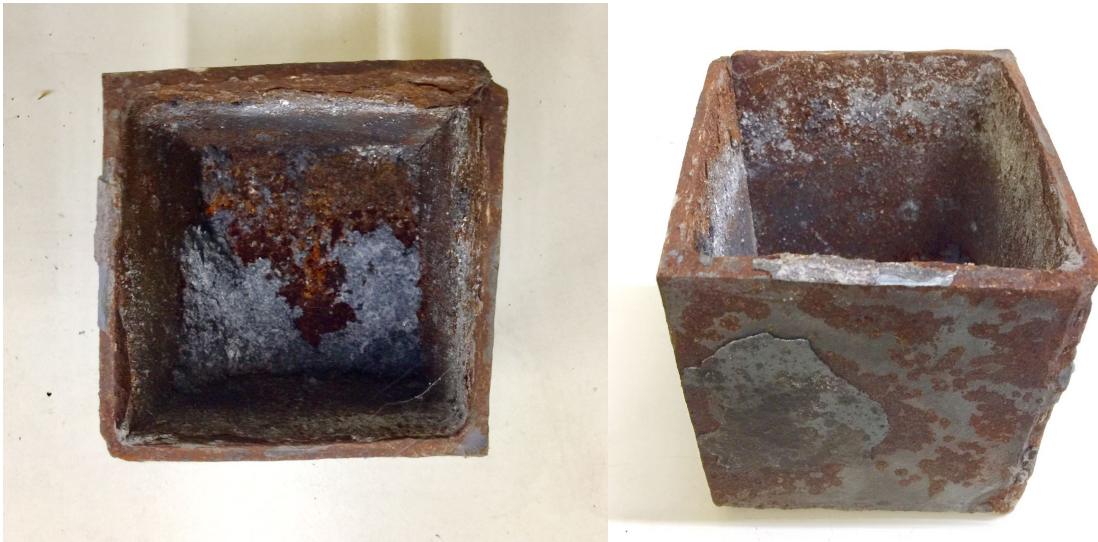
Figura 13 - Forno mufla grion



Fonte: Autores

A caixa de cementação com dimensão de largura 100 mm, profundidade 100 mm e altura de 110 mm. Para evitar a queima prematura do granulado, foi empregada uma tampa sobre a caixa, mantendo assim a carga fechada, de acordo com a Figura 14. Os corpos de prova foram posicionados com afastamento de 20 mm, sobre uma “cama” de granulado de 30 mm de espessura. A montagem da carga é de grande importância devendo ser observados a quantidade de granulado, afastamento entre amostras e a espessura das camadas sobrepostas, além de garantir o fechamento da caixa evitando a queima excessiva do granulado e a perda do gás cementante (CO).

Figura 14 - Caixa para cementação



Fonte: Autores

Uma vez montada a carga com os corpos de prova, a caixa fechada foi introduzida no forno a temperatura ambiente, levando de 10 a 15 minutos para atingir as temperaturas estudadas e então foi iniciado o processo de aquecimento controlado. Sendo que a elevação da temperatura se dá até a condição pré-definida de cementação (870°C ou 930°C). Após a carga atingir a temperatura, iniciou-se a contagem do tempo de cementação, sendo que para cada tempo estipulado no trabalho foram retiradas as amostras e resfriadas em meio adequado. Para os corpos de prova com resfriamento lento, o processo se deu através da retirada dos mesmos e seu acondicionamento em uma base refratária ao ar calmo.

### 3.3 PREPARAÇÃO METALGRÁFICA

Após o tratamento termoquímico de cementação, os corpos de prova foram cortados e em seguida embutidos em baquelite para facilitar o seu manuseio quando for realizar o lixamento e polimento respectivamente. Para o embutimento, as amostras foram embutidas a quente no equipamento, de acordo com a Figura 15 PRE 40Mi – AROTEC, e baquelite utilizada foi da AROTEC indústria e comércio.

Figura 15 - Embutidora a quente



Fonte: Autores

No processo de lixamento foi utilizada lixas com granulometria 180, 220, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2000 mesh, sucessivamente para acabamento. A cada mudança de lixa, as amostras foram rotacionadas á 90°, a cada interrupção do lixamento para análise da superfície, a limpeza das amostras foi feita em água corrente e secagem com jato de ar frio.

