



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Paulo César Oliveira Carvalho

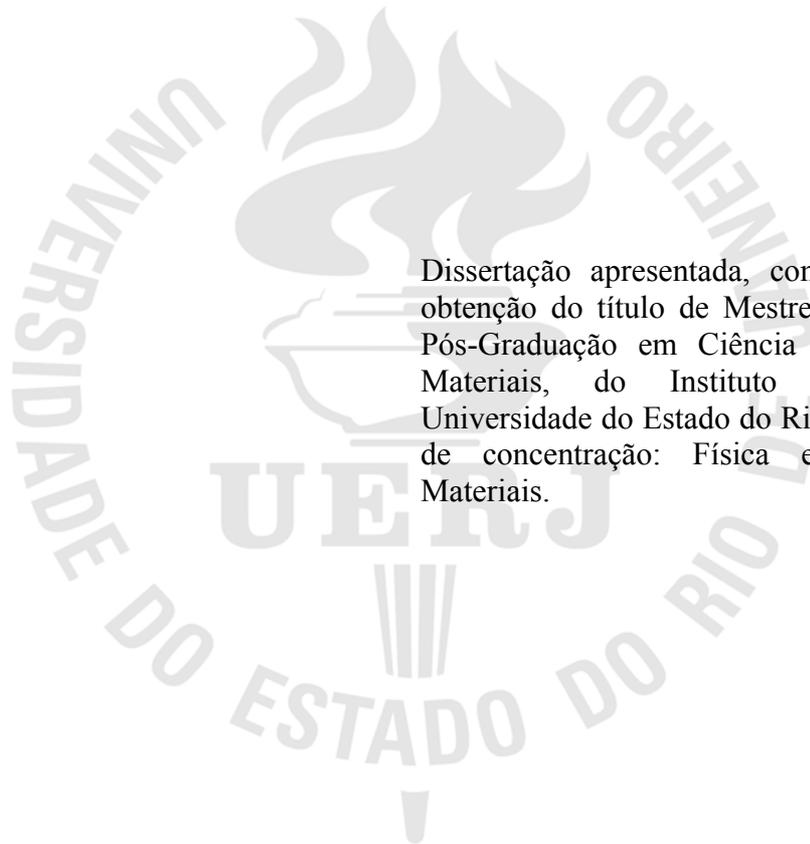
**Otimização do processo de endurecimento superficial de aços de baixa liga**

Nova Friburgo

2013

Paulo César Oliveira Carvalho

**Otimização do processo de endurecimento superficial de aços de baixa liga**



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Física e Mecânica dos Materiais.

Orientador: Prof. Gil de Carvalho, D.Sc.

Nova Friburgo

2013

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/E

C331 Carvalho, Paulo César Oliveira.  
Otimização do processo de endurecimento superficial de  
aços de baixa liga / Paulo César Oliveira Carvalho. - 2013.  
123 f.: il.

Orientador: Gil de Carvalho.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio  
de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Aço – Tratamento térmico – Teses. 2. Estatística  
matemática – Teses. 3. Métodos de simulação – Teses. I.  
Carvalho, Gil de. II. Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 669.14

Autorizo apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta  
dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Paulo César Oliveira Carvalho

**Otimização do processo de endurecimento superficial de aços de baixa liga**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Física e Mecânica dos Materiais.

Aprovado em 14 de março de 2013.

Banca examinadora:

---

Prof. Gil de Carvalho, D.Sc (Orientador)

Instituto Politécnico – UERJ - RJ

---

Prof. Dr. Luiz Nélio Henderson Guedes de Oliveira

Instituto Politécnico – UERJ - RJ

---

Prof. Júlio César da Silva, D.Sc

UNIFESO – RJ

Nova Friburgo

2013

## **DEDICATÓRIA**

Dedico aos meus pais Maria Francisca (In Memoriam) e José Luiz, a minha esposa Selma e a seus pais Edjar e Rita (In Memoriam), e, também aos meus amados filhos: Gabriel, Raphael e Ana Beatriz.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por ter me dado uma linda família sem a qual a minha caminhada até aqui não teria muito sentido.

Ao Professor Gil de Carvalho pelo empenho, disponibilidade e atenção indispensáveis na realização deste trabalho.

Aos Professores desta Academia, em especial, Norberto Cella e Marcos Pinheiro por suas aulas estimulantes, paciência por ouvirem minhas dificuldades e me incentivarem na trajetória deste trabalho.

Aos Professores Drs. Luiz Nélio Henderson Guedes de Oliveira e Júlio César da Silva, por terem aceitado o convite para participar desta banca.

Aos meus colegas do curso de pós-graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais por toda a colaboração a mim prestada.

Aos colegas engenheiros e colaboradores que muito me ajudaram neste trabalho: Edson Abrita, Gustavo Burleim, Júlio Faria S. Forte, Lucas de Oliveira Jr., André Abel Augusto e Jorge Aníbal Barrionuevo.

Às empresas NFP Automotive (Nova Friburgo), TEMPERAÇÃO RIO (Rio de Janeiro), BRASTÊMPERA (Rio de Janeiro), TORK Controle Tecnológico de Materiais Ltda.(Rio de Janeiro) e Elegance Elevadores (São Gonçalo), pelos serviços e colaboração técnica para com este trabalho.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo incentivo financeiro durante esses dois anos.

A todos que contribuíram e colaboraram de alguma maneira com esta dissertação, em especial ao povo maravilhoso de Nova Friburgo que não mais verá outro janeiro como aquele, pois o choro pode durar uma noite, mas, a alegria vem de manhã. Deus abençoe a todos nós.

## RESUMO

CARVALHO, Paulo César Oliveira. Otimização do processo de endurecimento superficial de aços de baixa liga, 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico do Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2013.

O objetivo deste trabalho é a aplicação de um Planejamento Fatorial Completo, ferramenta estatística que auxiliará a obter dados empíricos para otimizar um tratamento termoquímico, a cementação. Partindo-se de um levantamento da profundidade de camada cementada e da dureza de uma corrente de aço de baixo teor de carbono, usada para amarração, e para resistir à abrasão reproduziu-se uma nova cementação, variando-se seus parâmetros de influência, para se alcançar o ponto ótimo, definindo o melhor aço e o melhor processo. Foram realizados dois planejamentos, um fatorial  $2^3$  e dois  $2^2$ , comparando o comportamento do processo na prática em relação aos resultados teóricos de uma simulação computacional, que permite a obtenção das curvas de enriquecimento de carbono, baseado na segunda Lei de Fick, para várias condições de contorno. Os perfis teóricos de cementação apresentaram valores de profundidade efetiva próximos aos valores obtidos experimentalmente, evidenciando o planejamento realizado.

Palavras-chave: Planejamento fatorial completo. Tratamento termoquímico. Lei de Fick.

## **ABSTRACT**

The objective of this work is the application of a Full Factorial Design, statistical tool that will help us to obtain empirical data to optimize a thermochemical treatment, carburizing. Starting from a survey of the carburized layer depth and hardness of a steel chain, low-carbon, used for mooring, and to resist abrasion reproduced if a new cement, varying the parameters of influence, achieve the optimum setting the best steel and the best process. There were two plans, a  $2^3$  factorial and two  $2^2$ , comparing the behavior of the process in relation to the theoretical results of a computer simulation that allows the enrichment curves for carbon, based on the second Fick's law, for various contour conditions. The theoretical profiles cement showed effective depth values close to those obtained experimentally, highlighting the planning done.

Keywords: Full factorial design. Thermochemical treatment. Fick's Law.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processos de cementação industrial.....	22
Figura 2 – Reação de cementação .....	23
Figura 3 – Preenchimento da caixa de cementação com material cementante.....	25
Figura 4 – Forno industrial Jung TT 200.....	25
Figura 5 – Reações no interior da caixa de cementação.....	25
Figura 6 – Diagrama mostrando a zona crítica do diagrama Fe-Fe <sub>3</sub> C.....	26
Figura 7 – Peças retiradas do banho de sal.....	29
Figura 8 – Peças sendo temperadas, após cementação.....	30
Figura 9 – Forno para cementação líquida – com aquecimento externo.....	33
Figura 10 – Forno para cementação líquida – com aquecimento interno.....	33
Figura 11 – Atividade do C em função da temperatura e potencial de C da atmosfera .....	35
Figura 12 – Gradiente de carbono para os aços 1020 e 8620 após cementação a gás, em diferentes temperaturas.....	36
Figura 13 – Equipamento para cementação gasosa e têmpera posterior com prod. contínua ..	36
Figura 14 – Esquema de um forno a vácuo .....	38
Figura 15 – Forno de câmara simples.....	38
Figura 16 – Forno de câmara dupla .....	38
Figura 17 – Forno de cementação a plasma marca NDK Incorporated, Modelo PMF-754.....	39
Figura 18 – Termogramas de processos de cementação por indução GUGEL .....	40
Figura 19 – Mecanismo de movimentação atômica. Vazios (a) e Intersticial (b).....	44
Figura 20 – Mecanismo em anel. Anel de três átomos (a) e anel de quatro átomos (b).....	44
Figura 21 – Representação esquemática da difusão no reticulado e ao longo de defeitos.....	45
Figura 22 – Representação esquemática da estrutura CCC.....	46
Figura 23 – Representação esquemática da estrutura CFC.....	46
Figura 24 – Difusão do carbono na austenita .....	48
Figura 25 – Perfil de cementação sólida a 930 °C.....	51
Figura 26 – Comparação entre os perfis de cementação sólida x cementação a gás a temperatura próxima de 930 °C.....	52
Figura 27 – Influência da temperatura e do tempo sobre o tamanho de grão.....	53
Figura 28 – Micrografia do núcleo aço baixo carbono, constituída por martensita revenida perlita fina e ferrita de Widmannstätten em contorno de grão .....	55

Figura 29 – Ferrita de Widmanstätten.....	55
Figura 30 – Experimento fatorial sem interação.....	69
Figura 31 – Experimento fatorial com interação.....	70
Figura 32 – Corrente de elos redondos cementada em caixa. ....	74
Figura 33 – Seções de Elo de Corrente preparadas para o Ensaio de Dureza.....	75
Figura 34 – Amostra de Elo de Corrente fornecida para a Análise Química.....	76
Figura 35 – Elo de corrente embutido ao lado da outra metade seccionada.....	77
Figura 36 – Gráfico do Gradiente de Dureza (HV x Profundidade da camada cementada) ....	77
Figura 37 – Gradiente de carbono em barras de aço 8620, cementadas a 925 °C.....	79
Figura 38 – Perfil de microdureza Vickers em barra de aço 8620 cementada a 925°C.....	80
Figura 39 – Barra de aço ABNT 1020 bitola 12,7 mm (1/2 polegada). ....	81
Figura 40 – Preparo da barra de aço ABNT 1020 para cementação.....	81
Figura 41 – Comprimento do CP.....	82
Figura 42 – Curvas de cementação teóricas – Experimentos 2 <sup>3</sup> (1°, 2°, 3° e 4°).....	85
Figura 43 – Curvas de cementação teóricas – Experimentos 2 <sup>3</sup> (5°, 6°, 7° e 8°).....	86
Figura 44 – Interpretação Geométrica dos Efeitos no Planejamento 2 <sup>3</sup> .....	92
Figura 45 – Variação da resposta com os níveis dos três fatores.....	93
Figura 46 – Análise Gráfica do Planejamento Fatorial 2 <sup>2</sup> para cementação líquida.....	95
Figura 47 – Análise Gráfica do Planejamento Fatorial 2 <sup>2</sup> para cementação a gás.....	97
Figura 48 – Macrografia do aço ABNT 8620 cementação gasosa, %C = 1,1%, temperado em óleo e revenido.....	99
Figura 49 – Gradiente de dureza e profundidade de camada das amostras cementadas a gás do aço ABNT 8620.....	100
Figura 50 – Micrografias do ensaio no CP nº1.....	101
Figura 51 – Macrografia do aço ABNT 8620 cementação banho de sal com 1,0%C temperado e revenido.....	102
Figura 52 – Gradiente de dureza e profundidade de camada das amostras cementadas em banho de sal do aço ABNT 8620.....	103
Figura 53 – Micrografia do CP nº 7.....	104
Figura 54 – Macrografia do aço ABNT 1020 Cementação Banho de Sal temperado em água e revenido.....	105
Figura 55 – Gradiente de dureza e profundidade de camada das amostras cementadas em banho de sal do aço ABNT 1020.....	106
Figura 56 – Gradientes de Dureza para os CP do aço ABNT 1020 enviados a TEMPERAÇÃO	

para Cementação em Banho de Sal.....	107
Figura 57 – Perfil de Cementação CP nº 1 aço 1020 TEMPERAÇO RIO.....	108
Figura 58 – Perfis de Dureza dos CP da TEMPERAÇO RIO.....	108
Figura 59 – Gradientes de Dureza CP aço 8620 Cementação em Banho de Sal – TEMPERAÇO RIO.....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composições de Banhos de Sal para Cementação Líquida.....	27
Tabela 2 – Propriedades do banho Pure Case® .....	31
Tabela 3 – Sistemas SAE e AISI de classificação dos aços .....	42
Tabela 4 – Representação dos valores de Coeficiente de Difusão x Temperatura.....	49
Tabela 5 – Dados de difusão .....	49
Tabela 6 – Valores da função erro.....	50
Tabela 7 – Efeito do tamanho do grão de austenita sobre as propriedades do aço .....	54
Tabela 8 – Valores dos ensaios de dureza .....	61
Tabela 9 – Tabela de correlações entre dureza e propriedades mecânicas.....	62
Tabela 10 – Planejamento Fatorial com dois níveis e dois fatores.....	66
Tabela 11 – Experimento 2 <sup>2</sup> com os respectivos resultados.....	68
Tabela 12 – Experimento 2 <sup>2</sup> com interação entre os efeitos.....	68
Tabela 13 – Resultados de um Planejamento Fatorial 2 <sup>3</sup> para estudar a significância dos efeitos.....	71
Tabela 14 – Coeficientes de contraste.....	72
Tabela 15 – Valores dos efeitos.....	72
Tabela 16 – Dureza da camada cementada da corrente de elos.....	78
Tabela 17 – Composição Química do aço da corrente de elos.....	78
Tabela 18 – Alguns valores para função a função erro de Gauss.....	79
Tabela 19 – Composição Química do aço ABNT 8620 utilizado na cementação.....	82
Tabela 20 – Planejamento Fatorial 2 <sup>3</sup> dos Experimentos.....	84
Tabela 21 – Planejamento Fatorial 2 <sup>2</sup> para Cementação em Banho de Sal.....	87
Tabela 22 – Planejamento Fatorial 2 <sup>2</sup> para cementação a gás.....	88
Tabela 23 –Planejamento Fatorial 2 <sup>2</sup> para cementação. Resultados teóricos, obtidos a partir do software aplicado.....	89
Tabela 24 – Planejamento Fatorial 2 <sup>2</sup> para cementação a gás. Resultados obtidos através do software aplicado.....	90

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
1	<b>CRONOLOGIA</b> .....	14
2	<b>DESENVOLVIMENTO TEÓRICO</b> .....	21
2.1	<b>Tratamentos Termoquímicos</b> .....	21
2.1.1	<u>Cementação (Carbonetação)</u> .....	21
2.2	<b>Aços para Cementação</b> .....	41
2.3	<b>Difusão Atômica</b> .....	43
2.3.1	<u>Mecanismos de difusão do carbono</u> .....	43
2.3.2	<u>Difusão de carbono na austenita</u> .....	47
2.3.3	<u>Cálculo da cinética de cementação</u> .....	50
2.4	<b>Influência do Tamanho de Grão nas Propriedades dos Materiais</b> .....	52
2.5	<b>Influência da Têmpera na Transformação da Austenita</b> .....	56
2.6	<b>Defeitos Oriundos de Tratamentos Térmicos Mal Conduzidos</b> .....	58
2.7	<b>Determinação das Propriedades Mecânicas da Camada Cementada</b> .....	60
2.8	<b>Planejamento Experimental</b> .....	63
2.8.1	<u>Planejamento Fatorial</u> .....	65
2.8.2	<u>Planejamento Fatorial Completo ou Fatorial <math>2^k</math></u> .....	66
2.8.3	<u>Planejamento Fatorial Fracionado <math>2^{k-p}</math></u> .....	67
2.8.4	<u>Cálculo dos Efeitos</u> .....	67
2.8.5	<u>Cálculo da significância dos efeitos quando os experimentos possuem réplica</u> ..	71
3	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	74
3.1	<b>Preparação dos Corpos de Prova a Partir do Material a ser Investigado</b> ....	74
3.2	<b>Planejamento dos Experimentos</b> .....	83
4.	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	91
4.1	<b>Interpretações dos Resultados dos Planejamentos Fatoriais</b> .....	91
4.2	<b>Resultados Práticos dos Processos Planejados</b> .....	98
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	112
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	113
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	114
	<b>ANEXOS</b> .....	117
	<b>ANEXO 1 – Relatório de ensaio da NFP automotive</b> .....	118
	<b>ANEXO 2 – Relatório de ensaio TORC N° 12044060 MESP</b> .....	119

## INTRODUÇÃO

Em engenharia, a escolha do material e dos tratamentos aos quais ele será submetido é decisiva para o sucesso de um projeto. Uma vez este tenha sido definido, é fundamental termos certo nível de controle sobre a sua microestrutura e, conseqüentemente, sobre as suas propriedades, para que os resultados estejam conforme o esperado. Sendo este material o aço, diferentes tratamentos termoquímicos podem ser aplicados, quando o objetivo é a melhoria das suas propriedades superficiais. Geralmente, estes tratamentos são empregados quando se deseja obter um núcleo tenaz aliado a uma superfície resistente ao desgaste. De fato, em materiais contendo ligas de Fe-Fe<sub>3</sub>C, muitas vezes são as propriedades de uma superfície que são críticas para uma aplicação de engenharia, como por exemplo, componentes que devam suportar desgastes ou exibir baixo atrito ou resistir à oxidação ou corrosão.

Segundo Colpaert (2008) grande parte dos tratamentos termoquímicos envolve a adição de carbono e/ou nitrogênio. Por serem solutos intersticiais, difundem-se com certa rapidez no aço. Existem aços especialmente adequados aos tratamentos termoquímicos, que podem ter suas propriedades melhoradas a partir dos mais usuais, que são: “cementação” (ou carbonetação) em que se adiciona carbono na superfície do aço a temperaturas, normalmente superiores a 900°C; nitretação, em que se adiciona nitrogênio no aço entre 500 e 590°C; carbonitretação, derivada da cementação, em que o carbono e o nitrogênio são adicionados no aço a temperaturas entre 800 e 900°C; cianetação (um tipo de carbonitretação) em que o carbono e nitrogênio são introduzidos pela imersão do aço em um banho de cianetos fundidos e a nitrocarburação, que é a introdução de carbono e nitrogênio no aço em uma condição ferrítica, tal qual ocorre na nitretação.

Este trabalho leva em consideração a grande importância tecnológica que o Processo de Cementação representa para a indústria metal-mecânica, sendo este um dos mais antigos e mais importantes processos de endurecimento superficial das ligas ferrosas, imprescindível como meio de melhoria da qualidade e desempenho de componentes mecânicos. Trata-se de um experimento investigativo partindo de uma amostra de corrente de elos (corrente comum), formados de vergalhões de aço de baixo teor de carbono com secção circular de 6 mm de diâmetro caldeados, podendo ser usada em talhas manuais, transportadores, proteção de pneumáticos e em uma infinidade de aplicações. Sabe-se que esta pequena corrente, com cerca de 1500 mm de comprimento, foi cementada em caixa (cementação sólida) e temperada, mas sem revenimento. A partir de um ensaio de dureza e de um levantamento da profundidade da camada cementada, pretende-se reproduzir o processo de cementação de

forma a se obter, a partir dos parâmetros de influência, o seu ponto ótimo, aplicando-se, portanto um planejamento de experimentos, sendo este o objetivo principal desta pesquisa, e, acreditando-se assim estar contribuindo com informações necessárias para a melhoria do referido processo. Foram realizados dois planejamentos, um fatorial  $2^3$  e outro  $2^2$ , no intuito de comparar o comportamento do processo na prática em relação à segunda Lei de Fick para a Difusão.

A cementação tem finalidade de aumentar o teor de carbono na superfície do material, conferindo-lhe resistência ao desgaste, dureza e temperabilidade. Para maximizar a dureza da superfície, é realizada a têmpera, que transforma a microestrutura da periferia em martensita, mas não afetando o núcleo, devido ao seu baixo teor de carbono, mantendo a ductilidade e a tenacidade nessa região. Por fim, o revenimento, que aplicado nos aços temperados, imediatamente após a têmpera pode ser feito visando tirar algumas tensões residuais da martensita e modificar a sua microestrutura, para que a superfície tenha um mínimo de ductilidade.

A seguir será apresentada uma cronologia relativa às publicações de trabalhos análogos ou similares ao trabalho que será apresentado, publicados na última década; como segunda parte, um detalhado desenvolvimento teórico, objetivando dar embasamento e uniformidade aos conceitos utilizados na dissertação, enfocando prioritariamente os processos de cementação do aço, suas propriedades e a definição de Planejamento Fatorial, tratamento estatístico que será aplicado às variáveis do processo para determinar a redução de seus experimentos. A terceira parte contempla a metodologia de execução dos ensaios e procedimentos experimentais, finalizando a pesquisa, na quarta parte, com uma discussão dos resultados obtidos. Por último, uma conclusão objetiva sobre as contribuições propostas, seguida do Referencial utilizado para a dissertação.

## 1 CRONOLOGIA

Baumgarten (2003) mostra diferentes formulações de Granulados aplicados a Cementação Sólida dos aços comerciais classes ABNT 8620, avaliando os efeitos da substituição do carvão vegetal ativado novo por material reciclado descartado pela Indústria de Bebidas, assim como a substituição do ativador Carbonato de Bário pelo novo ativador Carbonato de Cálcio, considerada como tecnologia mais limpa do ponto de vista ambiental.

Sandor e Ferreira (2006) propõem um modelo para avaliar pontualmente as variações de tenacidade à fratura ao longo da camada cementada de um aço SAE 5115. A pequena espessura dessas camadas impede a retirada de corpos de prova nas dimensões especificadas pelas normas de ensaios de tenacidade à fratura. Assim, para simular uma camada cementada retiraram-se corpos-de-prova de tração e de tenacidade à fratura de amostras de aços SAE 5115, 5140, 5160 e 52100 assumindo a influência local apenas da variação do teor de carbono e considerando que os teores dos demais elementos de liga são essencialmente constantes. Os corpos-de-prova após eletrodeposição de cobre foram tratados termicamente em forno de cementação, têmpera e revenimento para serem submetidos aos efeitos térmicos sem absorção de carbono. Os resultados da análise micro estrutural, dos ensaios de microdureza, de tração e de tenacidade à fratura foram agrupados em um único gráfico e comparados com o perfil de cementação de peças de aço SAE 5115 tratadas nas mesmas condições. Foi confirmado que a tenacidade à fratura varia inversamente proporcional à microdureza (HV1) e que a previsão do comportamento de uma trinca numa camada cementada pode ser feita por meio de equação ou diagrama que relacionam a micro dureza (HV1) com a tenacidade à fratura (KIC ou CTODC).

Gobbi et al. (2006) defendem que o uso de tecnologias limpas aumenta a eficiência das empresas e a competitividade de seus produtos. Neste contexto, inserem-se os processos a plasma e deposição física de vapor, que são processos de tecnologias limpas para a formação de camadas/filmes finos resistentes ao desgaste, os quais têm sido aplicados na indústria para prolongar a vida útil de ferramentas e componentes, além de manter o acabamento superficial. Este processo, ainda recente, tem como objetivo melhorar a dureza superficial e resistência à corrosão dos aços AISI 316L e AISI 304L, ampliando suas aplicações. É realizado com a introdução de uma mistura de gases contendo carbono, como o metano (CH<sub>4</sub>), por exemplo, eliminando a geração de resíduos. Os aços AISI 316L e AISI 304,

devido à elevada resistência à corrosão e biocompatibilidade, são extensamente utilizados em equipamentos para processos químicos, componentes expostos a condições ambientais adversas e em próteses ortopédicas. A baixa dureza e resistência ao desgaste atuam como fatores limitantes para fabricação de componentes que sofram fortes solicitações mecânicas. O principal enfoque dos estudos das camadas/filmes obtidos através dos processos a plasma está na caracterização das propriedades físicas, mecânicas e tribológicas das camadas obtidas. Entretanto, uma melhora nestas propriedades não garante uma boa resistência à corrosão, principalmente em relação aos aços inoxidáveis que são suscetíveis a precipitação em contornos de grão e interferência no processo de formação da camada passiva. Em função das condições de obtenção, pode ocorrer uma perda significativa da resistência à corrosão do material tratado, com a formação de fases mais estáveis que a matriz. As pesquisas em corrosão destes revestimentos tiveram seu desenvolvimento a partir dos anos 90 - inicialmente em aço carbono e só recentemente em aços inoxidáveis. No entanto, ainda são escassos os estudos de avaliação dos mecanismos de corrosão. O proposto para este trabalho, através dos equipamentos de cementação a plasma (mesmo utilizado para nitretação a plasma), foi de verificar somente a formação da fase S, sem precipitados e, caracterizar a microestrutura desta fase S nos aços AISI 316L e AISI 304, em duas diferentes temperaturas, empregando técnicas de análise como: análise metalográfica, medição de camada cementada, determinação de fases por difração de raios-X e caracterização quanto a resistência à corrosão (testes de imersão e voltametria cíclica). Em paralelo, com a caracterização e qualificação destas camadas, objetiva-se também ter uma noção de parâmetros de cementação por plasma adequados para se obter camadas com uma máxima profundidade e com boas características de resistência ao desgaste e à corrosão para serem aplicadas diretamente na indústria petroquímica, alimentícia, farmacêutica entre outras.

Menetrier (2006) esclarece em seu trabalho a influência entre as variáveis de processo e de composição nas propriedades de compressibilidade a frio, densidade, dureza, flexão e coeficiente de atrito. Para isso utilizou planejamentos de experimentos fracionados e completos. O planejamento de experimentos fracionado  $2^{5-1}$  indicou que a quantidade de resina fenólica e a temperatura do molde são os fatores mais significativos para a compressibilidade. O planejamento de experimento completo  $2^4$  mostrou mais uma vez que, que a quantidade de resina e a temperatura do molde, bem como suas interações, são fatores significativos na determinação da compressibilidade. O terceiro planejamento de experimentos,  $2^3$ , concentrou-se nas propriedades da resina, já que a mesma mostrou-se muito influente na determinação das propriedades dos materiais de atrito. Os resultados

mostraram que é possível controlar as propriedades tribológicas e a compressibilidade das pastilhas de freio dentro de certa escala de valores. Assim, este trabalho mostra que é possível aplicar técnicas estatísticas para racionalizar o projeto de materiais de atrito.

Vecchia et al. (2006) investigaram o poder carbonetante de uma nova mistura de gases para o processo de cementação. A mistura de gases proposta consistiu de monóxido de carbono, dióxido de carbono e metano, na proporção de 49%, 1% e 5%, respectivamente, e nitrogênio para balanço. Para o processo de cementação foi utilizado o aço DIN16Mn5Cr, sendo que as temperaturas de cementação testadas foram 900°C, 1000°C e 1050°C, com diferentes tempos de processo. A partir dos gráficos dos perfis de dureza determinados experimentalmente e do perfil de carbono obtido por simulações obteve-se o valor da profundidade efetiva de cementação. A nova mistura gasosa apresentou uma boa eficiência, permitindo diminuir o tempo de processo e assim reduzir custos. Os resultados mais promissores corresponderam ao tempo de processo de 4h e temperatura de 1000°C. Nesse caso, obteve-se uma camada cementada média de 1,3 mm e uma dureza superficial de aproximadamente 80HRN30.

