



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

# Estudo de viabilidade técnica e econômica de troca de processo de cementação em linha industrial de tratamento térmico

Gabriel Coelho Paranhos Barra  
106046241

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Luiz Carlos Pereira

Rio de Janeiro

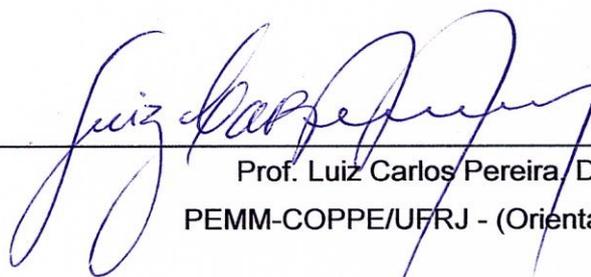
Agosto/2013

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE TROCA DE PROCESSO DE  
CEMENTAÇÃO EM LINHA INDUSTRIAL DE TRATAMENTO TÉRMICO.

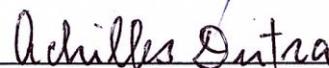
Gabriel Coelho Paranhos Barra

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO.

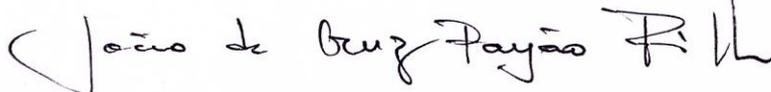
Examinada por:



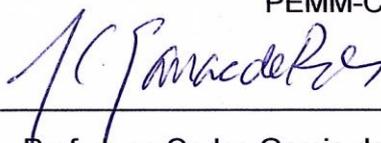
Prof. Luiz Carlos Pereira, D. Sc.  
PEMM-COPPE/UFRJ - (Orientador)



Prof. Achilles Junqueira Bourdot Dutra, D. Sc.  
PEMM-COPPE/UFRJ



Prof. João da Cruz Payão Filho, D. Sc.  
PEMM-COPPE/UFRJ



Prof. Juan Carlos Garcia de Blas, D. Sc.  
PEMM-COPPE/UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Agosto de 2013

Barra, Gabriel Coelho Paranhos

Estudo de viabilidade técnica e econômica de troca de processo de cementação em linha industrial de tratamento térmico/ Gabriel Barra. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

VII, 61 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luiz Carlos Pereira

Projeto de graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Metalúrgica, 2013.

Referências Bibliográficas: pp 54.

1. Tratamento térmico 2. Cementação 3. Têmpera  
4. Análise de custos 5. Aço SAE 8620. I. Pereira, Luiz Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. III. Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica de Troca de Processo de Cementação em Linha Industrial de Tratamento Térmico.

## **Agradecimentos**

Aos amigos e namorada pela colaboração no decorrer do curso. Ao orientador Luiz Carlos Pereira e a empresa Brastêmpera pela colaboração no projeto. Ao corpo docente do DEMM da Universidade Federal do Rio de Janeiro que passaram seus conhecimentos sempre da melhor forma possível. Aos meus familiares, principalmente minha mãe pelo apoio e ajuda inesgotável. A meu pai por ser meu maior exemplo.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado ao DEMM/EP/UFRJ como parte integrante dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico.

Estudo de viabilidade técnica e econômica de troca de processo de cementação em linha industrial de tratamento térmico.

Gabriel Coelho Paranhos Barra

Agosto/2013

Orientador: Luiz Carlos Pereira

O tratamento térmico de cementação busca através da introdução de carbono na superfície do aço, em conjunto com o processo de têmpera, um aumento da dureza superficial das peças. Em uma empresa onde há meios distintos de cementação - meio líquido (banho de sal) ou gasoso, é necessário especificar o processo mais adequado tendo em vista os fatores técnicos e econômicos. Neste projeto foram estudados a eficiência, características de qualidade e os custos de cada processo de cementação realizados nas linhas de tratamento térmico de uma empresa. Foi selecionado o aço SAE 8620 por se tratar de material bastante utilizado na indústria para esse tipo de tratamento termoquímico. Foram medidos os valores de dureza superficial e de núcleo, bem como o dimensionamento da camada de cementação e qualidade superficial de corpos de prova cilíndricos. Os parâmetros de processo (temperatura e tempo) e os insumos necessários aos tratamentos térmicos permitiram uma avaliação econômica para cada linha de produção. Os resultados indicaram que, para lotes de mesmo tamanho, a linha de cementação em meio gasoso apresenta-se superior às linhas de banho de sal em termos de eficiência de cementação, qualidade do produto bem como em termos econômicos do processo.

*Palavras chave: Tratamento térmico, aço SAE 8620, cementação, têmpera, análise de custos.*

Abstract of Undergraduate Project presented to DEMM/POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Metallurgical Engineer.

Technical and Economic Feasibility Study of Changing a Cementation Production Line of Heat Treatment

Gabriel Coelho Paranhos Barra

August/2013

Advisor: Luiz Carlos Pereira

The carburizing treatment seeks through surface carbon enrichment in conjunction with quenching to increase surface hardness of a work piece. In a company which has two different carburizing processes - either in liquid (salt bath) or gaseous form -, it's mandatory to choose between the most adequate treatment in light of technical and economic factors. In this project, the quality and associated costs of each step of the carburizing process made in the heating treatment were studied. Test specimen composed of SAE 8620 steel were selected since they are largely used by industry players in this type of heat treatment. Superficial and nuclear hardness were measured, as well as the size of the cementation layer and the superficial quality of cylindrical proof-bodies. The process' parameters (temperature and time) and inputs used in heating treatment enabled an economic feasibility study for each production line. Results point out that, for same lot orders, the carburizing line in the gaseous environment proved to be superior to the salt bath line in terms of carburizing efficiency, product quality and economic terms.

*Keywords: Heat Treatment, SAE 8620 steel, carburizing, quenching, cost analysis*

## Sumário

1	Introdução .....	1
2	Revisão Bibliográfica.....	2
2.1	Os aços .....	2
2.1.1	Definições e classificações .....	2
2.1.2	Diagrama de equilíbrio ferro-carbeto de ferro (Fe-Fe <sub>3</sub> C).....	4
2.1.3	Aços para cementação .....	8
2.2	Tratamentos térmicos .....	10
2.2.1	Tipos de tratamentos térmicos .....	10
2.2.2	Recozimento .....	11
2.2.3	Têmpera .....	14
2.2.4	Revenimento .....	14
2.2.5	Tratamentos termo-químicos .....	15
2.3	A cementação .....	16
2.3.1	Tipos de cementação.....	16
2.3.2	Fatores que influenciam na cementação .....	19
2.4	Análise de Custos .....	22
2.4.1	Diferença entre custos, despesas e investimento .....	22
2.4.2	Tipos de Custos .....	22
2.4.3	Métodos de custeio .....	24
3	Materiais e métodos .....	27
3.1	Corpos de prova.....	27
3.2	Tratamento térmico .....	28
3.3	Medida de dureza .....	32
3.3.1	Dureza superficial.....	33
3.3.2	Dureza de núcleo .....	34

3.4	Medida da camada efetiva .....	35
3.5	Medida da camada cementada (visual) .....	37
3.6	Análise do Custo .....	38
4	Resultados e discussão .....	40
4.1	Dureza superficial.....	40
4.2	Dureza de núcleo .....	41
4.3	Camada efetiva .....	43
4.4	Camada cementada (visual).....	45
4.5	Qualidade dos processos .....	46
4.6	Custos .....	47
4.6.1	Parte I.....	47
4.6.2	Parte II .....	49
5	Conclusões .....	52
5.1	Qualidade e eficiência dos processos .....	52
5.2	Custos dos processos .....	52
6	Referências .....	54
7	Apêndice A.....	55
8	Apêndice B.....	56
9	Apêndice C.....	57
10	Apêndice D.....	58
11	Apêndice E.....	59

## **1 Introdução**

Os tratamentos térmicos dos metais, principalmente dos aços, têm grande importância na engenharia, pois fazem com que eles possam assumir uma grande variedade de propriedades. Dentro desse grupo de processos estão os tratamentos termoquímicos, que além de transformar a liga metálica através da variação de temperatura, possibilita ainda a variação da composição química da liga, modificando assim ainda mais as suas propriedades.

O presente trabalho busca analisar o tratamento termoquímico de cementação, visando encontrar a diferença de custo e de qualidade entre dois processos distintos. Os processos estudados serão o de cementação em banho de sal com aquecimento a gás e por resistência elétrica e a cementação em meio gasoso (Forno T4 – Ypsen), o cálculo da diferença de custo dos dois processos serão baseados no ciclo térmico para três diferentes tamanhos de camada cementada.

Pretende-se nesse trabalho encontrar a diferença de custo associado a cada processo para diferentes tamanhos de camadas, podendo assim decidir qual meio será o mais lucrativo para empresa, visto que o preço de venda do serviço é o mesmo.

## **2 Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Os aços**

#### **2.1.1 Definições e classificações**

Segundo Chiaverini [1], “Aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,0% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação.”.

Existem diversas formas de se classificar um determinado aço, podendo agrupá-los quanto sua composição química, seu método de fabricação, forma, microestrutura, acabamento, método de desoxidação ou até pelo seu tratamento térmico.

O sistema mais utilizado para a classificação dos aços é em função da composição química, os dois institutos mais famosos e desenvolvedores desse sistema são o SAE (Society of Automotive Engineers) e o AISI (American Iron and Steel Institute). O sistema consiste em classificar os aços em torno de um conjunto de quatro algarismos (até cinco), onde os primeiros dois números têm como referência os elementos de liga presentes no aço, já o último par de algarismos representa o teor de carbono contido no mesmo [1]. A tabela abaixo mostra alguns aços classificados de acordo com esse método.

Os aços-carbono podem ser classificados quanto sua composição química (teor de carbono) podendo ser de baixo (até 0,25% C), médio (entre 0,25% e 0,5% C) e alto (entre 0,5% e 1,4% C) teor. Além desta classificação, pode-se subdividi-los em cinco grupos mais específicos, sendo esses: extradoce ( $0,15 < \%C < 0,3$ ), doce ( $0,3 < \%C < 0,4$ ), meio-doce ( $0,4 < \%C < 0,6$ ) e extraduro ( $0,7 < \%C < 1,2$ ) [1].

Tabela 1 - Sistema SAE e AISI de classificação dos aços [1].

Sistema SAE e AISI de classificação dos aços

Designação		Tipo de Aço
SAE	AISI	
10XX	C 10XX	Aços-carbono comuns
11XX	C 11XX	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 5,0% de Ni
31XX	31XX	Aços-níquel-cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E 33XX	Aços-níquel-cromo com 3,50% de Ni e 1,57% de Cr
303XX	—	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Ni-Cr
40XX	40XX	Aços-molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços-cromo-molibdênio com 0,50% ou 0,95% de Cr e 0,12%, 0,20% ou 0,25% de Mo
43XX	43XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio, com 1,82% de Ni, 0,50% ou 0,80% de Cr e 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços-níquel-molibdênio com 1,57% ou 1,82 de Ni e 0,20 ou 0,25% de Mo
47XX	47XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,20% de Mo
48XX	48XX	Aços-níquel-molibdênio com 3,50% de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aços-cromo com 0,27%, 0,40% ou 0,50% de Cr
51XX	51XX	Aços-cromo com 0,80% a 1,05% de Cr
501XX	—	Aços de baixo cromo para rolamentos, com 0,50% de Cr
511XX	E511XX	Aços de médio cromo para rolamentos, com 1,02% de Cr
521XX	E521XX	Aços de alto cromo para rolamentos, com 1,45% de Cr
514XX	—	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Cr
515XX	—	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Cr
61XX	61XX	Aços-cromo-vanádio com 0,80% ou 0,95% de Cr e 0,10% ou 0,15% de V (min.)
86XX	86XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 0,55% de Ni, 0,50% ou 0,65% de Cr e 0,20% de Mo
87XX	87XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 0,55% de Ni, 0,50% de Cr e 0,25% de Mo
92XX	92XX	Aços-silício-manganês com 0,65%, 0,82%, 0,85% ou 0,87% de Mn, 1,40 ou 2,00% de Si e 0%, 0,17%, 0,32% ou 0,65% de Cr
93XX	93XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 3,25% de Ni, 1,20% de Cr e 0,12% de Mo
98XX	98XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,00% de Ni, 0,80% de Cr e 0,25% de Mo
950	—	Aços de baixo teor em liga e alta resistência
XXBXX	XXBXX	Aços-boro com 0,0005% de B min.
XXLXX	CXXLXX	Aços-chumbo com 0,15% – 0,35% de Pb

Os aços ligados são aços que contém certos elementos de liga acima de concentrações consideradas normais – como Cr, Ni, Mo, V, W, além de muitos outros – para que possam modificar diversas características do aço carbono, desde sua propriedade mecânica até resistência à corrosão e temperabilidade. Eles podem ser agrupados inicialmente em aços de baixa liga, quando contém entre 3% a 5% de elementos de liga em sua composição, ou como aços de alta liga, quando contém entre 10% a 12% de elementos de liga. A existência de aços com média liga pode ser considerada em um grupo intermediário entre os aços de baixa e alta liga [2].

## 2.1.2 Diagrama de equilíbrio ferro-carbeto de ferro (Fe-Fe<sub>3</sub>C)

Os diagramas de equilíbrio, ou diagrama de fases, relacionam as composições químicas, a temperatura e a quantidade presente em cada fase em condição de equilíbrio termodinâmico. A pressão externa também influencia a formação dos diagramas de fases, porém, no presente, estudo a pressão é uma grandeza constante (1 atm.). Os diagramas mais usuais e fáceis de serem utilizados são os diagramas binários, nos quais são representadas ligas que contém dois componentes. Existem ainda diagramas com mais de dois componentes, o que torna o seu uso bastante complexo [2].

O diagrama de equilíbrio ferro-carbono é possivelmente o mais conhecido e utilizado, e isso se deve ao intenso uso do aço pela humanidade. Esse diagrama geralmente é limitado até teores de 6,67% C, que é a composição da cementita (Fe<sub>3</sub>C), pois acima desse teor as ligas metálicas não tem importância comercial, podendo verificar isso na figura abaixo [3].

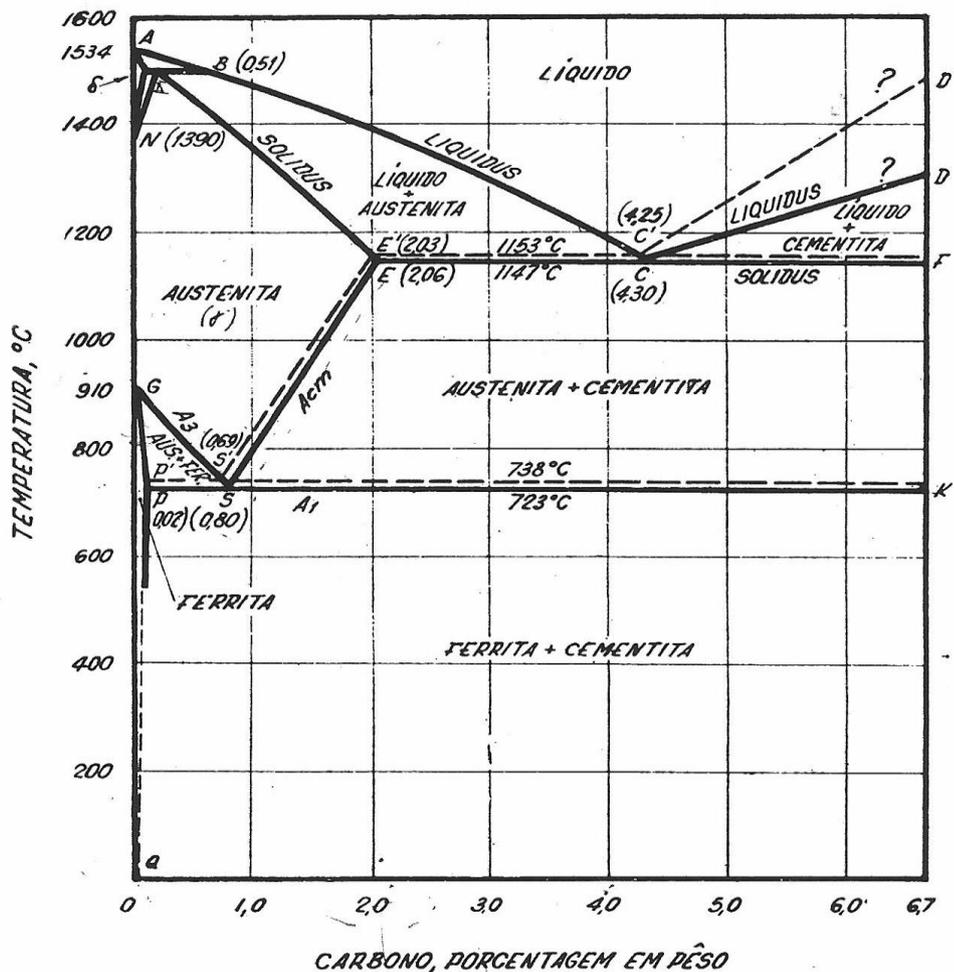


Figura 1 - Diagrama de equilíbrio Ferro-carbono [1].