O polimento foi realizado com o equipamento de acordo com a Figura 16 AROPOL 2V – AROTEC, utilizou-se pasta de diamante de 3 $\mu$ m e sucessivamente poliu-a com a Politriz AROTEC 46 indústria e comércio.

Figura 16 - Politriz



Fonte: Autores

A revelação microestrutural foi realizada com o auxílio do reativo nital, que consiste em uma mistura de 2% de ácido nítrico em álcool etílico absoluto. O ataque foi realizado variando-se o tempo entre 5 a 15 segundos de imersão. Foram realizados vários testes para se obter os detalhes significativos da camada cementada, mas a princípio o tempo determinado pela literatura fazia com que a amostras ficassem com um aspecto de queimado por ficar muito tempo exposta ao reagente. Então foi diminuindo o tempo de imersão até chegar ao ponto necessário, que foi em média de 3 a 4 segundos. O ataque foi interrompido com álcool e a superfície de observação seca através de evaporação de álcool etílico, auxiliada por jato de ar quente. As amostras depois de atacadas foram observadas no microscópio óptico com o auxílio do software analysis-olympus, de acordo com a Figura 17.

Figura 17 - Microscópio óptico



Fonte: Autor



### 3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA

Para proceder ao ensaio de microdureza foi necessário antes de fazer a preparação metalográfica nas amostras a serem testadas no microdurômetro, nele um endentador com formato de pirâmide feito de diamante é pressionado contra amostra formando uma impressão que dirá o quão duro a região aonde foi o ensaio. Nesse caso onde se deseja obter a camada efetiva, uma linha imaginária é traçada partindo da superfície até o núcleo, de acordo com a Figura 18 da máquina de microdureza.

Figura 18 - Microdurômetro



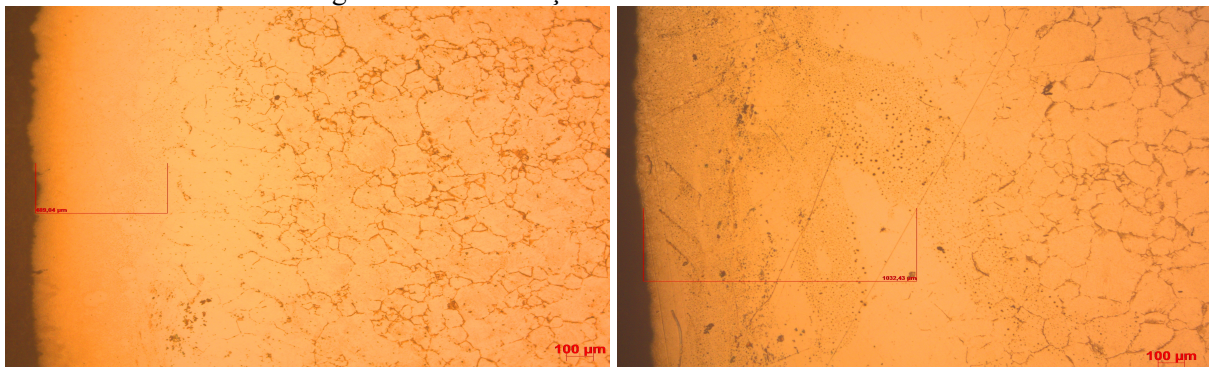
Fonte: Autores

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 MICROSCOPIA ÓTICA

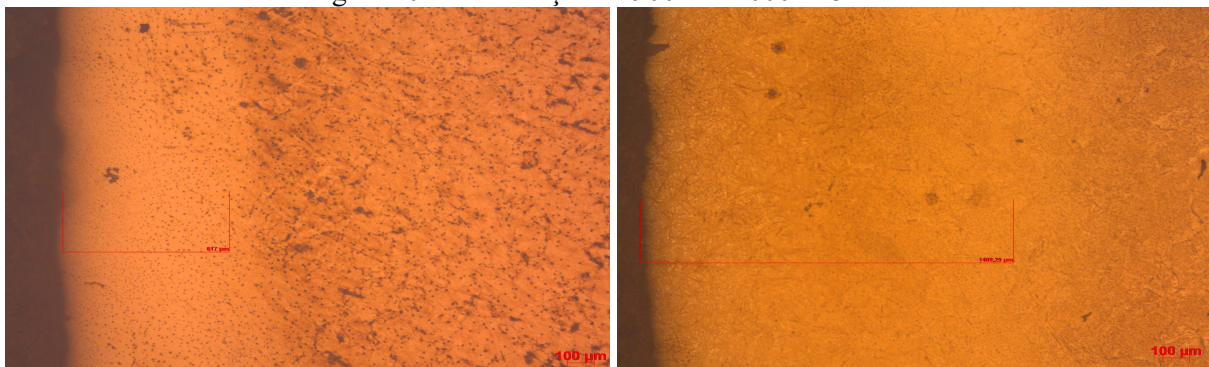
Para as análises preliminares das amostras de aço SAE 1020, foi feita a microscopia ótica. Depois dos procedimentos de lixamento, polimento e ataque com solução de nital 2%, as amostras foram submetidas para a aquisição de imagens. As micrografias obtidas estão ilustradas nas Figuras 19 a 24. As micrografias foram reveladas como era esperado, para o aço SAE 1020, sendo o objetivo verificar o crescimento da camada de acordo com o tempo e temperatura. Portanto durante o processo onde foi necessário tempo de forno por 24 horas foi observado crescimento de grão. Embora a camada obtida no tratamento de 24 horas seja relativamente espessa, não se recomenda utilizar devido ao crescimento de grão e possível diminuição das propriedades mecânicas.