Hammes et al. (2006), em seu trabalho, citam que uma nova forma de adição de elementos de ligas em componentes sinterizados vem sendo estudada e desenvolvida pelos pesquisadores do Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina (LabMat). Nesta nova técnica, realizada em reator a plasma, átomos de elementos de liga são pulverizados do cátodo do suporte de processamento devido ao bombardeamento de íons e átomos neutros rápidos acelerados na bainha catódica do plasma. Os átomos pulverizados difundem na fase gasosa e depositam-se na superfície dos componentes compactados posicionados no ânodo, durante a sua sinterização, e difundem-se para o seu interior, formando uma camada de alguns micrometros enriquecida com os elementos de liga pulverizados do cátodo. Esta alteração da composição química em uma camada da superfície permite obter propriedades distintas entre a superfície e o núcleo dos componentes sinterizados, resultando em uma melhoria de seu desempenho como, por exemplo, maior resistência ao desgaste e/ou corrosão. Quando se realiza a sinterização de ferro puro com enriquecimento de Mo na superfície, tem-se como resultado um componente constituído, basicamente, de ferro puro sinterizado, onde, somente na superfície tem-se uma liga composta de Fe-Mo. Com a conseqüente cementação por plasma, tem-se a incorporação de carbono na superfície, na forma de carbetos. Estes carbetos, mais duros que a matriz, podem aumentar significativamente a resistência ao desgaste dos materiais. Pode-se então obter um componente que possua em seu volume um material de baixo custo, sendo a modificação

microestrutural aplicada somente na superfície onde os componentes sofrem a maior parte das solicitações, em especial às relacionadas com o desgaste e atrito.

Pimenta (2008) investigou através de estatística a influência das variáveis do processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento e seus efeitos no limite de resistência dos arames de aço SAE 9254, com bitola 2,00mm. Para isso foram utilizadas as metodologias de regressão múltipla e DOE (planejamento de experimentos). A aplicação de regressão múltipla consistiu numa investigação prévia dos fatores para eliminação dos não influentes na etapa posterior de estudos, com intuito de reduzir custos relacionados à experimentação. Na fase de experimentação foi utilizada uma matriz completa  $2^3$ , onde foram testados os fatores relacionados ao processo em dois níveis. A justificativa do seu artigo é a falta de estudos estatísticos relacionados a esse processo e a importância do conhecimento do comportamento das variáveis influentes no tratamento térmico de têmpera e revenimento de arames de aço. Os resultados revelaram quais os fatores que têm influência no processo e a relevância de cada fator individualmente para atingir a variável resposta, proporcionando a otimização desse processo através de técnicas estatísticas e gerando aumento de produtividade, assim como, melhoria na qualidade através da previsibilidade dos resultados.

Lopes (2009) analisou o crescimento do grão austenítico através de revelação em um aço ABNT 1020, observando também a evolução da profundidade da camada cementada tendo os mesmos fatores o tempo variado e à temperatura constante, quando este aço é submetido ao tratamento de cementação, além de observar nos corpos-de-prova se a revelação do grão austenítico, do citado aço, esta de acordo com o método utilizado, na temperatura e tempos exposto, conforme a Norma MERCOSUL NM 163-96. Acompanhando os resultados obtidos das amostras, citaram que há uma tendência: do crescimento do grão irregular; da não uniformidade dos grãos nos corpos-de-prova e ao decorrer do tratamento de cementação. Nos procedimentos por comparação e por contagem de interceptos apresentam certa imprecisão. A eficiência dos procedimentos depende no procedimento por contagem de interceptos da parte operacional do *software* e do cálculo da margem de erro e desvio padrão. Já o procedimento por comparação simplesmente da habilidade do operador que pode ser comprometida por paralaxe devido a grãos menores. Foi visto que a evolução da profundidade da camada cementada ao longo do processo ocorre de maneira uniforme ao longo do tempo e é explicada com a correlação linear. A evolução da camada cementada é revelada por um gráfico da correlação linear.

Leitão et. al. (2010) demonstraram que o processo de cementação, utilizado para o tratamento de componentes que necessitam de alta dureza superficial e de grande resistência

ao desgaste pode, em alguns casos, ser substituído pelo processo de nitretação, trazendo algumas vantagens, entre as quais, a redução dos custos de fabricação. Seu estudo aborda dados comparativos sobre as deformações geradas, durezas, e estruturas obtidas em corpos de prova tipo Navy "C" e corpos de prova tipo "Engrenagens" submetidas a processos de cementação, beneficiamento, nitretação gasosa e nitretação líquida. Foram estudados outros fatores importantes do processo de nitretação, tais como, o efeito do beneficiamento prévio à usinagem e dos elementos de liga em peças de aços com 0,4 % de carbono, submetidos à nitretação gasosa e a verificação do efeito da nitretação líquida e da nitretação gasosa na espessura da camada branca formada, no perfil de dureza e na deformação de peças de aços carbono e baixa liga. Os resultados obtidos mostram que os corpos de prova, que passaram pelos processos de nitretação, chegaram a deformar cerca de dez vezes menos do que os processos de cementação, e que o custo do corpo de prova "engrenagem" que passou pelo processo de nitretação, ficou cerca de 40 % mais barato do que no processo de cementação.

Scheuer (2011) diz que a aplicação industrial de tratamentos termoquímicos assistidos por plasma tem apresentado considerável crescimento nos últimos anos. Isso é consequência dos excelentes resultados obtidos na modificação de superfícies nos materiais de engenharia com baixo impacto ambiental. No caso da nitretação dos aços inoxidáveis, quando o tratamento é realizado em baixas temperaturas, normalmente abaixo de 450°C, proporciona uma significativa melhora de seu comportamento tribológico e da resistência a corrosão. Dentre os diferentes tratamentos termoquímicos assistidos por plasma, a cementação tem mostrado bons resultados em aplicações práticas, possibilitando melhoras nas propriedades superficiais dos aços inoxidáveis por meio da difusão de carbono e/ou formação de carbonetos com os elementos de liga do metal. As propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas, da camada tratada, dependem fortemente das variáveis utilizadas durante o processo, incluindo temperatura e tempo de tratamento, assim como a composição e fluxo da mistura gasosa. Neste contexto, foram estudadas as características microestruturais de amostras do aço inoxidável martensítico AISI 420 cementado por plasma a baixa temperatura, avaliando a influência dos parâmetros: composição da mistura gasosa, fluxo da mistura gasosa, tempo de tratamento e temperatura de tratamento. Quatro séries de amostras foram tratadas visando avaliar a influência dos parâmetros aplicados: a primeira, denominada variação da composição da mistura gasosa foi realizada a temperatura de 450°C, por 4 horas, com conteúdo de CH<sub>4</sub> variando entre 0,25 a 1%, com intervalos de 0,25%, em uma mistura gasosa contendo 20% de Ar e 80% de H<sub>2</sub>, a um fluxo de 100sccm (standard cubic centimeter per minute); a segunda, intitulada variação do fluxo da mistura gasosa, foi executada a

temperatura de 420°C, por 4 horas, usando uma mistura gasosa composta por 99,5% (80% H<sub>2</sub> + 20% Ar) + 0,5% CH<sub>4</sub> com fluxo variando entre 100 a 400sccm, com intervalos de 100 sccm; a terceira, nomeada variação da temperatura de processo, foi realizada usando a mistura gasosa contendo 99,5% (80% H<sub>2</sub> + 20% Ar) + 0,5% CH<sub>4</sub>, fluxo gasoso de 100sccm, com tempo de tratamento de 8 horas e temperaturas variando entre 350 a 500 °C, com diferença de 50°C; e a quarta, designada variação do tempo de tratamento, foi executada a temperatura de 450°C, fazendo uso de uma mistura gasosa com teor de CH<sub>4</sub> de 0,5% e fluxo de 100sccm, sendo realizado em períodos de tratamentos para 4, 8, 12 e 16 horas. Todos os ciclos foram realizados a pressão de 3Torr e tensão de pico de 700V. As camadas obtidas foram caracterizadas por meio de microscopia óptica, eletrônica de varredura e confocal laser, difração de raios-X e medidas de micro dureza. Os resultados mostram que a modificação superficial do aço AISI 420 através da cementação por plasma nas condições avaliadas conduz a um significativo aumento na microdureza do material, a qual se deve possivelmente à saturação intersticial de átomos de carbono e/ou à precipitação de Fe<sub>3</sub>C, o que é evidenciado pelos espectros de DRX obtidos e pelas micrografias que confirmam a presença de uma camada com morfologia modificada. Os resultados indicam uma relação direta entre os parâmetros utilizados nos tratamento de cementação a plasma e as propriedades da superfície modificada.

Araújo (2011) contribui com informações que podem conduzir ao conhecimento necessário para aplicação de planejamento multivariado, no processo de desenvolvimento de um motor Diesel, buscando uma diminuição no tempo para realizar esta atividade. Em uma primeira fase do trabalho, foram identificados quais os componentes (fatores) que deveriam ser estudados e também as variáveis de resposta, que no caso são consumo de óleo lubrificante e pressão de recirculação dos gases de combustão (pressão de Carter). Após a definição dos componentes, foram selecionados quais os níveis dos fatores a serem estudados (no caso, mudanças geométricas dos componentes). Em seguida foi aplicada a metodologia de planejamento multivariado de experimentos (fatorial completo) para identificar qual o melhor compromisso entre as configurações estudadas visando os melhores resultados das variáveis de resposta. Ao final desta fase foi possível identificar a melhor configuração entre os componentes estudados e também um ganho substancial no tempo necessário para executar esta atividade. Já em uma segunda fase do trabalho, foi realizado um estudo verificando a influência das tolerâncias de especificação de projeto de alguns componentes considerados críticos para as mesmas respostas estudadas na fase 01 (consumo de óleo e pressão de Carter). Através de um estudo fatorial fracionado foi possível identificar quais são

as especificações críticas a serem controladas no processo produtivo para manter os valores de consumo de óleo e pressão de Carter dentro dos padrões especificados para o motor em questão.

## 2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

### 2.1 Tratamentos termoquímicos

Tratamentos termoquímicos são processos que visam à adição, por difusão, de elementos químicos (carbono, nitrogênio e boro, entre outros) na superfície do aço (SILVA; MEI 2010). O processo de difusão de um dado elemento no aço é feito com um aquecimento variando entre 300 e 1200°C, daí a sua denominação de tratamento termoquímico.

Há diversas formas de se realizar cada um dos tratamentos termoquímicos já citados na introdução deste trabalho, em especial no que diz respeito ao meio empregado para promover e transportar o elemento empregado. Estes meios são sólidos, líquidos e gasosos. Atualmente, dá-se preferência aos meios líquidos e gasosos, em função da velocidade do processo. O tratamento termoquímico estudado e aplicado nos experimentos do presente trabalho é a cementação, sendo descrito a seguir.

#### 2.1.1 Cementação (Carbonetação)

Consiste na introdução de carbono na superfície do aço, de modo que este, depois de temperado, apresente uma superfície mais dura. Para se produzir uma combinação de uma superfície dura e núcleo tenaz, deve-se partir de um aço com baixo teor de carbono, menos de 0,30% e aquecê-lo, geralmente, entre 815 e 950°C (SILVA; MEI, 2010). São utilizados neste processo aços carbono (AISI/ABNT 1010 a 1035) e aços de baixa liga (AISI/ABNT 2317, 2325, 3115, 4617, 8620, 9310 etc.).

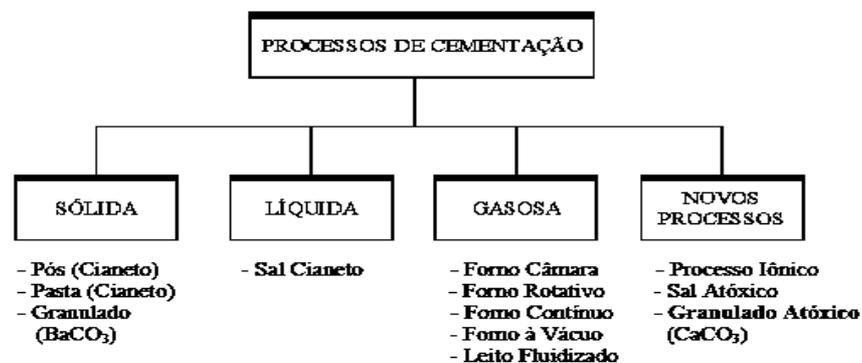
A cementação do ferro ou aço é, segundo Chiaverini (1986), o tratamento mais empregado e mais antigo, tendo sido utilizado pelo império romano. Registros históricos indicam que os Egípcios e Romanos no 3º século antes de Cristo já realizavam a cementação em diversos utensílios, principalmente armas e peças de veículos, objetivando elevar a dureza superficial e a resistência ao desgaste. O meio cementante era o carvão vegetal puro na forma de pequenos fragmentos que eram acondicionados junto com as “peças” em potes de argila. Tal montagem de carga era então aquecida em um forno tipo iglu ou fogueira, passando várias horas em elevada temperatura. Essencialmente, o processo de cementação consiste na carbonização das partes superficiais do aço, com este, um aço maleável fica muito resistente na superfície. A peça é aquecida em forno abaixo do ponto de fusão do aço e então recebe

carbono, o qual se difunde na superfície fazendo uma ligação com o ferro. A cementação ocorre em uma faixa de temperatura e a fonte de carbono é variável.

A cementação diferencia-se bastante dos outros tipos de tratamento porque estes introduzem modificações de ordem estrutural e a cementação modifica a composição química, com a introdução de carbono na parte superficial da peça, conforme já citado.

Depois da cementação surgem praticamente dois tipos de aço: um superficial, com alto teor de carbono e que pode ficar com alta dureza após a operação de têmpera, e outro interno, com baixo teor de carbono, baixa dureza e bastante ductilidade.

Os processos de cementação podem ser feitos segundo as vias dadas na Figura 1 sendo definidas a seguir:

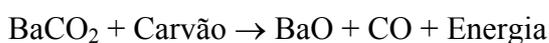


**Figura 1 – Processos de cementação industrial**

Fonte: BAUMGARTEN, 2003.

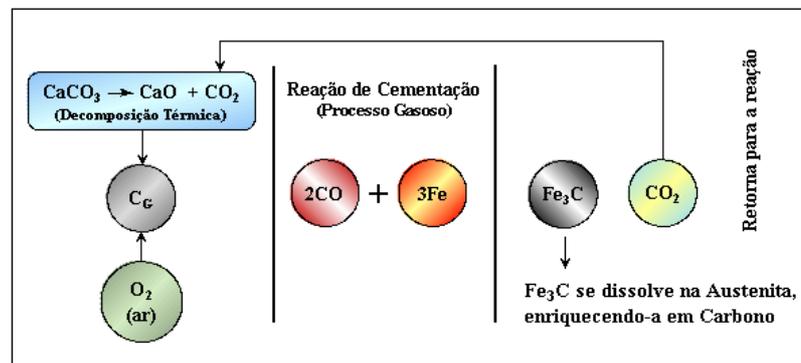
**Cementação sólida:** O processo de cementação sólida é um dos tratamentos térmicos mais antigos de que se tem registro na história, sendo encontrados artigos de aço tratado do período de 300 anos antes de Cristo, elaborados provavelmente pelos antigos ferreiros romanos (BAUMGARTEN, 2003). As peças de aço são acondicionadas em caixas metálicas, a que se adiciona carvão de madeira ou coque, catalisador constituído de uma mistura de 50 a 70% de carbonato de bário com outros carbonatos (cálcio, potássio e sódio) e um óleo ligante ou alcatrão (SILVA; MEI, 2010).

Reações principais do processo:



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

A cementação foi, tradicionalmente, desenvolvida com o emprego de meios de cementação sólidos (denominados cimentos). Sua lenta cinética reacional e as dificuldades de controle exato dos resultados foram alguns dos fatos que tornaram este processo a ser pouco utilizado, hoje em dia, apesar dos aperfeiçoamentos que nele têm sido introduzidos. A Figura 2 mostra a reação de cementação.



**Figura 2 – Reação de cementação**

Fonte: BAUMGARTEN, 2003.

Baumgarten (2003), em sua pesquisa, sugere a utilização de um novo processo sólido, ecologicamente correto, sem perdas de potencial de cementação, levando em consideração a grande importância tecnológica que representa o processo de cementação para a indústria metal-mecânica, sendo imprescindível como meio de melhoria da qualidade, ganho de vida útil e desempenho de componentes mecânicos. Desenvolve um granulado para cementação sólida, que utiliza material reciclado como parte da sua matéria-prima, reduzindo assim o seu custo fabricação, e a substituição do ativador tradicional a base de carbonato de bário (metal pesado), considerado tóxico, por carbonato de cálcio que não possui restrições com relação a questões ambientais. Os resultados de sua pesquisa lhe permitiram, em nível ambiental, concluir: Não foram detectados elementos considerados tóxicos e/ou venenosos nos Granulados pesquisados, sendo que os teores de Cálcio em torno de 1.500ppm (mg/L) não são considerados críticos como produto de resíduo de cementação; o teor de Bário está na casa de “partes por bilhão” (ppb), sendo que não foi detectada a presença de Cianeto, Metais Pesados e outras substâncias críticas ao meio-ambiente; as cinzas obtidas da queima dos Granulados têm baixa densidade aparente, resultando em menor custo para descarte junto aos Aterros Sanitários, isto porque o preço para o descarte é baseado no peso do material rejeitado.

## **Vantagens e desvantagens da cementação sólida**

### **Vantagens**

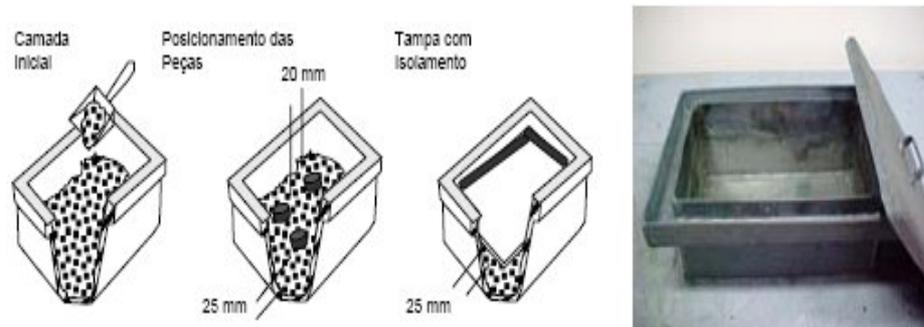
- ✓ Pode utilizar uma maior variedade de fornos, pois não exige o uso de uma atmosfera preparada;
- ✓ É eficiente e econômico para o processamento de pequenos lotes de peças ou para peças de grandes dimensões;
- ✓ Exige menor experiência do operador;
- ✓ Diminui a tendência ao empenamento das peças devido ao fato delas se apoiarem bem na mistura carburante sólida;
- ✓ O resfriamento das peças, a partir da temperatura de cementação é lento, o que pode apresentar uma vantagem para peças que devam ser submetidas a uma usinagem de acabamento depois da cementação e antes da têmpera.

### **Desvantagens**

- ✓ Não é tão limpo, quanto aos outros métodos;
- ✓ Não é recomendável para a produção de camadas cementadas finas, que devam ser controladas dentro de tolerâncias estreitas;
- ✓ Não é o melhor método para ter-se um controle preciso do carbono superficial e do gradiente de carbono;
- ✓ Não é adequado para têmpera direta, pois há dificuldade de desempacotar as peças.
- ✓ Não fornece o grau de flexibilidade no controle das condições de carbonetação, como é possível obter na cementação a gás;
- ✓ O peso da mistura carburante e das caixas de cementação reduz as velocidades de aquecimento e resfriamento, necessitando-se, em consequência, mais tempo para a operação.
- ✓ A profundidade de penetração do carbono pode atingir 2mm ou mais; como o processo é de difícil controle, não se pode forçar a obtenção de camadas cementadas em torno de 6mm, devido à quase impossibilidade de ter-se uma camada uniforme (CHIAVERINI, 1986).

Nas Figuras 3 e 4, respectivamente, são mostrados preenchimento da caixa de cementação e um forno específico para cementação sólida, enquanto que a Figura 5 representa as reações que acontecem no interior da caixa durante o processo.

O material das caixas: aço carbono revestida de alumínio > aço inox > aço C.



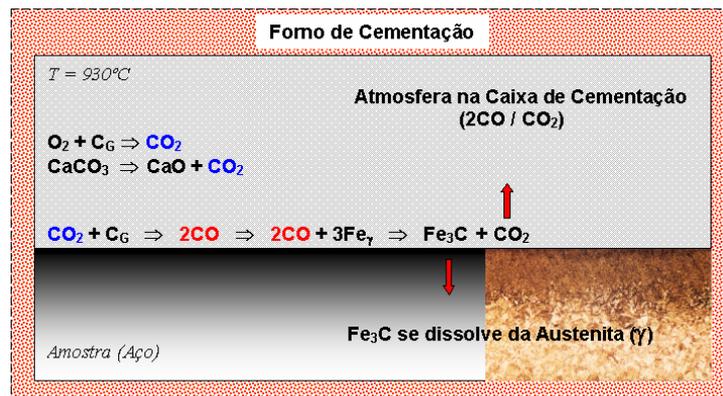
**Figura 3 – Preenchimento da caixa de cementação com material cementante.**

Fonte: <http://www.ifba.edu.br/metalografia/arq/termoquimicos.pdf>. Acesso em 8/5/2012.



**Figura 4 – Forno industrial Jung TT 200.**

Fonte: LOPES, 2009.



**Figura 5 – Reações no interior da caixa de cementação.**

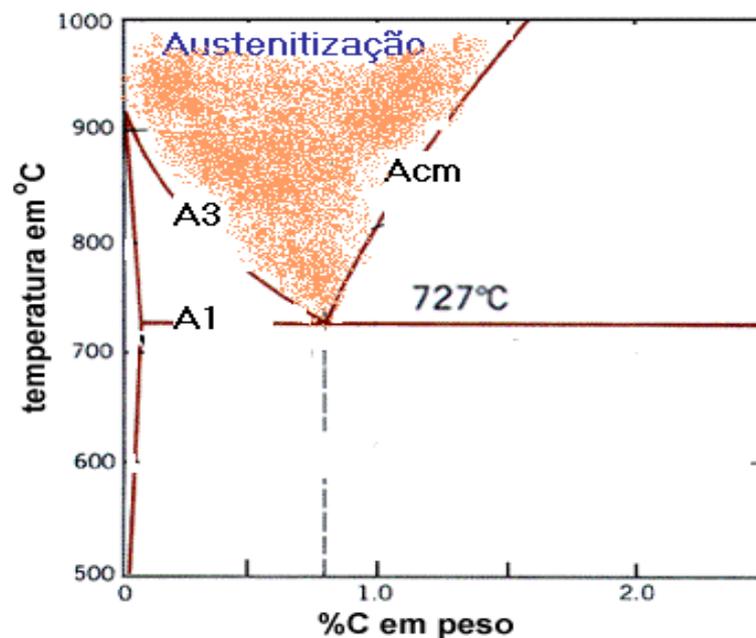
Fonte: LOPES, 2009.

A cementação sólida tem, entre outros, os aspectos positivos da simplicidade, do baixo custo dos dispositivos e materiais, da menor tendência ao empenamento devido ao apoio integral da peça no meio sólido. Entretanto, é um método pouco prático para produção

em larga escala, tem pouca flexibilidade, não há controle preciso de temperatura e de profundidade da camada.

**Cementação líquida:** Consiste em manter o aço em um banho de sal fundido em uma temperatura acima de  $A_1$  (temperatura crítica) visualizada na figura 6. A profundidade da camada cementada depende da composição do banho e, principalmente, da temperatura utilizada (SILVA; MEI, 2010).

Atualmente a cementação líquida, em banho de cianeto, representa 65 % dos processos utilizados no mundo, sendo que no Brasil o emprego do Cianeto representa aproximadamente 85 % dos processos comerciais. Dentre os maiores problemas relacionados ao meio-ambiente, destacamos a grande formação de resíduos sólidos, maior emissão de poluentes gasosos e a elevada toxicidade dos efluentes industriais (BAUMGARTEN 2003).



**Figura 6 – Diagrama mostrando a zona crítica do diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C.**

Fonte: O autor, 2013.

A composição do sal fundido é variável e está indicada na Tabela 1.

**Tabela 1 – Composições de Banhos de Sal para Cementação Líquida.**

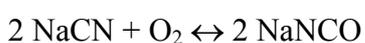
Constituinte	Composição do banho, %	
	Camada de pequena espessura Baixa temperatura (840° a 900°C)	Camada de grande espessura Alta temperatura (900° a 955°C)
Cianeto de sódio	10 a 23	6 a 16
Cloreto de bário	0 a 40	30 a 35
Outros sais alcalinos	0 a 10	0 a 10
Cloreto de potássio	0 a 25	0 a 20
Cloreto de sódio	20 a 40	0 a 20
Carbonato de sódio	30 max	30 max
Aceleradores de outros compostos de metais alcalino-ferrosos	0 a 5	0 a 2
Cianeto de sódio	1 max	0,5 max

Fonte: Apostila da ABM.

Existe uma superposição de composições do banho para os dois tipos de camadas expostas na tabela acima. De modo geral, um tipo de banho se distingue do outro mais pela temperatura de operação do que pela composição, de maneira que as expressões “baixa temperatura” e “alta temperatura” são mais usuais. Algumas vezes, para efeitos específicos, a faixa de temperatura para banhos de “baixa temperatura”, é estendida para 790° a 915°C. A espessura das camadas cementadas para banhos de baixa temperatura varia de 0,08 a 0,8mm.

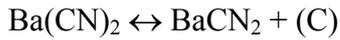
Segundo Spim (2002), o mecanismo da cementação com banhos de baixa temperatura é complexo, devido ao número de produtos finais e intermediários que se formam.

Algumas das reações que ocorrem na Cementação Líquida em Banhos para Baixa Temperatura:



Os banhos de alta temperatura, operados a temperaturas entre 900° e 955°C, produzem camadas cementadas de profundidade maior: entre 0,5 e 3,0mm. Operações acima de 955°C resultam em uma rápida penetração de carbono, mas comprometendo a qualidade do banho, assim como uma grande deterioração do equipamento (SPIM, 2002).

Nas operações com banhos de alta temperatura, a principal reação é:



### **Vantagens e desvantagens da cementação líquida:**

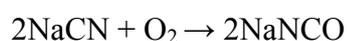
#### **Vantagens**

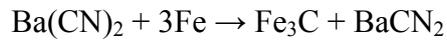
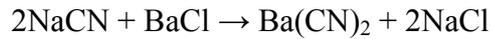
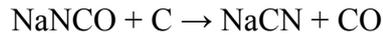
- ✓ Rapidez de operação, permitindo a obtenção de apreciáveis profundidades de penetração, em tempo relativamente mais curto que processo a gás;
- ✓ Fácil colocação das peças no interior do banho, suspensas por cestas ou ganchos;
- ✓ Menor possibilidade de empeno das peças;
- ✓ Supressão do tempo de pré-aquecimento das peças, as quais entram diretamente em contato com a massa líquida na temperatura desta, não necessitando mais do que poucos minutos para atingir a temperatura do banho;
- ✓ Possibilidade de operação contínua, pela colocação ou retirada das peças, enquanto outras ainda estão em tratamento;
- ✓ Maior controle da profundidade de penetração;
- ✓ Maior facilidade de produzir-se cementação localizada;
- ✓ Supressão da limpeza posterior, salvo no caso da têmpera em óleo; no caso da têmpera direta, não há qualquer vestígio de casca de óxido.

#### **Desvantagens**

- ✓ Processo extremamente perigoso, pois os cianetos são extremamente venenosos;
- ✓ Os fornos exigem sistema de exaustão, pois os cianetos não podem ser dispersos no ambiente.
- ✓ Deve-se evitar contato com os sais tornando o processo de difícil operação.
- ✓ Neutralização dos banhos via processamento químico, após um determinado período de operação.

Dentre as várias reações que ocorrem no banho líquido, as mais críticas em termos de geração de resíduos tóxicos, são a formação de cianamidas e cianatos.





Como se pode observar, através das reações, anteriormente equacionadas, o sal fundido contém cianeto de sódio (NaCN) e cianato de sódio (NaCNO), conferindo à camada endurecida apreciável quantidade de nitrogênio, que pode formar nitretos que irão aumentar a resistência ao desgaste, reduzindo o amolecimento durante os tratamentos térmicos, como o revenimento.

Banhos para baixas temperaturas são indicados para camadas mais finas (0,13 a 0,25mm).

Os principais Resíduos Tóxicos, resultantes da Cementação Líquida, são:

$\text{Na}_2\text{CN}_2$  – Cianamida de sódio NaCN – Cianeto de sódio

$\text{BaCN}_2$  – Cianamida de bário  $\text{Ba}(\text{CN})_2$  – Cianeto de bário

NaNCO – Cianato de sódio.

A Figura 7 apresenta uma peça sendo retirada do banho de cementação, onde se observa o líquido a base de cianeto, cianato e cianamidas escorrendo pela superfície das mesmas. Parte considerável deste sal tóxico permanece aderida a superfície do material e dispositivo, sendo dissolvido posteriormente na água ou óleo de têmpera (Figura 8).



**Figura 7 – Peças retiradas do banho de sal.**

Fonte: O autor, 2013.

Com permissão da Temperaço Rio.



**Figura 8 – Peças sendo temperadas, após cementação.**

Fonte: O autor, 2013.