O diagrama acima representa as ligas de aço com elementos de liga até teores considerados normais em aços-carbono, sendo possível notar alguns pontos importantes como os pontos S, C e o A. O ponto S representa a transformação eutetóide do aço, ocorrendo quando o aço possui 0,8% de carbono em sua composição química e sua temperatura é de 727°C. No ponto eutetóide o ferro  $\gamma$  (austenita) se transforma em ferro  $\alpha$  (ferrita) e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), ocorrendo a transformação de uma fase sólida em outras duas distintas. Em C tem-se o ponto eutético onde ocorre a transformação de uma fase líquida para duas fases sólidas ( $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ ), o que ocorre em uma concentração de 4,3% C e na temperatura de 1147°C que é a menor temperatura de fusão (por completo) do aço. No ponto A tem-se uma reação peritética, na qual ocorre a transformação de uma fase líquida e uma sólida em outra fase sólida distinta, porém esse ponto não tem tanta importância comercial [2] [1].

Além dos pontos importantes há linhas no diagrama de fases muito relevantes para um conhecimento mais aprofundado sobre as características dos aços. Essas linhas são chamadas de linhas de transformação, sendo mais importantes as linhas GS ( $A_3$ ), PSK ( $A_1$ ) e ES ( $A_{cm}$ ). Passando de uma temperatura mais alta para uma temperatura inferior antes da composição eutetóide através da linha GS, o ferro  $\gamma$  estará começando a se transformar em ferro  $\alpha$ . Assim sendo, no campo delimitado pelas linhas GS, PS e GP estão as fases  $\gamma$  e  $\alpha$ . A linha ES que está localizada após a composição eutetóide mostra o limite de solubilidade do carbono no ferro  $\gamma$ . Ao atravessar esta linha no sentido do resfriamento estar-se-á transformando ferro  $\gamma$  em ferro  $\gamma$  mais  $\text{Fe}_3\text{C}$ , e isso se deve ao decréscimo da solubilidade do ferro  $\gamma$  ao diminuir a temperatura. A linha PSK está na temperatura de 727°C e delimita a presença de austenita no aço. Abaixo de 727°C não é mais possível encontrar ferro  $\gamma$  (austenita); nessa temperatura há importantes transformações no aço [2] [1].

Os aços carbonos, como já falado, podem conter desde 0,008% até cerca de 2% de teor de carbono em sua composição química. No diagrama de fases é possível classificar os aços carbono quanto à quantidade de carbono presente em sua composição, sendo os aços compostos por 0,76% de carbono os aços eutetóides, os aços com teores abaixo de 0,76% de carbono os hipoeutetóides e os aços com teores acima de 0,76% 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. Essa transformação pode ser vista na figura abaixo [2] [1].

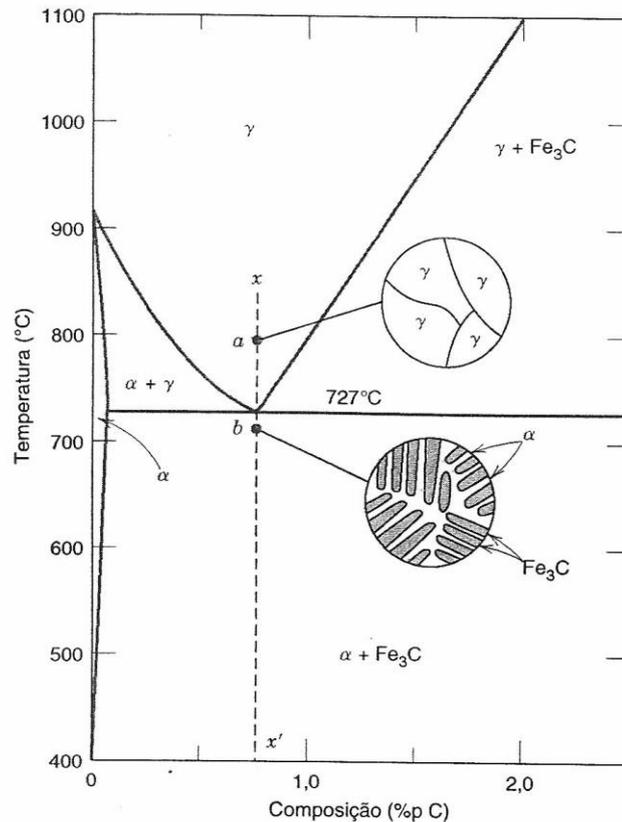


Figura 2 - Representações esquemáticas das microestruturas para uma liga ferro-carbono de composição eutetóide [2].

Os aços hipoeutetóides se distinguem dos aços eutetóides por conter menos carbono em sua composição química. Assim sendo, estão localizados mais à esquerda no diagrama de fases. Ao aquecer um aço hipoeutetóides com cerca de 0,3% de carbono em sua composição química a uma temperatura de 875°C (ponto C) ter-se-á apenas austenita; ao resfriá-lo até uma temperatura em torno de 775°C (abaixo de  $A_3$ ) começar-se-á a formar ferro  $\alpha$  preferencialmente nos contornos de grão da austenita. À medida que o aço é resfriado e aproximado do ponto E, a quantidade de ferro  $\alpha$  presente no aço é aumentada até chegar a linha  $A_1$  (727°C). A ferrita formada entre  $A_3$  e  $A_1$  tem um nome específico chamada de ferrita proeutetóide. Atravessando-se a linha  $A_1$ , toda austenita presente no aço se transformará em perlita (lamelas de ferrita e cementita), tendo como produto final ferrita proeutetóide e perlita. Abaixo está a representação da transformação de um aço hipoeutetóides [2].

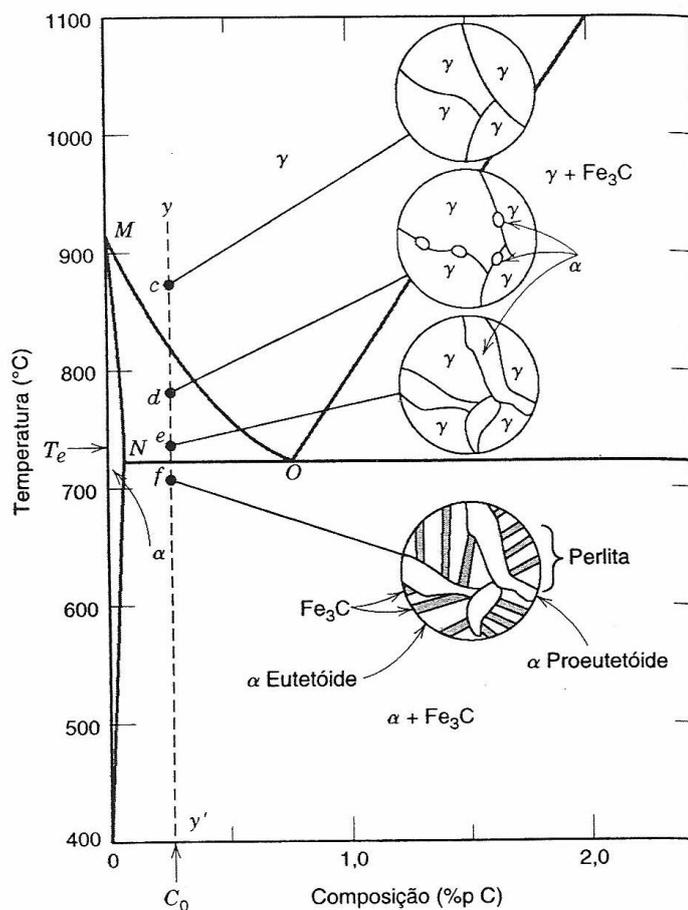


Figura 3 - Representações esquemáticas das microestruturas para uma liga ferro-carbono de composição hipoeutetóide [2].

Nos aços hipereutetóides o teor de carbono é superior ao dos aços eutetóides, ou seja, eles têm mais que 0,76% de carbono em sua composição química. Acima da linha  $A_{cm}$  os aços hipereutetóides apresentam apenas a fase ferro  $\gamma$ . Ao ser resfriado abaixo da linha  $A_{cm}$  e acima da linha  $A_1$  o aço transforma uma parte da austenita (ferro  $\gamma$ ) em cementita, que neste tipo de aço é denominada cementita proeutetóide. Abaixo de  $A_1$  o resto de austenita presente no aço irá se transformar em perlita, tendo como microestrutura final cementita proeutetóide e perlita. Abaixo, o diagrama de fases representa esse tipo de transformação [2].

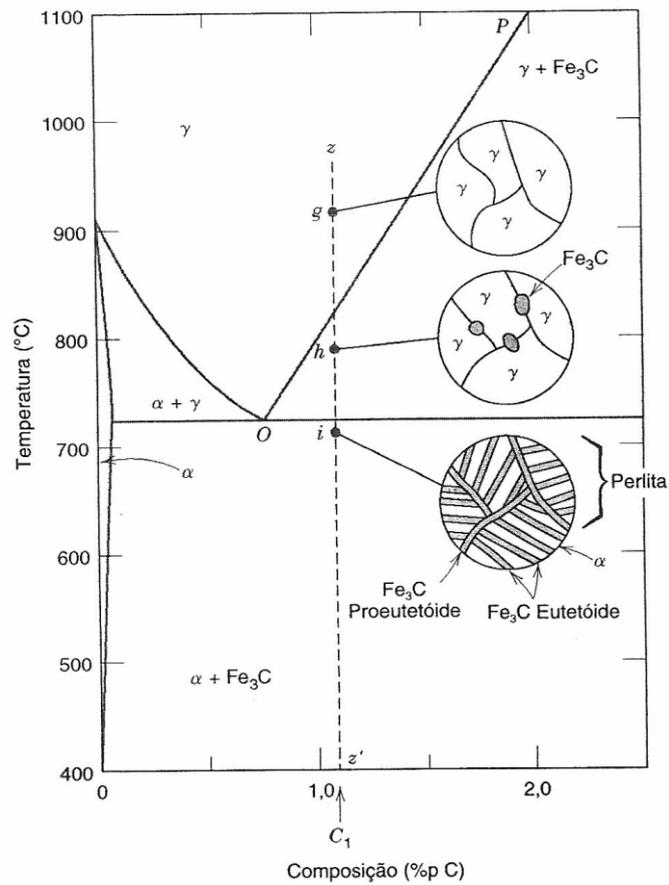


Figura 4 - Representações esquemáticas das microestruturas para uma liga ferro-carbono de composição hipereutetóide [2].

### 2.1.3 Aços para cementação

Os aços utilizados no tratamento termoquímico de cementação devem aliar ao final do tratamento uma superfície dura com um núcleo tenaz. Os aços cementados geralmente são usados em engrenagens (dentes cementados), matrizes para estampagem, pinos móveis e eixos. De acordo com Chiaverini deve ser levado em conta dois fatores principais para a escolha do aço a ser cementado: o meio de resfriamento ao qual o aço será submetido após a cementação para que ocorra a têmpera e os níveis e os tipos de tensões que a peça estará sujeita [1].

Os meios utilizados para o resfriamento das peças para a têmpera após o tratamento de cementação são as soluções aquosas e o óleo. As soluções aquosas são os meios mais drásticos de resfriamento e assim os mais efetivos. Porém esse tipo de resfriamento não é aconselhável para peças com pequenas espessuras e quando há a possibilidade de empenamento. Quando é necessária uma dureza substancial na peça, sem que haja distorções

ou trincas, normalmente em caso de peças com seções finas ou com probabilidade de empeno, usa-se um meio mais brando de resfriamento, e assim devem ser utilizados aços com alguns elementos de liga, que confirmam maior temperabilidade à liga [1].

Outros fatores determinantes para a escolha do aço a ser cementado, são os níveis e tipos de tensões que se desenvolvem após o tratamento térmico. Três variáveis devem ser consideradas: espessura da camada cementada, característica microestrutural do núcleo e zona de transição. A camada cementada após a cementação geralmente apresenta duas composições químicas distintas: hipereutetóides ou eutetóide (podendo ser um pouco hipoeutetóides). Alguns elementos de liga ajudam a aumentar o teor de carbono na superfície do aço, como o cromo e o molibdênio, formando carbonetos; alguns outros elementos já atuam de forma contrária, eles ajudam a formar ferrita, por exemplo: o silício e o níquel. A temperatura e o tempo irá influenciar diretamente no tamanho da camada cementada e no gradiente de carbono contido na peça, pois esses dois fatores atuam diretamente na taxa de difusão do carbono [1].

O núcleo do aço cementado deve ser tenaz, porém é recomendável que haja uma camada cementada com melhor tenacidade ao invés de controlar em excesso o aumento da tenacidade do núcleo, pois se houver uma trinca na camada cementada o núcleo tenaz não irá impedir o colapso da peça. A zona de transição entre a camada cementada e o núcleo da peça é de extrema importância. Ela deve ter uma diminuição gradual de dureza para que não ocorra o "lascamento" da superfície cementada. Um aumento da temperabilidade do aço favorece a formação de uma zona de transição gradual, sendo este motivo do uso de aços ligados para a cementação [1]. A tabela abaixo mostra alguns tipos de aços de baixa liga usuais no tratamento de cementação e suas composições químicas.

Tabela 2 - Composições típicas de aços-liga para cementação com baixo teor de liga [1].

Tipo de Aço	Composição Química, %						Aplicações Típicas
	C	Mn	Ni	Cr	Mo	V	
SAE 3115	0,13-0,18	0,40-0,60	1,10-1,40	0,55-0,75	—	—	Engrenagens de transmissão de tratores, brocas para perfuração de poços petrolíferos, mancais anti-fricção.
SAE 3120	0,17-0,22	0,60-0,80	1,10-1,40	0,55-0,75	—	—	
SAE 4118	0,18-0,23	0,70-0,90	—	0,40-0,60	0,08-0,15	—	Coroas, pinhões impulsores, engrenagens de transmissão, etc.
SAE 4615	0,13-0,18	0,45-0,65	1,65-2,00	—	0,20-0,30	—	Engrenagens de transmissão e de diferencial de automóveis e tratores, pinos e engrenagens para indústria aeronáutica e aplicações semelhantes.
SAE 4620	0,17-0,22	0,45-0,65	1,65-2,00	—	0,20-0,30	—	
NE 6120	0,17-0,22	0,70-0,90	—	0,70-0,90	—	0,10 min.	Engrenagens de diferencial de caminhões e tratores, pinos e eixos.
NE 8620	0,18-0,23	0,70-0,90	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	—	Parafusos de automóveis, eixo de comando de válvulas, coroas, engrenagens de diferencial, eixos de bomba, engrenagens de redução, engrenagens de máquinas-ferramenta, pinos de pistão, etc.
NE 8720	0,18-0,23	0,70-0,90	0,40-0,70	0,40-0,60	0,20-0,30	—	
NE 9420	0,18-0,23	0,80-1,10	0,30-0,50	0,30-0,50	0,06-0,15	—	

## 2.2 Tratamentos térmicos

### 2.2.1 Tipos de tratamentos térmicos

Segundo Colpaert (1974), "Os tratamentos térmicos consistem, essencialmente em aquecer o material a uma certa temperatura e esfriá-lo em determinadas condições". Existem três principais grupos de tratamentos térmicos : recozimento, têmpera e revenimento [4].