Figura 19 - Cementação de 900°C e 1000°C/4 horas



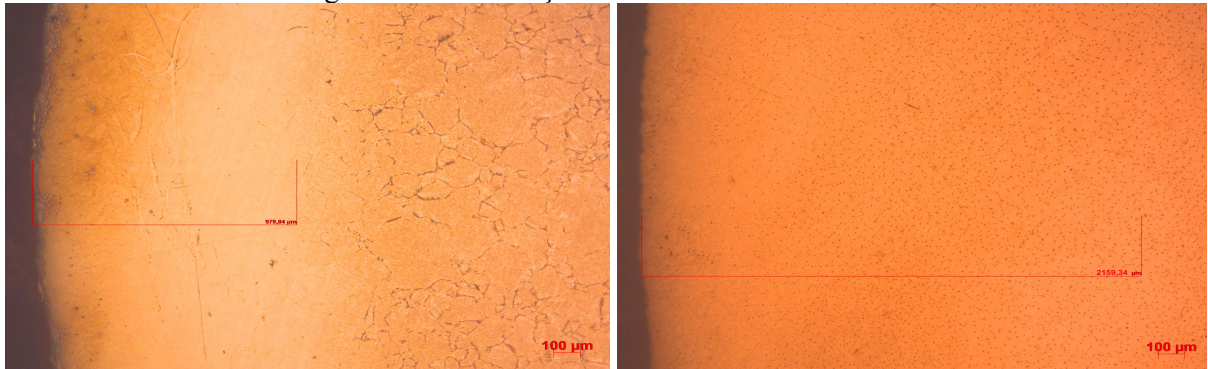
Fonte: Autores

Figura 20 - Cementação de 900°C e 1000°C/8 horas



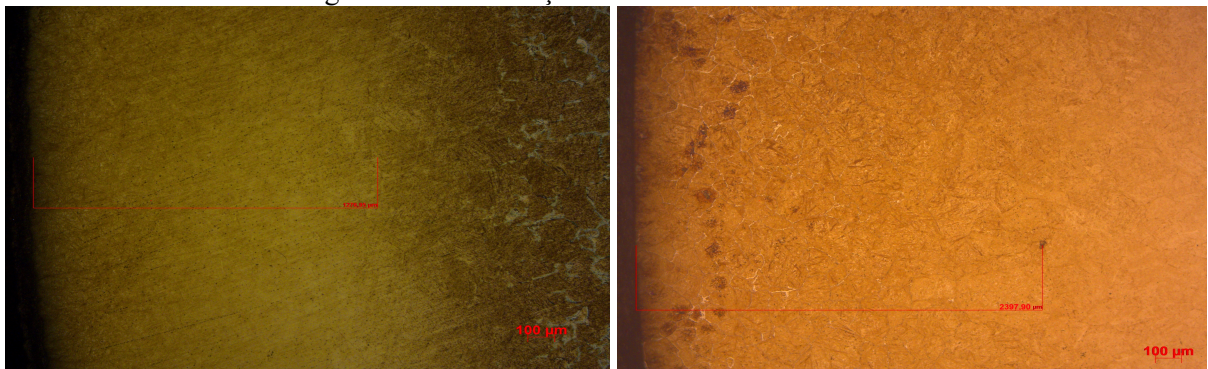
Fonte: Autores

Figura 21 - Cementação de 900°C e 1000°C/12 horas



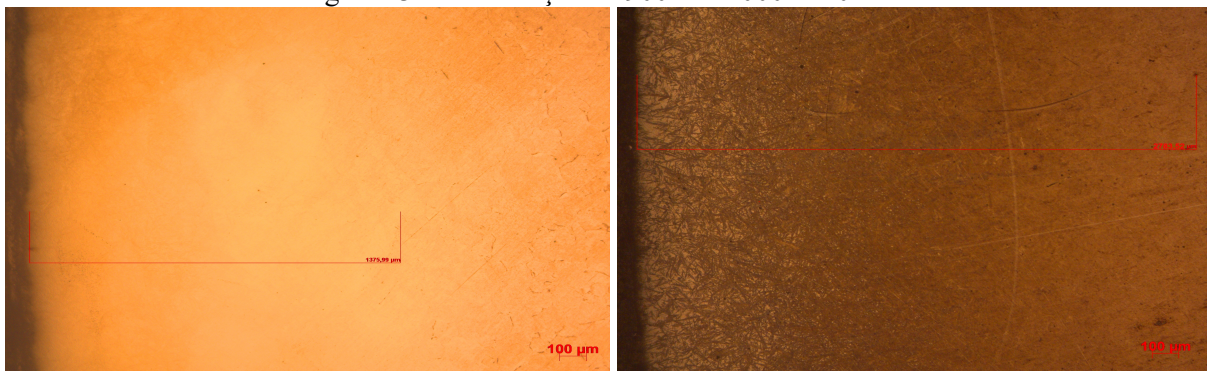
Fonte: Autores

Figura 22 - Cementação de 900°C e 1000°C/16 horas



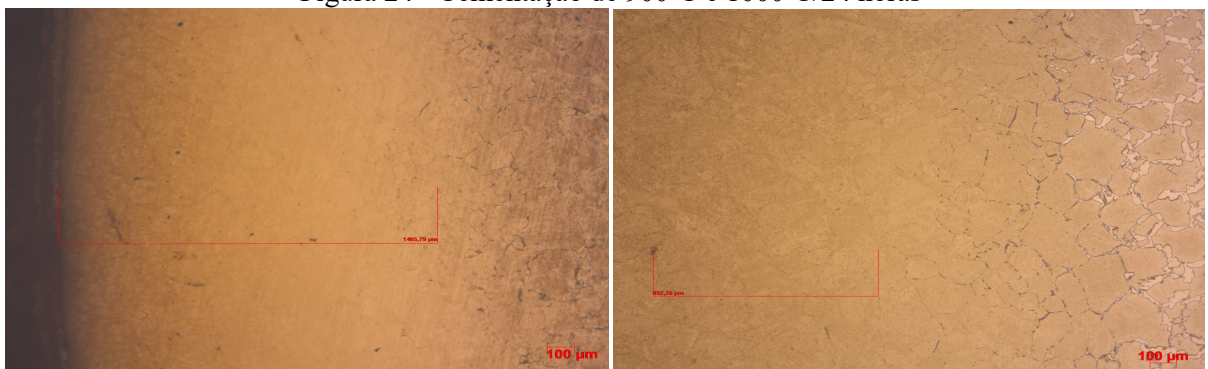
Fonte: Autores

Figura 23 - Cementação de 900°C e 1000°C/20 horas



Fonte: Autores

Figura 24 - Cementação de 900°C e 1000°C/24 horas



Fonte: Autor

## 4.2 MEDIÇÃO DA CAMADA CEMENTADA

O tratamento foi realizado em duas faixas de temperaturas a fim de formar uma camada de carbono e formação de carbonetos de ferro que elevam a dureza das amostras, o tratamento de 900°C seguiu o padrão das indústrias, já a cementação de 1000°C teve um excelente resultado, pois o carbono com o aumento da temperatura e por longo tempo continua aumentando a espessura da camada e conseqüentemente a dureza, adquirindo o dobro que a amostra de 900°C, de acordo com a Tabela 3 e os Gráfico 1 e 2.