Com permissão da Temperaço Rio.

Seguindo-se a norma ABNT NBR 10.004, que trata da classificação de resíduos sólidos, “todos os sais usados em tratamentos térmicos, incluindo sobras de respingos, borra, produtos de varredura do piso, além dos resíduos da evaporação da água de têmpera e lavagem dos componentes tratados, são classificados como Resíduos Perigosos Classe 1” (ABNT, 1987; HEF, 1989). O projeto de norma 1:63.04-001 estabelece as condições mínimas necessárias para o armazenamento temporário destes resíduos. A seguir apresentamos as principais exigências da norma com relação ao armazenamento provisório:

- Os *containers* e/ou tambores devem ser armazenados, preferencialmente, em áreas cobertas, bem ventiladas e os recipientes colocados sobre base de concreto ou outro material que impeça a lixiviação e a percloração de substâncias para o solo e águas subterrâneas. A área deve ainda possuir um sistema de drenagem e captação de líquidos contaminados para que sejam posteriormente tratados. Os *containers* e tambores devem ser adequadamente rotulados de modo a possibilitar uma rápida identificação dos resíduos armazenados.
- Os tambores devem ser de chapa metálica ou material plástico, com capacidade máxima de 250 litros. Para facilitar o tratamento posterior recomenda-se que os sais e resíduos sejam guardados na forma de grânulos com dimensão máxima do punho. Os resíduos contendo cianetos e cloretos (tóxicos) devem ser armazenados separadamente daqueles contendo nitritos, nitratos e hidróxidos (oxidantes e corrosivos).
- Os recipientes contendo os resíduos devem estar sempre fechados, exceto por ocasião da manipulação dos resíduos, seja adição ou remoção; um *container* e/ou tambor contendo

resíduos perigosos não deve ser aberto, manuseado ou armazenado de modo a possibilitar o vazamento do produto ou ainda rompimento ou dano ao recipiente.

- A instalação/empresa deve possuir um registro de sua operação, que deverá ser mantido até o fim de sua vida útil incluindo o período de encerramento das atividades.
- Antes do descarte, isto é, envio para um aterro sanitário credenciado, deverá ser enviada uma amostra significativa do material armazenado a um Laboratório especializado, que deverá classificar o material segundo as normas ABNT NBR 10.004, NBR 10.005 e NBR 10.006, definindo seu enquadramento como material tóxico perigoso (Classe 1).

Devido à simplicidade de execução da cementação líquida, intensos esforços vêm sendo aplicados nos últimos anos visando o desenvolvimento de um processo que utilize sais neutros fundidos, isentos de cianeto como agente ativador.

Baumgarten (2003) destaca em seu trabalho, duas linhas de produtos apresentadas recentemente ao mercado; a primeira denominada PURE ASE®, emprega uma base de sal de cloretos (44% NaCl + 56% KCl) e grafite especial em pó como agente ativador. Esta mistura de cloreto-grafite não é tóxica e produz uma camada cementada isenta de nitrogênio. Componentes tratados neste banho podem ser diretamente resfriados em sais a base de nitrito e nitrato (martêmpera), sem os riscos de reação explosiva que são decorrentes da reação entre o cianeto/nitrito/nitrato. A Tabela 2 apresenta dados técnicos referentes ao banho Pure Case® elaborado pela empresa Heatbath Corporation.

**Tabela 2 – Propriedades do banho Pure Case®**

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Ponto de fusão, °C	663
Temperatura de trabalho, °C	954 – 982
Calor Específico, J/Kg	
Sólido	960
Líquido	1050
Calor de fusão, Kj/Kg	414
Densidade a 954 °C, g/cm <sup>3</sup>	1,44

Fonte: BAUMGARTEN, 2003.

O novo processo desenvolvido pela Heatbath apresenta alguns inconvenientes técnicos como, a temperatura de trabalho e metodologia de início de operação do banho. Para ativar um banho Pure Case®, deve-se inicialmente fundir a mistura de sais de cloreto a uma temperatura mínima de 954°C, aguardando sua completa fusão e estabilização. A seguir, faz-

se a adição gradual por imersão do aditivo de grafite, até que se forme uma camada superficial entre 15 a 25mm de espessura. Uma vez que se faz necessária a dissolução do grafite no banho, para obtenção do potencial de carbono, deve-se aguardar um tempo de 2 horas para o início do processo de tratamento térmico. Ao longo de todo o processo de cementação, sempre deverá haver uma camada de grafite sobre o banho, objetivando evitar a oxidação do mesmo (BAUMGARTEN, 2003).

Um segundo produto também desenvolvido pela empresa Heatbath Corporation, denominado NO-CY®, também se propõe ao processo de cementação líquida sendo completamente isento de cianeto. Utiliza uma mistura de sais de cloreto e carbonato, além de partículas de grafite especial e um sistema de agitação mecânica. As reações químicas ainda não são bem conhecidas, porém sabe-se que há a formação de monóxido de carbono (CO) dissolvido, em função da reação entre as partículas de grafite, o carbonato e oxigênio (O<sub>2</sub>). A faixa de temperatura de operação está entre 900°C a 955°C, não sendo recomendadas temperaturas inferiores a 870°C por favorecer a descarbonetação do aço. Segundo a literatura, o teor de carbono na superfície tende a ser um pouco menor ao obtido nos processos a base de cianeto, evitando a formação da austenita retida e não afetando a dureza final do componente tratado. Uma vez que no processo NO-CY® não há a difusão de nitrogênio (N), peças cementadas e resfriadas lentamente apresentam melhor usinabilidade favorecendo esta operação de fabricação.

Algumas considerações finais a serem destacadas na cementação líquida:

- Os banhos líquidos de cementação devem ter uma cobertura, a qual pode ser obtida pela adição de grafita de baixo teor de sílica no banho fundido;
- As peças devem ser introduzidas limpas e secas;
- No caso de aço liga, recomenda-se têmpera em banho de sal quente a mais ou menos 180°C. Neste caso, entretanto, de forma geral, há necessidade de efetuar um novo reaquecimento para nova têmpera, para prevenir a formação de austenita residual (800°C);
- A profundidade de cementação que pode ser obtida com banhos de sal, varia com a sua composição, com o tempo de operação e com a temperatura do banho, podendo-se atingir, em 3 a 4 horas, cerca de 1,5mm. Geralmente, os tempos necessários são mais curtos que nos outros processos de cementação;

- Em tempos mais curtos, 1 a 2 horas, obtém-se, com relativa facilidade, profundidade de cementação de cerca de 0,5mm, apresentando um teor de carbono de 0,70% a 1,0% de C, com cerca de 0,2% de nitrogênio, sendo este último concentrado, principalmente, na superfície do aço.

Nas Figuras 9 e 10, são mostrados dois tipos de fornos usados nas indústrias de tratamento térmico.



**Figura 9 – Forno para cementação líquida – com aquecimento externo**

Fonte: [http://www.slideshare.net/nel\\_mota](http://www.slideshare.net/nel_mota).



**Figura 10 – Forno para cementação líquida – com aquecimento interno**

Fonte: [http://www.slideshare.net/nel\\_mota](http://www.slideshare.net/nel_mota).

**Cementação gasosa:** Segundo SILVA; MEI (2010), este processo consiste em se colocar a peça a ser cementada em um forno com atmosfera de potencial de carbono controlado. Quando uma peça é submetida a uma atmosfera cementante, sua superfície de contato

poderá ter a percentagem em massa de C na austenita alterada. Este percentual de C na superfície da peça é denominado potencial de carbono da atmosfera (TEIXEIRA, 2009).

O potencial de C está diretamente ligado à sua atividade nesta atmosfera e a temperatura em que o processo ocorre.

São empregados o gás natural (80 a 90% de CH<sub>4</sub> e 10 a 20% de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), o propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), o butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) e mais recentemente, no Brasil, o álcool etílico volatizado (C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>OH) (SILVA; MEI, 2010). Outros gases, denominados “Gás Veículo”, são empregados para diluir o gás cementante, mantendo uma pressão positiva no forno. São formados a partir da mistura dos seguintes gases:

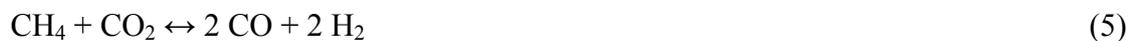
N<sub>2</sub> (40 a 97%); CO (2 a 35%); CO<sub>2</sub> (0 a 5%); H<sub>2</sub> (1 a 40%); CH<sub>4</sub>(0 a 1%).

Segundo Teixeira (2009) estima-se que simultaneamente ocorram aproximadamente 180 reações químicas. As principais e mais importantes para o processo são:

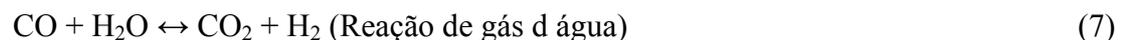
a) Reações de dissociação de carbono;



b) Reações de hidrocarbonetos;



O potencial de carbono é controlado pelas relações CO/CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, as quais são componentes da reação heterogênea água-gás:



A cementação em atmosfera endotérmica consiste na mistura de agentes carburantes como CO e CH<sub>4</sub> com agentes descarburantes como CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. A razão entre eles determinará o potencial de carburação. A força deste potencial se dará pela diferença entre o potencial de carbono na atmosfera e o potencial de carbono na superfície do aço.

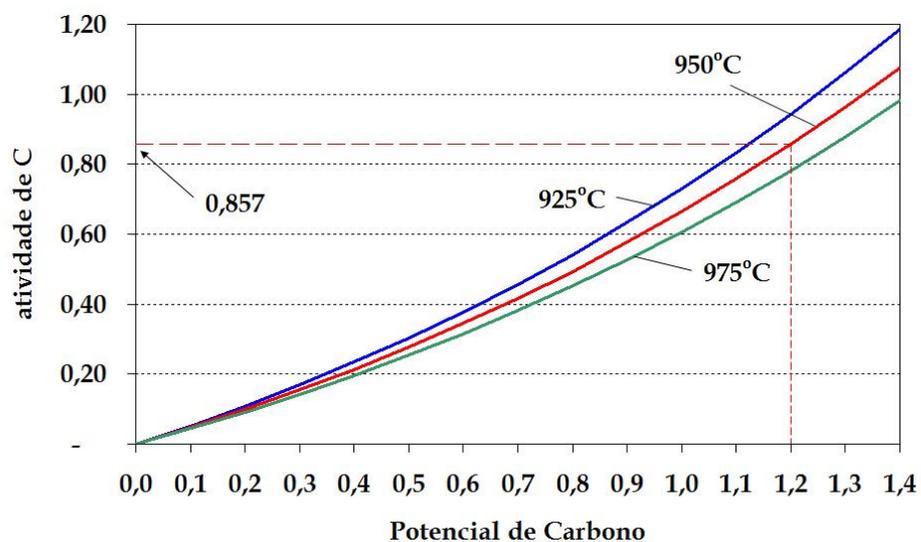
Com a diluição do gás cementante o processo de carburação e descarburação são influenciados pelas reações das equações 1, 4 e 7 (TEIXEIRA, 2009).

Quando uma peça é submetida a uma atmosfera cementante, sua superfície de contato poderá ter a percentagem em massa de C na austenita alterada. Este percentual de C na superfície da peça é denominado potencial de carbono da atmosfera. O potencial de C está diretamente ligado à sua atividade nesta atmosfera e a temperatura em que o processo ocorre.

Este potencial deve ser dimensionado de maneira a possibilitar que a atividade Raoultiana do C seja menor que um, pois, ultrapassado este valor a grafita se formará como fase estável, ou seja, haverá a precipitação de C.

O controle dos agentes descarburantes é de suma importância para o balanceamento das reações e para a manutenção do potencial de carbono da atmosfera (TEIXEIRA, 2009).

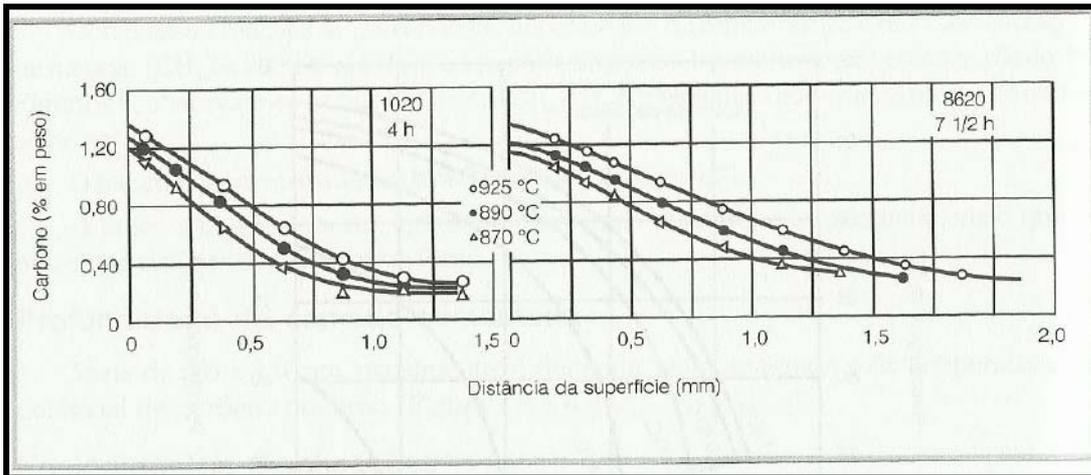
Através da análise do gráfico da Figura 11, conclui-se que quando fixado o potencial de C, a atividade de C decrescerá com o aumento da temperatura. Da mesma forma, ao fixar a atividade de C o potencial de C aumentará com o aumento da temperatura.



**Figura 11 – Atividade do C em função da temperatura e potencial de C da atmosfera.**

Fonte: TEIXEIRA, 2009.

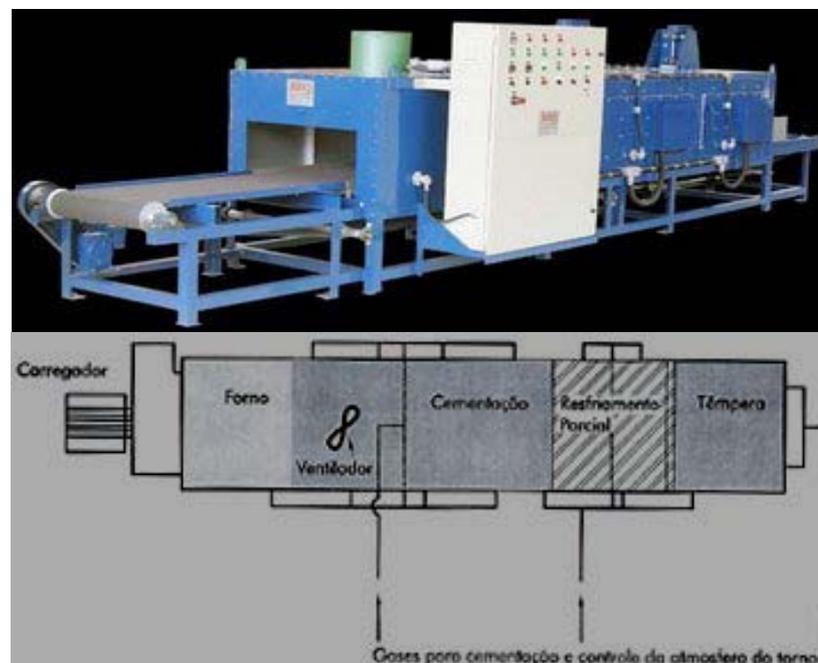
Segundo SILVA; MEI (2010) a profundidade da camada cementada no processo gasoso varia, usualmente, de 0,5 a 2,0mm, e depende, além do tempo e da temperatura, do potencial de carbono do forno. A Figura 12 mostra o gradiente de carbono para os aços SAE 1020 e 8620.



**Figura 12 – Gradiente de carbono para os aços 1020 e 8620 após cementação a gás ( $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ), em diferentes temperaturas.**

Fonte: SILVA; MEI, 2010.

Embora os equipamentos para cementação gasosa sejam variados, estes podem ser subdivididos para processos contínuos e intermitentes. Segundo Silva; Mei (2010), o processo contínuo é indicado para alto volume de produção de peças semelhantes e com camada cementada menor que 2mm. A Figura 13 mostra um esquema de um forno para produção contínua.



**Figura 13 – Equipamento para cementação gasosa e têmpera posterior com produção contínua.**

Fonte: Adaptado de Silva e Mei, 2010.

## **Vantagens e desvantagens da cementação gasosa**

### **Vantagens**

- ✓ Cementação mais limpa que a por via sólida;
- ✓ Tratamento mais completo (segurança, controle e técnica de operação);
- ✓ Permite mais facilmente a cementação de peças delicadas;
- ✓ Melhor controle do teor de carbono e da espessura da camada cementada (0,5 a 2,0mm);
- ✓ Possibilita têmpera direta (Evitando o resfriamento).

### **Desvantagens**

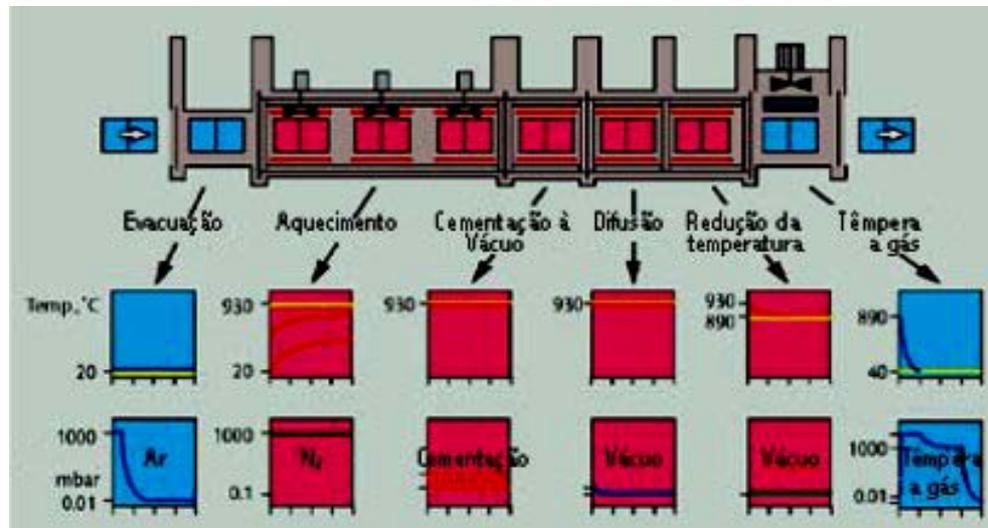
- ✓ Custo alto do equipamento, se comparado com a cementação sólida;
- ✓ Requer operário habilitado.

### **Cementação a Vácuo**

Processo similar a cementação gasosa só que os gases são evacuados e preenchidos com gás nitrogênio. Chiaverini (1986) afirma ser um processo relativamente novo, pois foi introduzido em escala comercial em 1970. O aço é austenitizado em uma câmara de vácuo entre 0,1 e 0,5torr, com posterior injeção de gás cementante (metano ou propano, puros ou misturados) em uma pressão parcial entre 10 e 200torr, mantido entre 1 e 3 horas na temperatura de austenitização para possibilitar a difusão do carbono. Então, em seguida, a câmara é evacuada e preenchida com o nitrogênio, sendo o aço temperado imediatamente em óleo. A amônia ( $\text{NH}_3$ ) pode ser adicionada ao gás cementante se for necessária à introdução de nitrogênio na camada endurecida.

O processo a vácuo oferece uma melhor uniformidade, além de um controle mais preciso da camada cementada em relação à cementação gasosa, evitando a oxidação intergranular. Por ser um processo a vácuo, as peças ficam muito mais limpas ao final que na cementação gasosa. A emissão de gases poluentes é minimizada em relação ao processo gasoso, reduzindo os eventuais problemas ambientais. O único inconveniente é o seu alto custo, por conta do equipamento.

Os fornos são isolados por grafita (com resistores de grafita) ou cerâmicos (isolantes cerâmicos e resistores de carboneto de silício).



**Figura 14 – Esquema de um forno a vácuo.**

Fonte: BAUMGARTEN, 2003.



**Figura 15 – Forno de câmara simples.**

Fonte: BAUMGARTEN, 2003.



**Figura 16 – Forno de câmara dupla.**

Fonte: BAUMGARTEN, 2003.

### **Cementação Iônica ou a Plasma**

Este processo, ainda recente, tem como objetivo melhorar a dureza superficial e resistência à corrosão em aços, ampliando suas aplicações. É realizado com a introdução de uma mistura de gases contendo íons positivos e negativos, além de partículas neutras. Segundo SILVA; MEI (2010), a cementação com plasma usa a tecnologia de descargas luminescentes para fornecer íons de carbono para a superfície da peça.

A Figura 17 apresenta um forno de cementação marca NDK Incorporated, Modelo PMF-754.



**Figura 17 – Forno de cementação a plasma marca NDK Incorporated, Modelo PMF-754.**  
Fonte: BAUMGARTEN, 2003

A aplicação industrial de tratamentos termoquímicos assistidos por plasma tem apresentado considerável crescimento nos últimos anos.

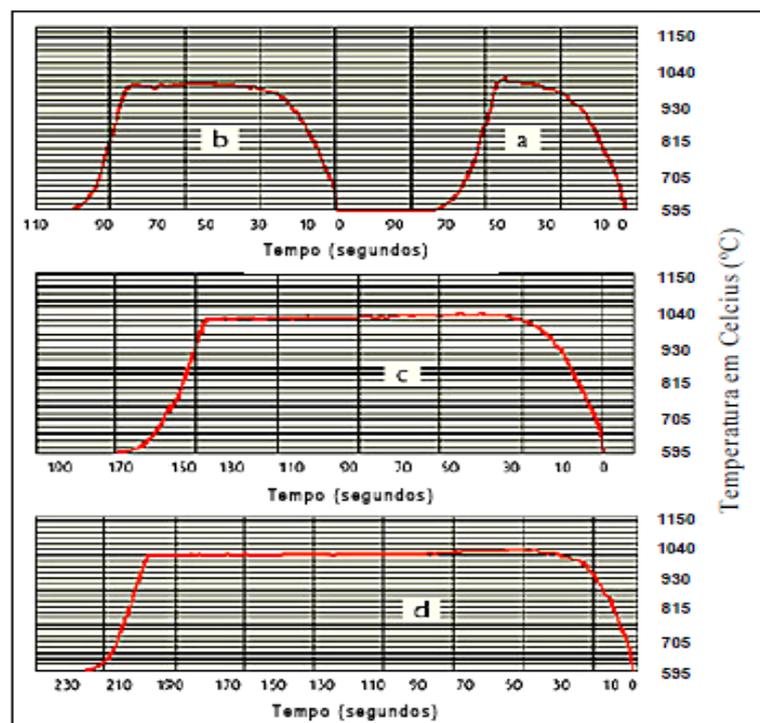
Dentre os diferentes tratamentos termoquímicos assistidos por plasma, a cementação tem mostrado bons resultados em aplicações práticas, possibilitando melhoras nas propriedades superficiais dos aços inoxidáveis por meio da difusão de carbono e/ou formação de carbonetos com os elementos de liga do metal. As propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas da camada tratada, dependem fortemente das variáveis utilizadas durante o processo, incluindo temperatura e tempo de tratamento, assim como a composição e fluxo da mistura gasosa (SCHEUER, 2011).

O processo de cementação iônica é mais rápido que o de cementação a gás. Usando-se o gás metano ( $\text{CH}_4$ ), por exemplo, na cementação a gás, irão ocorrer várias reações de decomposição:  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_2 \rightarrow \text{CH} \rightarrow \text{C}$  (ativo), que irá se dissolver no aço. Na cementação iônica, a dissociação do metano forma diretamente o carbono ativo, diminuindo o tempo do processo. Logo, a temperatura empregada pode ser aumentada para cerca de  $1040^\circ\text{C}$  em vez dos valores próximos de  $900^\circ\text{C}$  da cementação a gás, favorecendo a difusão do carbono para o interior do aço, e, com isso, aumentando o limite de solubilidade do carbono na austenita.

## Cementação por indução

É um processo desenvolvido na década de 80, que emprega as vantagens do tratamento térmico por indução em alta frequência e as características do tratamento termoquímico superficial em um único processo. Uma das principais vantagens do processo de cementação por indução, é que não há restrição quanto ao tamanho, forma, ou material do componente a ser cementado. O processo também pode ser aplicado de forma seletiva permitindo que apenas uma determinada região do componente seja endurecida. Para a cementação por indução, o componente é inicialmente imerso em um “líquido especial” contendo elevado teor de carbono e agentes ativadores a base de carbonatos. Camadas superficiais com elevado teor de carbono e profundidades variadas podem ser obtidas alterando o tipo de indutor, meio ativo e regime de processo. O processo pode ser facilmente automatizado, sendo econômico, apresentando boa reprodutibilidade e ecologicamente correto por não gerar resíduos tóxicos (TEIXEIRA, 2009).

A figura 18 apresenta vários termogramas de processos de cementação por indução, onde (a) 30 seg., (b) 60 seg., (c) 120 seg. e (d) 180 seg.



**Figura 18 – Termogramas de processos de cementação por indução**

Fonte: TEIXEIRA, 2009.

Taxas de aquecimento podem ser variadas desde 25 °C/s até 1.200 °C/s, sendo que a temperatura de cementação poderá estar entre 950°C até 1.150°C. Tais parâmetros irão controlar a microestrutura, espessura de camada, composição química e perfil de carbono na superfície tratada. Após a cementação por indução, a microestrutura da superfície poderá ser cementita pura, ledeburita, pura austenita retida estabilizada e/ou produtos de transformação austenítica (martensita, bainita e/ou perlita). O processo também pode ser aplicado na operação de restauração de carbono em superfícies descarbonetadas, permitindo a recuperação da estrutura de perlita junto à superfície dos componentes (TEIXEIRA, 2009).

## 2.2 Aços para Cementação

### Aços Carbono

- superfície resistente ao desgaste com núcleo tenaz
- 1016 / 1018 / 1019 / 1022
- peças pequenas / temperadas em água
- aplicações onde não é exigida baixa distorção.

### Aços de baixa-liga

- superfície resistente ao desgaste / núcleo resistente e dúctil
- 4023 / 5110 / 4118 / 8620 / 4620
- temperados em óleo / baixa distorção.

### Aços de média-liga

- aplicações onde é exigida menor distorção
- 4320 / 4817 / 9310

É interessante destacar que as diversas instituições normativas, nacionais ou internacionais, estabeleceram critérios de designação para os diversos tipos de aços utilizados na indústria. Dentre as mais importantes designações, podem ser salientadas: ABNT, AISI e SAE.

ABNT - SAE - AISI XXXX

XXXX – os dois primeiros termos se referem aos elementos de liga presentes (ou não); os dois últimos algarismos (ou três) indicam o percentual de carbono multiplicado por 100. Esta é uma forma de classificação baseada na composição química.

A tabela 3 mostra a designação adotada pela AISI e SAE. Nesse sistema, as letras XX ou XXX correspondem a cifras indicadoras dos teores de carbono. Assim, por exemplo, nas designações AISI-SAE, a classe 1023 significa aço-carbono com 0,23% de carbono em média.