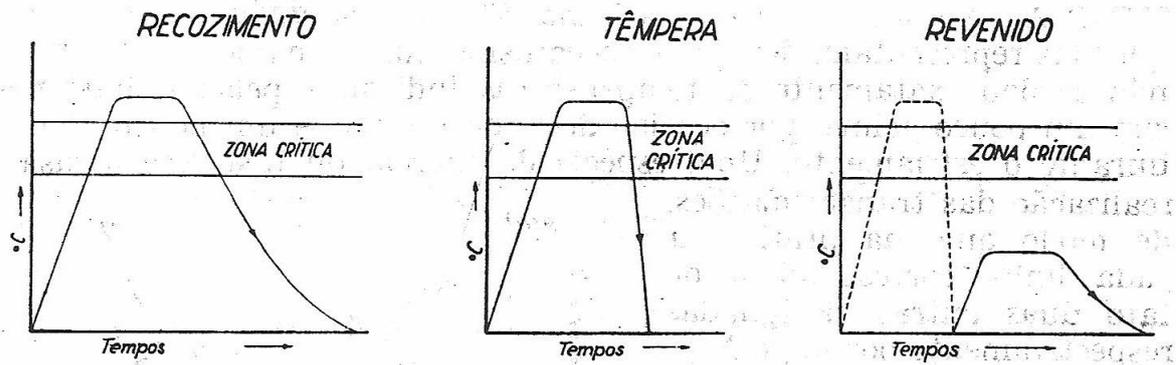


Figura 5 - Representação esquemática do recozimento, têmpera e revenido [4].

### 2.2.2 Recozimento

Dentro da classe de tratamentos térmicos de recozimento das ligas ferrosas é possível subdividi-los em pelo menos mais três processos: normalização, recozimento pleno e recozimento subcrítico. O recozimento em geral é um processo onde a liga é submetida a uma temperatura alta por muito tempo e resfriada lentamente. Os objetivos do recozimento são: aliviar tensões, tornar o material mais dúctil, tenaz e produzir uma microestrutura determinada [2].

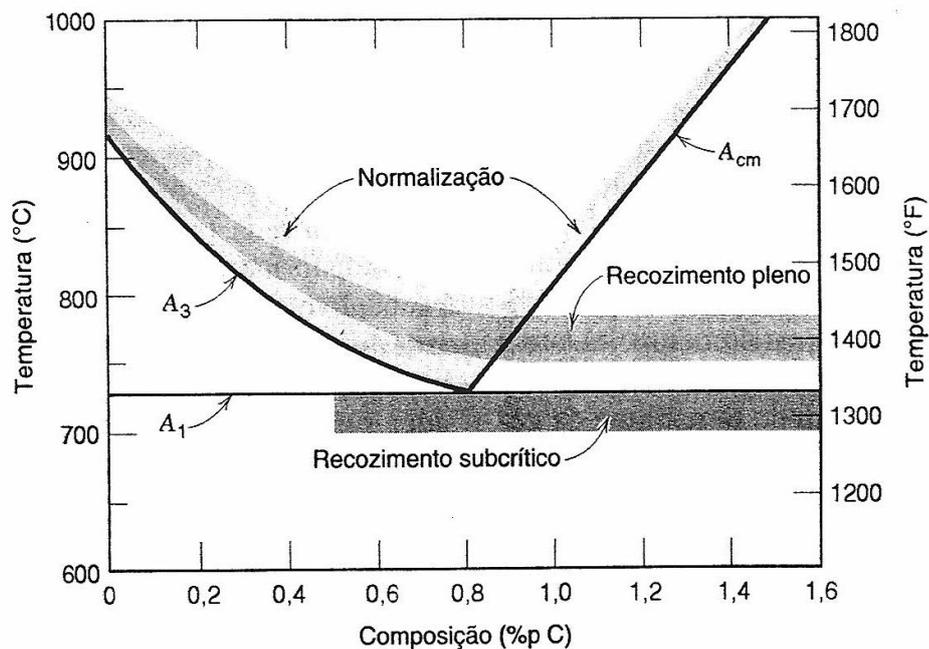


Figura 6 - Representação no diagrama de equilíbrio ferro-carbono das faixas de temperatura utilizadas na normalização, recozimento pleno e subcrítico [2].

### **2.2.2.1 Normalização**

O tratamento de normalização consiste em aquecer a liga até o campo austenítico, acima de  $A_{cm}$  para aços hipoeutetóide e acima de  $A_{cm}$  para aços hipereutetóides, deixar por algum tempo para homogeneizar a microestrutura e depois retirar a peça e deixá-la resfriando ao ar. A microestrutura resultante deste processo será uma fase perlítica e outra proeutetóide (ferrita ou cementita dependendo da composição química) com tamanho de grão refinado [2].

### **2.2.2.2 Reozimento pleno**

O reozimento pleno tem como objetivo produzir uma microestrutura com tamanho de grão pequeno e uniforme composto por perlita grosseira e alguma fase proeutetóide, na maioria das vezes ferrita proeutetóide, pois esse tratamento é geralmente feito em ferros de baixo e médio carbono. Essa microestrutura resultante apresenta alta ductilidade, o que é ideal para processos de conformação mecânica e usinagem [2].

O ciclo térmico do tratamento de reozimento pleno é parecido com o da normalização, porém o resfriamento é muito mais lento para que possibilite a formação da perlita grosseira. O aço é austenitizado acima de  $A_3$  ou  $A_1$  em torno de 15 a 40 °C além das linhas, é submetida a essa temperatura por algum tempo para que ocorra a homegeização da liga e então é resfriada dentro do próprio forno. Esse resfriamento é feito desligando o forno e esperando ele baixar até a temperatura perto da ambiente junto com a peça, isso demanda uma grande quantidade de tempo [2]. A figura abaixo mostra a comparação entre o resfriamento da peça na normalização e no reozimento pleno no diagrama TTT (temperatura,tempo e transformação).

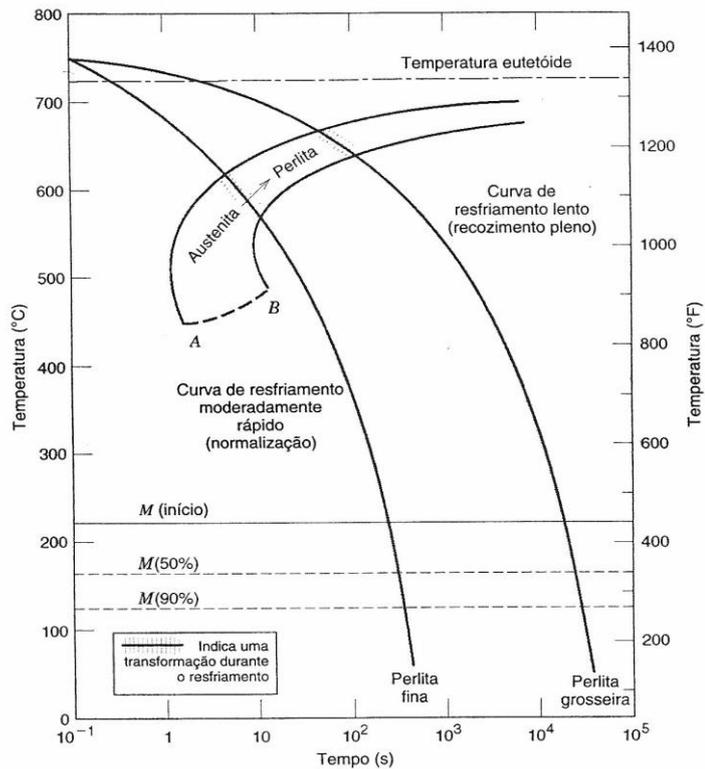


Figura 7 - Curvas de resfriamento da normalização e do recozimento pleno superpostas sobre um diagrama de transformação por resfriamento contínuo para um aço eutetóide [2].

### 2.2.2.3 Recozimento subcrítico

O recozimento subcrítico visa transformar a perlita em uma microestrutura composta por matriz ferrítica e cementita globulizada dispersa em formato esférico pela matriz, essa microestrutura possibilita propriedades mecânicas ainda melhores para usinagem e conformação mecânica devido a alta ductilidade apresentada por esses materiais após o tratamento térmico [2].

Esse tratamento é feito através do aumento da temperatura da peça até um pouco abaixo da temperatura eutetóide, cerca de 700°C, por volta de 15 a 25 horas até que as lamelas de cementita presente na perlita possam se coalescer e formar glóbulos (cementita globulizada) [2].

### **2.2.3 Têmpera**

O tratamento térmico de têmpera do aço tem como objetivo produzir uma microestrutura martensítica, a martensita é muito dura e tem alto limite de resistência a tração e pode ser de dois tipos : lenticular ou em ripas. Como a martensita é uma microestrutura que não se encontra em equilíbrio não é possível achá-la no diagrama de fases pois na sua transformação não ocorre difusão da austenita. Fatores como tamanho de grão, elementos de liga e taxa de resfriamento modificam a temperabilidade do material, quanto maior o teor de carbono e maior o tamanho de grão maior será a chance de se ter martensita [2] [1].

O ciclo térmico para temperar um aço consiste basicamente em aquecer a liga até o campo austenítico, deixar por algum tempo até que toda a peça esteja na mesma temperatura e então resfriá-la rapidamente. O resfriamento da peça pode ser em água, óleo, salmoura ou até mesmo no ar. O que irá influenciar na escolha no meio de resfriamento será a temperabilidade do material, quanto menor a sua temperabilidade mais drástico terá que ser o meio de resfriamento [1].

### **2.2.4 Revenimento**

Após a têmpera, o aço tem um grande aumento em sua dureza e no seu limite de resistência a tração, porém outras propriedades ficam muito prejudicadas como seu alongamento, ductilidade e resistência ao choque. O revenimento atua corrigindo as propriedades do aço, buscando um ponto ótimo entre propriedades que são inversamente proporcionais como a dureza e a tenacidade. É possível ver essas propriedades na figura a qual relaciona a temperatura de revenimento com as propriedades mecânicas do material [4].

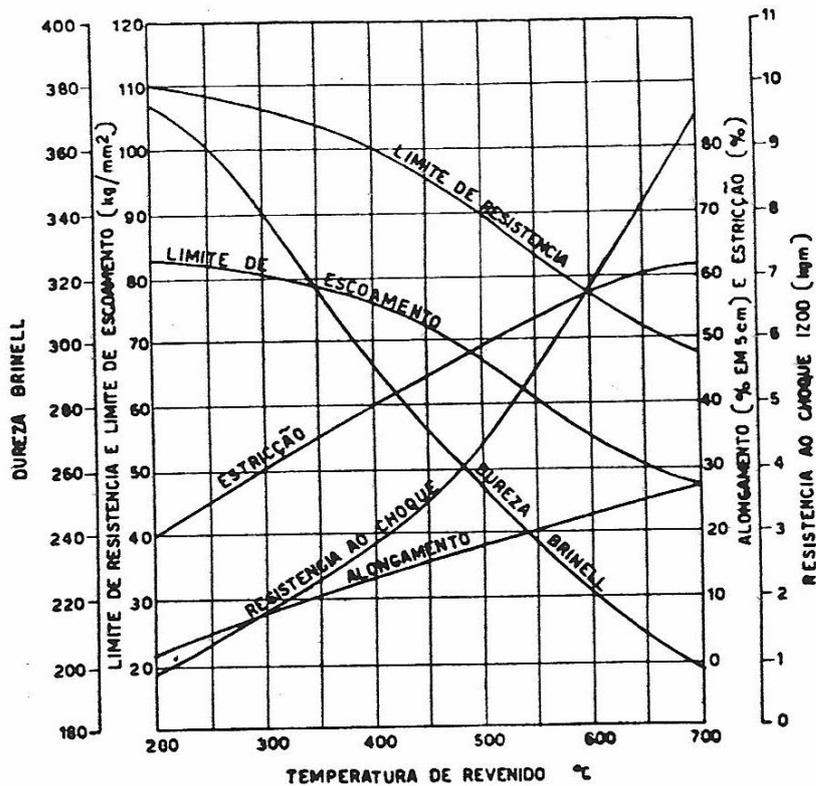


Figura 8 - Influência da temperatura de revenido nas propriedades mecânicas de um aço com 0,5% de carbono, temperado em água [1].

A temperatura de revenimento a qual será submetida a peça dependerá das propriedades mecânicas desejadas e do material após o tratamento: quanto maior a temperatura, maior a resistência ao choque e menor a dureza. Assim sendo, a faixa de temperatura irá variar de 200 até quase 700°C. O tempo de revenimento também irá influenciar nas propriedades quando maior o tempo maior a intensidade de revenimento [1].

### 2.2.5 Tratamentos termo-químicos

Os tratamentos termoquímicos podem ser definidos de acordo com Chiaverini [1, p. 113] 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 [1].

A cementação tem como finalidade enriquecer a superfície da peça com carbono, isso é feito colocando a peça em um meio rico em substância carbonácea para que ocorra difusão do carbono para “dentro” do material. O tratamento de nitretação e carbonitretação são

semelhantes ao processo de cementação, porém a nitretação tem como objetivo enriquecer a superfície com nitrogênio e na carbonitretação com nitrogênio e carbono [1].

## **2.3 A cementação**

### **2.3.1 Tipos de cementação**

A cementação, como já visto anteriormente, 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 [1].

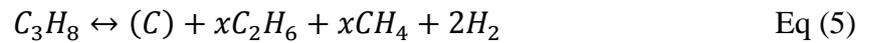
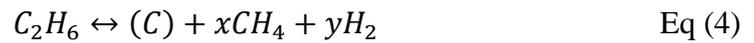
#### **2.3.1.1 Cementação em meio sólido**

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 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 (CO<sub>2</sub>). 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 (Fe<sub>3</sub>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 o amolecimento da superfície. [1].

#### **2.3.1.2 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 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 [1]. As reações fundamentais do processo são :



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 pra proceder a cementação [1].

### 2.3.1.3 Cementação em meio líquido

Existem dois processos de tratamentos de cementação distintos : um acontece a baixas temperaturas, entre 840 e 900°C, e o outro a altas temperaturas, entre 900 e 955°C. A

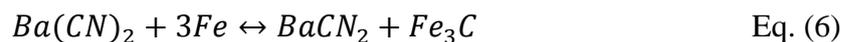
composição química dos dois banhos também são diferentes como se pode ver na tabela abaixo [5].

Tabela 3 - Composições de banho de sal para cementação líquida [1].

Constituinte	Composição do Banho, %	
	Camada de Pequena Espessura Baixa Temperatura (840° a 900°C)	Camada de Grande Espessura Alta Temperatura (900° à 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 max.	30 max.
Aceleradores outros que compostos de metais alcalinos ferrosos*	0 a 5	0 a 2
Cianato de sódio	1,0 max.	0,5 max.

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

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  $A_{c1}$  (um pouco acima de  $A_1$ ) 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 é :



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 [5]. 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 acelerado equipamento [1].

O sal fundido pode conter quantidades de cianeto que podem causar o enriquecimento superficial por nitrogênio junto com o carbono (carbo-nitreção 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 [5]. 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. Existem, também, algumas desvantagens relacionadas ao tratamento como, necessidade de exaustão dos forno 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 [1].

### **2.3.2 Fatores que influenciam na cementação**

A cementação, como colocado anteriormente, é um processo fortemente dependente da taxa de difusão do carbono para o interior do aço, e a difusão é diretamente associada à temperatura e à concentração de carbono. Mas existem outros fatores que influenciam na cementação, como o teor inicial de carbono, a solubilidade da austenita, a natureza do agente carbonetante, entre outros. Na figura abaixo é possível ver a influência da temperatura e do tempo na camada cementada. A medida que o tempo de tratamento aumenta, a austenita se torna mais saturada e a velocidade de cementação diminui.