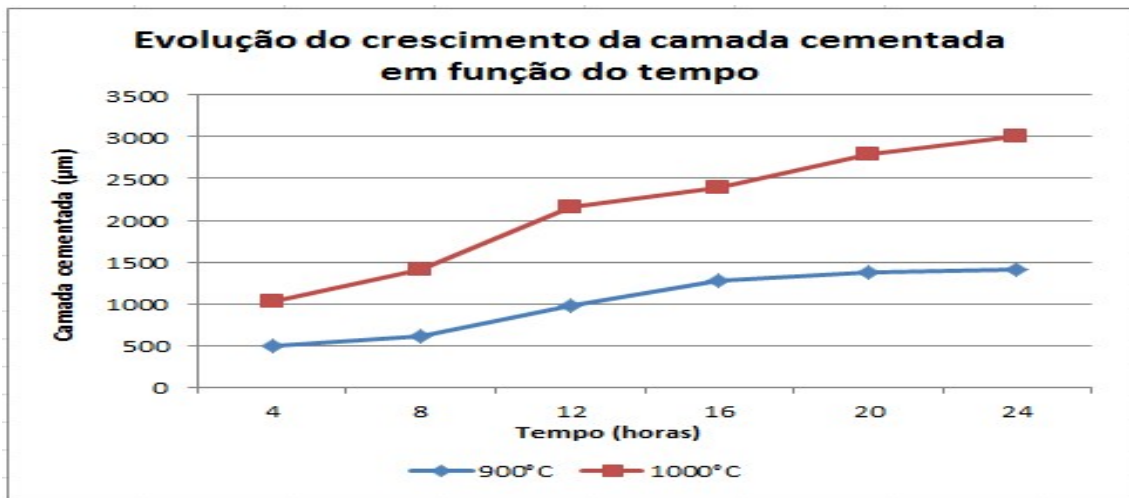
Nas amostras cementadas, foi possível verificar uma dureza superficial desejável, permanecendo o núcleo com suas características iniciais preservadas. Como os aços adequados para cementação são aqueles com teor baixo de carbono igual ou inferior a 0,25%, os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo considerada uma média de cinco medições. Contudo, fica evidente que podemos aplicar a cementação sólida em caixa, desde que sejam realizados com atmosfera controlada e com um rigoroso controle da temperatura e tempo de aplicação. Para diferenciar a camada cementada, da parte dútil do núcleo, durante a medição foram utilizados os pontos da microdureza da amostra, começando da borda até encontrar uma parte com a dureza menor, identificando que a camada cementada tinha terminado, e com isto a distância foi encontrada.

Tabela 3: Temperatura e tempo de aplicação do processo de cementação com a medida da distância e dureza

<b>900°C</b>	<b>4 horas</b>	<b>8 horas</b>	<b>12 horas</b>	<b>16 horas</b>	<b>20 horas</b>	<b>24 horas</b>
<b>Distância (µm)</b>	500	520	1000	1300	1400	1400
<b>Dureza HV</b>	400	400	500	680	820	820
<b>1000°C</b>	<b>4 horas</b>	<b>8 horas</b>	<b>12 horas</b>	<b>16 horas</b>	<b>20 horas</b>	<b>24 horas</b>
<b>Distância (µm)</b>	1000	1400	2200	2400	2700	3000
<b>Dureza HV</b>	650	680	700	720	750	910

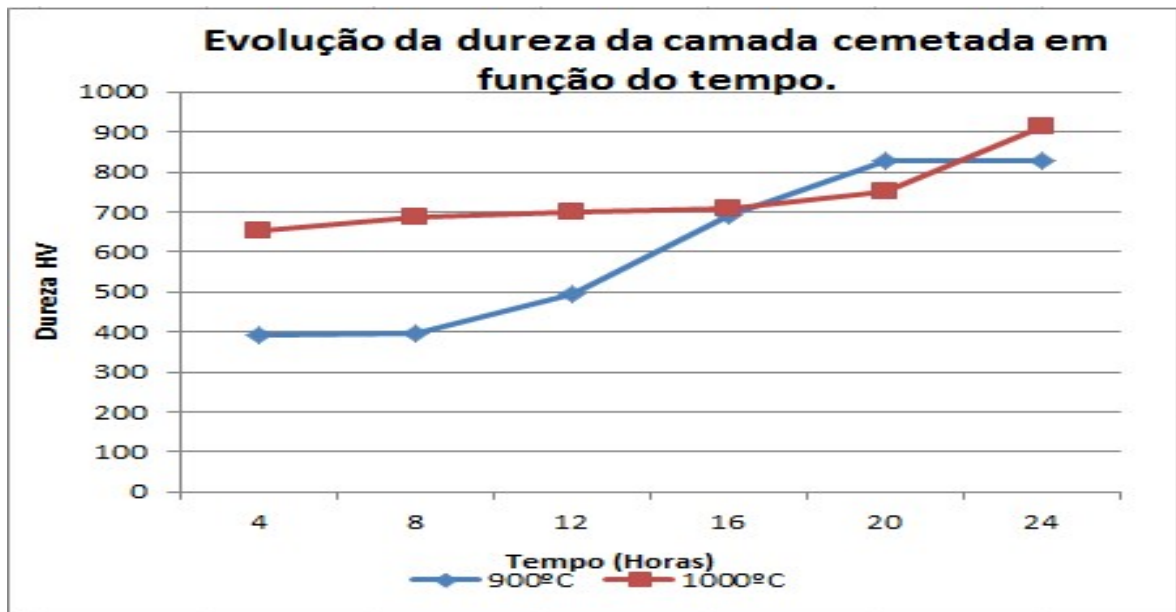
Fonte: Autores.