**Tabela 3 – Sistemas SAE e AISI de classificação dos aços.**

Numerais e dígitos*	Tipo de aço e conteúdo nominal da liga <sup>b</sup>	Numerais e dígitos	Tipo de aço e conteúdo nominal da liga	Numerais e dígitos	Tipo de aço e conteúdo nominal da liga
<b>Aços carbono</b>		<b>Aços de níquel-cromo-molibdênio</b>		<b>Aços de cromo</b>	
10XX(a)	Carbono comum (Mn 1,00% máx)	43XX	Ni 1,82; Cr 0,50 e 0,80; Mo 0,25	50XXX	Cr 0,50
11XX	Resulfurizado			51XXX	Cr 1,02
12XX	Resulfurizado e refosforizado	43BVXX	Ni 1,82; Cr 0,50; Mo 0,12 e 0,25; V 0,03 mín	52XXX	Cr 1,45
15XX	Carbono comum (faixa máxima Mn — 1,00 a 1,65%)	47XX	Ni 1,05; Cr 0,45; Mo 0,20 e 0,35		
	<b>Aços de manganês</b>			61XX	Cr 0,60, 0,80 e 0,95; V 0,10 e 0,15 mín
13XX	Mn 1,75	81XX	Ni 0,30; Cr 0,40; Mo 0,12		
	<b>Aços de níquel</b>	86XX	Ni 0,55; Cr 0,50; Mo 0,20		<b>Aço de tungstênio-cromo</b>
		87XX	Ni 0,55; Cr 0,50; Mo 0,25	72XX	W 1,75; Cr 0,75
23XX	Ni 3,50	88XX	Ni 0,55; Cr 0,50; Mo 0,35		
25XX	Ni 5,00	93XX	Ni 3,25; Cr 1,20; Mo 0,12		<b>Aços de silício-manganês</b>
	<b>Aços de níquel-cromo</b>	94XX	Ni 0,45; Cr 0,40; Mo 0,12	92XX	Si 1,40 e 2,00; Mn 0,65, 0,82 e 0,85; Cr 0,00 e 0,65
31XX	Ni 1,25; Cr 0,65 e 0,80	97XX	Ni 0,55; Cr 0,20; Mo 0,20		
32XX	Ni 1,75; Cr 1,07	98XX	Ni 1,00; Cr 0,80; Mo 0,25		
33XX	Ni 3,50; Cr 1,50 e 1,57				<b>Aços de baixa liga e de alta resistência</b>
34XX	Ni 3,00; Cr 0,77	46XX	Ni 0,85 e 1,82; Mo 0,20 e 0,25	9XX	Várias classificações SAE
	<b>Aços de molibdênio</b>	48XX	Ni 3,50; Mo 0,25		
40XX	Mo 0,20 e 0,25			XXBXX	B denota aço com boro
44XX	Mo 0,40 e 0,52				
	<b>Aços de cromo-molibdênio</b>				<b>Aços de chumbo</b>
41XX	Cr 0,50, 0,80 e 0,95; Mo 0,12, 0,20, 0,25 e 0,30	50XX	Cr 0,27, 0,40, 0,50 e 0,65	XXLXX	L indica aço com chumbo
		51XX	Cr 0,80, 0,87, 0,92, 0,95, 1,00 e 1,05		

Fonte: Adaptada de SHACKELFORD, 2008.

A maior quantidade de aço consumida pela indústria pertence à categoria dos aços carbono. Isto se deve ao baixo custo, em relação aos aços ligados e à ampla gama de propriedades que pode ser obtida mediante variação do teor de carbono e do estado de fornecimento (encruado, temperado etc.).

Os aços de baixo carbono, normalmente são aplicados em situações que envolvam exigências quanto à soldabilidade, pois o baixo teor de carbono é necessário para evitar a formação de martensita que ocorre no resfriamento posterior à soldagem. Estes aços, quando combinados aos elementos de liga e cementados, são aplicados quando se necessita combinar resistência ao desgaste (dureza superficial) com tenacidade (no núcleo), tais como

engrenagens, pinos, eixos e correntes transportadoras e de içamento, como, por exemplo, os aços 8620 e 4320.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, por intermédio das normas NBR 6006 (102) classifica os aços-carbono e os de baixo teor em liga segundo os critérios adotados pela AISI e SAE.

### 2.3 Difusão Atômica

Durante a produção e a aplicação, a composição química dos materiais da engenharia normalmente é modificada como resultado do movimento dos átomos, ou difusão no estado sólido. Em certos casos, átomos são realocados dentro da microestrutura do material. Já em outros, são acrescentados a partir do ambiente do material, ou ainda, os átomos do material podem ser lançados para o ambiente (SHACKELFORD, 2008).

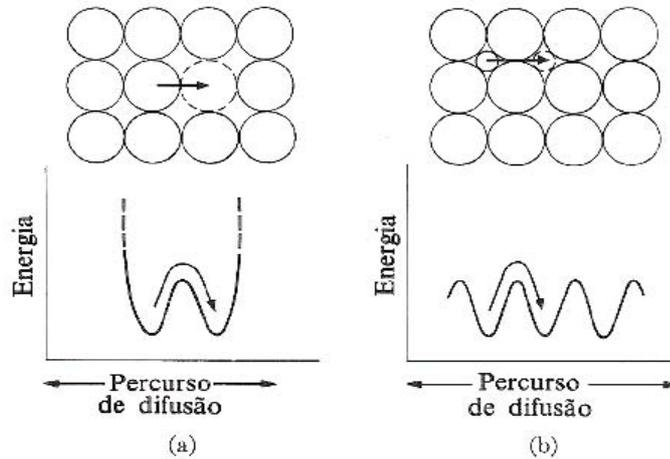
Difusão pode ser definida como sendo o mecanismo pelo qual a matéria é transportada através da matéria. Os átomos, em gases, líquidos e sólidos, estão em movimento constante e migram ao longo do tempo. Nos gases os movimentos atômicos são relativamente rápidos, como odores culinários ou do fumo. Nos líquidos, os movimentos atômicos são mais lentos que nos gases, como no movimento da tinta em água e finalmente nos sólidos, os movimentos atômicos são dificultados devidos à ligação dos átomos em posição de equilíbrio. Contudo as vibrações térmicas que ocorrem nos sólidos permitem o movimento de alguns átomos. (CHIAVERINI, 1986).

Van Vlack (1970) cita que durante o aumento de temperatura, enquanto os átomos vibram mais energeticamente, uma fração deles se recolocará no reticulado. Certamente, que a fração não depende somente da temperatura, mas também de quão justos os átomos estão ligados em suas posições. Nas redes cristalinas existem dois mecanismos principais de difusão atômica. Um é o mecanismo substitucional ou por lacuna e o outro é o mecanismo intersticial.

#### 2.3.1 Mecanismos de difusão do carbono

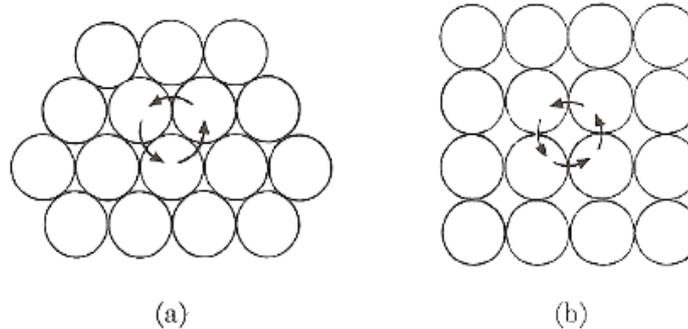
Segundo Callister (2008), a difusão é o nome dado ao fenômeno de transporte de massa através do movimento dos átomos ou íons num reticulado cristalino. Para que isto ocorra deve-se haver um espaço adjacente vazio e o átomo deve possuir energia suficiente para quebrar as ligações atômicas com seus átomos vizinhos. A movimentação atômica nos

sólidos pode ocorrer por meio do mecanismo de vazios (Figura 19a), mecanismo intersticial (Figura 19b) ou por movimentos em cristais sem defeitos pontuais (Figuras 19a e 19b).



**Figura 19 – Termogramas de processos de cementação por indução**

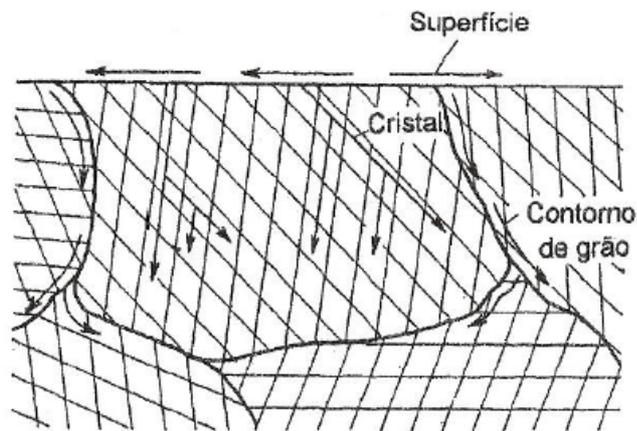
Fonte: TEIXEIRA, 2009.



**Figura 20 – Mecanismo em anel. Anel de três átomos (a) e anel de quatro átomos (b)**

Fonte: VAN VLACK, 1970, p. 94.

Somente ocorrerá difusão se houver gradiente de potencial químico. A zero absoluto ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) os átomos ficam estáticos e com o mínimo de energia. À medida que a temperatura é elevada, as vibrações térmicas dispersam estes átomos para uma posição de menor energia (VAN VLACK, 1970). A Figura 21 representa a esquematicamente a difusão na superfície externa, ao longo dos contornos de grãos e em seus interiores.



**Figura 21 – Representação esquemática da difusão no reticulado e ao longo de defeitos.**

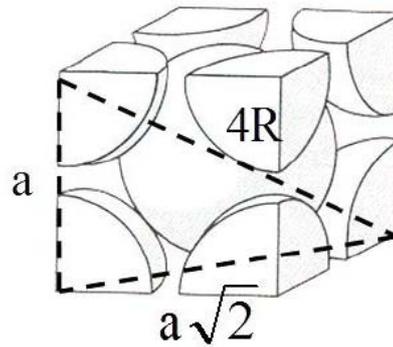
Fonte: PADILHA, 2003, p. 125

O carbono é um soluto intersticial, assim, o tipo de estrutura do ferro durante o processo de cementação é um dos fatores importantes para facilitar a difusão. A estrutura cristalina de corpo centrado (CCC) possui fator de empacotamento (FE) igual a 0,68. Segundo Van Vlack (1970), este índice para a estrutura CCC é calculado como a seguir:

$$FE_{ccc} = \frac{2 \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right)}{\left( \frac{4R}{\sqrt{3}} \right)^3} = 0,68 \quad R = \text{Raio atômico} \quad (8)$$

Significando que 32% da célula unitária são compostas de vazios. O distanciamento (a) entre centro de átomos na estrutura CCC é dada pela expressão:  $a_{cc} = 4R/3$  e está representada na figura 22. O raio (r) do maior átomo que poderá se alojar no interstício da estrutura CCC é dado pela expressão:

$$a_{ccc} = \frac{4R}{\sqrt{3}} = 2R + 2r_{ccc} \therefore r_{ccc} = \frac{\frac{4R}{\sqrt{3}} - 2R}{2} \Rightarrow r_{ccc} = 0,155R \quad (9)$$



**Figura 22 – Representação esquemática da estrutura CCC.**

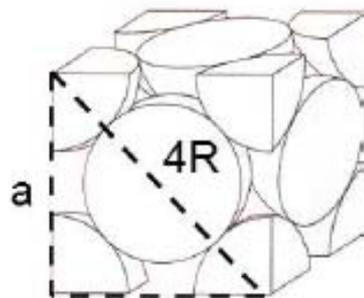
Fonte: Adaptado de Callister (2001, p. 34. *apud* TEIXEIRA, 2009).

A estrutura cristalina de face centrada (CFC) possui fator de empacotamento igual a 0,74. Segundo Van Vlack (1970), este índice para a estrutura CFC é calculado como a seguir:

$$IOV_{cfc} = \frac{4 \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right)}{(2\sqrt{2}.R)^3} = 0,74 \text{ onde } R \text{ é o raio atômico} \quad (10)$$

Isto significa que 26 % da célula unitária é composta de vazios. A distância (a) entre centro de átomos na estrutura CFC é dada pela expressão  $a_{CFC} = 2\sqrt{2}.R$  e está representada na Figura 23. O raio (r) do maior átomo que poderá se alojar no interstício da estrutura CFC é dado pela expressão:

$$a_{cfc} = 2\sqrt{2}.R = 2R + 2r_{cfc} \therefore r_{cfc} = \frac{2\sqrt{2}.R - 2R}{2} \Rightarrow r_{cfc} = 0,414.R \quad (11)$$



**Figura 23 – Representação esquemática da estrutura CFC.**

Fonte: Adaptado de Callister (2001, p. 32. *apud* TEIXEIRA, 2009).

Assim, ao ser aplicado estas duas definições para ambas as estruturas cristalinas do ferro,  $Fe_{\alpha}$  (CCC) e  $Fe_{\gamma}$  (CFC), serão obtidos os seguintes raios máximos dos átomos que poderão ser alojados nos interstícios:

$$\text{Raio atômico do } Fe_{\alpha} = 0,124 \text{ nm} \Rightarrow r_{CCC} = 0,155.R = 0,155.(0,1241) = 0,0192\text{nm}$$

$$\text{Raio atômico do } Fe_{\gamma} = 0,1270\text{nm} \Rightarrow r_{CFC} = 0,414.R = 0,414.(0,1270) = 0,0526\text{nm}$$

Conseqüentemente, apesar da estrutura CCC apresentar uma maior porcentagem de espaços vazios que a CFC, eles são menores, o que dificulta a dissolução do carbono que possui raio atômico de 0,0710nm. Mesmo que a velocidade da difusão do carbono no ferro seja maior na estrutura CCC, a ferrita pode dissolver no máximo 0,02% enquanto a austenita poderá dissolver mais.

Como exemplo, para a temperatura de 950°C a dissolução máxima de carbono na austenita será de 1,33%. Por este motivo a cementação é executada quando o ferro está com estrutura CFC (TEIXEIRA, 2009).

### 2.3.2 Difusão de carbono na austenita

O processo de cementação é controlado pela difusão do carbono através da superfície do material, sendo este muito influenciado pela temperatura, potencial de carbono do meio cementante e o tempo de processo. Baumgarten cita que a cinética de cementação pode ser, portanto, expressa através das Equações de Fick que definem o cálculo do Coeficiente de Difusão (D) (equação 12) e a sua derivada de segunda ordem conhecida como Segunda Lei de Fick que mostra o perfil de concentração de carbono em função da distância, para um dado tempo de cementação (equação 13).

$$D = D_0 (e^{-Q/RT}) \quad (12)$$

Onde D é o coeficiente de difusão;  $D_0$  é uma constante; Q é a energia de ativação para a difusão; R é a constante universal dos gases e T é a temperatura absoluta Kelvin.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (13)$$

Segundo Callister, quando são especificadas condições de contorno que possuam um sentido físico, é possível obter soluções para essa expressão (concentração em termos tanto da posição quanto do tempo).

A solução analítica da 2ª Lei de Fick para um sólido finito, aplicado ao processo de cementação pode ser escrita conforme a equação 14.

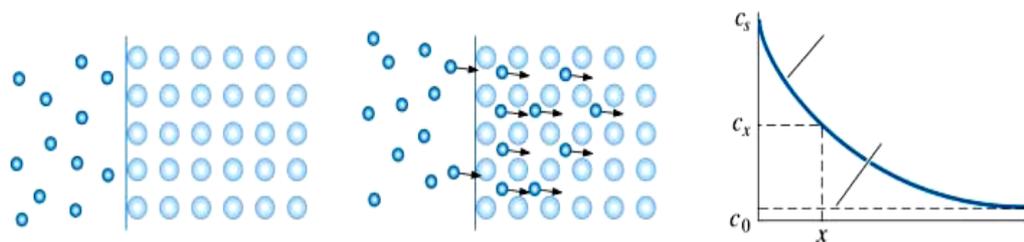
$$\left( \frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} \right) = 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (14)$$

O valor de  $C_x$  é a concentração de carbono na posição “x”,  $C_0$  é teor de carbono no núcleo do material,  $C_s$  corresponde à concentração de carbono junto à superfície,  $x$  é distância,  $D$  é o coeficiente de difusão,  $t$  é tempo de processo e “erf” indica uma “função erro” de Gauss, conforme a equação 15.

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-y^2} dy \quad (15)$$

Em que  $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$  foi substituído pela variável  $z$ .  $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$

A figura 24 esquematiza a difusão do carbono na austenita e o comportamento do perfil de concentração conforme a 2ª Lei de Fick e prevista pela equação 14 (BAUMGARTEN, 2003).



**Figura 24 – Difusão do carbono na austenita.**

Fonte: BAUMGARTEN, 2003.

A Tabela 4 apresenta em detalhes os valores calculados para o Coeficiente de Difusão do carbono no ferro gama (austenita), utilizando a equação 12. Foram considerados como valores de referência a energia de ativação  $Q = 141,5 \text{ kJ/mol}$ ,  $R = 8,314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$  e  $D_0 = 0,21 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

**Tabela 4 – Representação dos valores de Coeficiente de Difusão x Temperatura**

Temperatura ° C (°K)	Coeficiente de Difusão - D ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
870 (1.143)	$0,72 \times 10^{-7}$
880 (1.153)	$0,82 \times 10^{-7}$
890 (1.163)	$0,93 \times 10^{-7}$
900 (1.173)	$1,05 \times 10^{-7}$
910 (1.183)	$1,19 \times 10^{-7}$
920 (1.193)	$1,34 \times 10^{-7}$
930 (1.203)	$1,51 \times 10^{-7}$
940 (1.213)	$1,69 \times 10^{-7}$
950 (1.223)	$1,90 \times 10^{-7}$

Fonte: BAUMGARTEN, 2003.

Segundo Van Vlack (1970), o fator pré-exponencial é uma constante que inclui fatores independentes da temperatura, tais como a distância a ser percorrida e a frequência de vibração dos átomos.

Os valores do fator pré-exponencial e da energia de ativação diferem para cada sistema onde ocorrerá a difusão. Estes valores para alguns sistemas podem ser vistos na Tabela 5.

**Tabela 5 – Dados de difusão.**

Diffusing Species	Host Metal	$D_0(\text{m}^2/\text{s})$	Activation Energy $Q_d$		Calculated Values	
			$\text{kJ/mol}$	$\text{eV/atom}$	$T(^{\circ}\text{C})$	$D(\text{m}^2/\text{s})$
Fe	$\alpha$ -Fe (BCC)	$2.8 \times 10^{-4}$	251	2.60	500	$3.0 \times 10^{-21}$
					900	$1.8 \times 10^{-15}$
Fe	$\gamma$ -Fe (FCC)	$5.0 \times 10^{-5}$	284	2.94	900	$1.1 \times 10^{-17}$
					1100	$7.8 \times 10^{-16}$
C	$\alpha$ -Fe	$6.2 \times 10^{-7}$	80	0.83	500	$2.4 \times 10^{-12}$
					900	$1.7 \times 10^{-10}$
C	$\gamma$ -Fe	$2.3 \times 10^{-5}$	148	1.53	900	$5.9 \times 10^{-12}$
					1100	$5.3 \times 10^{-11}$
Cu	Cu	$7.8 \times 10^{-5}$	211	2.19	500	$4.2 \times 10^{-19}$
Zn	Cu	$2.4 \times 10^{-5}$	189	1.96	500	$4.0 \times 10^{-18}$
Al	Al	$2.3 \times 10^{-4}$	144	1.49	500	$4.2 \times 10^{-14}$
Cu	Al	$6.5 \times 10^{-5}$	136	1.41	500	$4.1 \times 10^{-14}$
Mg	Al	$1.2 \times 10^{-4}$	131	1.35	500	$1.9 \times 10^{-13}$
Cu	Ni	$2.7 \times 10^{-5}$	256	2.65	500	$1.3 \times 10^{-22}$

Fonte: CALLISTER, 2008.

### 2.3.3 Cálculo da cinética de cementação

Para o cálculo do tempo de cementação utiliza-se o seguinte desenvolvimento axiomático, observando as corretas unidades de medida. Empregando a solução da 2ª Lei de Fick (equação 13), obtém-se a seguinte expressão já mencionada (equação 15).

Aplicando a inversão da *função erro* na equação 7 temos,

$$\operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{c_x - c_0}{c_s - c_0}\right) = \frac{1x}{2\sqrt{Dt}} = z \quad (16)$$

Logo,

$$z = \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{c_x - c_0}{c_s - c_0}\right) \quad (17)$$

Para o cálculo da *função erro*, pode-se utilizar também a equação 8, cujos valores estão apresentados na Tabela 5 (SILVA; MEI, 2010).

**Tabela 6 – Valores da função erro.**

z	erf (z)						
0,00	0,00000	0,26	0,2869	0,52	0,5379	0,78	0,7300
0,01	0,01128	0,27	0,2934	0,53	0,5465	0,79	0,7361
0,02	0,02256	0,28	0,3079	0,54	0,5549	0,80	0,7421
0,03	0,03384	0,29	0,3183	0,55	0,5633	0,81	0,7480
0,04	0,04511	0,30	0,3286	0,56	0,5716	0,82	0,7538
0,05	0,05637	0,31	0,3389	0,57	0,5798	0,83	0,7595
0,06	0,06762	0,32	0,3491	0,58	0,5879	0,84	0,7651
0,07	0,07886	0,33	0,3593	0,59	0,5959	0,85	0,7707
0,08	0,09008	0,34	0,3694	0,60	0,6039	0,86	0,7761
0,09	0,1013	0,35	0,3794	0,61	0,6117	0,87	0,7814
0,10	0,1125	0,36	0,3893	0,62	0,6194	0,88	0,7867
0,11	0,1236	0,37	0,3992	0,63	0,6270	0,89	0,7918
0,12	0,1348	0,38	0,4090	0,64	0,6346	0,90	0,7969
0,13	0,1459	0,39	0,4187	0,65	0,6420	0,91	0,8019
0,14	0,1569	0,40	0,4284	0,66	0,6494	0,92	0,8068
0,15	0,1680	0,41	0,4380	0,67	0,6566	0,93	0,8116
0,16	0,1790	0,42	0,4475	0,68	0,6638	0,94	0,8163
0,17	0,1900	0,43	0,4569	0,69	0,6708	0,95	0,8209
0,18	0,2009	0,44	0,4662	0,70	0,6778	0,96	0,8254
0,19	0,2118	0,45	0,4755	0,71	0,6847	0,97	0,8299
0,20	0,2227	0,46	0,4847	0,72	0,6914	0,98	0,8342
0,21	0,2335	0,47	0,4937	0,73	0,6981	0,99	0,8385
0,22	0,2443	0,48	0,5027	0,74	0,7047	1,00	0,8427
0,23	0,2550	0,49	0,5117	0,75	0,7112	1,10	0,8802
0,24	0,2657	0,50	0,5205	0,76	0,7175	1,20	0,9103
0,25	0,2763	0,51	0,5292	0,77	0,7238	1,50	0,9661

Fonte: SILVA; MEI, 2010.

BAUMGARTEN (2003), mostra em seu trabalho o cálculo do tempo efetivo de cementação, considerando uma determinada profundidade “x” a partir da superfície, empregando-se a equação 18.

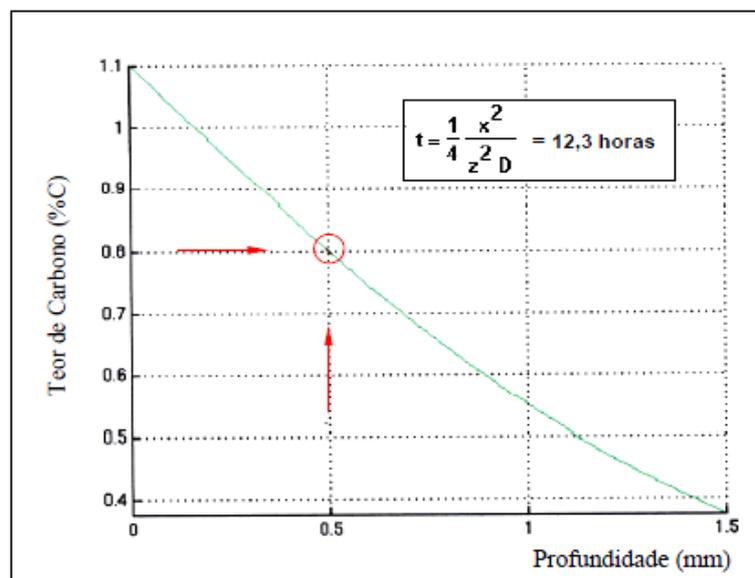
$$t = \frac{1x^2}{4z^2D} \quad (18)$$

Aplicando as equações 17 e 18, calcula-se o tempo (t) necessário para atingir, por exemplo, 0,80 % Carbono a uma profundidade de 0,50 mm, considerando os valores do coeficiente de difusão  $D = 1,51 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $C_x = 0,80 \% \text{ C}$ ,  $C_0 = 0,20$  e  $C_s = 1,1 \% \text{ C}$ , isto a uma temperatura de 930 °C. Os resultados são assim calculados:

$$z = \text{erfinv} \left( 1 - \frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} \right) = \text{erfinv} \left[ 1 - \frac{0,80 - 0,20}{1,10 - 0,10} \right] = \text{erfinv} (0,333) = \underline{0,3046}$$

$$t = \frac{1}{4} \frac{x^2}{z^2 D} = \frac{0,5^2}{4 \cdot 0,3046^2 \cdot 1,51 \cdot 10^{-5}} = 44.639 \text{ segundos} = \underline{12,3 \text{ horas}}$$

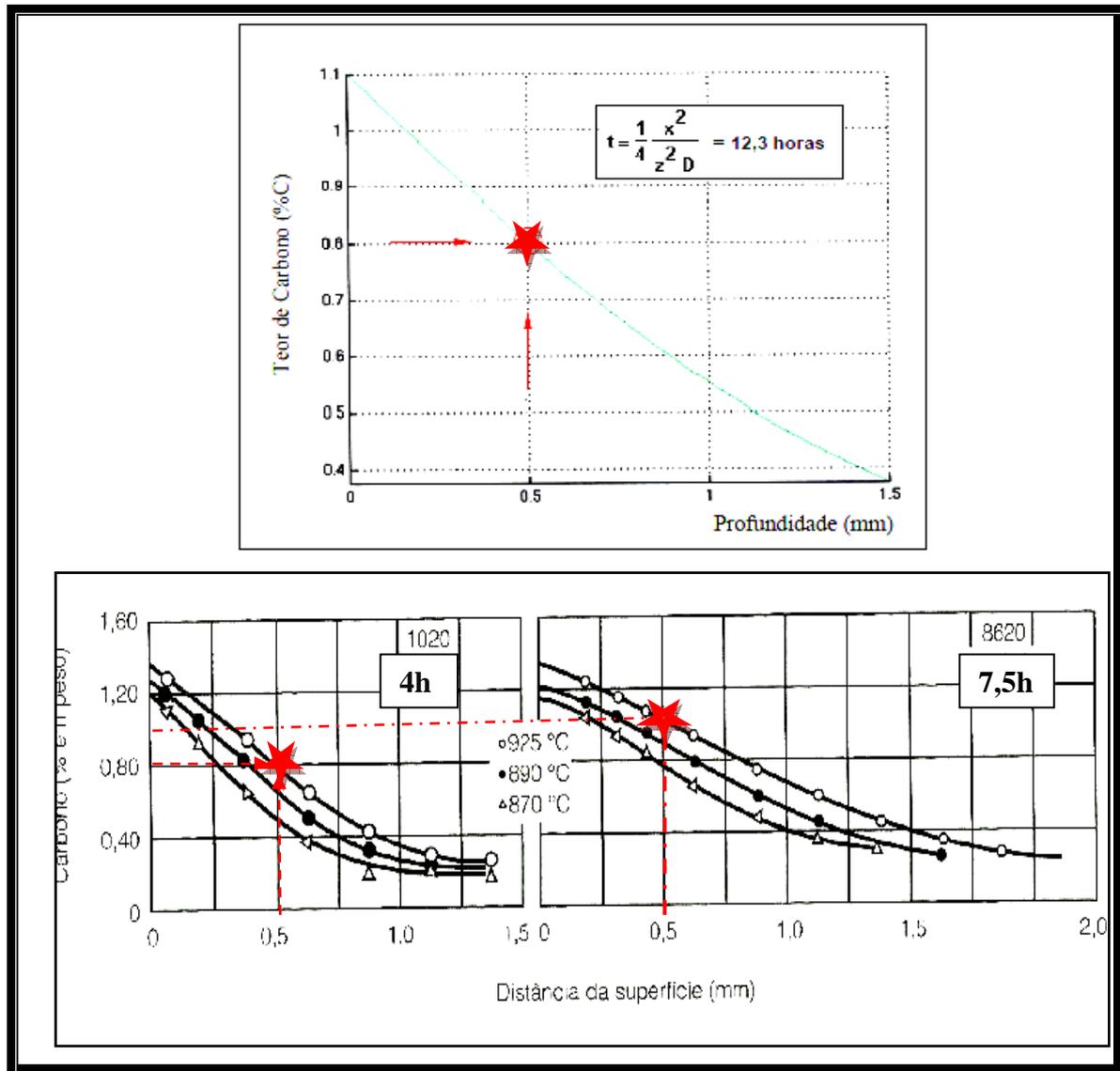
A Figura 25 apresenta o perfil do teor de carbono que define a cinética de cementação a 930 °C, sendo que para garantir 0,80 %C a uma profundidade de 0,50mm são necessárias 12,3 horas de tratamento térmico, em um processo de cementação sólida (em caixa).



**Figura 25 – Perfil de cementação sólida a 930 °C.**

Fonte: BAUMGARTEN, 2003.

Comparando-se os dados obtidos do gráfico da Figura 25 com os da Figura 12, observa-se que o perfil de cementação a gás, a temperatura próxima aos 930°C é nitidamente superior em relação ao da cementação sólida, mantendo-se os 0,80% de Carbono. Esta comparação é visualizada na Figura 26.