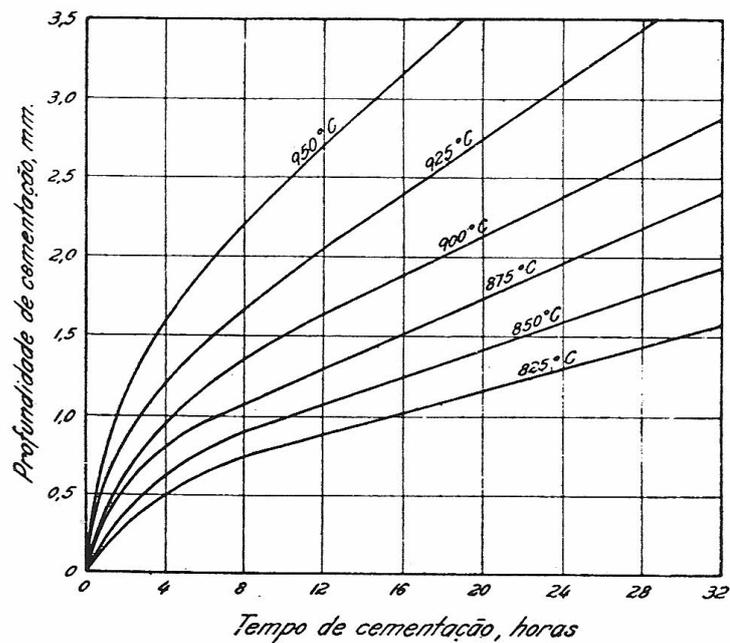


Figura 9 – Curvas mostrando a influência do tempo e da temperatura na penetração superficial de carbono [1].

A difusão é pouco influenciada pelo tamanho de grão, elementos de liga e impurezas contidas no aço. Os fatores mais importantes são o aumento da temperatura e o teor de carbono inicial. A temperatura além de acelerar a difusão, aumenta a velocidade de reação de carbonetação e aumenta a solubilidade da austenita. O teor inicial baixo de carbono tornará a difusão mais rápida, pois a austenita estará com pouco carbono dissolvido, podendo assim solubilizar mais facilmente o carbono difundido, acelerando o processo de difusão. O agente carbonetante dependerá do meio em que a peça será cementada, cujo meio mais rápido de cementação é o meio líquido, pois há um aumento na taxa de enriquecimento de carbono nesse processo, e o meio gasoso em comparação com o sólido é mais rápido [1].

### 2.3.2.1 A segunda lei de Fick

A segunda lei de Fick equaciona o comportamento da difusão em um regime não-estacionário. Assim, tanto o fluxo de difusão quanto o gradiente de concentração em um ponto específico dentro do sólido irão variar ao longo do tempo. A equação é dada por :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad \text{Eq (7)}$$

Onde C é a concentração e D o coeficiente de difusão.

Para um sólido semi-infinito (comprimento  $> 10\sqrt{Dt}$ ) onde a concentração do elemento a ser difundido para o seu interior é mantida constante na sua superfície, é possível obter uma importante solução prática para a equação acima. Além disso, é relevante ter mais três hipóteses iniciais : antes da difusão os átomos do soluto em difusão devem estar distribuídos homogeneamente pelo sólido ( $C_0$ ) ; o valor de x na superfície é igual a zero e aumenta quando é direcionado para dentro do sólido ; o tempo é igual a zero no momento imediatamente anterior ao começo da difusão. A partir das condições de contorno aplicadas chega-se à seguinte equação :

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \text{Eq. (8)}$$

Os valores  $C_x$  e  $C_s$  são respectivamente as concentrações em uma profundidade x após um tempo t e na superfície do sólido. Essa equação fornece a relação entre a concentração, o tempo e a posição, bastando saber qual é o D,  $C_s$  e  $C_0$  do caso em questão.

Como falado anteriormente, a difusão é fortemente influenciada pela temperatura. Na segunda lei de Fick a sua importância não é claramente visualizada, pois está implícita no coeficiente de difusão (D). O coeficiente de difusão é ditado pela a equação a seguir :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right) \quad \text{Eq. (9)}$$

Assim, é possível notar que a temperatura (T) aumenta exponencialmente o coeficiente de difusão,  $Q_d$  representa a energia de ativação e  $D_0$  é uma constante independente da temperatura. No ferro  $\gamma$  onde são difundidos os átomos de carbono para a superfície do sólido no processo de cementação, tem-se em  $900^\circ\text{C}$  um coeficiente de difusão de  $5,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Se a temperatura for aumentada em  $200^\circ\text{C}$ , o coeficiente de difusão passará para  $5,3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ . Com isso, percebe-se que subindo a temperatura  $200^\circ\text{C}$  aumenta-se o coeficiente em dez vezes [2].

## **2.4 Análise de Custos**

### **2.4.1 Diferença entre custos, despesas e investimento**

Mesmo parecendo sinônimos, custos e despesas são diferentes quanto ao seu significado. Para uma análise de custos, os dois são considerados gastos, além do investimento. Os gastos podem ser considerados como qualquer ativo financeiro que seja utilizado para se obter um produto ou serviço, gerando assim uma promessa ou entrega de um ativo [6].

Segundo Martins [6] investimento pode ser definido como, “gasto ativado em função de sua vida útil ou de benefícios atribuíveis a futuro(s) período(s)”. Os custos se diferenciam das despesas devido a sua finalidade. Todo gasto usado na produção de outro bem ou serviço pode ser considerado um custo, por exemplo: a matéria-prima utilizada diretamente na produção de um produto, a energia elétrica utilizada para aquecer o forno de tratamento térmico, o óleo utilizado para esfriar a peça, todos esse exemplos são definidos como custos. As despesas, por outro lado, são todos os gastos com bens ou serviços que contribuem para formar de forma direta ou indireta a receita da empresa. Pode-se citar, como exemplo, o material usado no escritório como papeis e tinta da impressora que será considerado como despesa [6].

### **2.4.2 Tipos de Custos**

Os custos são os gastos utilizados para produção de um produto ou serviço. Sendo assim, geralmente são classificados como fixo ou variável e direto ou indireto.

#### **2.4.2.1 Custo fixo e custo variável**

Os custos fixos, como o próprio nome diz, não varia com o volume de produção, ele tende a manter-se em um nível fixo mesmo com a variação da quantidade produzida de serviços ou produtos. Ainda de acordo com Martins [6, p. 54], “Podem-se subclassificar os Custos Fixos em Repetitivos e Não-repetitivos em valor, isto é, custos que se repetem em

vários períodos seguintes na mesma importância e custos que são diferentes em cada período.”

Os custos variáveis, diferentemente dos custos fixos, aumentam junto com a quantidade produzida tanto de serviços quanto de produtos. Para Dutra [7], “Define-se custos variáveis como os custos que variam em função da variação do volume de atividade, ou seja, da variação da quantidade produzida no período”. Tem-se como exemplo de custo variável a quantidade de matéria-prima utilizada na confecção de um produto ou a quantidade de arame usada na amarração de peças para serem tratadas em um forno banho de sal.

Alguns custos podem apresentar as duas características simultaneamente, podendo ser chamados de custos semivariáveis ou semifixos. A energia elétrica tem essa característica, pois a potência instalada representa o custo fixo e a outra parte depende diretamente do consumo da empresa, sendo então variável. As despesas também podem ser classificadas como variáveis e fixas, porém não podem ser classificadas como diretas ou indiretas [6].

#### **2.4.2.2 Custo direto e custo indireto**

Segundo Horngren, Foster e Datar [8, p. 20], “Custos diretos são os custos que estão relacionados a um determinado objeto de custo e que podem ser identificados com este de maneira economicamente viável”. De acordo com a definição, os custos diretos são os custos mensuráveis no processo produtivo e, sendo assim, os custos diretos são quase que exclusivamente variáveis, tendo apenas poucas exceções, como a mão de obra empregada diretamente no processo produtivo.

Algumas vezes, por dificuldades e aumento de custo de aferição, custos diretos são tratados como indiretos e posteriormente rateados entre os serviços ou produtos finais da empresa dependendo do método de rateio. Como exemplos têm alguns materiais de consumo que por serem irrelevantes não merece um tratamento especial [6].

Segundo Martins [6, p. 53] os custos indiretos podem ser definidos como custos que “não oferecem condição de uma medida objetiva e qualquer tentativa de alocação tem de ser feita de maneira estimada e muitas vezes arbitrária”. Os custos indiretos podem ser tanto variáveis como fixos, porém a grande parte deles tem natureza fixa.

### **2.4.3 Métodos de custeio**

De acordo com Martins [6, p. 41], “Custeio significa Método de apropriação de Custos.”. Assim sendo, o custeio é a maneira que se utiliza para determinar os custos, existem alguns tipos de custeio, como o por absorção, direto ou variável, o ABC, o padrão, o RKW e etc. Não existe um modo correto de custeio, cada um tem suas vantagens e desvantagens cabe ao administrador da empresa determinar qual será mais vantajoso, dentro dos seus objetivos. Os três principais tipos de custeio que serão analisados a seguir são : o por absorção, direto e o ABC (custeio baseado em atividade).

#### **2.4.3.1 Custeio por absorção**

O custeio por absorção é definido por Megliorini [9, p. 3] como sendo ”o método de custeio que consiste em atribuir aos produtos fabricados todos os custos de produção, quer de forma direta ou indireta. Assim, todos os custos, sejam eles fixos ou variáveis, são absorvidos pelos produtos. ” No custeio por absorção todos os custos sendo eles variáveis ou fixos, diretos ou indiretos são alocados nos produtos ou serviços produzidos pela empresa, sendo assim o custo final pode muitas vezes ficar distorcido dependendo do método de rateio utilizado pela empresa ao alocar os custos indiretos. O critério de rateio dos custos indiretos é umas das principais desvantagens desse método de custeio já que o rateio é feito de forma subjetiva e pode distorcer o custo final do bem ou do serviço. Outro ponto negativo desse método é que ele apresenta muito pouca informação para fins gerenciais, o que o torna pouco útil para tomada de decisão. A principal vantagem do custeio por absorção é que ele é aceito legalmente para fins de balanço patrimonial, demonstração de resultados e balanços e lucros fiscais [6].

#### **2.4.3.2 Custeio direto ou variável**

O custeio direto ou variável visa diminuir a distorção causada pelos criterios de rateios quando aos custos fixos, ele permite que os custos fixos entrem no balanço da empresa como despesas.

Quanto aos custos fixos relacionados aos dois metodos de custeio Megliorini [9, p. 137] afirma que, “enquanto no custeio por absorção eles são rateados aos produtos, no custeio variável, são tratados como custos do período, indo diretamente para o resultado igualmente às despesas”. A não necessidade de uso do rateio vem da alocação apenas dos custos variáveis nos produtos ou serviços produzidos, o qual ao final do custeio tem uma visão clara de quanto cada um contribuiu para o resultado da empresa, sendo esse valor chamado de margem de contribuição.

Conforme Migliorini [9, p. 137], “este método permite aos administradores utilizar os custos como ferramenta auxiliar na tomada de decisões”. Assim sendo este método vem sendo usado cada vez mais para a tomada de decisões dentro das empresas tendo em vista a sua objetividade na alocação de custos e a clareza dos resultados. Por outro lado este método de custeio não atende aos princípios fundamentais da contabilidade não sendo aceito assim por autoridades fiscais ficando seu uso restrito apenas para uso de controle interno da empresa.

#### **2.4.3.3 Custeio ABC (custeio baseado em atividades)**

O custeio baseado em atividades é definido por Martins [6] como, “uma metodologia de custeio que procura reduzir sensivelmente as distorções provocadas pelo rateio arbitrário dos custos indiretos”. O custeio ABC tem como princípios aprimorar tanto o custeio variável e principalmente o por absorção.

Com o crescimento das empresas e a grande variedade de produtos e serviços dentro delas os custos indiretos tiveram um crescimento substancial em comparação com os custos diretos de fabricação. Ter uma ferramenta como o custeio baseado em atividades para uma melhor alocação destes custos é de enorme importância para as empresas, tendo em vista que esse método se transforma em uma poderosa ferramenta gerencial podendo mostrar como se desencadeia todos os custos da empresa para cada atividade produtiva [6].

Este método de custeio busca custear os processos pelo principio da causação, buscando através de rastreamento o causador do custo. A primeira etapa do custeio ABC é analisar as atividades da empresa, imputando a cada uma seus custos. Após analisar os custos das atividades, estes foram alocados nos produtos ou serviços finais da empresa, pois os produtos e os serviços ao longo do processo produtivo consomem essas atividades cada um em uma proporção diferente. Por analisar cada atividade e direcionar os custos incluídos nas

mesmas o custeio ABC se torna um método de custeio mais racional do que o método por absorção o qual rateia os seus custos indiretos às vezes de forma não real.

Pode-se citar além da poderosa ferramenta gerencial que é o ABC algumas outras vantagens relacionadas a esse método de custeio como: adequa-se mais facilmente às empresas de serviços, pela dificuldade de definição do que seja custos, gastos e despesas, menor necessidade de rateios arbitrários, atende aos Princípios Fundamentais de Contabilidade, obriga a implantação, permanência e revisão de controles internos, proporciona melhor visualização dos fluxos dos processos, identifica onde os itens em estudo estão consumindo mais recursos. O custeio ABC também tem alguns pontos desvantajosos relacionados principalmente a complexidade de sua implantação sendo necessária mão-de-obra qualificada, controle interno apurado, grande quantidade de informações e gastos elevados para implantação.

### 3 Materiais e métodos

#### 3.1 Corpos de prova

Os corpos de provas utilizados no experimento foram fabricados com aços SAE 8620 (Apêndice A). 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 comprada para a fabricação das amostras tinha inicialmente 1 metro de comprimento e 1 polegada de diâmetro, a mesma foi dividida em 20 partes iguais, a qual deu origem a 20 corpos de prova com 5 centímetros de comprimento e 1 polegada de diâmetro com formato cilíndrico. Foram utilizadas 12 amostras no experimento sendo 3 cementadas no banho de sal aquecido a gás e outras 3 no mesmo banho de sal porém aquecido por resistência elétrica, as 6 amostras restantes foram tratadas no forno T4 (cementação em meio gasoso). Os dois primeiros grupos de amostras foram marcadas com numerais de 1 a 3 e as outras de 4 à 9 para melhor identificação. Abaixo, é possível verificar as fotos dos 6 corpos de provas utilizados na cementação em meio líquido e a diferença entre os corpos de prova tratados nos fornos T4 e banho de sal.



Figura 10 - Corpos de prova cementados e temperados em banho de sal com aquecimento a gás.



Figura 11 - Corpos de prova cementados e temperados em banho de sal com aquecimento por resistência elétrica.



Figura 12 - Corpos de prova tratados no forno T4 e banho de sal

### 3.2 Tratamento térmico

O primeiro grupo de amostras foi tratado entre os dias 13/05/2013 e 14/05/2013 no forno número 2. Este forno é aquecido por resistência elétrica e o banho de sal no qual a peça foi cementada era composto pelo sal TEC 97 (TECFAR Comercial e Industrial LTDA). Este banho de sal onde as peças serão tratadas permitirá que ocorra a cementação da peça, ou seja,

a introdução de carbono pela difusão do meio líquido para o interior da peça. O ciclo térmico utilizado está no Apêndice B.

Nesse primeiro tratamento térmico, o primeiro corpo de prova (1) foi introduzido no forno no início da curva de patamar às 00:20:00, o segundo (2) colocado dentro do forno após 4 horas do começo do tratamento e o terceiro 6 horas após o começo da cementação. Assim o corpo de prova 1, 2 e 3 ficaram em patamar, cementando em torno de 10, 6 e 4 horas respectivamente. A temperatura de cementação ficou em torno de  $940^{\circ}\text{C}$ , após passadas as 10 horas do início da cementação da primeira amostra o forno é então resfriado até a temperatura de  $850^{\circ}\text{C}$  para que ocorra a homogeneização da camada cementada assim permanece por 1 hora e então as peças são retiradas do forno e resfriadas em um tanque de óleo, com temperatura em torno de 30 a  $40^{\circ}\text{C}$ . Na têmpera em óleo não é recomendável temperatura baixas do banho, pois o óleo aumenta sua viscosidade diminuindo sua capacidade de retirar calor da peça, e o que se pretende na tempera é justamente o contrário: um resfriamento rápido. Abaixo, é possível ver uma foto do tanque de óleo e do forno utilizado neste tratamento.