Gráfico 1: Evolução do crescimento da camada cementada em função do tempo



Fonte: Autores.

Gráfico 2: Evolução da dureza da camada cementada em função do tempo



Fonte: Autores

## 5 CONCLUSÃO

- ❑ Para atingir 1400 micras em 1000 °C foram necessárias 8 horas de banho, já em 900°C foram necessárias 24 horas.
- ❑ A 900°C a dureza da camada cementada aumentou a partir de 8 horas de banho.
- ❑ Na temperatura de 900°C a dureza manteve-se constante a partir de 20 horas.
- ❑ Em 1000°C conseguiu-se maior dureza em todos os tempos de banho.
- ❑ A 1000°C a dureza da camada cementada se manteve constante até 20 horas de banho e só aumentou a partir de 24 horas
- ❑ A espessura da camada cementada aumenta com o aumento da temperatura.
- ❑ Para obter-se uma dureza acima de 600 HV foram necessárias 4 horas de banho a 1000°C. Já em 900°C foram necessárias 14 horas.
- ❑ Para trabalho futuro ficam os testes envolvendo a aplicação no tempo de 30 horas de cementação nas temperaturas de 900°C e 1000°C para uma avaliação da camada de carbono e da dureza, permitindo a otimização do processo.

## REFERÊNCIAS

ARCELOR MITAL. **Guia do aço**. Catálogo. Guarulhos. 2013. Disponível: <<http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>> Acesso em: 17. Outubro.16.

ASM HANDBOOK. **Atlas of time temperature diagrams for irons and steels**. 2ª ed. Vol.4. USA: ASM International, 1991.

ASM HANDBOOK. **Heat Treating**. 1ª ed. Vol.4. USA: ASM Internacional, 1990.

ASM HANDBOOK. **Pack Carburizing**. 1ª ed. Vol.4. USA: ASM Internacional, 1990.

CEFET- SP. Informações gerais sobre os aços. São Paulo, 2001. Disponível: <[http://www.associacaodeinspetores.com.br/arquivos/arquivo\\_artigo/be8263845f3ec3c3167cf64ffcbe22ac.pdf](http://www.associacaodeinspetores.com.br/arquivos/arquivo_artigo/be8263845f3ec3c3167cf64ffcbe22ac.pdf)> Acesso em: 02. Março. 17.

BAUMGARTEN, J. F. **Cementação sólida empregando granulado elaborado a partir de carvão vegetal reciclado e ativador de CaCO<sub>3</sub> ecologicamente correto**. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. 2003.

CADIOLLI, L.P. **Estudos para viabilização da cementação gasosa através da dissociação do etanol diluído com gás nitrogênio**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade do Estado de São Paulo. São Carlos. 1998.

CUNHA, M. C. **Influência de parâmetros de processo no crescimento de trincas curtas por fadiga em camada cementada do aço DIN 20MnCr5**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia Materiais. Universidade do Estado de São Paulo. São Carlos. 2000.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de materiais: Uma introdução**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CHEN, P. C; CHAO, C. G; LIU, T. F. **A novel higher – strength high ductility and high corrosion resistance FeAlMnC low density alloy**. Scripta Materialia. National Chiao Tung University. Taiwan. 2012.

CHIAVERINI V. **Aços e Ferros fundidos**. 6ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, 1988.