**Figura 26 – Comparação entre os perfis de Cementação Sólida x Cementação a gás à temperatura próxima de 930°C.**

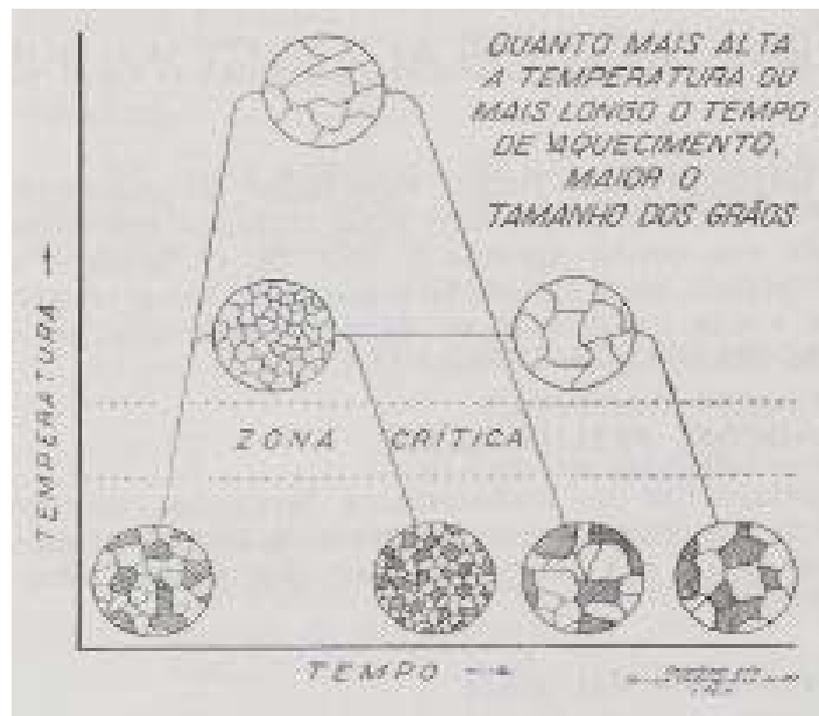
Fonte: Adaptado de BAUGARTEN (2003), SILVA; MEI (2010).

## 2.4 Influência do Tamanho de Grão nas Propriedades dos Materiais

Desde que é reconhecido que os grãos de austenita grosseiros ou finos têm vantagens definidas para aplicações definidas, tratamentos foram desenvolvidos para produzir o

tamanho de grão que responde mais favoravelmente a uma dada operação (NOVIKOV, 1994). Quando um aço durante o aquecimento atravessa a zona crítica ( $723^{\circ}\text{C}$ ) ocorre de toda a perlita existente no aço se transformar em austenita, pois as lamelas de ferro-alfa da perlita se transformam em ferro-gama pela difusão do carbono das lamelas de cementita originando assim no lugar de cada grão de perlita, um grupo de pequenos grãos de austenita (COLPAERT, 2008).

Os grãos de austenita, com o tempo, crescem á custa dos grãos vizinhos menos estáveis, tanto mais rapidamente quanto mais elevada for à temperatura, pois, esse crescimento se dá por uma migração de átomos através dos contornos de grão, de forma que pode adquirir uma textura de grãos grandes. A Figura 27 mostra a Influencia da temperatura e do tempo sobre o tamanho de grão.



**Figura 27 – Influência da temperatura e do tempo sobre o tamanho de grão.**

Fonte: COLPAERT, 2008.

Deve-se ressaltar que por tamanho de grão não quer dizer tamanho do grão de ferrita, como nos aços de baixo carbono, ou o tamanho das áreas grosseiras de perlita, que são encontradas em aços de teor médio de carbono. Neste estudo considera-se o tamanho de grão da austenita, o qual é estabelecido acima da zona de transformação crítica, conforme Norma ASTM E 407 – 99.

Como os contornos de grãos representam descontinuidades que impedem o deslizamento ou o movimento das discordâncias, quanto menor o número de contornos de grãos, menor a resistência a esse movimento, ou seja, “granulação fina favorece a resistência mecânica” a “granulação grosseira diminui a resistência mecânica e a dureza e melhora a plasticidade do metal” (CHIAVERINI, 2003).

A granulação grosseira torna o material quebradiço porque, a coesão entre grãos é afetada pela concentração de impurezas nos seus contornos e com o aumento da granulação há um aumento desta concentração, devido à diminuição da área total desses contornos. As fissuras também se propagam mais facilmente no interior dos grãos grosseiros, em virtude dos planos de clivagem ser mais extensos (COLPAERT, 2008).

Por isso, entre aços de igual composição, os de grão mais fino possuem melhores propriedades mecânicas (NOVIKOV, 1994).

A Tabela 7 mostra o efeito do tamanho de grão de austenita sobre as propriedades do aço.

**Tabela 7 – Efeito do tamanho de grão de austenita sobre as propriedades do aço.**

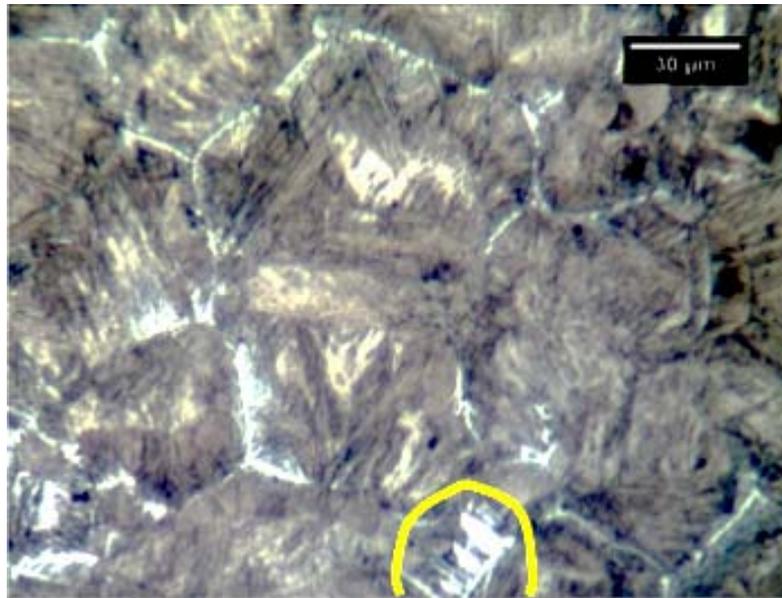
<b>GRÃO</b>	<b>PROPRIEDADES</b>	<b>EFEITO DOS GRÃOS DE AUSTENITA MAIS FINA</b>
No estado austenítico	Formação plástica	Menor forjabilidade e maior resistência ao escorregamento
	Velocidade de decomposição	Mais rápida
Endurecido ou endurecido e revenido	Endurecibilidade	Endurecimento bastante raso
	Resistência ao impacto	Muito maior
	Fissuras de Têmpera	Raramente exhibe fissuras de Têmpera
	Tensão interna	Mais baixa

Fonte: LOPES, 2009.

A metalografia microscópica estuda os produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, visando à determinação dos seus constituintes e de sua textura (COLPAERT, 2008) Nos materiais metálicos, os limites de grão podem ser identificados numa amostra como linhas escuras, os limites de grãos são corroídos mais rapidamente do que os grãos, originando-se, assim, pequenos sulcos ao longo dos limites de grão. Quando examinados

num microscópio óptico, a luz incidente não será tão intensamente refletida pelos limites de grão e, como consequência, estes aparecerão como linhas escuras na ocular do microscópio.

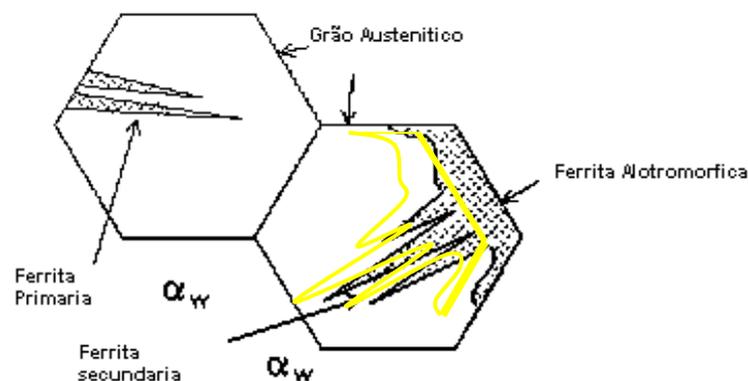
Na Figura 28, são mostrados os constituintes do núcleo de um aço de baixo carbono.



**Figura 28 – Micrografia do núcleo aço baixo carbono. Constituída por martensita revenida e ferrita de Widmannstätten em contorno de grão (detalhe).**

Fonte: O autor, 2013. (sob licença de Tork Controle Tecnológico de Materiais Ltda).

Entende-se por ferrita de Widmannstätten uma estrutura cristalina sob a forma de lamelas cruzadas que nucleiam nos contornos de grão da austenita, mas crescem ao longo da matriz. Elas crescem diretamente dos contornos ou nucleiam em uma ferrita alotromórfica pré-existente, como mostrada na Figura 29.



**Figura 29 – Ferrita de Widmanstätten.**

Fonte: Adaptado de COLPAERT, 2008.

## 2.5 Influência da Têmpera na Transformação da Austenita

O aumento da velocidade de resfriamento altera as condições de equilíbrio do diagrama Fe-C e, portanto, as condições de formação dos constituintes normais resultantes da transformação da austenita. Essa formação é baseada na mudança do reticulado cristalino do ferro, ou seja, numa movimentação de átomos por difusão. Na realidade, o que ocorre é um fenômeno de inércia próprio de certos fenômenos físicos, resultando um atraso da transformação da austenita (CHIAVERINI, 2003). Com o aumento da velocidade de resfriamento, surge, junto com os constituintes normais, um novo microconstituente – a “martensita” – de estrutura totalmente diferente e, em consequência, de propriedade totalmente nova (CHIAVERINI, 2003).

O resfriamento extremamente rápido, em água ou salmoura, não dá tempo à austenita para se transformar, a não ser na faixa de transformação da martensita. Não há, portanto, um fenômeno de nucleação e crescimento envolvendo uma extensa migração de átomos. Não havendo difusão, a composição da martensita é idêntica à da austenita que lhe deu origem (COLPAERT, 2008).

Exemplificando: peças iguais fabricadas em série, com aço de composição idêntica, e que devam ser temperadas do mesmo modo, só apresentaram propriedades semelhantes, se o tamanho de grão austenítico for sempre o mesmo, no momento que saem do forno para serem temperadas. A Têmpera é o tratamento por resfriamento contínuo que promove a transformação da austenita em martensita (COLPAERT, 2008).

Os meios de Têmpera mais frequentemente usados são: óleo, água, salmoura, solução de solda cáustica e também preparados químicos específicos. Em qualquer um destes meios existem 3 estágios durante o resfriamento da peça:

- 1) Inicia-se imediatamente após a imersão da peça no meio líquido e caracteriza-se pela formação de cortina de vapor que envolve toda a superfície da peça. A transferência de calor é feita por radiação e condução através do filme de vapor com velocidade relativamente lenta. Por esta razão é altamente indesejável.
- 2) Neste estágio dá-se o rompimento da cortina de vapor e a superfície da peça é molhada pelo líquido de têmpera, dando início à ebulição. O resfriamento é bastante rápido e o calor é transferido por grande massa de vapor.
- 3) Cessada ebulição, começa o terceiro estágio, que é lento. A transferência de calor se dá por convecção e condução até atingir equilíbrio de temperatura.

Para eliminar rapidamente a cortina de vapor formada no primeiro estágio basta que se adicione sal na água (9%) ou soda cáustica (3%).

Em alguns aços de média liga (430, 8640, 4140), o resfriamento não pode ser brusco, porque assim o não pode ser brusco, porque assim o material trincaria. Deve-se usar o óleo, que tem um primeiro estágio de têmpera mais longo.

Devido à limitação do equipamento, algumas vezes não se poderá mudar facilmente a têmpera do óleo para água, ou vice-versa. Entretanto, isto não representa grande problema: dissolvidos em água, certos preparados orgânicos dão um meio de têmpera menos severo do que a água, mais severo do que o óleo e que passa por todas as formas intermediárias.

Face à brusca transformação de ordem estrutural na retícula cristalização do aço (de austenita para martensita) e porque a martensita ocupa maior volume, ocorre uma conseqüentemente variação nas dimensões da peça, conhecida genericamente por distorção.

Por ser inerente ao processo, este problema é tolerado. Alguns, cuidados, porém podem ser tomados para minimizar a ocorrência, como, exemplo, conseguir estrutura homogênea antes de têmpera (normalização adequada) ; ou não temperar direto depois da cementação e sim esfriar as peças, reaquecê-las e depois temperar não se deve confundir a distorção com o problema do empenamento, onde há mudanças na forma sem envolver mudanças de volume.

O empenamento acontece em tratamentos térmicos porque geralmente se esquece de que o material está com baixa resistência mecânica face à temperatura de processo e não se toma na arrumação das peças no forno ou na cesta.

O material no estado temperado é frágil, pois tem alta dureza e baixa ductilidade. Para que se consiga do material as propriedades mecânicas desejadas, necessita submetê-lo a tratamento posterior de revenido.

Em função das diferentes velocidades de tratamento entre o núcleo e superfície, ocorrem estruturas e durezas diferentes. Convém lembrar que a dureza superficial é praticamente função do teor de carbono do aço e a dureza do núcleo vem a ser função da liga do material.

Por isso, às vezes consegue-se melhorar as propriedades mecânicas do material trocando o meio de têmpera. Chega a um ponto, contudo, em que o tratamento térmico não é mais conveniente, porque se torna mais oneroso do que a troca do aço por outro com mais elementos de liga. O inverso também é válido, visto que para determinadas propriedades mecânica pode-se usar um aço com menores teores de elementos ligas, aplicando, porém o tratamento térmico adequado.

- Uma observação importante em relação ao revenido diz respeito às variáveis de tempo e temperatura: a dureza do material será menor se para determinada temperatura aumentar-se o tempo de revenido. Também para um mesmo período de tempo, um aumento de temperatura diminuirá a dureza. Temperaturas baixas e tempos de revenido mais longos são recomendáveis, porque, desse modo, pode-se obter melhor usinabilidade sem alterar a dureza final da peça.

## 2.6 Defeitos Oriundos de Tratamentos Térmicos Mal Conduzidos

Uma peça pode ter sido devidamente projetada e fabricada a partir de um bom material, vindo a falhar mais tarde devido a um defeito criado por um processamento impróprio, após sua fabricação. Estes processamentos podem ser vários, porém o tratamento térmico mal conduzido é geralmente um importante fator que vem a causar falhas em peças. São listados a seguir, resumidamente, alguns entre os principais defeitos causados por um tratamento térmico mal conduzido.

- Superaquecimento

Quando as ligas são aquecidas acima de sua temperatura de recristalização, ocorre o crescimento do grão. À medida que a temperatura aumenta, o grão cresce rapidamente resultando em várias características indesejáveis. O enfraquecimento que usualmente acompanha o superaquecimento é causado não somente pelo tamanho do grão, mas também por filmes contínuos que são formados nos contornos do grão tais como precipitados ou gases aprisionados. Grãos mais finos, por outro lado apresenta uma quantidade maior de área total de contorno, sobre a qual as impurezas podem estar mais uniformemente distribuídas.

Os danos causados pelo superaquecimento dependem da temperatura e do tempo de encharque e são particularmente significantes nos aços com alto e médio teor de carbono nos quais a resistência e ductilidade são ambas afetadas.

- Queima

É um termo aplicado quando um metal é grosseiramente superaquecido, é um dano permanente e irreversível ocorre no metal, ou pela penetração intergranular de gases

oxidantes ou por fusão incipiente nos contornos de grão. A causa mais óbvia de queima é a utilização de um forno com temperaturas muito elevadas. Ocasionalmente, a queima pode ocorrer em fornos adequadamente controlados, uma vez que a chapa pode estar dirigida de tal modo que alcance a superfície da peça causando superaquecimento local. Um material queimado não pode ser salvo porque as mudanças metalúrgicas que ocorreram são irreversíveis.

- Trincas de Têmpera

Trincas de têmpera nos aços, geralmente, resultam das tensões produzidas pelo acréscimo de volume que acompanha a transformação austenita/martensita. Quando um aço é temperado, a martensita forma-se inicialmente na superfície e, à medida que o resfriamento prossegue, a austenita interna se transforma, aumentando de volume e tracionando a superfície do material. A martensita resultante é dura e frágil (martensita não revenida); o que torna a peça suscetível ao trincamento por causa das tensões localizadas. Esta suscetibilidade ao trincamento é aumentada pela presença de fontes de tensões tais como filetes agudos, marcas de ferramentas e outros entalhes, além de inclusões ou vazios; outros fatores que afetam o trincamento pela têmpera são a temperabilidade do aço, a taxa de resfriamento e o tempo de espera entre a têmpera e o revenido.

- Fragilidade de revenido

Certos aços, particularmente os “cromo-níquel” mostram um decréscimo violento na resistência ao impacto quando revenidos a temperaturas da ordem de 350 a 575°C faixa esta que depende largamente da composição, grau de segregação e fabricação do aço. Acredita-se que a fragilidade de revenido seja o resultado da precipitação de uma fase complexa nos contornos de grão da austenita, todavia, isto não é sempre observado. A fragilidade de revenido aumenta a temperatura de transição e reduz a energia requerida para a fratura frágil. Foi também mostrado que esta fragilidade aumenta a taxa de crescimento de trincas de corrosão sob tensão.

- Carbonetação e decarbonetação

Aquecer uma superfície de um metal contaminado com óleo ou aquecê-lo numa atmosfera rica em carbono pode produzir uma superfície com elevado teor de carbono. Se

uma superfície carbonetada não foi considerada no projeto inicial, problema de trincas podem aparecer uma vez que as propriedades mecânicas na superfície são diferentes das do núcleo. Por exemplo, uma peça sujeita a impacto severo raramente é cementada, pois a superfície endurecida geralmente possui baixa tenacidade. Já a descarbonetação pode ocorrer pelo aquecimento numa atmosfera oxidante. Assim o resultado é uma superfície com teor de carbono menor do que o do núcleo, com baixas propriedades de resistência e dureza.

## **2.7 Determinação das Propriedades Mecânicas da Camada Cementada**

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. Os métodos e ensaios mais aplicados em engenharia utilizam-se de penetradores com formato padronizado e que são pressionados na superfície do material sob condições específicas de pré-carga e/ou carga, causando inicialmente deformação elástica e em seguida deformação plástica (GARCIA, SPIM E SANTOS, 2012).

Estes ensaios visam determinar as propriedades mecânicas do material trabalhado principalmente à dureza. A dureza de um material depende diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, do escorregamento de planos atômicos, assim como da resistência mecânica. Os sólidos metálicos e iônicos, devido à natureza mais intensa das forças de ligação, são mais duros, enquanto os sólidos de ligação covalente são os materiais conhecidos de maior dureza. A dureza dos metais pode ser aumentada por tratamentos especiais, como adição de soluto, trabalho a frio, refino de grão, endurecimento por precipitação, tratamentos térmicos e termoquímicos, como no caso do trabalho em questão, a Cementação. Há métodos para se determinar a dureza como Brinell, Rockwell, Vickers e Shore.

Os valores utilizados para cada método estão representados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Valores dos ensaios de dureza.**

	VICKERS	BRINELL	ROCKWELL BC	MOHS	SHORE
Durezas de algunos materiales de uso más frecuente	2500			10	Diamante
	2000				
Carburos sinterizados	1500			9	Corindón
	1000		70		
Aceros de herramientas templados	900	700	65	8	Topacio
	800		60		
	700	600	55		
Cuerda de piano	600	500	50	7	Cuarzo
	500		45		
	400	400	40		
Aceros de construcción tratados	300	300	35	6	Feldespato
			30		
			25	5	Apatito
Aceros recocidos	200	200	20	4	Espatoflúor
			100		
			90	3	Calcita
Acero dulce			80		
			70		
Duraluminio	100	100	60	2	Yeso
	90	90			
Bronces	80	80			
	70	70			
Latones	60	60			
	50	50	0		
Cobre	40	40			
	30	30			
Antifricciones	20	20		1	Talco
	10	10			

Fonte: Adaptado de PADILHA, 2003.

As propriedades mecânicas e as durezas de alguns tipos de aço podem ser relacionadas conforme a Tabela 9 (GARCIA, SPIM; SANTOS, 2012).

**Tabela 9 – Tabela de correlações entre durezas e propriedades mecânicas.**

Dureza Brinell HB	Aço-carbono HB × 0,36	Resistência (kgf/mm <sup>2</sup> )		Dureza Rockwell		Dureza Vickers	Dureza Shore
		Aço Cr	Aço Ni	HRC	HRB		
		Aço Cr Mn HB × 0,35	Aço Cr Ni Aço Cr Mo HB × 0,34				
—	—	—	—	68,0	—	940	97
—	—	—	—	67,5	—	920	96
—	—	—	—	67,0	—	900	95
(767)	276,1	268,4	260,7	66,4	—	880	93
(757)	272,4	264,9	257,3	65,9	—	860	92
(745)	268,2	260,8	253,3	65,3	—	840	91
(710)	255,6	248,5	241,4	63,3	—	780	87
(682)	245,5	238,7	231,9	61,7	—	737	84
(653)	235,1	228,6	222,0	60,0	—	697	81
627*	225,7	219,5	213,2	58,7	—	667	79
601*	216,4	210,4	204,3	57,3	—	640	77
578*	208,1	202,3	196,5	56,0	—	615	75
555*	199,8	194,3	188,7	54,7	—	591	73
534*	192,2	186,9	181,6	53,5	—	569	71
514*	185,0	179,9	174,8	52,1	—	547	70
495*	178,2	173,3	168,3	51,0	—	528	68
477*	171,7	167,0	162,2	49,6	—	508	66
461*	166,0	161,4	156,7	48,5	—	491	65
444*	159,8	155,4	151,0	47,1	—	472	63
429	154,4	150,2	145,9	45,7	—	455	61
415	149,4	145,3	141,1	44,5	—	440	59
401	144,4	140,4	136,3	43,1	—	425	58
388	139,7	135,8	131,9	41,8	—	410	56
375	135,0	131,3	127,5	40,4	—	396	54
363	130,7	127,1	123,4	39,1	—	383	52
352	126,7	123,2	119,7	37,9	(110,0)	372	51
341	122,8	119,4	115,9	36,6	(109,0)	360	50
331	119,2	115,9	112,5	35,5	(108,5)	350	48
321	115,6	112,4	109,1	34,3	(108,0)	339	47
311	112,0	108,9	105,7	33,1	(107,5)	328	46
302	108,7	105,7	102,7	32,1	(107,0)	319	45
293	105,5	102,6	99,6	30,9	(106,0)	309	43
285	102,6	99,8	96,9	29,9	(105,5)	301	—
277	99,7	97,0	94,2	28,8	(104,5)	292	41
269	96,9	94,2	91,5	27,6	(104,0)	284	40
262	94,3	91,7	89,1	26,6	(103,0)	276	39
255	91,8	89,3	86,7	25,4	(102,0)	269	38
248	89,3	86,8	84,3	24,2	(101,0)	261	37
241	86,8	84,4	81,9	22,8	100,0	253	36
235	84,6	82,3	79,9	21,7	99,0	247	35
229	82,4	80,2	77,9	20,5	98,2	241	34

Fonte: GARCIA, 1976.

Em algumas situações práticas, ocorre a necessidade de determinação da dureza de pequenas áreas do corpo de prova. A medida que o gradiente de dureza que se verifica em superfícies cementadas e a determinação da dureza individual de microconstituintes de uma estrutura metalográfica são alguns exemplos dessas situações (GARCIA, 2012). O ensaio de microdureza produz uma impressão microscópica e se utiliza de penetradores de diamantes e cargas menores que 9,8N (1kgf). Os métodos mais utilizados são a microdureza Vickers (mHV) e a microdureza Knoop, ASTM E384: (2008 apud GARCIA, 2012).

## 2.8 Planejamento Experimental

A concepção atual de ciência é de aprendizagem através da experimentação e análises dos dados observados. A procura das causas, das leis, traduz-se em um processo interativo de observação do real, de repetição de experimentos, de avaliação quantitativa dos fenômenos em estudo CAMPOS (1999 *apud* MENETRIER, 2006).

É comum nas indústrias aparecerem problemas em que se precisam estudar várias propriedades ao mesmo tempo e estas, por sua vez, são afetadas por um grande número de fatores experimentais. A utilização de Planejamento de Experimentos baseados em Princípios Estatísticos é, geralmente, a maneira mais eficiente para estimar os efeitos de muitas variáveis ao mesmo tempo (BARROS NETO; SCARMINO; BRUMS, 2001).

Com o objetivo de melhorar a qualidade industrial, a produtividade, o desempenho do produto final, os custos das operações, entre outras características, as empresas realizam vários experimentos para encontrar os níveis ótimos dos parâmetros que regulam seus processos de fabricação. Alguns dos problemas encontrados ao realizar os ensaios é a necessidade de estudar simultaneamente o efeito dos fatores com diferentes níveis de regulagens.

Observa-se, nesse caso, que o número de testes requeridos para a experimentação tende a crescer à medida que a quantidade de fatores aumenta. Isso torna os experimentos industriais inviáveis economicamente, visto que os custos e o tempo de execução são elevados. Montgomery (2001) afirma que tais problemas podem ser contornados quando os experimentos são planejados e analisados com métodos e técnicas estatísticas.

Segundo Araújo (2011), desenvolver os componentes para motores a Diesel vem sendo um desafio. O conhecimento técnico, que sempre vai ser a base para realizar este trabalho é auxiliado pela aplicação de práticas e ferramentas para que os projetos sejam realizados dentro de um prazo cada vez mais desafiador, preservando a qualidade e o desempenho do produto. O custo para desenvolver o projeto também é um fator de grande relevância. O planejamento multivariado de experimentos vem sendo uma destas ferramentas, que possui um grande potencial de aplicação em muitas etapas do processo de desenvolvimento de motores.

De acordo com Araújo (2011), o planejamento multivariado de experimentos também pode ser utilizado em outras situações, como no desenvolvimento de componentes, onde é necessário se comparar o desempenho de diferentes conceitos. Outro exemplo de aplicação é

a utilização do projeto de experimentos para comprovar um resultado de um *software* de simulação numérica, ou também como uma alternativa, quando não se tem a segurança ideal nos dados utilizados ou na precisão da simulação.

Outra fase onde o planejamento multivariado de experimentos pode ser amplamente utilizado é no estudo de robustez do produto, onde se pode estudar a influência de vários fatores simultaneamente nos resultados de parâmetros importantes do motor.

Segundo Pimenta et al. (2008), cada vez mais se tem aplicado ferramentas estatísticas para a otimização de processos industriais, devido aos bons resultados que estas ferramentas proporcionam para o desenvolvimento tecnológico industrial. A “estatística” não é simplesmente um conjunto de técnicas a serem usadas somente nos projetos. Devido o ritmo acelerado de mudanças que ocorrem no ambiente econômico, conjuntamente com o “benchmarking,” a “reengenharia,” e a “satisfação total do cliente”, esses métodos estatísticos são necessários para o trabalho do dia-dia e uma vez entendidos e aplicados, proporcionará habilidade e o entendimento que irá lhe garantir melhores análises, comunicação e tomada de decisões (PIMENTA et al., 2008).

Experimentos envolvem uma série de variáveis (ou fatores) com maior ou menor grau de importância para o processo em estudo. Barros Neto et al. (2007) enfatizam que ao iniciar-se um planejamento de experimentos precisam-se definir primeiramente quais são os fatores e as respostas de interesse.

Fatores: que são as variáveis que sofrem alterações em um experimento, ou seja, sofrem mudanças de forma controlada com o objetivo de observar seu impacto sobre a variável resposta. Um fator pode ser qualitativo ou quantitativo. Durante o planejamento de um determinado experimento, alguns métodos podem ser utilizados para identificar os fatores. Entre eles podem se destacar os mais importantes: mapeamento do processo, teorias científicas, conhecimentos da engenharia, experiência da equipe, brainstorming e diagrama de causa e efeito Ishikawa.

Variável resposta: uma variável observada ou medida em um determinado experimento, ou seja, o resultado do experimento. Um experimento pode ter uma ou mais variáveis respostas, devendo ela ser efetiva para quantificar os resultados desejados.

O próximo passo é definir qual é a finalidade do experimento, ou seja, seu objetivo. Para escolher-se o melhor planejamento, objetivos diferentes precisam de planejamentos diferentes.