Figura 13 – Fornos com banho de sal aquecidos por resistência elétrica.



Figura 14 - Tanque de resfriamento para têmpera em óleo.

O segundo grupo de amostras foi tratado entre os dias 04/06/2013 e 05/06/2013 no forno 07, banho de sal com aquecimento a gás, tendo início a temperatura de patamar ( $940^{\circ}\text{C}$ ) as 00 :00 :00 aproximadamente. A sequência de tratamento seguiu os mesmos parâmetros do primeiro grupo de amostras sendo colocadas gradualmente dentro do forno para que ao final houvesse corpos de prova com cementação de 10 horas (amostra 1), 6 horas (amostra 2) e 4 horas (amostra 3). Ao final as amostras foram resfriadas no forno até  $850^{\circ}\text{C}$  e permanecendo neste patamar por 1 horas e depois retiradas e resfriadas no mesmo tanque de óleo do primeiro grupo. Abaixo está a foto do forno e o gráfico da temperatura está no Apêndice C.



Figura 15 - Forno com banho de sal aquecido por gás (GNV).

O terceiro grupo de amostras (4 à 9) foi tratado no dia 26/06/13 no forno 22, T4 (Ypsen), a temperatura de patamar ( $940^{\circ}\text{C}$ ) foi atingida por volta das 01 :30 :00 e o primeiro par de corpos de prova (4 e 5) colocados às 02 :00 :00, o segundo par (6 e 7) duas horas depois e o último par (8 e 9) quatro horas depois, sendo cementados por oito, seis e quatro horas respectivamente cada par. Ao completar oito horas de patamar (10 :00 :00), as peças foram resfriadas dentro do forno até a temperatura de  $840^{\circ}\text{C}$  permanecendo assim por mais uma hora sendo depois resfriadas em óleo. Abaixo, é possível visualizar o forno T4 e os cestos nos quais os corpos de prova foram tratadas. No Apêndice D é apresentado o gráfico do tratamento térmico.



Figura 16 - Forno T4 (cementação em meio gasoso)

### 3.3 Medida de dureza

Após passarem pelo processo de cementação e têmpera os corpos de provas são testados para comprovar suas novas propriedades. Assim há uma sequência de testes a serem feitos, seguindo a ordem : dureza superficial da amostra, dureza de núcleo, medida da camada efetiva e camada cementada (visual). Os testes de dureza foram feitos de acordo com o padrão de qualidade da empresa para a liberação de peças após tratamentos térmicos similares.

A dureza de um material é uma grandeza que permite medir o quanto resistente o material é ao risco ou quanto ele resiste a uma deformação plástica localizada. A medição de dureza consiste em forçar um penetrador na superfície do material sob condições controladas de força e taxa de aplicação. O tamanho e a profundidade da penetração irá fornecer a medida de dureza do material, sendo maior e mais profunda a medida que o material esteja com menor dureza. Esse ensaio é muito utilizado devido a sua baixa complexidade, baixo custo e por não ser um método destrutivo [2].

### 3.3.1 Dureza superficial

A dureza superficial das amostras diz quanto o material está resistente a deformação localizada na sua superfície, sendo assim o penetrador é forçado contra a parte mais externa da peça para que ocorra ali a medição da dureza. Antes de começar o ensaio necessita-se alguns cuidados : primeiramente, deve-se limpar e lixar a superfície da peça, para que se possa retirar a camada de óleo e óxido que adere a superfície e que pode prejudicar o ensaio. Utiliza-se manualmente lixa com granulometri 220 para o lixamento..

O método de medição utilizado para a ensaio de dureza foi o Rockwell C, este método consiste em penetrar a peça com um indentador de diamante com forma de cone, nesse tipo de ensaio é utilizada uma carga de 150kg. O durômetro utilizado no ensaio foi um durômetro de bancada Panambra DS-15 modelo RB, esse modelo foi calibrado pela Durotec e possui incerteza de medida de 0,3 HRC (dureza Rockwell C). Foram feitas três medições em cada amostra para que a chance de ocorrer alguma alteração no ensaio fosse minimizado, assim valendo a média das três durezas como a dureza superficial. Abaixo observar-se fotos do equipamento e do ensaio.



Figura 17 - Durômetro de bancada e corpo de prova sendo submetido ao ensaio de dureza (Rockwell C).

### 3.3.2 Dureza de núcleo

A dureza de núcleo neste caso é medida no mesmo durômetro, com mesma carga e indentador do que no caso anterior, porém neste caso ocorre uma preparação maior da amostra devido a necessidade de se medir a dureza no interior da peça, o mais perto possível do ponto médio do seu diâmetro. A primeira etapa é cortar o corpo de prova em uma cortadora metalográfica, neste caso uma TECLAGO CM 80, dentro da mesma um disco abrasivo resfriado a água é responsável pelo corte da peça. Isto pode ser observado na figura abaixo.



Figura 18 - Cortadora metalográfica TECLAGO CM 80 interior e exterior.

Ao cortar o corpo de prova depara-se com a superfície interna da peça, ainda antes de medir a dureza é importante lixar esta superfície pois ao ser cortada pode apresentar impurezas provenientes do disco de corte ou até mudanças em suas propriedades devido ao corte. Lixa-se os corpos de provas cortados em uma politriz com lixas 220 e então o ensaio de dureza é efetuado, é medido três pontos no núcleo e feito a média, obtém-se assim o resultado. Na medição dos três pontos é importante não permitir que as penetrações fiquem próximas

uma das outras para que não haja alteração na medição. O resultado das perfurações está na figura abaixo.

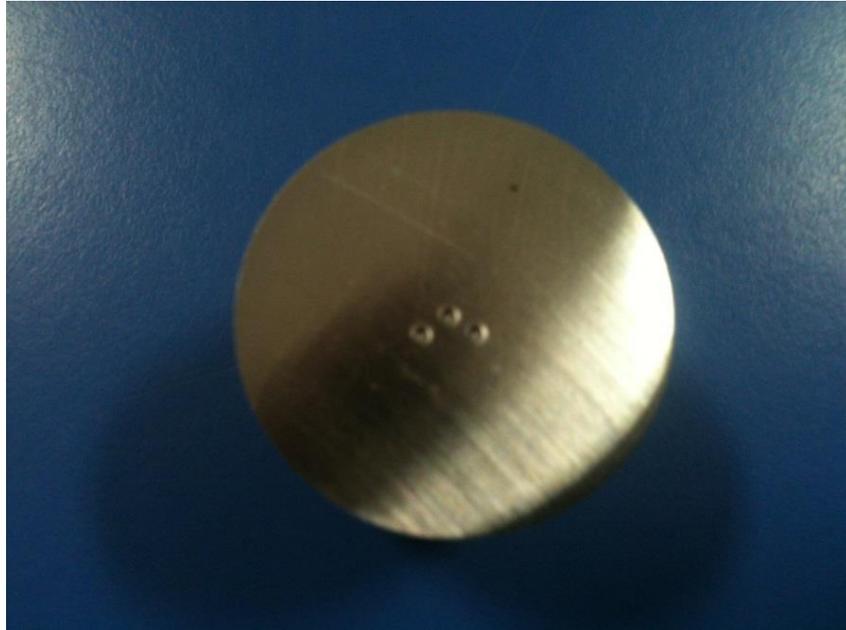


Figura 19 - Corpo de prova com furações referentes ao ensaio de dureza de núcleo.

### 3.4 Medida da camada efetiva

A camada efetiva permite saber o tamanho da camada com dureza superior a 50 HRC, essa medida é feita em microdurômetros os quais permite medir a dureza e a distância entre o lugar testado na peça e a superfície da mesma. Para proceder o ensaio é necessário preparar a amostra, para o lixamento na politriz utilizando-se lixas com granulometria de 220, 400 e 600 respectivamente, a cada mudança de lixa gira-se o corpo de prova em 90° para que seja apagado os riscos da lixa anterior. Ao chegar na lixa mais fina o corpo de prova deve passar por um processo de polimento, assim a amostra é polida na politriz por um disco felpudo, nesse disco é posta uma suspensão aquosa de alumina 1 $\mu$ m, que irá dar o acabamento final a superfície, eliminando assim os riscos deixados pelas lixas.

O corpo de prova com a superfície polida a ser testada é posto no microdurômetro, nele um indentador com formato piramidal feito de diamante é pressionado contra a amostra formando uma impressão que dirá o quão dura é a região onde foi feito o ensaio. Nesse caso onde deseja-se obter a camada efetiva, uma linha imaginária é traçada partindo da superfície

até o núcleo e então faz-se as medições de dureza a partir da superfície externa até o núcleo seguindo esta linha. Ao encontrar a dureza de 50 HRC, analisa-se a distância desse ponto medido até a superfície da amostra, essa distância dirá a camada efetiva da amostra. Abaixo está a foto do microdurômetro utilizado no teste e de uma amostra polida.



Figura 20 - Corpos de prova com a superfície polida.



Figura 21 - Microdurômetro utilizado no ensaio de camada efetiva.

### 3.5 Medida da camada cementada (visual)

A medida da camada cementada (visual) é o último ensaio feito antes da aprovação ou não da peça, a superfície em que foi medida a camada efetiva se encontra polida podendo assim ser atacada pelo reagente para a revelação da camada, o reagente utilizado no experimento foi o nital 2%, que é basicamente 2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico. O ataque foi feito por imersão, sendo assim os corpos de prova imersos no reagente (nital 2%) por cerca de 10 segundos até que promova a revelação da camada cementada.

Depois do ataque deve-se analisar o tamanho da camada visual, a medida é realizada através de uma lupa graduada onde pode-se medir a camada com precisão de 0,1 mm. O ensaio é repetido três vezes variando os lugares de medição ao longo da circunferência do corpo de prova. Abaixo, estão fotos da lupa utilizada na medição e algumas amostras atacadas.



Figura 22 - Lupa utilizada para a medição da camada visual cementada.



Figura 23 - Corpos de prova atacados com nital 2%.

### 3.6 Análise do Custo

Esse projeto tem como objetivo central analisar o custo de cementação em dois fornos de banho de sal (com aquecimento a gás e por resistência elétrica) e em um forno com cementação em meio gasoso (Tipo T-Ypsen), para que ao final haja a possibilidade de afirmar qual forno é melhor tendo os pontos de vista técnico e econômico como fatores decisórios. No começo do projeto cogitou-se a possibilidade de analisar por completo os custos dos três fornos, porém ao realizar os ensaios verificou-se que os ensaios deram resultados extremamente parecidos para os processos de cementação em banho de sal. Como esses resultados foram similares e os outros custos do processo são quase que necessariamente iguais (custos de amarração, quantidade de arame utilizado na amarração, quantidade e tipo de sal utilizado no banho, mão de obra e etc.) o único custo significativo que irá diferenciar o custo do processo em banho de sal será o custo da energia, quantidade de gás ou energia elétrica, utilizada no aquecimento do forno durante o tratamento térmico.

O cálculo do custo para os dois fornos serão feitos em três etapas. A primeira irá demonstrar o custo da subida de temperatura do forno, a rampa. Nessa etapa, o consumo do forno é de 100% de sua capacidade de aquecimento e a subida será considerada a partir de 800°C. No caso do forno por aquecimento elétrico e por queima de gás (GNV) será usada toda a sua potência. Na segunda etapa será contabilizado o consumo na etapa de patamar do processo, na qual o forno consome cerca de 50% de sua potência e seu consumo dependerá do

tamanho de camada requerida e por consequência o tempo de cementação. Na terceira e última etapa será analisado o custo da etapa de têmpera onde a peça é resfriada até 850°C onde permanece por algum tempo. Deve-se levar em consideração as duas partes dessa etapa onde a primeira ocorre o resfriamento e depois a temperatura se mantém constante até o final do processo, consumindo também 50% de sua potência.

$$\begin{aligned} \text{custo de cada etapa} & \qquad \qquad \qquad \text{Eq. (10)} \\ & = (\text{potência utilizada}) \times (\text{tempo}) \times (\text{custo da energia por hora}) \end{aligned}$$

Ao finalizar o custo de energia de cada forno chegar-se-á ao meio mais eficiente de aquecimento para o banho de sal. Assim será possível comparar o custo da cementação deste forno com a realizada no forno tipo T4 (Ypsen). Para o cálculo do custo de cementação de cada processo serão utilizados os custos diretos. Ao final, chegar-se-á ao custo por batelada ou por quilograma de aço tratado para que haja a possibilidade de estabelecer, em função da camada atingida, uma comparação entre os processos.

No forno tipo T4 (Ypsen) serão levados em conta nove itens para a formação do custo do processo: energia elétrica, gás natural, GLP, manutenção, cesta, resistência, óleo de têmpera, mão de obra e energia gasta no forno de pré-aquecimento. No banho de sal ter-se-ão dez custos distintos, são eles: desgaste do cadinho, reposição de sal e grafite, arame de amarração, energia para aquecimento(gás ou energia elétrica), mão de obra, óleo de têmpera, resistência, tratamento de resíduos e manutenção. Os cálculos utilizados estarão no Apêndice E.

## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Dureza superficial

Os resultados medidos no laboratório no durômetro de bancada encontram-se a seguir. A dureza encontrada nos corpos de prova tratados em banho de sal estão um pouco abaixo do que a encontrada na prática da empresa – geralmente em torno de 63 HRC –, porém esse resultado pode ser devido à temperatura do tanque de óleo de resfriamento. O óleo, na hora em que ocorreu a têmpera, poderia estar frio demais, não permitindo um resfriamento tão efetivo; porém os resultados são bastante aceitáveis. É possível observar também que no forno T4 a dureza encontrada na superfície – em torno de 62 HRC –, é maior do que nos corpos de prova cementados e temperados no banho de sal.

Tabela 4 - Dureza de superfície dos corpos de prova cementados em banho de sal aquecidos a gás

Corpo de prova cementado em banho de sal a gás					
Tempo de cementação		Dureza superfície ( Rockwell C) / $\pm 0,3$ Rockwell C			
horas	C. P.	medida 1	medida 2	medida 3	média
10	1	59,8	59,6	60,4	<b>59,93</b>
6	2	60,4	59,8	58,9	<b>59,7</b>
4	3	60	59,7	59,9	<b>59,86</b>

Tabela 5 - Dureza de superfície dos corpos de prova cementados em banho de sal aquecidos por resistência elétrica

Corpo de prova cementado em banho de sal aquecido por resistência elétrica					
Tempo de cementação		Dureza superfície ( Rockwell C) / $\pm 0,3$ Rockwell C			
horas	C. P.	medida 1	medida 2	medida 3	média
10	1	60,2	59,5	59,6	<b>59,76</b>
6	2	60,5	59,9	58,5	<b>59,63</b>
4	3	59,8	60,2	59,8	<b>59,93</b>

Tabela 6 - Dureza de superfície dos corpos de prova cementados no forno T4

Corpo de prova cementado em meio gasoso (forno T4 - Ypsen)					
Tempo de cementação		Dureza superfície ( Rockwell C ) / $\pm 0,3$ Rockwell C			
horas	C. P.	medida 1	medida 2	medida 3	média
8	4	62	62,2	62,5	<b>62,23</b>
8	5	62,4	62,3	62,1	<b>62,26</b>
6	6	62	62	62,1	<b>62,03</b>
6	7	62	61,8	62	<b>61,93</b>
4	8	62	61,8	62,1	<b>61,96</b>
4	9	61,8	61,7	62	<b>61,83</b>

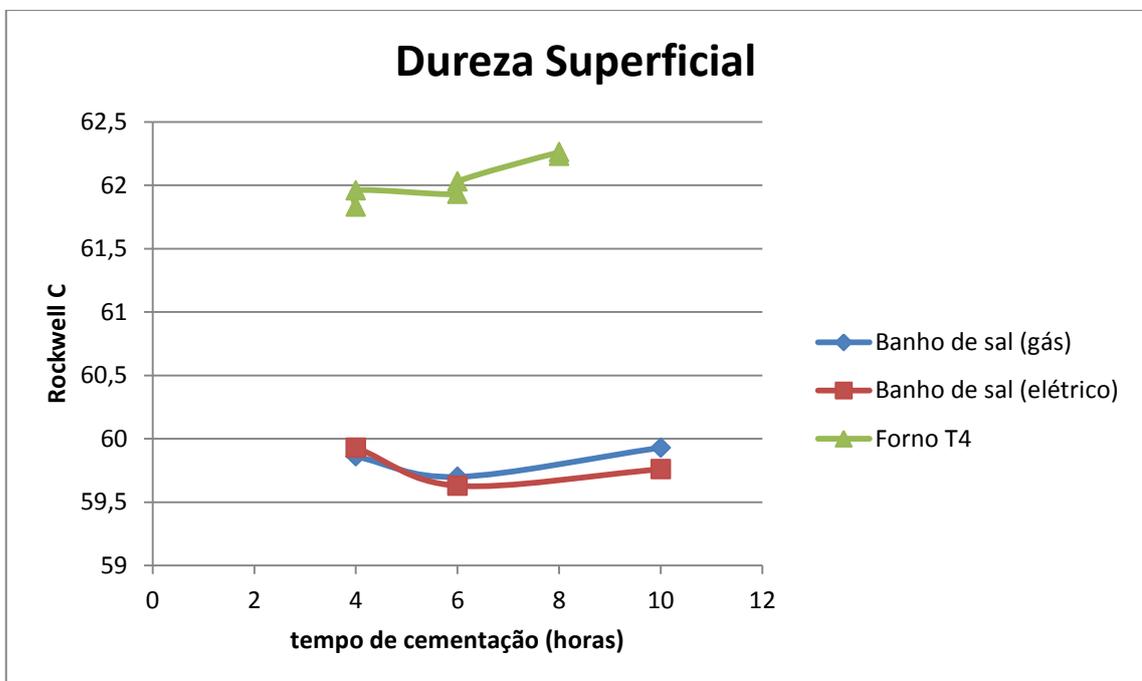


Gráfico 1 – Dureza superficial (HRC) versus Tempo de cementação (horas).