CHIAVERINI, V. **Tratamentos térmicos das ligas metálicas**. 1ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4º ed. São Paulo: Blucher, 2008.

COSTA e SILVA, A. L., & MEI, P. R. (2006). **Aços e Ligas especiais**. São Paulo: Edgard Blücher.

ELISEI, C. C. A. **Caracterização mecânica e microestrutural de um aço multifásico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Matérias. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá - Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. 2004.

FAZANO, C. A. T. V. **A prática metalográfica**. 1ª ed. São Paulo: Editora Limitada, 1980.

FOPPA, Cristiano. **Estudo da Influência de diferentes estados superficiais na resistência ao torque e vida de acoplamentos mecânicos fabricados com aços DIN 16MnCr5 e SAE 10B22M**. 2009. 99f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

GARCIA, A; SPIM, J. A; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

GGDMETALS. **SAE 1020**. Catálogo. São Paulo. 2015. Disponível: <<http://www.ggdmets.com.br/produto/sae-1020/>> Acesso em: 24. Out. 2016.

LEANDRO, M. R. **Estudos das Propriedades Mecânicas dos Aços H13 E “H13 Modificado” Aplicados em Matrizes De Extrusão de Alumínio**. 2009. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2009.

LEONI, M.B. **O processo tecnored frente ao alto forno e as novas tecnologias de produção do ferro primário**. 2012. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo de Engenharia de Lorena, Lorena, 2012.

MOURÃO, M. B et al. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo. ABM, 2007.

MONTEIRO, A. C. **Estudo do Comportamento dos Aços Ferramentas Soldados em Fadiga**. 2011. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Elétrica Com ênfase em Processos Industriais, Universidade Federal do Pará Instituto de Tecnologia, Belém, 2011.



NUNES, L.M. **Desenvolvimento do aço microligado para a produção de vergalhão nervurado**, PUCRS, 2009.

NTCm – **Núcleo de Termodinâmica Computacional para Metalurgia**, UFRGS. Disponível em:<<http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06632/Redcarb.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

OLIVEIRA, E.L. **Estudo da otimização de manganês em aço SAE 1541 modificado e da sua influencia nas propriedades mecânicas de vergalhão**. Graduação em Engenharia Metalúrgica. Porto Alegre, 2012.

PASCOALI, S. **Tecnologia Mecânica**. Apostila. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Santa Catarina. Julho, 2008.

PORTAL METÁLICA. **O que é aço carbono?** Brasil Disponível em:<<http://wwwo.metallica.com.br/o-que-e-aco-carbono>>. Acesso em: 03 mar. 2017.

VALE, A. R. M. **Tratamento térmico**. Apostila Ciência e Tecnologia. Instituto Federal de Educação. Belém. 2011.

SANTOS, F. N. **Efeito da microestrutura nas propriedades mecânicas de aço automotivos dissimilares soldados à laser**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual do Estado de São Paulo. Guaratinguetá. 2015.

SENAI. **Materiais metálicos e não metálicos**. Apostila caldeiraria. Vitória. 1996. Disponível: <<http://www.abraman.org.br/arquivos/16/16.pdf>>Acesso em: 24. Outubro.16.

SCHEID, A. **Curso Básico de Aços**. Apostila. Curitiba, 2010.

SILVA, V. P. **Dimensionamento de estrutura de aço**. Apostila. Departamento de Engenharia e Estruturas e Geotécnica Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. São Paulo.2012.

Disponível:<[https://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/110863/mod\\_resource/content/0/apostila2012.pdf](https://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/110863/mod_resource/content/0/apostila2012.pdf)>Acesso em: 17. Outubro.2016.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5º ed. São Paulo: Blucher, 1982.

SPECTRU. **Classificação dos aços**. Apostila. Rio de Janeiro. 2017. Disponível:<<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/Nova%20pasta2/clasiaco.pdf>>Acesso em: 02.03.17.

TSCHIPTCHIN, A. P. **Tratamento térmico dos aços**. Dissertação de Mestrado. EPUSP – Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Disponível: <<https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/21012/1/000314074400010.pdf>> Acesso em: 17.0outubro.16

WENDT, D. **Comparação entre aparelhos medidores de potencial de carbono em fornos de atmosfera endotérmica para cementação**. Trabalho de diplomação. Departamento de Engenharia Metalúrgica. Porto Alegre. 2010.

ZAIDEN, A.R; PETTERSEN, L.P. **Ensaio mecânicos de metais**. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2010.