Após conhecidos estas etapas precisa-se também definir alguns conceitos básicos:

Níveis: os fatores sofrem variações em seus valores e essas variações são chamadas de níveis. O nível pode ser associado a pontos em uma escala numérica para um fator quantitativo ou uma opção específica de um fator qualitativo incluído no experimento. Durante a seleção dos níveis, alguns erros podem ser cometidos como a seleção de níveis muito próximos ou muito distantes entre si.

Variável ruído: durante o experimento, algumas variáveis podem não ser totalmente controladas pelo pesquisador. Essas variáveis são classificadas como variável ruído. O ruído pode afetar uma variável resposta em um determinado experimento, mas ainda assim o ruído não é de interesse como fator. Os efeitos das variáveis ruído podem ser minimizados. Basicamente são duas as formas de minimizá-los:

- 1) Mantendo o nível dos fatores constante;
- 2) Medindo e levando em consideração seus efeitos durante a análise das variáveis respostas.

Montgomery (2003) define Planejamento Fatorial dizendo que “em cada tentativa completa ou réplica do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas”. E, ainda, afirmam que “experimentos fatoriais são a única maneira de descobrir interações entre variáveis”.

### 2.8.1 Planejamento fatorial

Um experimento fatorial consiste de um conjunto de ensaios, onde se mudam simultaneamente os níveis dos fatores que se deseja estudar. Depois de conduzir os experimentos, os dados são analisados para determinar os efeitos dos fatores. Um dos objetivos é aperfeiçoar o produto ou processo, isto é, determinar os níveis ótimos para cada fator.

Nos experimentos fatoriais, todas as combinações possíveis entre os níveis dos fatores são investigadas, neste caso o planejamento recebe o nome de fatorial completo (full factorial). Por exemplo, se existem níveis a de um fator A e níveis b de um fator B, cada réplica contém todas as combinações ab. Quando os fatores seguem um arranjo segundo uma estratégia de planejamento fatorial, normalmente são denominados de arranjos cruzados (ARAÚJO, 2011).

A Tabela 10 mostra um planejamento simples, ou seja, um experimento fatorial com dois fatores e com dois níveis para cada fator. Chamamos estes níveis de “baixo” e “alto” e são indicados por “-1” e “+1” respectivamente.

**Tabela 10 – Planejamento fatorial com dois níveis e dois fatores.**

<i>Ensaio</i>	<i>Fator</i>	<i>Fator</i>
1	1	1
2	-1	1
3	1	-1
4	-1	-1

Fonte: MONTGOMERY, 2003.

### 2.8.2 Planejamento Fatorial Completo ou Fatorial $2^k$

Os fatoriais completos se caracterizam pela realização de ensaios com todos os tratamentos, ou seja, todas as combinações possíveis de níveis dos fatores são testadas. Para executar um plano fatorial completo, um investigador seleciona um número fixo de níveis para cada um dos fatores. Se existem  $p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n$  ensaios é chamado experimento fatorial  $p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n$ . O resultado da multiplicação  $p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n$  representa o número de tratamentos. Deste modo, ele indica o número de ensaios a serem realizadas para se obter um fatorial completo. Por exemplo, um fatorial  $3 \times 3 \times 2$  necessita de dezoito ensaios. Um experimento no qual cada tratamento é aplicado uma vez constitui uma única replicação do planejamento. Se cada tratamento é replicado  $n$  vezes, o planejamento é dito ser replicado  $n$  vezes ou envolver  $n$  réplicas. Quando existem réplicas, o número total de ensaios será um múltiplo do número de tratamentos.

Este tipo de planejamento é indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência. Em cada réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas. Desta maneira todos os possíveis efeitos de interação entre os fatores podem ser determinados.

O planejamento fatorial tem sido muito aplicado em pesquisas básicas e tecnológicas por ser um método onde as variáveis de interesse que realmente apresentam influências significativas na resposta são avaliadas ao mesmo tempo.

### 2.8.3 Planejamento Fatorial Fracionado $2^{k-p}$

Quando o número de fatores  $k$  aumenta o número de testes também aumenta significativamente, tornando o planejamento inviável devido ao tempo e custos envolvidos. Neste caso pode-se realizar o planejamento fatorial fracionado para se obter a informação desejada com um número reduzido de ensaios.

Segundo Barros Neto □L.al. (2001) isso é possível por dois motivos: Primeiro, o número de interações de ordem alta aumenta dramaticamente com o número de fatores. Na maioria dos casos, essas interações têm valores pequenos e são destituídas de qualquer importância prática.

Se em um determinado experimento, interações deste tipo podem ser desprezadas, informações sobre os efeitos principais e interações de ordens baixas como primeira e segunda ordens podem ser obtidas através de um experimento que englobe apenas uma fração do experimento completo. Experimentos fatoriais fracionados estão entre os mais utilizados experimentos fatoriais.

Segundo motivo: quando o número de fatores aumenta, crescem as chances de que um ou mais deles não afete significativamente a resposta.

Experimentos fatoriais fracionados são muito úteis quando uma grande quantidade de fatores está sendo estudada e deseja-se identificar quais deles são realmente representativos. Muitas vezes estes experimentos permitem a obtenção da informação desejada em menor tempo e investimento reduzido.

### 2.8.4 Cálculo dos efeitos

O efeito de um fator é definido como sendo uma alteração em uma determinada variável resposta, produzida por uma alteração no nível deste fator. Isso é chamado de efeito principal (main effect) porque se refere aos fatores principais em um determinado planejamento.

Considerando o exemplo da Tabela 10, o efeito principal para o fator A pode ser calculado como sendo a média dos resultados do fator A no nível +1 menos a média dos resultados do fator A no nível -1, ou seja:

$$\text{Efeito} = R_+ - R_- \quad (20)$$

**Tabela 11 – Experimento 2<sup>2</sup> com os respectivos resultados.**

<i>Ensaio</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Resposta</i>
1	1	1	60
2	-1	1	80
3	1	-1	30
4	-1	-1	50

Fonte: O autor, 2013.

Numericamente temos:

$$A = \frac{60+30}{2} + \frac{80+50}{2} = -20 \quad (21)$$

Isto indica que o valor da variável resposta sofre uma redução de 20 unidades quando o fator A muda do seu nível mais alto +1 para o nível mais baixo -1.

Em alguns experimentos podemos descobrir que as diferenças nas variáveis respostas entre os níveis de um fator não são as mesmas para todos os níveis de outro fator. Quando isto ocorre, podemos dizer que existe interação entre os fatores. Por exemplo, considerando o experimento fatorial com dois fatores mostrado na Tabela 12, no nível “baixo” do fator B (B+), o efeito de A, seria:

$$A = 50 - 20 = 30$$

E no nível “alto” do fator B (B-), o efeito de A, seria:

$$A = 12 - 40 = -28$$

**Tabela 12 – Experimento 2<sup>2</sup> com interação entre os efeitos.**

<i>Ensaio</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Resposta</i>
1	1	1	12
2	-1	1	40
3	1	-1	50
4	-1	-1	20

Fonte: O autor, 2013.

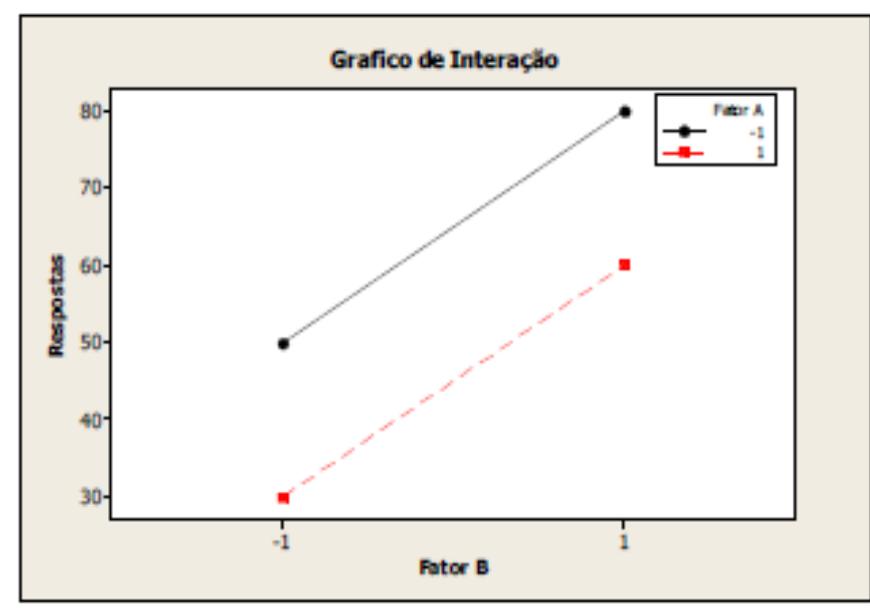
Como o efeito de A depende do nível escolhido do fator B, podemos observar que existe interação entre A e B. A magnitude do efeito da interação é a diferença média entre esses dois efeitos, ou seja:

$$AB = \frac{(-28-30)}{2} = -29 \quad (22)$$

Outra forma de calcular o efeito da interação entre as variáveis é atribuir o sinal da interação multiplicando-se os sinais das linhas do planejamento conforme Tabela 12. E o cálculo dos efeitos ocorre da mesma forma que para os efeitos principais, sendo a média dos resultados com sinal + menos a média dos resultados com sinal – ou seja:

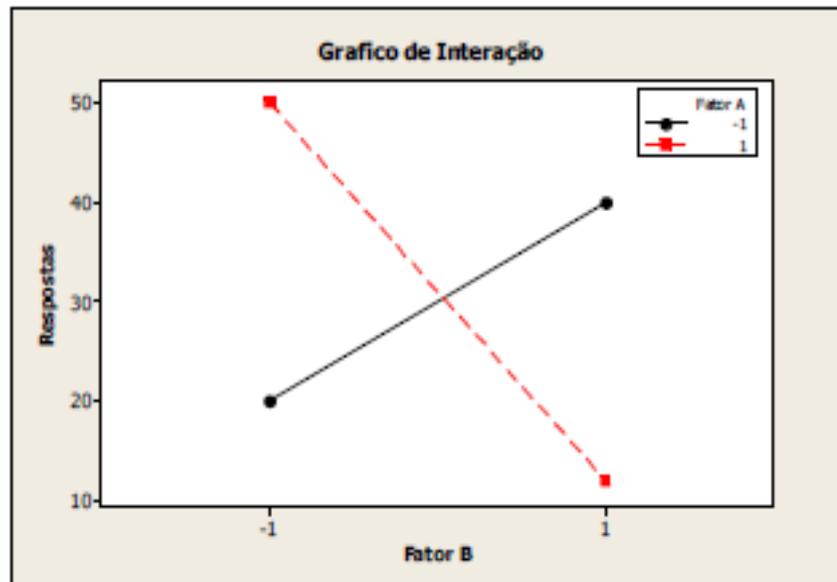
$$AB = \frac{12+20}{2} - \frac{40+50}{2} = 29 \quad (23)$$

Estes conceitos podem ser ilustrados graficamente. A Figura 30 mostra os dados das variáveis respostas do experimento mostrado anteriormente na Tabela 9. Observa-se que as linhas B-, o efeito no nível baixo de B, e B+, o efeito no nível alto de B, são paralelas, indicando ausência de interação entre os fatores A e B. Similarmente, a Figura 31 mostra os dados das variáveis respostas do experimento mostrado anteriormente na Tabela 9, mas neste caso, as linhas B- e B+ não são paralelas, indicando interação entre os fatores A e B.



**Figura 30 – Experimento fatorial sem interação.**

Fonte: ARAÚJO, 2011.



**Figura 31 – Experimento fatorial com interação**

Fonte: ARAÚJO, 2011.

Existe outra maneira de ilustrar o conceito de interação utilizando uma representação via modelo de regressão, onde, para os dois fatores mencionados nos gráficos ter-se-ia:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + \varepsilon$$

(24)

Onde  $y$  é a variável resposta, as letras  $b$  são os parâmetros cujos valores serão determinados,  $X_1$  é a variável que representa o fator A,  $X_2$  é a variável que representa o fator B, onde  $\varepsilon$  é o termo que representa o erro aleatório. As variáveis  $X_1$  e  $X_2$  são definidas em uma escala codificada de -1 a +1 (equivalente aos níveis “baixo” e “alto” dos fatores A e B), e  $X_1 X_2$  representa a interação entre  $X_1$  e  $X_2$ .

Para o experimento ilustrado na Tabela 10, encontramos os efeitos principais de A e B como sendo  $A = 1$  e  $B = -9$ . As estimativas de  $b_1$  e  $b_2$  são metade dos valores dos efeitos principais correspondentes, ou seja,  $b_1 = 1/2 = 0.5$  e  $b_2 = -9/2 = -4.5$ .

Então, o valor do coeficiente da interação no modelo de regressão é  $b_{12} = -14.5$ . O parâmetro  $b_0$  é estimado pela média das quatro respostas, ou seja:

$$b_0 = \frac{12+40+50+20}{4} = 30.5$$

(25)

Portanto, o modelo de regressão ajustado é:

$$y = 30,5 + 0,5x_1 - 4,5x_2 - 14,5x_1x_2 \quad (26)$$

### 2.8.5 Cálculo da significância dos efeitos quando os experimentos possuem réplicas

Quando os ensaios realizados possuem réplicas é possível se estimar o erro experimental e, a partir daí, avaliar significância estatística dos efeitos (BARROS NETO *et. al.* 2007).

A Tabela 13 apresenta um experimento fatorial  $2^3$  com uma réplica para que seja mostrado o cálculo da significância dos efeitos.

**Tabela 13 – Resultados de um planejamento fatorial  $2^3$  para estudar a significância dos efeitos.**

<i>Ensaio</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>Resposta</i>	<i>Réplica</i>	<i>Média</i>
1	-1	-1	-1	56	52	54
2	1	-1	-1	85	88	86,5
3	-1	1	-1	49	47	48
4	1	1	-1	64	62	63
5	-1	-1	1	65	61	63
6	1	-1	1	92	95	93,5
7	-1	1	1	57	60	58,5
8	1	1	1	70	74	72

Fonte: BARROS NETO *et. al.* 2007.

A partir da matriz do planejamento pode-se formar a tabela de coeficientes de contraste, multiplicando-se os sinais das colunas apropriadas para obter as colunas correspondentes as interações conforme Tabela 14 (BARROS NETO *et.al.* 2007).

**Tabela 14 – Coeficientes de contraste**

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>	<i>Resposta</i>	<i>Réplica</i>	<i>Média</i>
-	-	-	+	+	+	-	56	52	54
+	-	-	-	-	+	+	85	88	86,5
-	+	-	-	+	-	+	49	47	48
+	+	-	+	-	-	-	64	62	63
-	-	+	+	-	-	+	65	61	63
+	-	+	-	+	-	-	92	95	93,5
-	+	+	-	-	+	-	57	60	58,5
+	+	+	+	+	+	+	70	74	72

Fonte: BARROS NETO et. al. 2007.

**Tabela 15 – Valores dos efeitos.**

<i>Fator</i>	<i>Efeito</i>
<b>A</b>	<b>22,88</b>
<b>B</b>	<b>-13,88</b>
<b>C</b>	<b>8,88</b>
<b>AB</b>	<b>-8,63</b>
<b>AC</b>	<b>-0,88</b>
<b>BC</b>	<b>0,88</b>
<b>ABC</b>	<b>-0,13</b>

Fonte: BARROS NETO et. al. 2007.

Após o cálculo dos efeitos inicia-se o cálculo da estimativa do erro, em primeiro lugar calcula-se a estimativa conjunta da variância de uma observação individual:

$$\hat{V}(y) = s^2 = \sum di^2 / 2N \quad (27)$$

Onde  $d_i$  é a diferença entre duas observações correspondentes ao  $i$ -ésimo ensaio e  $N$  é o número de ensaios distintos, feitos em duplicata. Desta forma tem-se:

$$s^2 = \frac{(56-52)^2 + (85-88)^2 + (49-47)^2 + (64-62)^2 + (65-61)^2 + (92-95)^2 + (57-60)^2 + (70-74)^2}{2*8} \quad (28)$$

$$s^2 = 5,2$$

Tirando a raiz quadrada deste valor chega-se a uma estimativa de erro de observação ou do erro experimental do planejamento (BARROS NETO et.al.2007).

$$S = 2.28$$

Antes de começar a realizar experimentos é necessário que se tenham claros os objetivos e os critérios, ou seja, devemos planejar os experimentos, através da escolha (BUTTON, 2001; GALDANEZ et al, 2004):

- Das variáveis envolvidas nos experimentos;
- Da faixa de variação das variáveis selecionadas;
- Dos níveis escolhidos para essas variáveis;
- Da variável resposta;
- Do tipo de planejamento experimental que mais se adapta aos experimentos, de modo a nos conduzir ao objetivo desejado da forma mais rápida e simples, porém com fundamento científico.

A escolha da maioria destes parâmetros se torna relativamente fácil quando se conhece bem o processo a ser estudado. Desta forma, pode-se rapidamente montar o planejamento, em muitos casos sem a necessidade de realizar uma triagem. Triagem é um planejamento simplificado que se realiza para identificar principalmente os três primeiros fatores da lista acima, quando não se tem conhecimento do processo.

A escolha do experimentador pela ferramenta mais adequada resulta do conhecimento não só do processo, mas também do que ela pode oferecer como resultado. Escolhas erradas podem aumentar e muito o trabalho experimental e algumas vezes sequer produzir respostas condizentes.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Preparação dos Corpos de Prova a Partir de um Material a ser Investigado

Nesta dissertação de mestrado investigou-se o melhor procedimento para reproduzir de forma rápida e econômica um tratamento termoquímico de cementação, em peças de aço de baixo carbono e de baixa liga com aplicações em engenharia, culminando com uma abordagem estatística, relativamente simples, um Planejamento Fatorial  $2^3$ , de modo a obter o processo mais eficaz para este propósito.

Para realização do primeiro ensaio descritivo sobre cementação, foi escolhida, a título de motivação, uma corrente de elos redondos de aço carbono (figura 32), de uso doméstico (amarração), adquirida em comércio varejista de ferragens, tendo sido posteriormente cementada em caixa (cementação sólida), com um único objetivo: resistir às tentativas de ruptura por furto simples utilizando-se serras manuais ou pequenos alicates de corte.

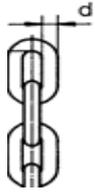


**Figura 32 – Corrente de elos redondos cementada em caixa.**

Fonte: O autor, 2013.

Este material foi gentilmente cedido por um engenheiro do ramo, no intuito de colaborar com o trabalho proposto.

Dados conhecidos da corrente:



- Diâmetro do vergalhão do elo ( $d$ ) = 6 mm.
- Aço de baixo teor de carbono.
- Cementação realizada em caixa (sem dados específicos).
- Comprimento da corrente: 1500 mm

Para iniciar a investigação, a corrente foi dividida em três elos seguindo-se os procedimentos:

Os três elos foram seccionados em uma máquina de disco de corte (3 amostras de cada elo) totalizando 9 amostras, sendo embutidas em baquelite incolor à 200°C, cada embutimento contendo 3 seções, numerados conforme a figura 33.



**Figura 33 – Seções de Elo de Corrente preparadas para o Ensaio de Dureza.**

Fonte: Autor

Antes do embutimento, cada lote de corpos de prova (CP), foi lixado e polido, utilizando-se lixas de 180 grãos, 400 grãos e 800 grãos, respectivamente. Esta primeira tarefa foi realizada no Laboratório de Inspeção da firma NFP Automotive, situada em Nova Friburgo RJ, numa gentil cooperação com este trabalho, estando à frente o técnico deste laboratório, o Sr. Fabrício Fialho, dando suporte ao preparo dos CP da corrente de elos.

Foi feito um Ensaio de Dureza Vickers, utilizando um padrão de 5 Kg, cujo padrão de calibração D 112-376 HV5 7831. O relatório deste Ensaio encontra-se no anexo deste trabalho.

No intuito de se levantar corretamente as especificações do aço utilizado na fabricação da corrente, solicitou-se um Ensaio de Microdureza **VICKERS HV**, 0,5 a cada 0,1mm da superfície da amostra selecionada, para determinação da profundidade de endurecimento. Este procedimento foi realizado por cortesia, pelo Laboratório TORK – Controle Tecnológico de Materiais Ltda., sendo atestado pelo Relatório de número **12044060MESP**, visto no anexo deste trabalho. Concomitante ao Ensaio de Dureza foi realizado um Ensaio de Análise Química para se descobrir a composição química do aço utilizado na fabricação da corrente. O Relatório deste Ensaio foi o de número **12040387AQSP**, também anexado a este trabalho. Para a realização destes procedimentos foram entregues os mesmos CP analisados anteriormente (Figura 33) e mais um elo inteiro.

As regiões do novo corpo de prova analisadas estão ilustradas na figura 34, conforme consta, no primeiro relatório citado no parágrafo anterior.

Segundo Colpaert (2008), as principais seções realizadas em produtos semi-acabados e de geometria regular são as seções longitudinais e transversais. Para a verificação do tratamento termoquímico superficial (cementação), sua profundidade e regularidade, o corte transversal é o preferido. O corte longitudinal é aplicado quando se quer verificar, por exemplo, a presença de solda no comprimento de arames, barras e vergalhões.



**Figura 34 - Amostra de Elo de Corrente fornecida para a Análise Química.**

Fonte: O autor, 2013.

A preparação do corpo de prova analisado (figura 34) foi realizada conforme ASTM E 3, ed 11, microataque com Nital 3% em conformidade com ASTM E 407, Ed 07.

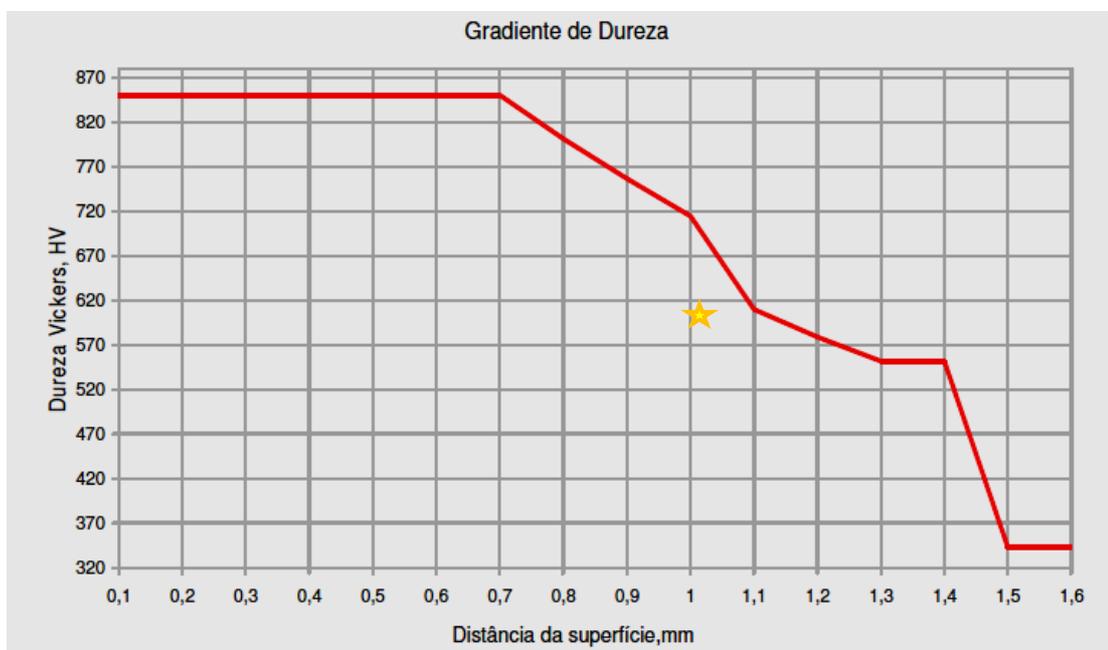
Termos e definições conforme ASTM E 7, Ed 03. Abaixo, na figura 35, mostra-se a seção do elo analisada, embutida, conforme as normas citadas.



**Figura 35 – Elo de corrente embutido ao lado da outra metade seccionada.**

Fonte: O autor, 2013.

Os ensaios realizados nos elos de corrente enviados ao laboratório detalharam a profundidade de endurecimento e a sua análise química apontando os seguintes resultados, mostrados na figura 36, tabela 15 e tabela 16, respectivamente:



**Figura 36 – Gráfico do Gradiente de Dureza (Dureza HV x Profundidade da camada cementada).**

Fonte: TORC Controle Tecnológico de Materiais Ltda.

**Tabela 16 – Dureza da camada cementada da corrente de elos.**

Dureza Verificada: <b>VICKERS HV 0,5 a cada 0,1mm da superfície</b>															
0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
851	851	851	851	851	851	851	802	757	715	610	579	552	552	342	342

Fonte: O autor, 2013.

**Tabela 17 – Composição química do aço da corrente de elos.**

<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) DO AÇO DA CORRENTE</b>		
<b>Carbono</b>	<b>(C)</b>	<b>0,32</b>
<b>Silício</b>	<b>(Si)</b>	<b>0,10</b>
<b>Manganês</b>	<b>(Mn)</b>	<b>0,60</b>
<b>Fósforo</b>	<b>(P)</b>	<b>0,039</b>
<b>Enxofre</b>	<b>(S)</b>	<b>0,012</b>
<b>Cromo</b>	<b>(Cr)</b>	<b>0,05</b>
<b>Níquel</b>	<b>(Ni)</b>	<b>0,02</b>
<b>Molibdênio</b>	<b>(Mo)</b>	<b>&lt;0,01</b>

Fonte: O autor, 2013.

Analisando-se os dados da tabela 16, confirmou-se que o aço utilizado na fabricação da corrente de elos foi o ABNT 1030. Um aço de boa forjabilidade e soldabilidade, mas de pouca usinabilidade. Não é um aço muito indicado para a cementação. Segundo Chiaverini, o aço carbono mais indicado, estaria situado na faixa de 0,08 a 0,25%, sendo o tipo padrão o ABNT ou SAE 1020. Uma variação desse aço pode ser ainda empregada, aumentando-se o teor de manganês (0,70 a 1,00%), isto irá proporcionar melhor usinabilidade e melhor capacidade de carbonetação. A introdução de elementos de liga dará ao núcleo maior tenacidade, além de uma camada superficial mais dura e igualmente tenaz, além de uma zona de transição mais gradual, proporcionando melhor suporte à camada cementada. Neste caso, a indicação do aço 8620 é recomendada.

A dureza da camada cementada pode variar entre 50 e 63 HRC e a profundidade desta varia, dependendo da aplicação e do método de cementação, em geral, entre 75µm e 1,5 mm. A profundidade da camada cementada, que é função do tempo, da temperatura e do potencial de carbono na superfície, pode ser determinada tanto por análise química como por meio de

medição de dureza, pois a variação da microestrutura causa um perfil de dureza através da camada.

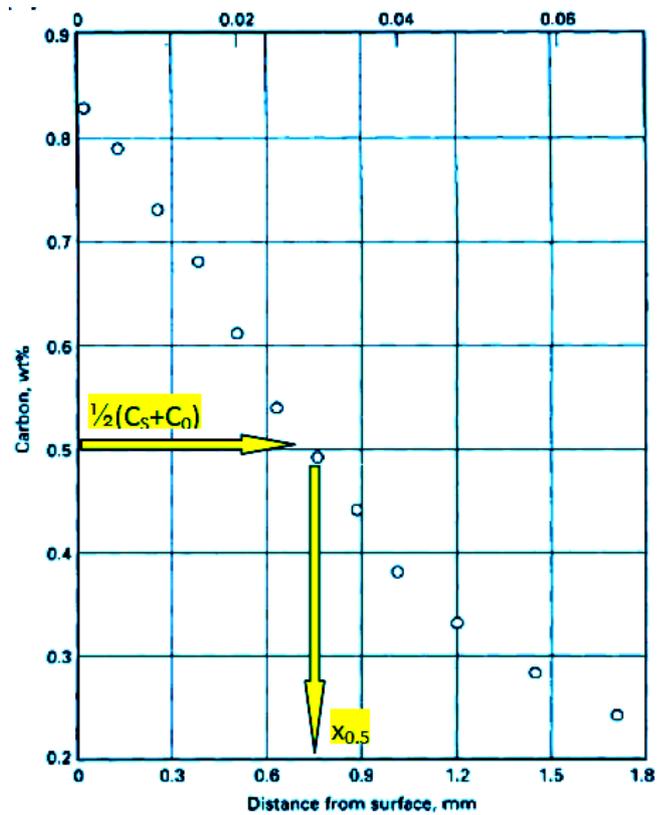
Se definirmos como meia distância de difusão,  $X_{0,5}$ , na condição  $C_C = \frac{1}{2}(C_S + C_0)$  (mostradas na Figura 40), isto é, quando a concentração de carbono ( $C_C$ ) é o valor médio entre a concentração de carbono na superfície ( $C_S$ ) e a concentração inicial de carbono na liga Fe-C ( $C_0$ ), esta distância pode ser aproximada segundo a equação:

$X_{0,5} = \sqrt{Dt}$ , pois, neste caso  $\text{erf}(0,5) = 0,5$  (Tabela 19). De forma similar, se considerarmos o valor médio da dureza entre a dureza da superfície ( $HV_S$ ) e a dureza inicial da liga Fe-C ( $HV_0$ ), pode-se determinar de forma aproximada a meia distância de difusão,  $X_{0,5}$ , ilustrada na Figura 41.