## 4.2 Dureza de núcleo

Na dureza de núcleo, assim como na dureza de superfície, os resultados foram similares para os corpos de prova cementados em banho de sal, não havendo assim uma diferença significativa. Observa-se também um aumento gradual da dureza do núcleo de acordo com o tempo de cementação da peça ; isso acontece em ambos os fornos. Como já esperado, a dureza de núcleo dos corpos de prova tratados no forno T4 apresentou maior dureza, o que se deve à têmpera mais efetiva ocorrida neste forno.

Tabela 7 - Dureza de núcleo dos corpos de prova cementados em banho de sal aquecidos a gás.

<b>Corpo de prova cementado em banho de sal a gás</b>					
<b>Tempo de cementação</b>		<b>Dureza núcleo ( Rockwell C)/ <math>\pm 0,3</math> Rockwell C</b>			
<b>horas</b>	<b>C. P.</b>	<b>medida 1</b>	<b>medida 2</b>	<b>medida 3</b>	<b>média</b>
10	<b>1</b>	30,8	31,3	30,9	<b>31</b>
6	<b>2</b>	30,5	29	30	<b>29,83</b>
4	<b>3</b>	28,8	28,5	28,8	<b>28,7</b>

Tabela 8 - Dureza de núcleo dos corpos de prova cementados em banho de sal aquecidos por resistência elétrica.

<b>Corpo de prova cementado em banho de sal aquecido por resistência elétrica</b>					
<b>Tempo de cementação</b>		<b>Dureza núcleo ( Rockwell C)/ <math>\pm 0,3</math> Rockwell C</b>			
<b>horas</b>	<b>C. P.</b>	<b>medida 1</b>	<b>medida 2</b>	<b>medida 3</b>	<b>média</b>
10	<b>1</b>	30,5	30,5	30,4	<b>30,46</b>
6	<b>2</b>	28,8	29,5	29,4	<b>29,23</b>
4	<b>3</b>	27,8	27,9	28,9	<b>28,2</b>

Tabela 9 - Dureza de núcleo dos corpos de prova cementados no forno Ypsen

<b>Corpo de prova cementado em meio gasoso (forno T4 - Ypsen)</b>					
<b>Tempo de cementação</b>		<b>Dureza núcleo ( Rockwell C)/ <math>\pm 0,3</math> Rockwell C</b>			
<b>horas</b>	<b>C. P.</b>	<b>medida 1</b>	<b>medida 2</b>	<b>medida 3</b>	<b>média</b>
8	<b>4</b>	32,4	33	32,3	<b>32,56</b>
8	<b>5</b>	32,9	32,5	33	<b>32,8</b>
6	<b>6</b>	31,8	31,9	31,6	<b>31,76</b>
6	<b>7</b>	31,7	32	31,9	<b>31,86</b>
4	<b>8</b>	31,3	31,2	30,9	<b>31,13</b>
4	<b>9</b>	31,1	31,4	30,9	<b>31,13</b>

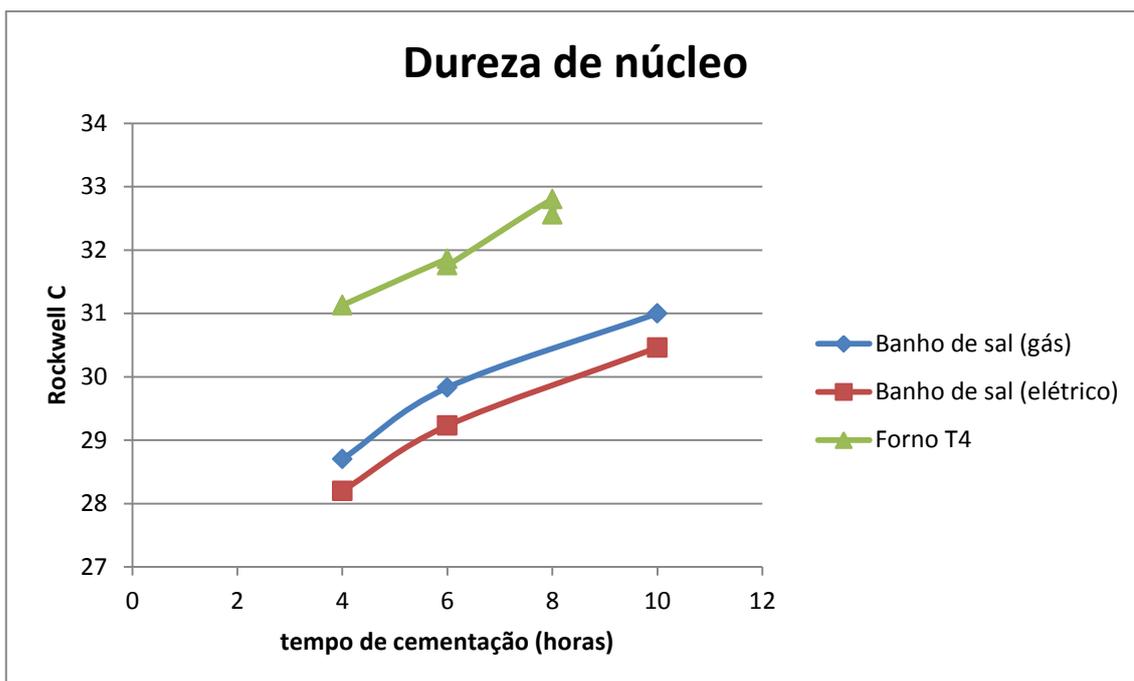


Gráfico 2 - Dureza de núcleo (HRC) versus Tempo de cementação (horas)

### 4.3 Camada efetiva

A camada efetiva encontrada está dentro do esperado. De acordo com as tabelas e o gráfico, observa-se que ela aumenta conforme o tempo de forma não linear. Novamente, é possível observar a similaridade nos resultados quanto aos dois tratamentos realizados em banho de sal. Ao comparar o mesmo com a cementação realizada no forno T4 é possível notar que este forno consegue prover uma camada efetiva maior em um menor tempo. No caso de uma cementação de 4 horas, tem-se no banho de sal uma camada efetiva de 0,39 mm enquanto no forno com atmosfera controlada chega-se a uma camada de 0,76 mm, quase o dobro no mesmo tempo.

Tabela 10 - Camada efetiva dos corpos de prova cementados em banho de sal aquecido a gás.

Corpo de prova cementado em banho de sal a gás					
Tempo de cementação		Camada efetiva (até 50 Rockwell C) mm			
horas	C. P.	medida 1	medida 2	medida 3	média
10	1	0,63	0,66	0,62	<b>0,63</b>
6	2	0,49	0,5	0,48	<b>0,49</b>
4	3	0,34	0,33	0,35	<b>0,34</b>

Tabela 11 - Camada efetiva dos corpos de prova cementados em banho de sal aquecidos por resistência elétrica.

Corpo de prova cementado em banho de sal aquecido por resistência elétrica					
Tempo de cementação		Camada efetiva (até 50 Rockwell C) mm			
horas	C. P.	medida 1	medida 2	medida 3	média
10	1	0,66	0,65	0,66	<b>0,65</b>
6	2	0,47	0,48	0,47	<b>0,47</b>
4	3	0,39	0,4	0,38	<b>0,39</b>

Tabela 12 - Camada efetiva dos corpos de prova cementados em forno T4

Corpo de prova cementado em meio gasoso (forno T4 - Ypsen)					
Tempo de cementação		Camada efetiva (até 50 Rockwell C) mm			
horas	C. P.	medida 1	medida 2	medida 3	média
8	4	1,3	1,2	1,2	<b>1,23</b>
8	5	1,4	1,2	1,2	<b>1,26</b>
6	6	1,1	1	1,1	<b>1,06</b>
6	7	1,1	1,1	1	<b>1,06</b>
4	8	0,7	0,8	0,7	<b>0,73</b>
4	9	0,9	0,7	0,7	<b>0,76</b>

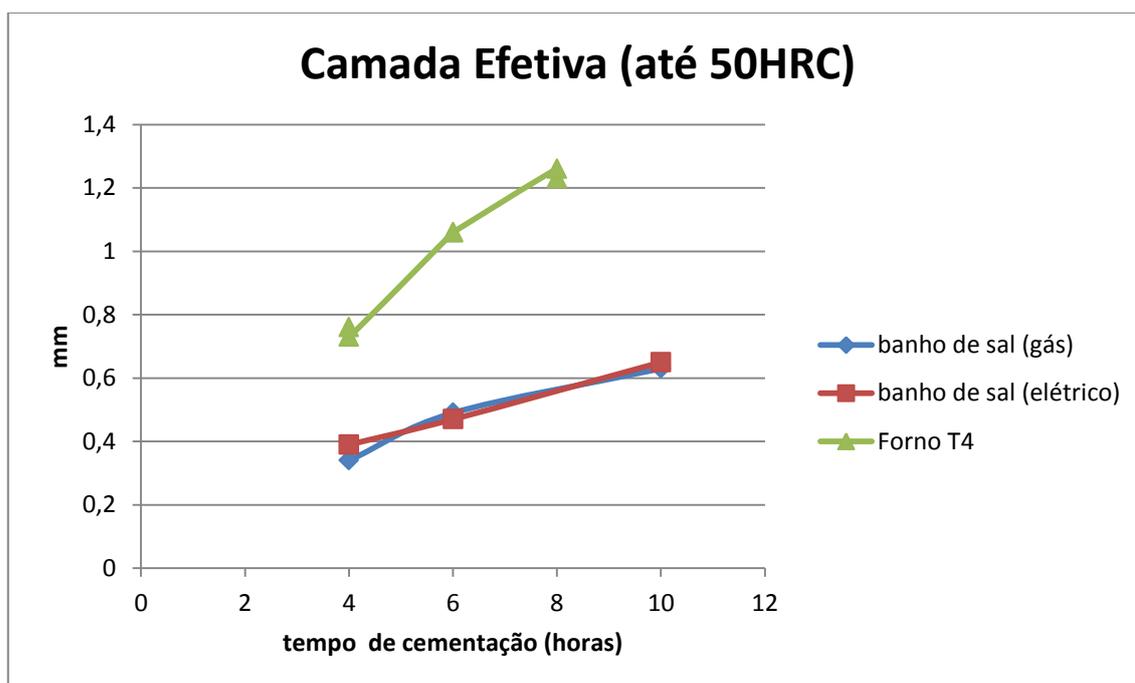


Gráfico 3 - Camada efetiva (mm) versus Tempo de cementação (horas)

#### 4.4 Camada cementada (visual)

A camada efetiva tende a se comportar de forma parecida com a camada cementada (visual), pois o aumento de dureza está relacionado diretamente com o aumento no teor de carbono e sua profundidade de penetração na peça. Com isso, pode-se novamente notar como os dois processos de cementação em banho de sal são parecidos. No forno T4 nota-se uma maior eficiência, para o qual em um mesmo tempo de tratamento consegue-se atingir maiores camadas. Os resultados estão apresentados nas tabelas e no gráfico abaixo.

Tabela 13 - Camada visual dos corpos de prova cementados em banho de sal com aquecimento a gás

Corpo de prova cementado em banho de sal a gás					
Tempo de cementação		camada visual (mm +/- 0,1 mm)			
horas	C. P.	medida 1	medida 2	medida 3	média
10	1	1,3	1,4	1,5	1,4
6	2	1,2	1,1	1,2	1,16
4	3	0,8	0,9	0,7	0,8

Tabela 14 - Camada visual dos corpos de prova cementados em banho de sal com aquecimento por resistência elétrica.

Corpo de prova cementado em banho de sal aquecido por resistência elétrica					
Tempo de cementação		camada visual (mm +/- 0,1 mm)			
horas	C. P.	medida 1	medida 2	medida 3	média
10	1	1,4	1,4	1,3	1,36
6	2	1	1,2	1,1	1,1
4	3	0,8	0,8	0,7	0,76

Tabela 15 - Camada visual dos corpos de prova cementados no forno T4

Corpo de prova cementado em meio gasoso (forno T4 - Ypsen)					
Tempo de cementação		camada visual (mm +/- 0,1 mm)			
horas	C. P.	medida 1	medida 2	medida 3	média
8	4	1,8	1,7	1,7	<b>1,73</b>
8	5	1,8	1,6	1,7	<b>1,7</b>
6	6	1,4	1,4	1,5	<b>1,43</b>
6	7	1,3	1,5	1,4	<b>1,4</b>
4	8	1	1	1,1	<b>1,03</b>
4	9	1,1	1,1	1	<b>1,06</b>

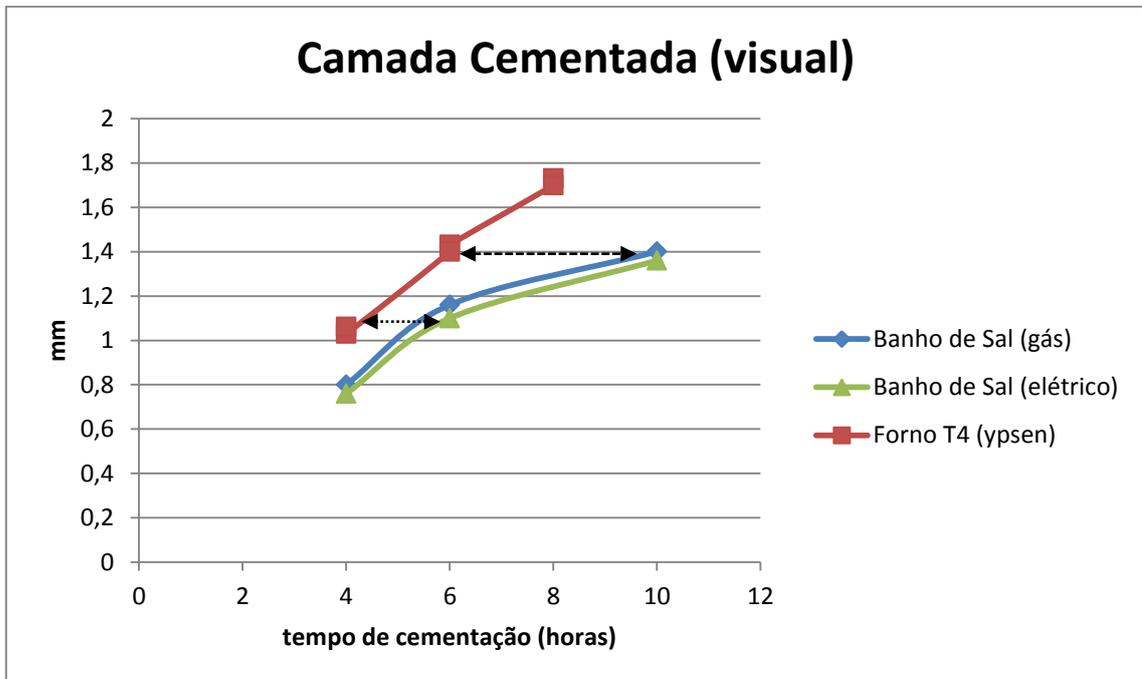


Gráfico 4 - Camada cementada (mm) versus Tempo de cementação (horas) ; setas indicando tamanho de camada cementada similar para diferentes processos e tempo.

#### 4.5 Qualidade dos processos

O acabamento superficial dos corpos de prova no forno T4 foi muito superior, desprezando até posteriores processos de jateamento ou decapagem, sendo possível verificar isso na figura 12 . Por não serem amarradas, as peças cementadas nos fornos com atmosfera controlada correm um risco muito menor de terem zonas de empobrecimento de carbono, causadas pelo contato do arame de amarração com a superfície da peça. Nestes fornos com

sistemas semi-automáticos o controle do tratamento é muito mais apurado, ajustando fonte de carbono e tempo de processo e evitando erros humanos e temperatura de óleo fora de especificação. No forno T4, como as camadas cementadas mais profundas são atingidas em um menor tempo, é possível evitar o crescimento de grão mesmo nos casos de camadas cementadas maiores, considerando-se o efeito deletério para a peça do crescimento de grão.

Os requisitos de controle ambiental também são fatores que pesam contra o tratamento de cementação em banho de sal. Neste processo, o uso de sais à base de cianeto em altas temperaturas se torna extremamente venenoso. Além disso, as peças tratadas nos fornos banho de sal, ao serem lavadas, geram resíduos os quais devem ser tratados devido ao seu alto potencial de poluição.

O principal ponto a favor do forno banho de sal é a possibilidade de temperar as peças cementadas em água, o que é inviável nos fornos tipo T. Com isso, o banho de sal apresenta maior flexibilidade na programação dos processos de cementação que venham a exigir têmpera mais vigorosa. Um outro ponto a favor é a geometria e a dimensão do cadinho, que permite tratar peças com maior comprimento, na vertical, diminuindo os riscos de empenamento da peça. Na cementação em banho de sal existe a possibilidade de tratar peças com ciclos diferentes ao mesmo tempo, em função do forno ser aberto, diferentemente do forno T4.

## **4.6 Custos**

A análise do custo será apresentada em duas partes : a primeira irá indentificar o banho de sal com o menor custo por batelada, enquanto a segunda irá demonstrar o processo mais econômico.

### **4.6.1 Parte I**

Os custo foram separados em três etapas. A primeira etapa corresponde a rampa da curva de aquecimento, na segunda o custo do processo na temperatura de patamar e a terceira e última etapa o custo da tempera e homogeneização da camada cementada.

Para o custeio do forno a gás foi convencionado a potência de 30 m<sup>3</sup>/h, e para o forno aquecido por resistência elétrica estipulou-se uma potência de 150 KW/h. No custo dos dois

modais de energia foi utilizada uma média do consumo da empresa: para o gás (GNV), R\$ 2,16 o metro cúbico; e para a energia elétrica, R\$ 0,27 o quilowatt/hora. Utilizando esses valores chega-se aos resultados apresentados nas tabelas abaixo, para cada forno e corpo de prova.

$$\text{Custo total} = \text{Etapa 1} + \text{Etapa 2} + \text{Etapa 3} \quad \text{Eq. (11)}$$

Tabela 16 - Custo relacionado a cada corpo de prova para o ciclo térmico de cementação.

Corpo de prova cementado em banho de sal a gás					
Tempo de cementação		Custo de aquecimento para cada corpo de prova (R\$)			
horas	C. P.	etapa 1	etapa 2	etapa 3	total
10	1	97,2	324	32,4	453,6
6	2	97,2	194,4	32,4	324
4	3	97,2	129,6	32,4	259,2

Tabela 17 - Custo relacionado a cada corpo de prova para o ciclo térmico de cementação.

Corpo de prova cementado em banho de sal aquecido por resistência elétrica					
Tempo de cementação		Custo de aquecimento para cada corpo de prova (R\$)			
horas	C. P.	etapa 1	etapa 2	etapa 3	total
10	1	101,25	202,5	20,25	324
6	2	101,25	121,5	20,25	243
4	3	101,25	81	20,25	202,5

Ao calcular a primeira etapa dos custos ficou demonstrada a diferença entre os dois métodos de aquecimento dos banhos de sal, sendo o aquecimento pelo GNV muito mais custoso para a empresa em qualquer um dos tempos de cementação desejados, sendo de 10, 6 ou 4 horas. Na primeira etapa, entretanto, o custo do forno aquecido a gás apresentou um custo inferior ao do forno aquecido por resistência elétrica, o que pode ser explicado pelo tempo demandado para o aquecimento até a temperatura de patamar, que no forno a gás acontece em cerca de uma hora a menos.

Os fornos estudados têm capacidade de 300 kg sendo, por exemplo, no caso da cementação de 10 horas, o custo por kg de R\$ 6,80. Ao multiplicar a capacidade do forno pelo

seu custo por quilograma chega-se ao valor de R\$ 2040,00 por fornada. Sendo o custo gasto no forno aquecido a gás de R\$ 453,60 e no forno aquecido por resistência elétrica de R\$ 324,00, esses valores são bem significativos, representando no caso do forno a gás 22% e no forno elétrico cerca de 16% da receita obtida por fornada.

Outro ponto a ser ressaltado é a diferença de preço do gás e da energia elétrica. O m<sub>3</sub> de gás natural é muito caro, impossibilitando seu uso nesse tipo de indústria; sendo assim, poderia haver algum tipo de incentivo por parte do governo, visto que isso já existe para o uso de GNV em veículos automotivos. O GNV usado em carros é mais barato do que o usado na indústria, o que é um grande absurdo.

#### 4.6.2 Parte II

Para identificar o processo mais vantajoso em termos econômicos para a empresa, a Tabela 18 mostra de forma resumida os valores dos custos no banho de sal aquecido por resistência elétrica. Os corpos de prova 1, 2 e 3 se referem aos processos de cementação de 10, 6 e 4 horas, respectivamente. Os custos que mais se destacam são a energia elétrica e a reposição do sal : correspondem no corpo de prova 1 (t=10 horas) a 75% do custo total.

Tabela 18 - Custos relacionados ao processo de cementação em banho de sal elétrico

<b>Corpo de prova cementado em banho de sal aquecido por resistência elétrica</b>			
	<b>Custos da batelada para os C.P.</b>		
<b>Custos (R\$)</b>	<b>1 (10 h)</b>	<b>2 (8 h)</b>	<b>3 (6 h)</b>
<b>Energia elétrica</b>	324	243	202,5
<b>Desgaste do cadinho</b>	19,44	13,88	11,11
<b>Reposição de sal</b>	258	258	258
<b>Arame</b>	31,1	31,1	31,1
<b>Resistência</b>	10,65	7,61	6,08
<b>Mão de obra</b>	54,54	54,54	54,54
<b>Óleo de têmpera</b>	25	25	25
<b>Grafite</b>	1,4	1,4	1,4
<b>Manutenção</b>	20,68	14,77	11,81
<b>Tratamento de resíduos</b>	31,11	22,22	17,77
<b>Total</b>	<b>775,92</b>	<b>671,52</b>	<b>619,31</b>

Os custos do forno T4 estão representados na Tabela 19, sendo possível verificar os maiores custos no processo que, neste caso, são a energia elétrica, a manutenção e o consumo de gás natural. Esses três custos correspondem no processo de cementação de 8 horas a, aproximadamente, 88% do custo total.

Tabela 19 - Custos relacionados ao processo de cementação no forno T4

Corpo de prova cementado em forno T4			
Custos (R\$)	Custos da batelada para os C.P.		
	4 e 5 (8 h)	6 e 7 (6 h)	8 e 9 (4 h)
Energia elétrica	64,15	52,48	40,82
Cesta	4,1	3,42	2,73
Gás Natural	362,88	302,4	241,92
GLP	7,10	60,48	90,72
Resistência	4,16	3,47	2,77
Mão de obra	19,31	19,31	19,31
Óleo de têmpera	25	25	25
Forno de pré-aquecimento	7,29	7,29	7,29
Manutenção	70,9	59,09	47,27
<b>Total</b>	<b>564,89</b>	<b>532,94</b>	<b>477,83</b>

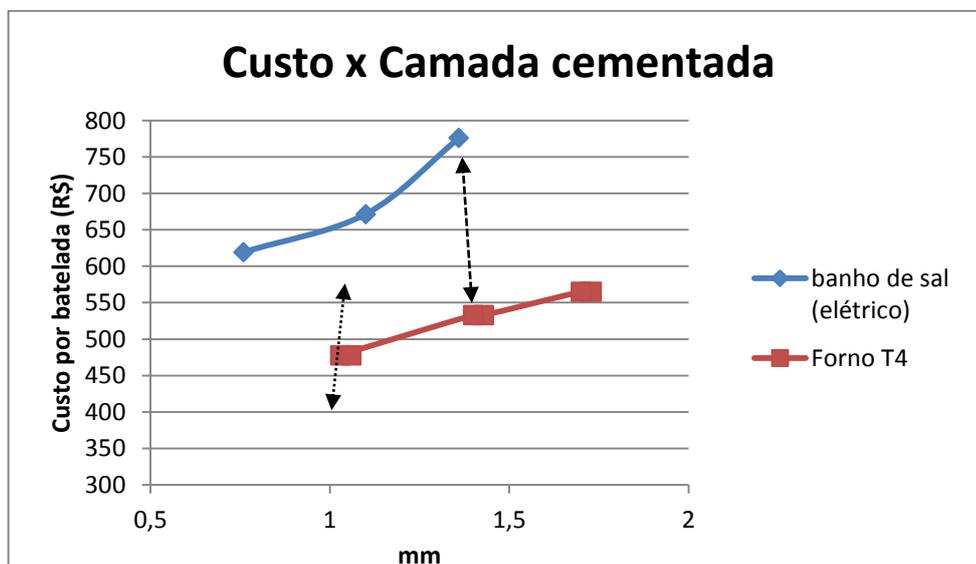


Gráfico 5 - Custo por batelada (mm) versus Tamanho de camada cementada (mm).

Tendo como parâmetro os resultados obtidos nos ensaios anteriores, passar-se-á a comparação dos corpos de prova 2 (banho de sal elétrico/t=8 horas) com as amostras 8 e 9 (forno T4/t=4 horas), e o corpo de prova 1 (banho de sal elétrico/t=10 horas) com as amostras 6 e 7 (forno T4/t=6 horas. Os valores podem ser comparados pelo custo absoluto da batelada, pois os dois processos têm a mesma capacidade de 300 Kg por batelada.

Conforme calculado, o forno banho de sal apresentou o maior custo por batelada. O tratamento térmico realizado no corpo de prova 1 (10 horas) tem um custo de R\$ 775,92; sendo a receita desse tratamento de R\$ 2040,00, esse custo representa 38% da receita. Já o tratamento realizado nos corpos de prova 6 e 7 (6 horas) tem um custo de R\$ 532,94, o que representa 26% da receita gerada. Com relação ao que foi falado anteriormente se o objetivo fosse chegar a uma camada cementada de 1,4 mm, o forno T4 daria uma margem de lucro 12% maior em relação ao tratamento realizado no banho de sal, e uma produtividade cerca de 40% maior.

Considerando que esse estudo foi dirigido para a empresa e que fatores como alguns custos indiretos e despesas não entraram nos resultados. Levando-se em consideração, por exemplo, o custo de depreciação dos equipamentos, o resultado poderia se modificar, mas partiu-se da priori que os equipamentos já estavam totalmente depreciados.

## **5 Conclusões**

O presente trabalho buscou analisar tanto os fatores econômicos quanto a qualidade dos meios de cementação estudados. Em razão disso, a conclusão foi dividida em duas partes: qualidade e custos dos processos.

### **5.1 Qualidade e eficiência dos processos**

Com base nos fatores de qualidade e eficiência dos processos (qualidade superficial, ausência de pontos moles, controle do processo, taxa de cementação) o forno de cementação em meio gasoso (T4) apresenta os melhores resultados.

Os fornos de cementação em meio líquido (banho de sal) são indicados nos casos de cementação de peças de maior comprimento e pequena espessura (maior possibilidade de empenamento) e quando a composição química do aço e/ou as dimensões das peças exigem meios de meios de resfriamento mais drásticos.

### **5.2 Custos dos processos**

O custo de aquecimento dos fornos de banho de sal aquecido à gás é superior ao custo do aquecimento por resistência elétrica. Por se tratar de insumo de maior peso na composição de custos do processo, os fornos com aquecimento elétrico são os mais adequados. O uso dos fornos com aquecimento a gás se aplica nos casos em que já ocorreu a carga total nos fornos de aquecimento elétrico, há corte do fornecimento de energia elétrica ou exista a necessidade de tratar peças em horários de pico de demanda por energia elétrica - essa forma de energia nesses períodos tem custo relativo oito vezes maior em comparação ao fornecimento em horário de baixa demanda.

Com relação ao custo total (por lote) o forno de cementação por atmosfera gasosa (T4) apresenta menor custo de processo para a empresa. O processo de cementação nesse forno se mostrou superior em quase que todos os aspectos de eficiência, qualidade e custos.

Se a empresa optasse por desativar algum dos fornos voltado para o processo de cementação, as análises desse trabalho indicariam que o forno a ser escolhido seria o de banho de sal. Porém, o planejamento da produção da empresa deve ser o mais flexível possível para

atender as demandas de mercado. A desativação dos fornos de banho de sal representa uma perda de flexibilidade neste planejamento de produção: haveria dificuldade de atender as demandas de tratamento térmico de peças que exigem têmpera em água e com determinadas dimensões.

## 6 Referências

1. CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: ABM, 1979.
2. CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
3. REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1982.
4. COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.
5. ASM HANDBOOK. **Heat Treating**. USA: ASM International, v. 4, 1991.
6. MARTINS, E. **Contabilidade de custos**. São Paulo: Atlas, 2000.
7. DUTRA, R. G. **Custos: Uma abordagem prática**. 4ª. ed. São Paulo: Atlas, 1995.
8. HORNGREN, C. T.; FOSTER, G.; DATAR, S. M. **Contabilidade de Custos**. 9ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
9. MEGLIORINI, E. **Custos**. 1ª. ed. São Paulo: Makron Books, 2001.
10. COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.