**Tabela 18 – Alguns valores para a função erro de Gauss, erf(z).**

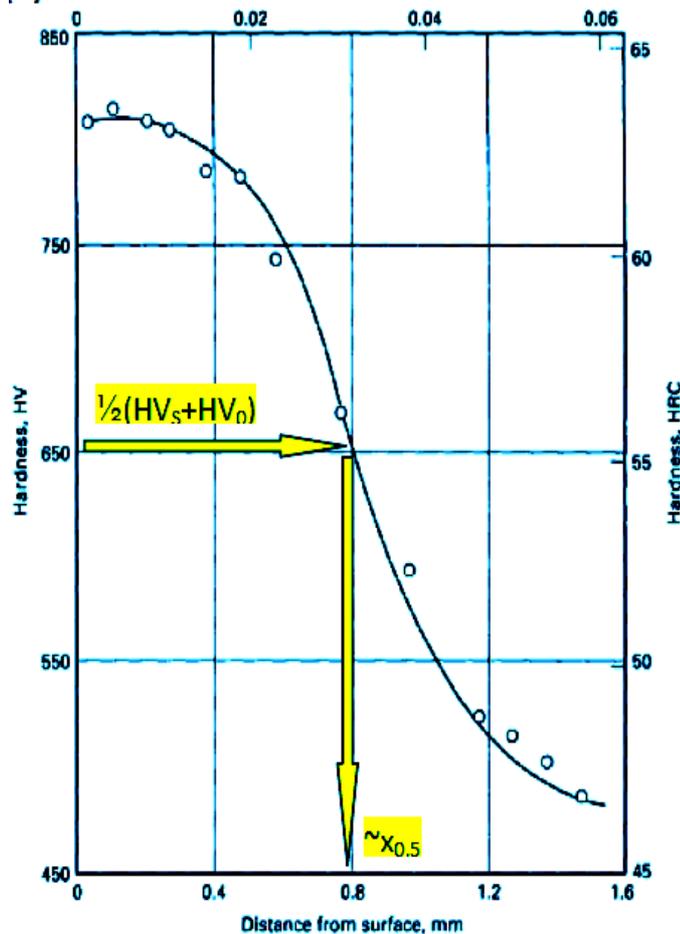
Dureza Verificada: VICKERS HV 0,5 a cada 0,1mm da superfície											
z	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
erf (z)	0	0,1	0,22	0,33	0,43	0,52	0,6	0,68	0,74	0,8	0,84

Fonte: O autor, 2013.



**Figura 37 - Gradiente de carbono em barras de aço 8620, cementadas a 925 °C.**

Fonte: ASM HANDBOOK, 1991.



**Figura 38 – Perfil de microdureza Vickers em barras de aço 8620 cementadas a 925 °C e temperadas.**

Fonte: Adaptado de ASM, 1991.

Existem duas profundidades de camada cementada de interesse, sob o ponto de vista tecnológico: a profundidade total, que é a distância da superfície a partir da qual não há variação química ou de propriedades mecânicas em relação às características do aço; e a profundidade efetiva, que é a distância da superfície até o ponto em que se alcança um valor de dureza especificado, usualmente 50 HRC.

A profundidade de camada, segundo os dados da tabela 15, para a cementação aplicada à corrente investigada é de 1,1 mm, aproximadamente, com a dureza em torno de 610 HV e uma dureza superficial de 851 HV.

Diante dos resultados obtidos dos ensaios feitos com os CP retirados da corrente, deliberou-se usar, para reproduzir o processo de cementação, dois aços, que são muito indicados para tal: O aço ABNT 1020 e o ABNT 8620.

A aquisição das amostras dos respectivos aços se deu através da cortesia e do excelente intercâmbio que existe, nesse país, entre indústrias e empresas de engenharia com as universidades e a pesquisa científica.

A amostra do aço 1020 foi gentilmente cedida pela empresa TEMPERAÇÃO RIO Tratamento Térmico de Aço e Metais LTDA, que também colaborou com a cementação das amostras. As características desta amostra são assim descritas:

- Barra trefilada de comprimento 1500 mm
- Bitola 12,7 mm (1/2 polegada)
- Aço ABNT 1020

A figura 39 mostra a barra e a figura 40, os respectivos procedimentos de usinagem em torno mecânico, da mesma para preparo dos CP, realizados nas oficinas da empresa Elegance Elevadores. Cada CP a ser cementado teve seu comprimento definido em 55 mm, conforme visualização das figuras 40 e 41. Sendo usinado um total de 27 corpos de prova.



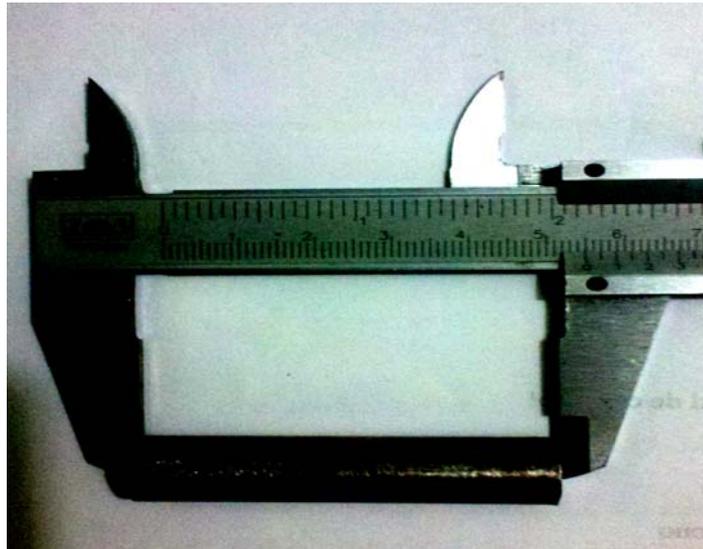
**Figura 39 – Barra de aço ABNT 1020 bitola 12,7 mm (1/2 polegada).**

Fonte: O autor, 2013.



**Figura 40 – Preparo da barra de aço ABNT 1020 para cementação.**

Fonte: O autor, 2013.



**Figura 41 – Comprimento do CP.**

Fonte: O autor, 2013.

A amostra do aço ABNT 8620, foi gentilmente doada pela empresa TENAX Aço e Ferro Ltda. Os dados da sua rastreabilidade, cujo número de lote é 0017353, são visualizados detalhadamente no anexo deste trabalho. As principais medidas são:

- Bitola = 12,70 mm
- Dureza HB 203
- Comprimento da amostra = 1500 mm
- A sua composição química é dada na tabela 17.

**Tabela 19 – Composição Química do aço 8620 utilizado na cementação.**

<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b>		
<b>QUÍMICA</b>	<b>ELEMENTO</b>	<b>%</b>
<b>Carbono</b>	<b>(C)</b>	<b>0,21</b>
<b>Silício</b>	<b>(Si)</b>	<b>0,22</b>
<b>Manganês</b>	<b>(Mn)</b>	<b>0,77</b>
<b>Fósforo</b>	<b>(P)</b>	<b>0,018</b>
<b>Enxofre</b>	<b>(S)</b>	<b>0,024</b>
<b>Cromo</b>	<b>(Cr)</b>	<b>0,51</b>
<b>Níquel</b>	<b>(Ni)</b>	<b>0,44</b>
<b>Molibdênio</b>	<b>(Mo)</b>	<b>0,16</b>

Fonte: Dados extraídos do Certificado de Qualidade da Gerdau.

A preparação dos CP do aço 8620 foi feita de maneira análoga a do aço 1020. Feito isto, os CP de ambos os aços foram encaminhados a duas conceituadas empresas de tratamento térmico, situadas na cidade do Rio de Janeiro, a TEMPERAÇÃO RIO Tratamento Térmico de Aço e Metais Ltda. e a BRASTEMPERA Beneficiamento de Metais Ltda., para o tratamento superficial (cementação) em dois tipos de fornos; Banho de sal e a gás, segundo o tratamento estatístico (planejamento fatorial  $2^k$ ) conforme o exposto na seção seguinte.

### 3.2 Planejamento dos Experimentos

Conhecendo-se da importância do planejamento de experimentos e, a objetividade na busca de resultados que essas técnicas proporcionam, utilizou-se, inicialmente, um planejamento fatorial completo  $2^3$  baseado nas variáveis de processo da cementação que exercem influência, tanto na espessura da camada cementada como na profundidade do endurecimento, ou seja, a temperatura, o tempo e o potencial de carbono no forno, a fim de estimar pontos ótimos para a execução destes processos, minimizando os custos operacionais.

A velocidade de difusão do carbono no aço está diretamente ligada à temperatura. Fica evidente que quanto maior a temperatura menor será o tempo que a peça deverá permanecer no forno. Como já fora citado, somente no estado austenítico acontece a solubilidade do carbono suficiente para chegar aos percentuais utilizados na camada superficial de peças cementadas. Desta forma, o limite inferior de temperatura para o processo está condicionado à austenitização do aço e o limite superior está condicionado ao crescimento de grão da austenita à medida que se usa temperaturas mais altas. Como quanto maior o tamanho de grão menor é a tenacidade do material, este efeito se torna indesejado. Assim, há dois compromissos que são antagônicos: ao aumenta a temperatura aumenta-se a velocidade de difusão, mas também se aumenta o tamanho de grão. Isto faz com que se tenha sempre que considerar estes dois fatores ao escolher a temperatura de cementação. Para peças menos solicitadas e de menor responsabilidade é possível utilizar temperaturas mais altas, entretanto, para peças mais solicitadas deve-se utilizar temperaturas mais baixas, a menos que se faça um tratamento térmico posterior para corrigir este problema.

Em relação ao tempo, a difusão do carbono também é influenciada por este enquanto a peça permanecer na temperatura de tratamento. A profundidade atingida no processo é proporcional à raiz quadrada do tempo. Isto quer dizer que à medida em que se desejem profundidades maiores, maior será o tempo de tratamento e a cada vez que se dobra a

espessura de cementação o tempo é multiplicado por 4 aproximadamente. Assim, quanto maior a profundidade que se queira maior será a consumo de energia e a ocupação do equipamento, fazendo com que este processo se torne antieconômico para camadas de profundidade muito grande. Em geral na prática esta espessura está limitada a 2,5 mm o que já dá um tempo de cementação de aproximadamente 25 horas a uma temperatura de 925 °C.

Com a finalidade de se determinar as condições ótimas de trabalho foram variados os parâmetros de temperatura de processo (920°C e 930°C), tempo efetivo de cementação (6 h e 10 h) e concentração de carbono (0,80 e 1,0%C), conforme Tabela 20.

**Tabela 20 – Planejamento Fatorial 2<sup>3</sup> dos Experimentos.**

FATORES	(-)	(+)	(Níveis)	
<b>A: Temperatura (°C)</b>	<b>920</b>	<b>930</b>		
<b>B: % Carbono</b>	<b>0,80</b>	<b>1,0</b>		
<b>C: Tempo (Horas)</b>	<b>06</b>	<b>10</b>		
ENSAIOS	A	B	C	(%)C (profundidade 1,1 mm)
<b>1</b>	-	-	-	
<b>2</b>	+	-	-	
<b>3</b>	-	+	-	
<b>4</b>	+	+	-	
<b>5</b>	-	-	+	
<b>6</b>	+	-	+	
<b>7</b>	-	+	+	
<b>8</b>	+	+	+	

Fonte: O autor, 2013

Para fins comparativos, realizaram-se simulações teóricas, utilizando um software que permite a obtenção das curvas de concentração de carbono, baseado na segunda lei de Fick, para diversas condições de contorno, que permite a obtenção das curvas de enriquecimento de carbono (VECCHIA, 2006) e (BAUMGARTEN, 2003) com bases estabelecidas no Planejamento Fatorial da tabela 20, para se atingir a profundidade de 1,1 mm nas amostras de aço de baixo carbono (0,20%C).

A seguir, são mostradas essas simulações na figura 42 a, b, c e d; respectivas aos 4 primeiros experimentos, e, 43 a, b, c e d; respectivas aos 4 últimos.

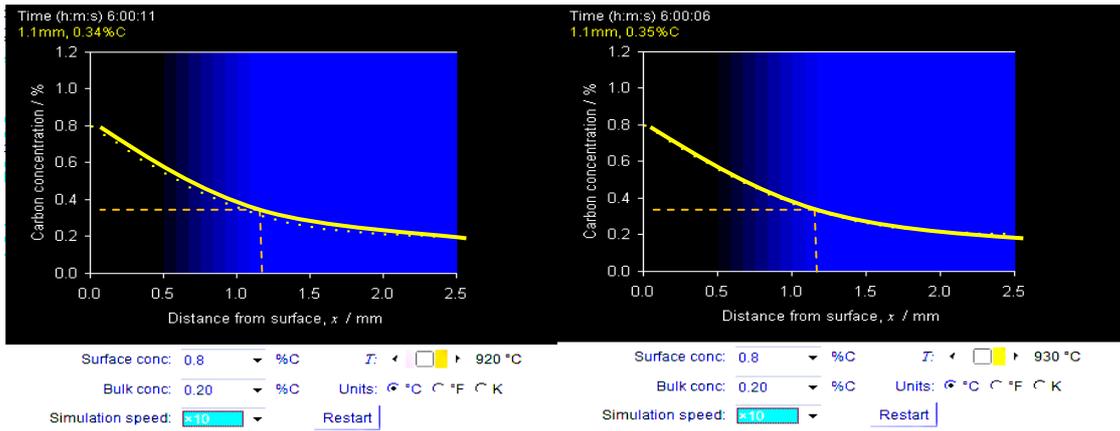


Figura 42 a – Simulação 1º Experimento: (-) (-) (-) / Figura 42 b – Simulação 2º Experimento: (+) (-) (-)

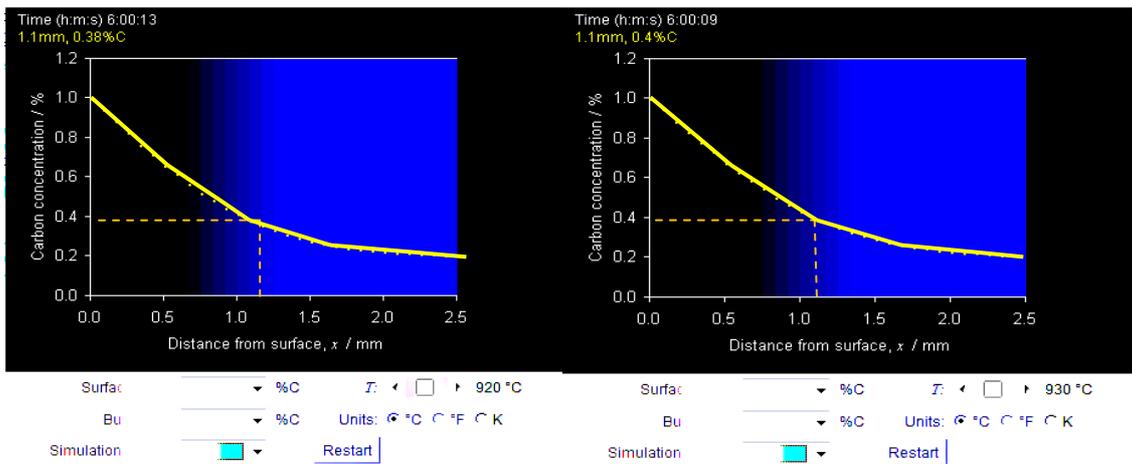
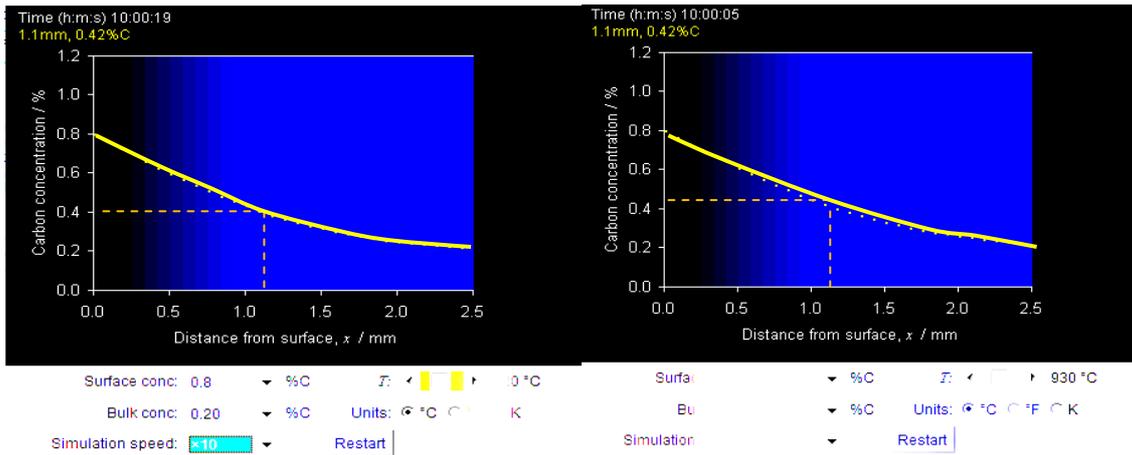


Figura 42 c – Simulação 3º Experimento: (-) (+) (-) / Figura 42 d – Simulação 4º Experimento: (+) (+) (-)

Fonte: O autor, 2013.

**Figura 42 a, b, c, d. Curvas de cementação teóricas – Experimentos 2<sup>3</sup> (1º, 2º, 3º e 4º).**



Figura

43 a – Simulação 5º Experimento: (-) (-) (+) / Figura 43 b – Simulação 6º Experimento: (+) (-) (+)

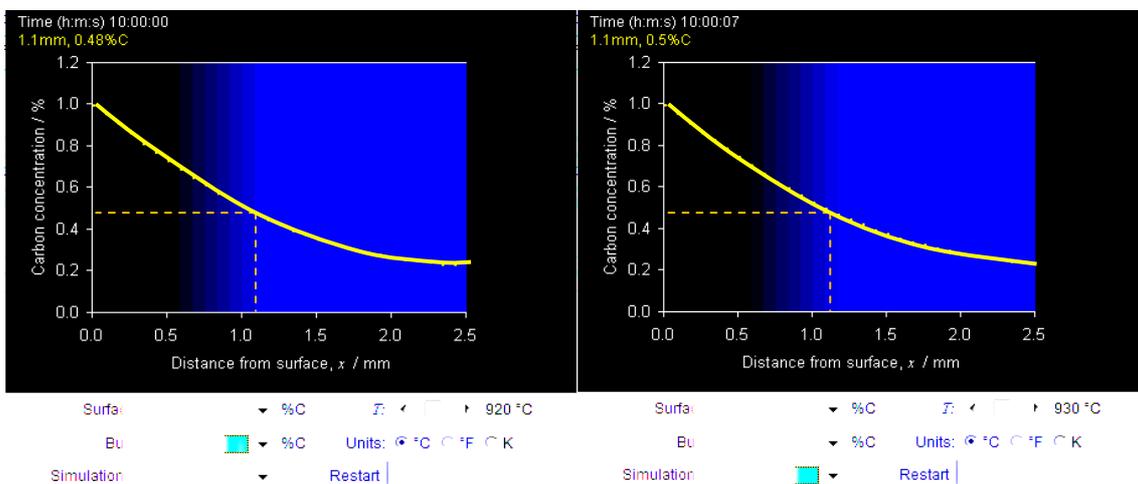


Figura 43 c – Simulação 7º Experimento: (-) (+) (+) / Figura 43d – Simulação 8º Experimento: (+) (+) (+)

---

**Figura 43 a, b, c, d. Curvas de cementação teóricas – Experimentos 2<sup>3</sup> (5º, 6º, 7º e 8º).**

Fonte: O autor, 2013.

Sabe-se pela literatura e também na prática que, os aços para cementação geralmente têm o teor de carbono em torno de 0,2% e o teor da camada cementada deve ter no máximo 1,0% C, pois teores de carbono muito altos podem resultar em austenita retida e microestrutura frágil, devido à formação de carbonetos pró-eutetóides nos contornos de grão da austenita.

A faixa estreita de temperatura é explicada também pela prática usual do processo, aplicada pelas empresas que fazem este tipo de tratamento.

Segundo o engenheiro Jorge Aníbal Barrionuevo, gerente da Qualidade da empresa TEMPERAÇO RIO Tratamento Térmico de Aço e Metais Ltda., a temperatura dos banhos de sal devem ser fixados para preservar a vida útil dos fornos e garantir o melhor rendimento

produtivo. Este profissional cita também que, com percentuais de carbono abaixo de 0,85% a camada cementada apresentará pontos moles (pouca dureza) enquanto que acima de 0,95% poderá ocorrer austenita retida em aços ligados (8620), não sendo, portanto adequado para se obter dureza acima de 60 HRC.

A seguir, na Tabela 20, serão mostrados os resultados do Planejamento Fatorial 2<sup>3</sup>, das simulações teóricas, realizadas a partir dos fatores que influenciam o percentual de carbono na profundidade de camada desejada (1,1 mm).

**Tabela 21 – Resultados do Planejamento Fatorial 2<sup>3</sup>.**

FATORES		(-)	(+)	(Níveis)
<b>A:</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>920</b>	<b>930</b>	
<b>B:</b>	<b>% Carbono</b>	<b>0,80</b>	<b>1,0</b>	
<b>C:</b>	<b>Tempo (Horas)</b>	<b>06</b>	<b>10</b>	
ENSAIOS	A	B	C	(%)C (profundidade 1,1 mm)
<b>1</b>	-	-	-	<b>0,34</b>
<b>2</b>	+	-	-	<b>0,35</b>
<b>3</b>	-	+	-	<b>0,38</b>
<b>4</b>	+	+	-	<b>0,40</b>
<b>5</b>	-	-	+	<b>0,42</b>
<b>6</b>	+	-	+	<b>0,42</b>
<b>7</b>	-	+	+	<b>0,48</b>
<b>8</b>	+	+	+	<b>0,50</b>

Fonte: O autor, 2013

Os CP enviados à TEMPERAÇÃO RIO no intuito de se reproduzir uma cementação com os mesmos resultados encontrados na corrente de elos, por motivos operacionais da referida empresa, não puderam ser cementados de acordo com o Planejamento Fatorial 2<sup>3</sup>, previamente elaborado, pois estes entrariam nos banhos de sal com uma temperatura definida para outras peças que custeavam aquela produção, assim como o fator relativo ao percentual de carbono que, também, estaria constante devido ao mesmo motivo. Assim, seguiu-se com as operações, aproveitando os CP e variando-se apenas o **tempo** de acordo com a metodologia a seguir:

Foram selecionados 7 CP da barra de aço ABNT 1020 de ½”, sendo enumerados de 1 a 7, através da marcação por punção. Seguiu-se, após isso uma planilha, conforme especificada na tabela 21, para efetuar-se uma cementação em banho de cianeto de sódio, conforme as seguintes especificações:

Foram fixadas a temperatura e a composição do banho, respectivamente em  $910^{+/-10^{\circ}\text{C}}$  e 0,85/0,90%. Segundo o gerente da Qualidade da TEMPERAÇÃO RIO (BARRIONUEVO), para se conseguir este percentual de carbono, é necessário que o percentual de NaCN no banho esteja entre 9 e 11%, visto que o objetivo é alcançar uma camada espessa (1,1 mm). Este fato é confirmado pela Tabela 1.

**Tabela 22 – Planilha de Cementação Líquida (Banho de Sal), amostras do aço ABNT 1020.**

Corpo de Prova N°	Tempo em horas	Camada Temperada
01	01	
02	02	
03	03	
04	04	
05	05	
06	10	
07	15	

Fonte: O autor, 2013

Após a cementação, os CP foram temperados em salmoura (10%), sendo revenidos durante 30 minutos em banho de sal a  $160^{\circ}\text{C}$ . A Têmpera, como já citado, aumenta a dureza da superfície, proporcionando resistência mecânica e ao desgaste. A têmpera em salmoura (NaCl ou CaCl) utiliza concentrações entre 2 e 25%, mas, geralmente, utiliza-se como referência 10% de NaCl. As taxas de resfriamento da salmoura são superiores às obtidas em água pura para a mesma agitação. O objetivo do revenido é diminuir os efeitos da têmpera, e atenuar ou fazer desaparecer as tensões internas da peça. Aquecimento: será feito lentamente até a temperatura do revenido. A temperatura de revenido normalmente situa-se entre  $150^{\circ}\text{C}$  e  $600^{\circ}\text{C}$ , e o tempo de duração entre 1h e 3h. Portanto, quanto maior a temperatura empregada, mais o revenido tende a reduzir a dureza originalmente obtida na têmpera. Quanto ao arrefecimento, este é realizado geralmente por ar. Um arrefecimento muito rápido pode provocar novas tensões.

Quanto aos CP do aço ABNT 8620, também enviados a TEMPERAÇÃO RIO, foram processados conforme a Planilha representada na Tabela 22.

**Tabela 23 – Planilha de Cementação Líquida (Banho de Sal), aço ABNT 8620  
TEMPERAÇÃO RIO.**

Corpo de Prova	Tempo (horas)	Camada Temperada
1	4	
2	6	
3	8	
4	10	

Fonte: O autor, 2013

Os dois corpos de prova, após a cementação foram temperados a 840 °C por 10 minutos, sendo resfriados em óleo e revenidos à 165°C por 3 horas.

No intuito de se efetivar o escopo deste trabalho, ou seja, aplicar um Planejamento Fatorial de modo a viabilizar a melhor resposta, a partir dos fatores escolhidos que afetam o processo da cementação, conseguiu-se junto à empresa BRASTÊMPERA, que se procedesse à aplicação dos dois Planejamentos Fatoriais 2<sup>2</sup> para os dois processos de cementação investigados (Líquida e Gasosa), respectivamente mostrados nas tabelas 23 e 34, visto que a referida empresa trabalha com os dois processos e possui mais equipamentos disponíveis. Ainda assim houve uma limitação da prática do Planejamento Fatorial 2<sup>3</sup>, já que no período dos ensaios não foi possível variar o %C nos dois tipos de fornos, pelos mesmos motivos apresentados pela empresa TEMPERAÇÃO RIO.

**Tabela 24 – Planejamento Fatorial 2<sup>2</sup> para Cementação em Banho de Sal. Resultados teóricos, obtidos a partir do software aplicado.**

FATORES		(-)	(+)	(Níveis)
<b>A:</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>930</b>	<b>940</b>	
		<b>%C</b>	<b>fixado (1,00%)</b>	
<b>B:</b>	<b>Tempo (Horas)</b>	<b>04</b>	<b>10</b>	
ENSAIOS	A	B	(%) C (profundidade 1,1 mm)	
<b>1</b>	-	-	<b>0,32</b>	
<b>2</b>	-	+	<b>0,49</b>	
<b>3</b>	+	-	<b>0,35</b>	
<b>4</b>	+	+	<b>0,52</b>	

Fonte: O autor, 2013

**Tabela 25 – Planejamento Fatorial 2<sup>2</sup> para cementação a gás. Resultados obtidos através do software aplicado.**

FATORES		(-)	(+)	(Níveis)
A: Temperatura (°C)		920	930	
%C fixado (1,10%)				
B: Tempo (Horas)		06	10	
ENSAIOS	A	B	(% ) C (profundidade 1,1 mm)	
1	-	-	0,41	
2	-	+	0,51	
3	+	-	0,43	
4	+	+	0,51	

Fonte: O autor, 2013

Após a cementação, cada corpo de prova (CP), foi temperado a 860°C durante 30 minutos, resfriado em óleo a 45° e revenido a 180°C.

Terminado o processo, as peças foram enviadas para o laboratório da TORK Controle Tecnológico de Materiais Ltda. para os ensaios de dureza, determinação da profundidade de endurecimento, análise química e metalográfica das mesmas.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Interpretações dos Resultados dos Planejamentos Fatoriais

Foi utilizada uma versão do programa MATLAB (R2006a) para obter os resultados dos Planejamentos Fatoriais propostos para este trabalho, cujos dados são:

- Planejamento Fatorial  $2^3$  (Tabela 20).