7 Apêndice A

						Trav. Leonor Mascarenhas, 101 - Ramos CEP 21040-135 - Rio de Janeiro - RJ Tel.: (21) 3865-4400 - Fax: (21) 3865-4422 qualidade@tenax.com.br www.tenax.com.br * Fundada em 1963 *					
		• Aços de Construção Mecânica • Aços de Ferramentas • Tubos Mecânicos • Chapas de Aços									
<b>CERTIFICADO DE QUALIDADE / QUALITY CERTIFICATE N.º: 0023197272180</b>											
Cliente/Customer:		ESTANCAL CALDEIRARIA E USINAGEM LTDA.						E3159			
Pedido Cliente/Customer Order n.º: 159				N.º Pedido Interno/Our Reference n.º: 00225642							
Nota Fiscal/Invoice n.º: 30019792		14/08/2012									
Material/Specification: ACO SAE 8620 RED.											
Dimensões/Dimensions: 1"						Quantidade/Quantity: 1 peça					
Estado, Acabamento/Finish, Coat: LAMINADO / BRUTO											
Tratamento Térmico/Heat Treatment:											
Restreabilidade Tenax/Trace Record n.º: 0023197											
COMPOSIÇÃO QUÍMICA/CHEMICAL COMPOSITION (%)											
Corrida n.º/Heat n.º: 28826		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V
		0.220	0.800	0.220	0.012	0.029	0.430	0.430	0.170		0.001
Nb	Co	Al	Cu	Ti	Sn	E					
		0.026	0.050		0.015						
PROPRIEDADES MECÂNICAS/MECHANICAL PROPERTIES											
Ensaio de Tração/Tensile Test											
Limite de Resistência/Tensile Strength (T.S.)				Limite de Escoamento/Yield Strength (Y.S.)			Alongamento/Elongation Low		Redução de Área/Reduction of Area		
							%		%		
Dureza/Hardness		Ensaio de Impacto/Impact Test					Dobramento/Bending Test		Temperabilidade/Hardenability		
		Temp.	1.º	2.º	3.º	Media/Average	Tipo/Type				
		°C						°			
ENSAIOS METALGRÁFICOS/METALLOGRAPHIC TESTS											
Macrografia/Macrography			Fratura Azul/Blue Fracture Test			Tamanho do Grão/Grain Size		Descarbonetação/Decarburization			
								mm			
Microinclusões/Microinclusions - ASTM-E-45											
A		B		C		D		Estrutura/Structure			
Fine/Thin	Gross/Thick	Fine/Thin	Gross/Thick	Fine/Thin	Gross/Thick	Fine/Thin	Gross/Thick				
ENSAIO DE TEMPERABILIDADE JOMINY/HARDENABILITY JOMINY TEST											
Distância/Distance											
Dureza/Hardness (HRC)											
ULTRA-SOM/ULTRASONIC TEST:											
ENSAIO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS/MAGNETIC PARTICLE TEST:											
Observações/Remarks:											
Certificado emitido com autorização e garantia da Usina Siderúrgica/ This Certificate is issued and authorized with guarantee by the Steel Mill.											
						Data: 14 08 2012					
								Eng. Mauro Elias			

Figura 24 - Certificado de qualidade do aço SAE 8620 utilizado no ensaio

## 8 Apêndice B

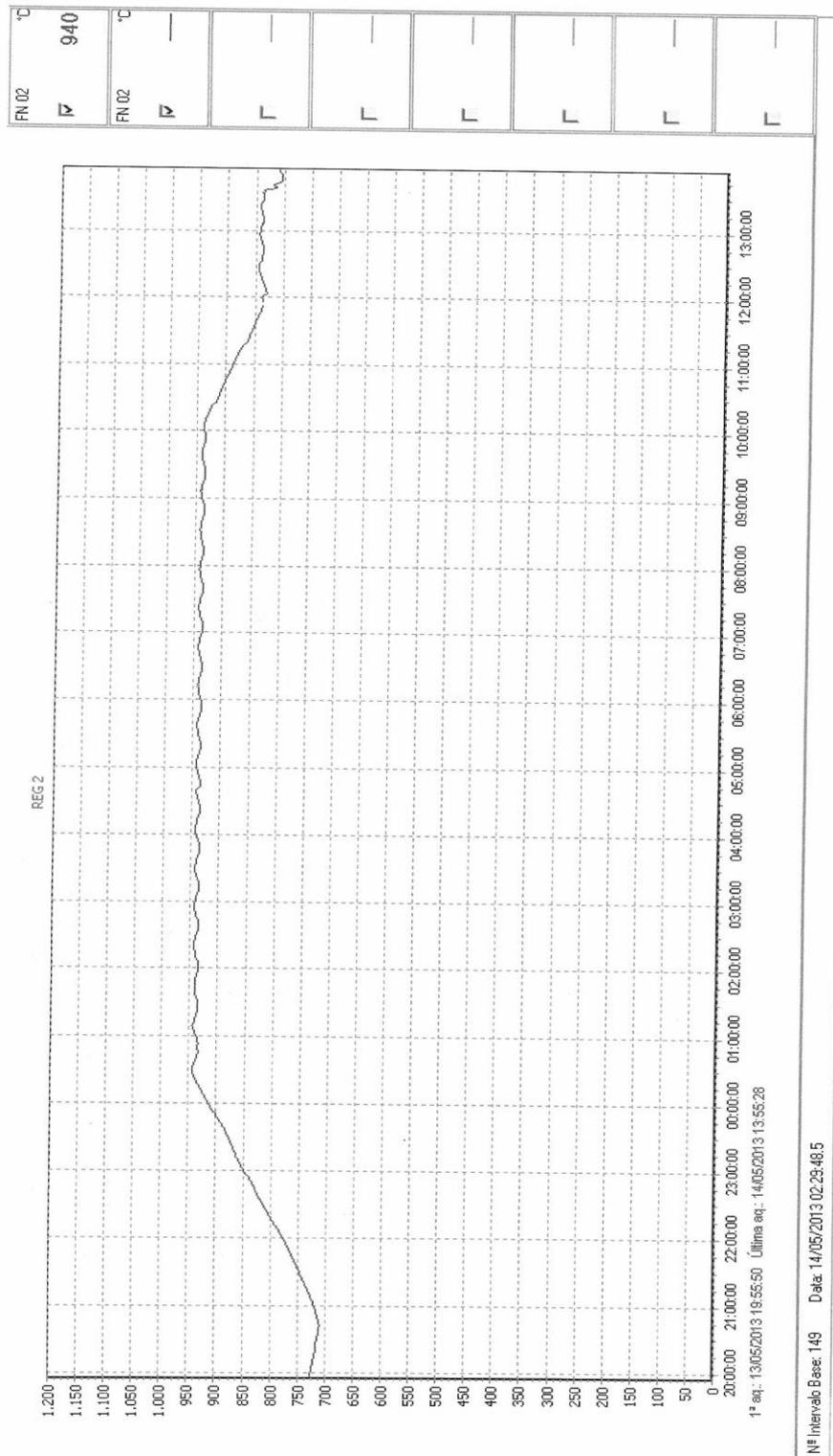


Figura 25 - Gráfico temperatura x tempo do tratamento realizado no forno banho de sal com aquecimento elétrico

## 9 Apêndice C

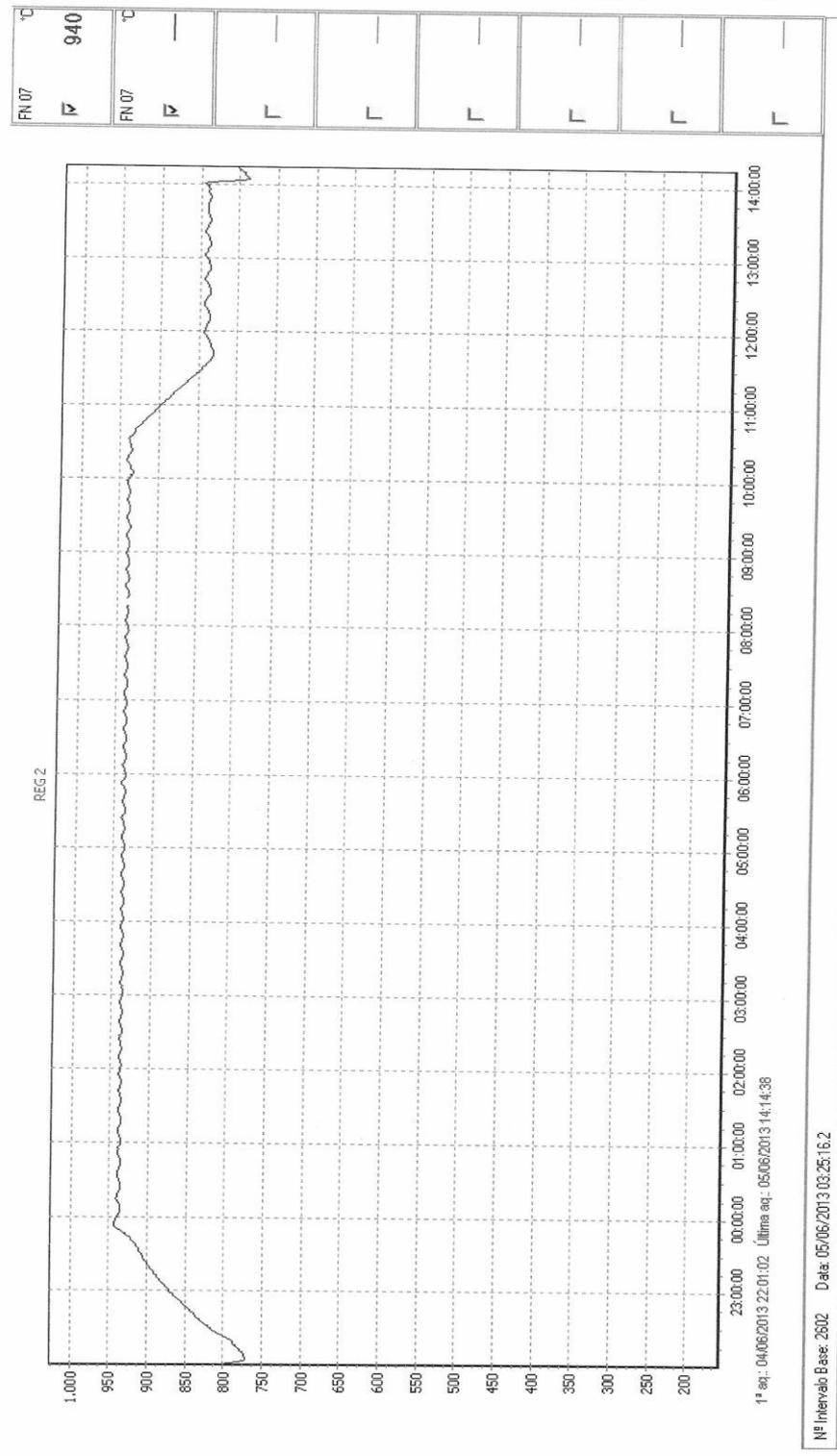


Figura 26 - Gráfico temperatura x tempo para o tratamento realizado no forno banho de sal aquecido a gás.

## 10 Apêndice D

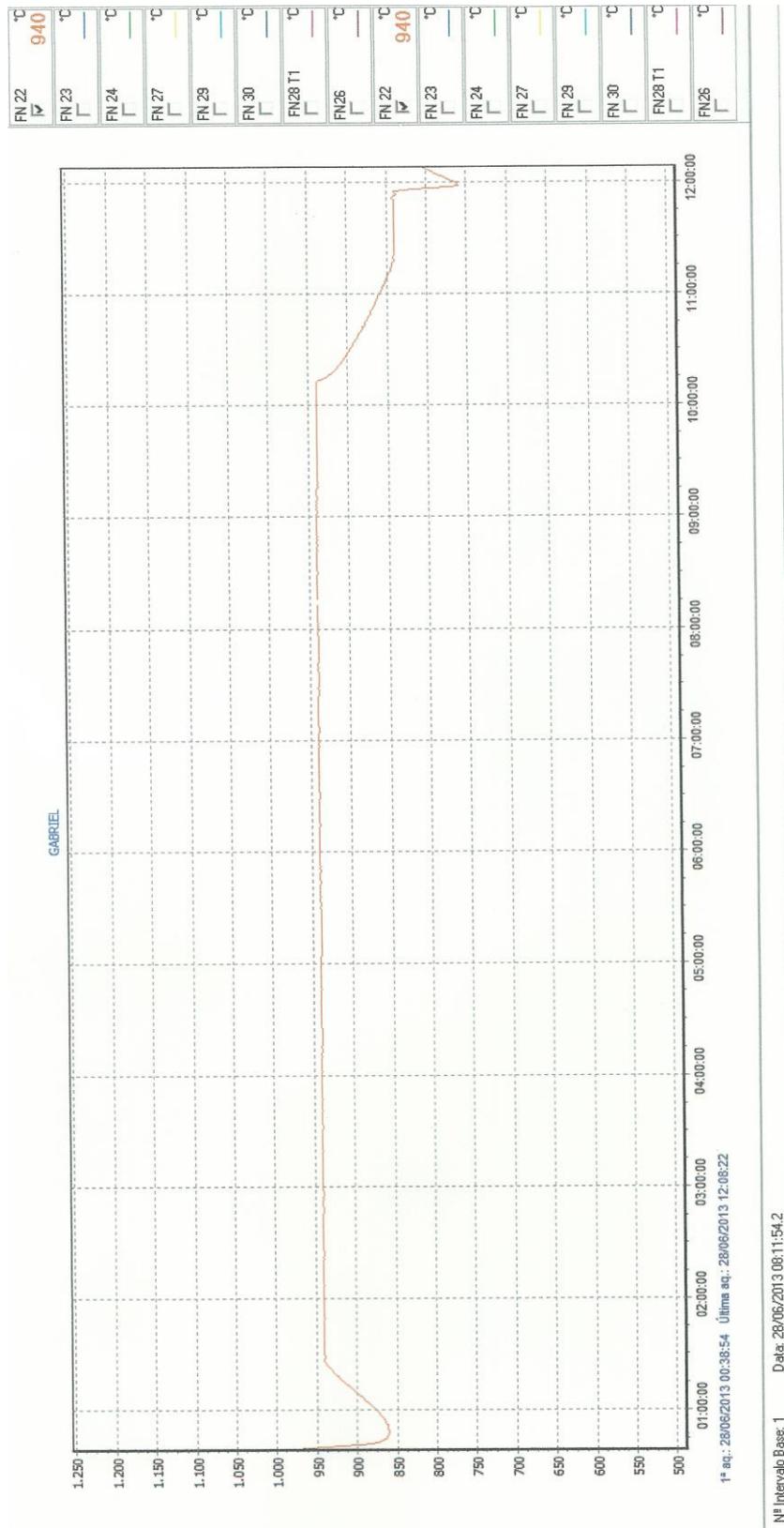


Figura 27 - Gráfico temperatura x tempo do tratamento realizado no forno tipo T (22 – Ypsen)

## 11 Apêndice E

- Desgaste do Cadinho (banho de sal)

$$Custo = \frac{\text{Preço do cadinho (reais)}}{\text{Vida útil (h)}} \times \text{Tempo da batelada (h)}$$

- Reposição de Sal (banho de sal)

$$Custo = \text{Reposição por batelada (Kg)} \times \text{Preço por Quilograma (R\$/Kg)}$$

- Arame (banho de sal)

$$Custo = \text{Quantidade utilizada na amarração de 300 Kg} \\ \times \text{Preço por Quilograma (R\$/Kg)}$$

- Resistência (banho de sal e forno T4)

$$Custo = \frac{\text{Preço da resistência (reais)}}{\text{Vida útil (h)}} \times \text{Tempo da batelada (h)}$$

- Mão de obra (banho de sal e forno T4)

$$Custo = \frac{\text{Custo mensal da mão de obra (reais)}}{\text{Horas trabalhadas em um mês (h)}} \times \text{Tempo utilizado por batelada (h)}$$

- Óleo de Têmpera (banho de sal e forno T4)

$$Custo = \text{Reposição por batelada (l)} \times \text{Preço por litro (R\$/l)}$$

- Gafite (banho de sal)

$$Custo = \text{Reposição por batelada (Kg)} \times \text{Preço por Quilograma (R\$/Kg)}$$

- Manutenção (banho de sal e forno T4)

$$Custo = \frac{\text{Custo mensal da mão de obra (reais)}}{\text{Horas trabalhadas em um mês (h)}} \times \text{Fator de utilização (\%)} \\ \times \text{Tempo utilizado por batelada (h)}$$

- Tratamento de resíduos (banho de sal)

$$Custo = \frac{\text{Custo mensal (reais)}}{\text{Horas em um mês (h)}} \times \text{Tempo utilizado por batelada (h)}$$

- Cesta (forno T4)

$$Custo = \frac{\text{Preço da cesta (reais)}}{\text{Vida útil (h)}} \times \text{Tempo da batelada (h)}$$

- Gás Natural (forno T4)

$$Custo = \text{Vazão} \left( \frac{m_3}{h} \right) \times \text{Preço (m}_3) \times \text{Tempo da batelada (h)}$$

- GLP (forno T4)

$$Custo = Vazão \left( \frac{m_3}{h} \right) \times Preço (m_3) \times Tempo da batelada (h)$$

- Forno de pré-aquecimento (forno T4)

$$Custo = Potência utilizada(\%) \times Tempo (h) \times Custo da energia \left( \frac{R\$xKw}{h} \right)$$