$X$  = Matriz 8x8 com os sinais algébricos dos coeficientes de contraste.

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$y$  = Vetor coluna contendo os rendimentos dos ensaios.

0.3400

0.3500

0.3800

0.4000

0.4200

0.4200

0.4800

0.5000

$X^t y$  = Cálculo dos efeitos.

3.2900

0.0500

0.2300

0.3500

0.0300

**-0.0100**

0.0500

0.0100

**Efeitos** = (aparecem no vetor em ordem idêntica à das colunas da matriz  $X$ , de maneira análoga à da tabela 13, utilizando-se números ao invés de letras).

Média 0.4112

1 - 0.0125 ..a temperatura exerce razoável influência no processo.

2 - 0.0575 ..o fator concentração é mais significativo que a temperatura.

3 - 0.0875...o fator **tempo** é o mais significativo em relação aos outros fatores.

12 - 0.0075...a interação entre temperatura e %C é irrelevante comparado ao tempo.

**13 - -0.0025...a interação entre tempo e temperatura é insignificante.**

23 - 0.0125...a interação entre %C e tempo é mais relevante do que as anteriores

123 - 0.0025...a interação entre os 3 fatores é menor que a interação 12, porém muito maior que a interação 13.

**Coefficientes =**

0.4112

0.0062

0.0288

0.0438

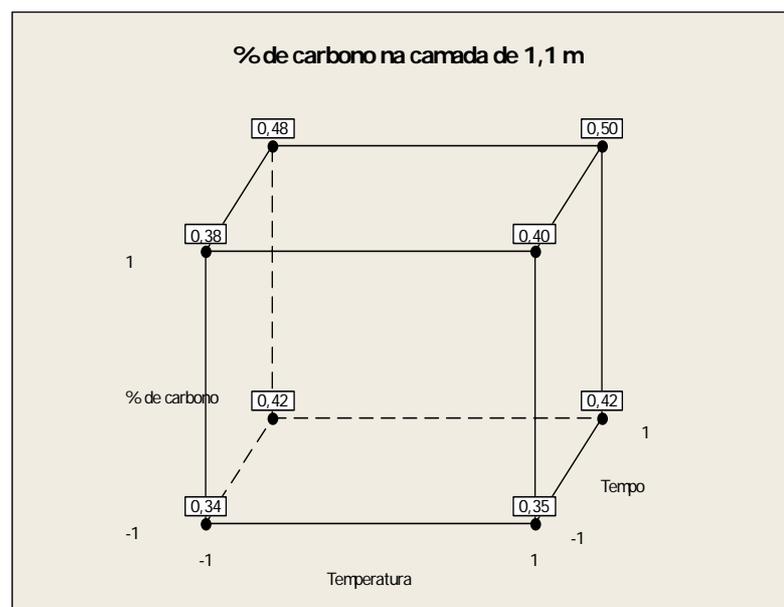
0.0038

**-0.0013**

0.0063

0.0012

Segundo Neto (2001), os efeitos calculados num fatorial  $2^3$  também podem ser interpretados como contrastes geométricos. Os oito ensaios da matriz de planejamento correspondem aos vértices do cubo. Para os ensaios em questão, basta visualizar a Figura 44.



**Figura 44 – Interpretação Geométrica dos Efeitos no Planejamento  $2^3$ .**

Fonte: O autor, 2013

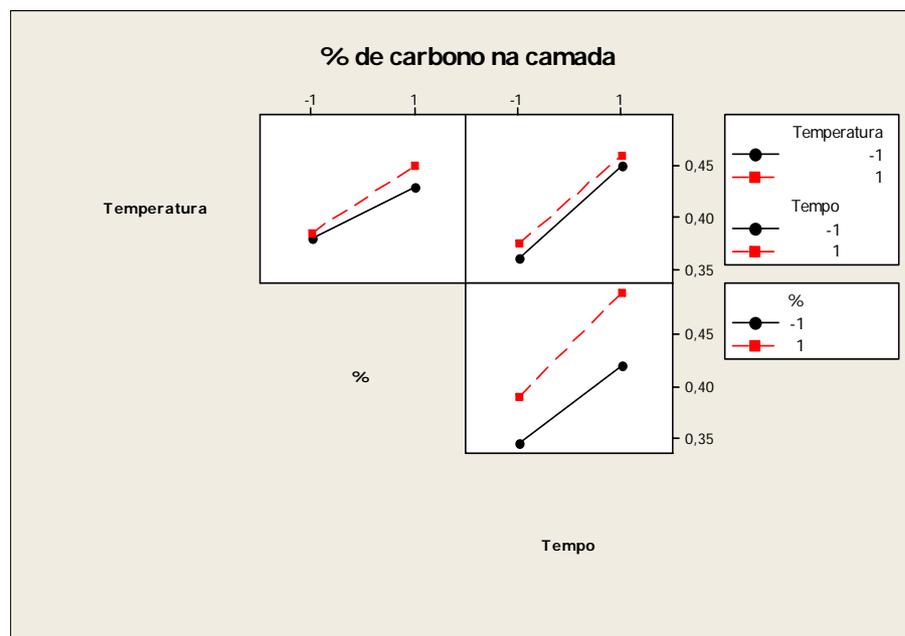
A figura revela que os ensaios negativos estão todos numa das faces do cubo, a que é perpendicular ao eixo do fator 1 (temperatura) e está situada no nível inferior deste fator. Os demais ensaios estão na face oposta, que corresponde ao nível superior desse fator. Os efeitos principais são contrastes entre as faces opostas, e os efeitos de interação são contrastes entre os planos diagonais. Observa-se que o ensaio nº 8, correspondente aos níveis (+++) possui o

maior %C, ou seja, 0,50. Isto se deve ao fato da máxima temperatura, máximo %C e máximo tempo no forno.

Analisando-se novamente o cubo, verifica-se que o %C igual a 0,34, corresponde à combinação de tratamento com todos os fatores em nível baixo, o valor 0,35 indica o nível alto do fator temperatura, o valor **0,42** corresponde ao maior nível do **fator tempo**, 0,38 indica, por sua vez, o **nível mais elevado** para o percentual de carbono, enquanto que 0,40 mostra a interação entre o primeiro e terceiro fatores, já o valor 0,48 indica a interação entre o segundo e terceiro fatores, finalizando-se com o valor 0,50 que representa a interação entre os três fatores do planejamento.

Conclui-se com estes resultados que, o **fator tempo** é o mais significativo para o experimento, contribuindo para um melhor rendimento obtido (0,42%C).

Analisando-se as interações entre os fatores, conclui-se que o melhor resultado aponta para o nível mais elevado entre todos os fatores (Temperatura, Tempo e %C), ou seja, 0,50%C na camada cementada. Essas mesmas conclusões podem ser visualizadas de outra forma, conforme a Figura 45.



**Figura 45 – Variação da resposta com os níveis dos três fatores.**

Fonte: O autor, 2013

Na figura acima estão representadas as interações entre dois efeitos. A interação que demonstrou maior rendimento foi entre a temperatura e o tempo (0,50%), nos níveis máximos de temperatura e tempo. Conclui-se que, para se conseguir um melhor rendimento

para o experimento deve-se utilizar a temperatura e o tempo no seu nível máximo, levando-se em conta estas interações.

- Planejamento Fatorial  $2^2$  para Cementação em Banho de Sal.

**Percentual de Carbono fixado em 1,0%**

[média, efeitos, coeficientes] = planejamento fatorial ( $2^2$ )

**X** = Matriz 4x4 com os sinais algébricos dos coeficientes de contraste.

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

**Y** = Vetor coluna contendo os rendimentos dos ensaios.

0.3200

0.4900

0.3500

0.5200

**X<sup>t</sup>Y** = Cálculo dos efeitos.

1.6800

0.3400

0.0600

0

**Média** = 0.4200

**Efeitos** =

0.1700...este efeito (tempo) é bastante preponderante.

0.0300...já o efeito da temperatura é pouco influente.

0.....a interação entre os dois efeitos anteriores é nula.

**Coeficientes** =

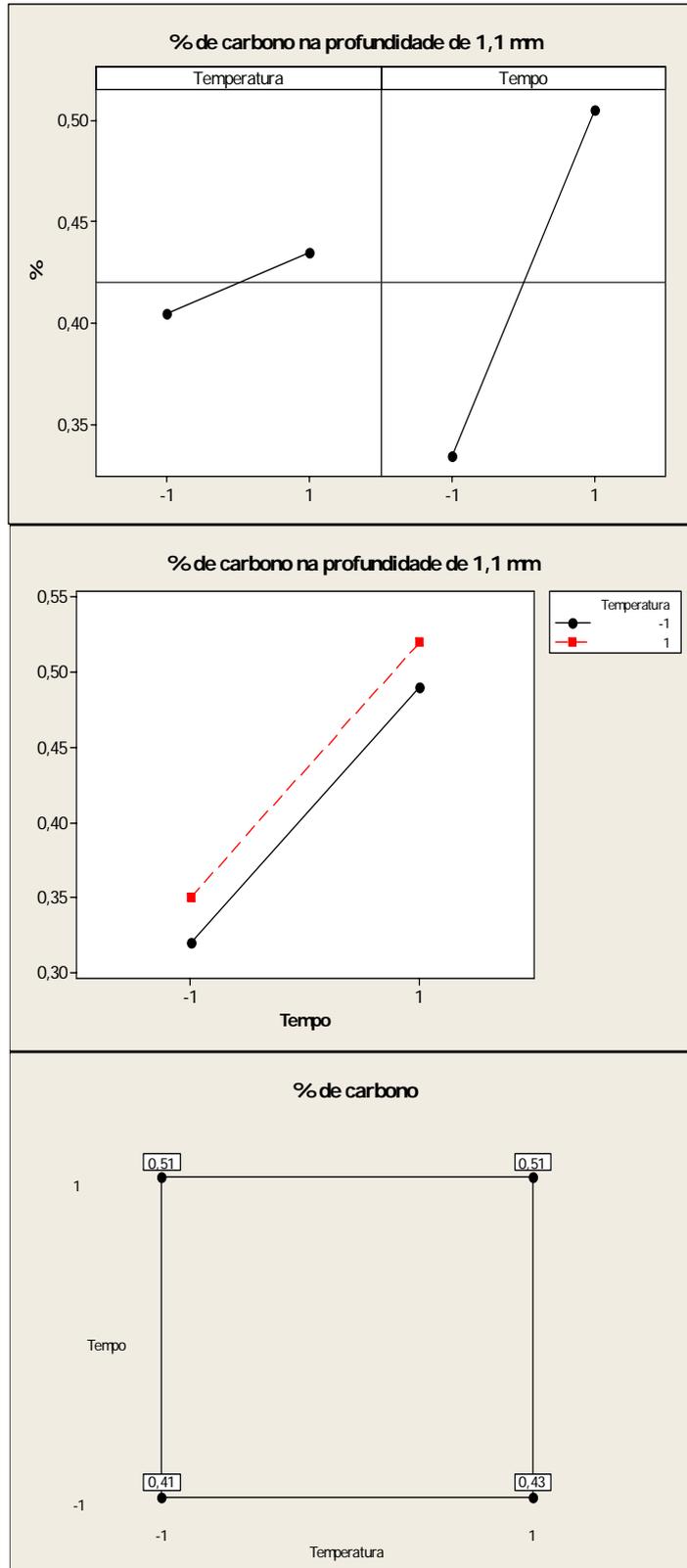
0.4200

0.0850

0.0150

0

A análise gráfica dos resultados deste planejamento é mostrada na Figura 46 e comentada a seguir:



**Figura 46 – Análise gráfica do planejamento fatorial 2<sup>2</sup> para cementação líquida.**  
 Fonte: O autor, 2013

O primeiro quadro (alto) da figura mostra a importância do fator tempo para o processo da cementação. Este maior efeito principal é justificado pela inclinação íngreme da linha que conecta as respostas médias para o nível baixo e o nível alto. O segundo quadro mostra a interação nula entre os fatores principais (tempo e temperatura). Já o último quadro (abaixo) mostra o perfil do Planejamento  $2^2$ , ou seja, os valores dos seus rendimentos e seu único efeito de interação são plotados nos vértices do quadrado.

- Planejamento Fatorial  $2^2$  para Cementação a Gás.

### Percentual de Carbono 1,1%

[média, efeitos, coeficientes] = planejamento fatorial ( $2^2$ )

$\mathbf{X}$  = Matriz 4x4 com os sinais algébricos dos coeficientes de contraste.

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{Y}$  = Vetor coluna contendo os rendimentos dos ensaios.

0.4100

0.5100

0.4300

0.5100

$\mathbf{X}^t \mathbf{Y}$  = Cálculo dos efeitos.

1.8600

0.1800

0.0200

**-0.0200**

**Média** = 0.4650

**Efeitos** =

0.0900...outra vez o fator tempo é o mais significativo no processo.

0.0100...a temperatura é 9 vezes inferior ao fator tempo.

**-0.0100...a interação entre tempo e temperatura agora é negativa**

**Coeficientes** =

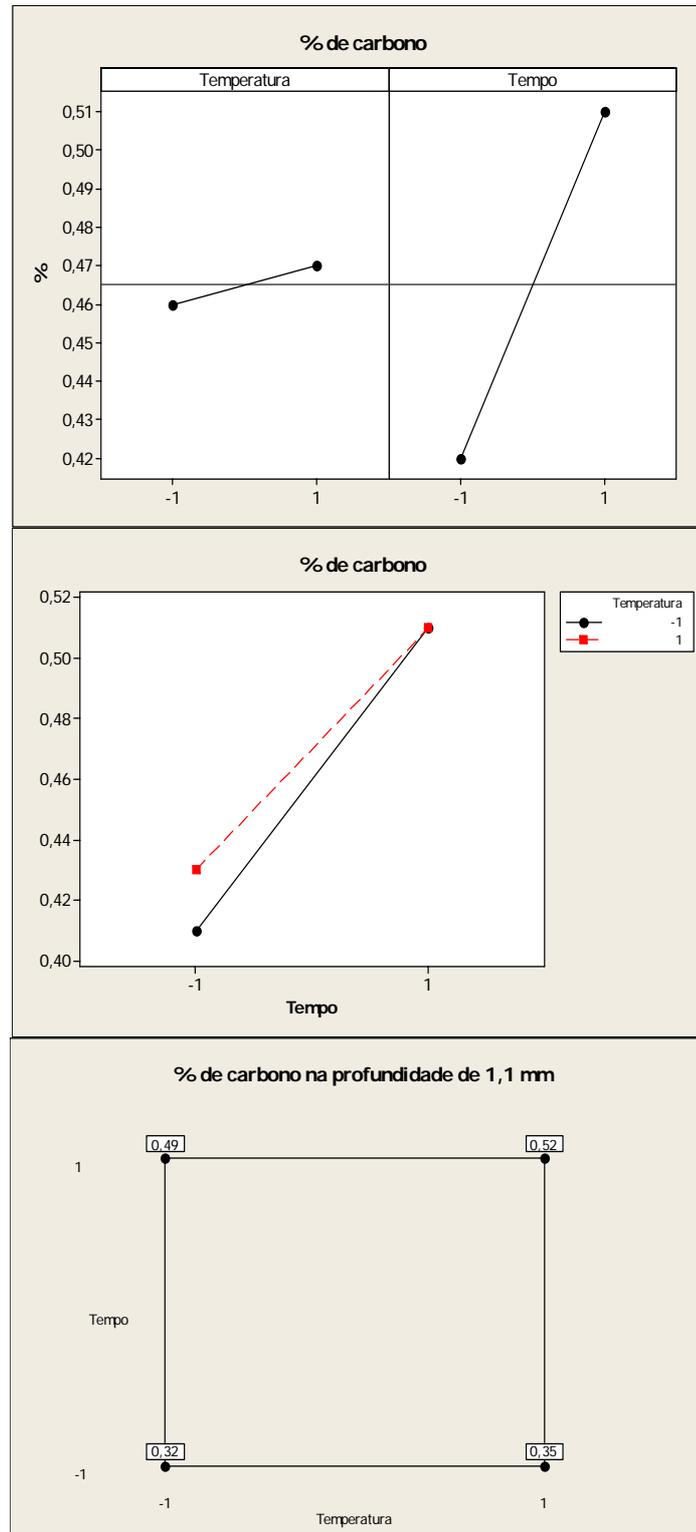
0.4650

0.0450

0.0050

**-0.0050**

A análise gráfica para este Planejamento é mostrada na Figura 47, sendo comentada a seguir.



**Figura 47 – Análise gráfica do planejamento fatorial 2<sup>2</sup> para cementação a gás.**

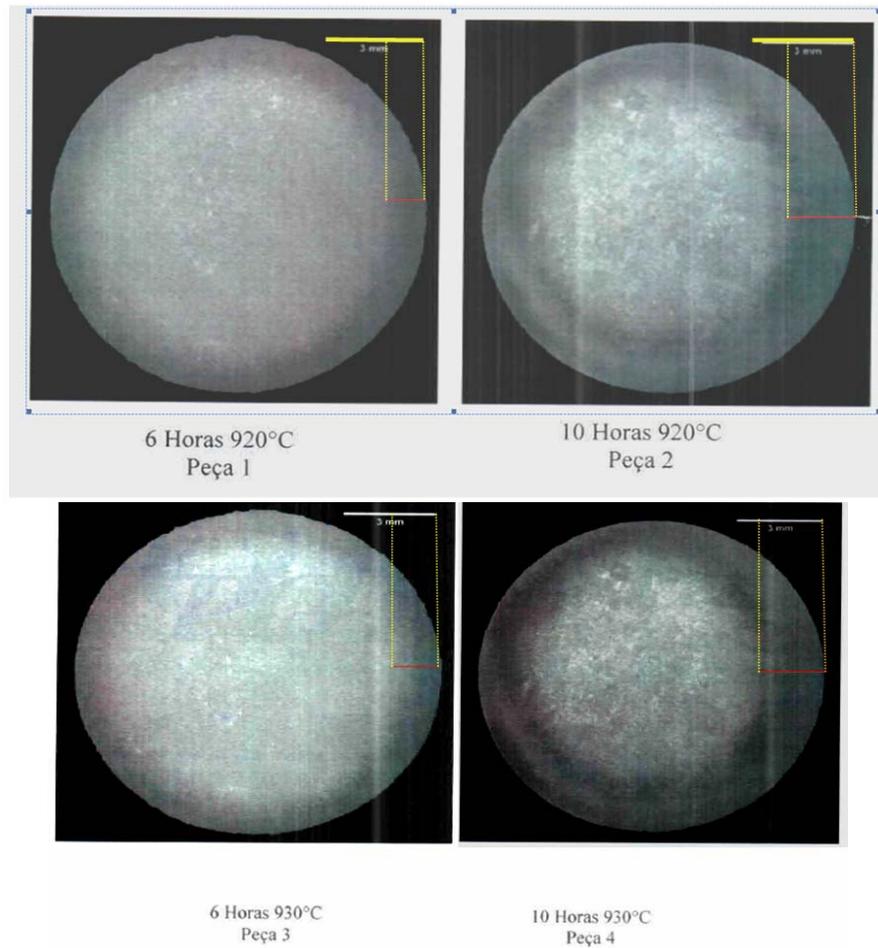
Fonte: O autor, 2013

No quadro de cima, nota-se, mais uma vez a preponderância do fator tempo, no processo, enquanto que o quadro central mostra a interação negativa entre tempo e temperatura.

#### **4.2 Resultados práticos dos processos planejados**

A seguir são apresentados os resultados obtidos no controle da Microdureza Vickers (mHV), em diversas profundidades a partir da superfície, que resultam nos perfis de endurecimento dos diferentes aços tratados. Os ensaios foram realizados nos Corpos de Prova cementados, temperados e revenidos, isto é, aço SAE/ABNT 1020 – resfriamento em água a 25 °C e aço SAE/ABNT 8620 – resfriamento em óleo a 45 °C, ambos, sendo revenidos a 180°C. Os laudos técnicos de alguns destes ensaios são mostrados no Anexo deste trabalho.

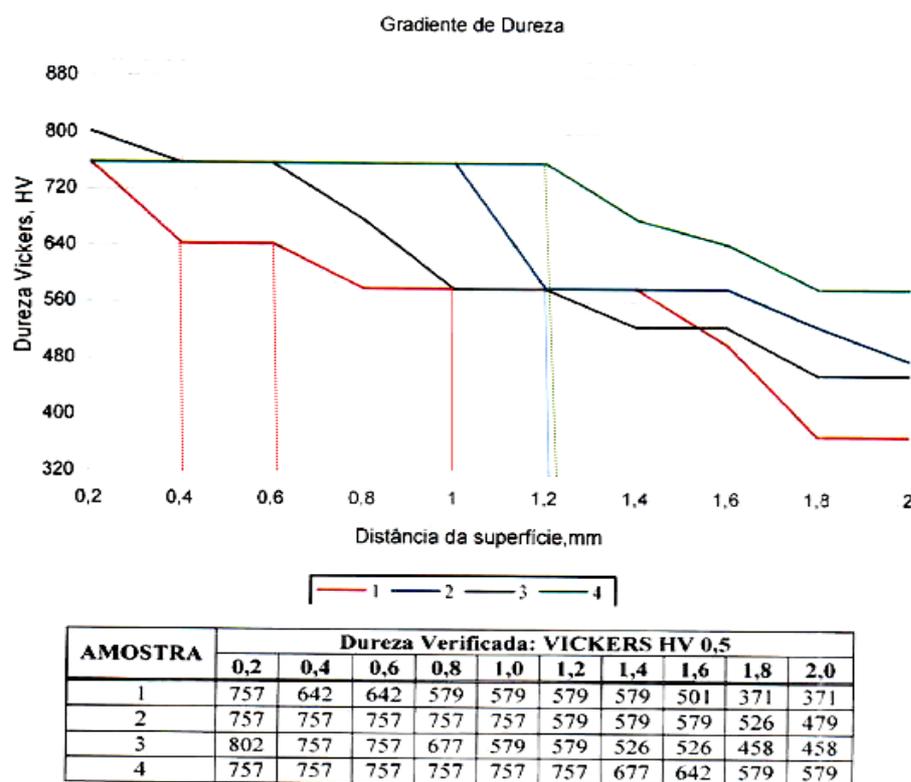
O primeiro resultado prático a ser discutido será o da cementação a gás, cujo planejamento fatorial  $2^2$  foi citado na Tabela 23, sendo sua macrografia mostrada na Figura 48.



**Figura 48 – Exame metalográfico: macrografia do aço ABNT 8620 cementação gasosa, %C = 1,1%, temperado em óleo e revenido.**

Fonte: O autor, 2013

Nota-se, através da escala (3,0 mm) dada, em cada macrografia, que o perfil da camada cementada está bem próximo do desejado, mas o resultado mais exato só poderá ser definido através da interpretação do gradiente de dureza, apresentado na Figura 49.



**Figura 49 – Gradiente de dureza e profundidade de camada das amostras cementadas a gás do aço ABNT 8620.**

Fonte: O autor, 2013

Os CP estão listados e numerados na coluna AMOSTRA, correspondendo a ordem do Planejamento Fatorial  $2^2$ , cada gráfico, neste caso, está associado a uma cor e seu respectivo CP.

Observando-se o gráfico preto, relativo ao corpo de prova nº3, verifica-se uma dureza de 579 HV, bem próxima da exigida da peça investigada deste trabalho (610 HV), para a profundidade de 1,2 mm de camada contra a de 1,1 mm, encontrada no elo de corrente. Os dados de processo desta peça, segundo a Figura 48, foram 6 horas de forno a 930°C, temperada a 860°C durante 30 minutos em óleo e revenida a 180°C.

Analisando-se o gráfico vermelho, relativo ao CP nº 1, observa-se um gradiente de dureza mais escalonado, atingindo na camada solicitada a dureza exigida pelo projeto. Segundo Spim Jr. (2002), deve-se procurar evitar uma linha nítida de demarcação entre a camada cementada e o núcleo, isto é, a distribuição do carbono ou gradiente de carbono da superfície ao centro deve ser suave, evitando-se bruscas quedas de carbono. Os dados de processo deste CP foram: 920°C, durante 6 horas, temperado e revenido nas mesmas condições do anterior.

Em uma última análise deste ensaio, observa-se que os gráficos para os CP nº 2 e nº 4 apontam resultados de camadas acima de 1,2 mm, muito uniformes, porém de alta dureza, além de representarem o fator de processo mais relevante, o tempo, em seu nível mais alto (10 horas) aumentando o custo do processo. Segundo informação verbal do Sr. Márcio Giesteira Chianca, gerente comercial da BRASTÊMPERA Beneficiamento de Metais Ltda., o custo para se produzir uma peça com as características planejadas dos CP 2 e 4, durante 10 horas é de \$7,00 unidades monetárias/Kg, em seus fornos a gás ou em banho de sal.

A Figura 50 mostra as micrografias de camada cementada e de núcleo para o ensaio realizado no CP nº 1.



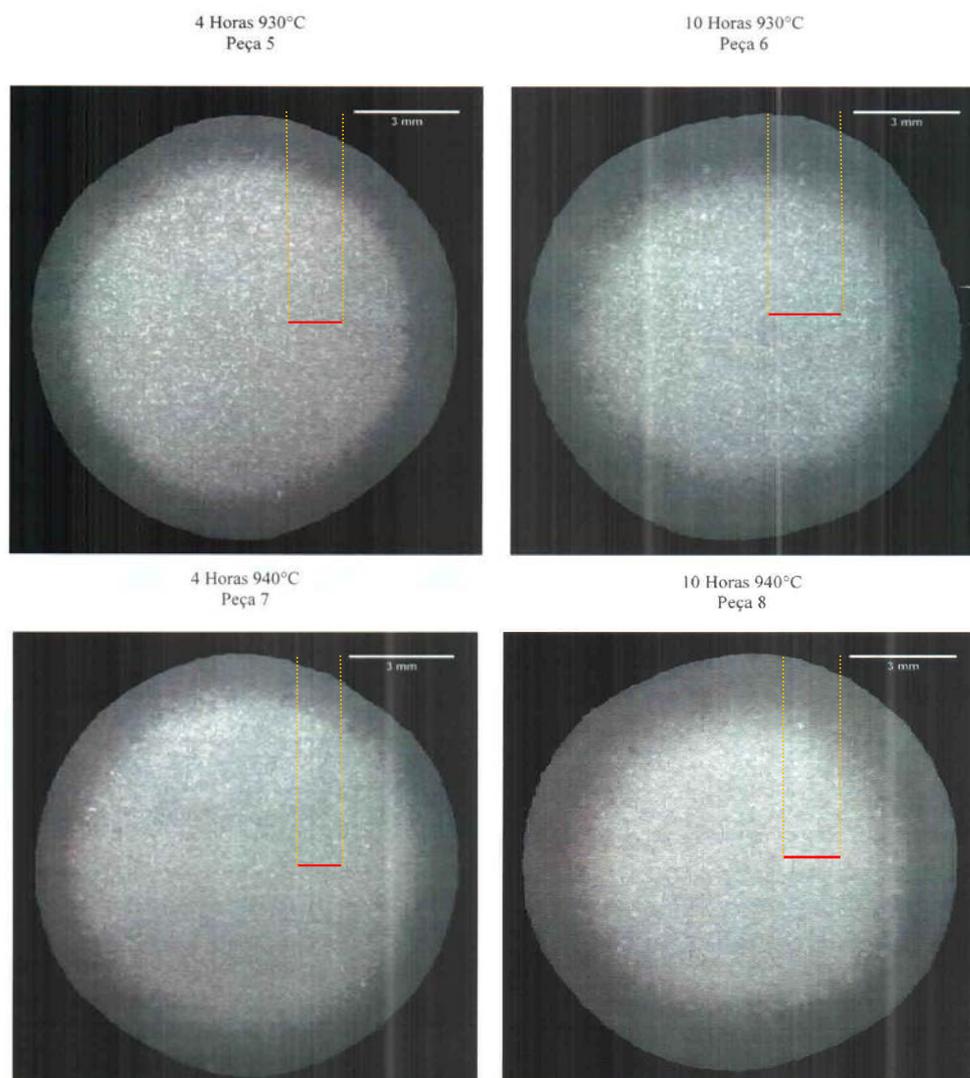
**Figura 50 – Micrografias do ensaio no CP nº1.**

Fonte: O autor, 2013.

Observa-se, nesta figura, a microestrutura obtida após o revenimento; a martensita revenida.

As normas utilizadas nos ensaios realizados para este planejamento estão citadas nos Relatórios da TORK, sob o nº 12054719 MESP e 12065250 MESP, anexado a este trabalho.

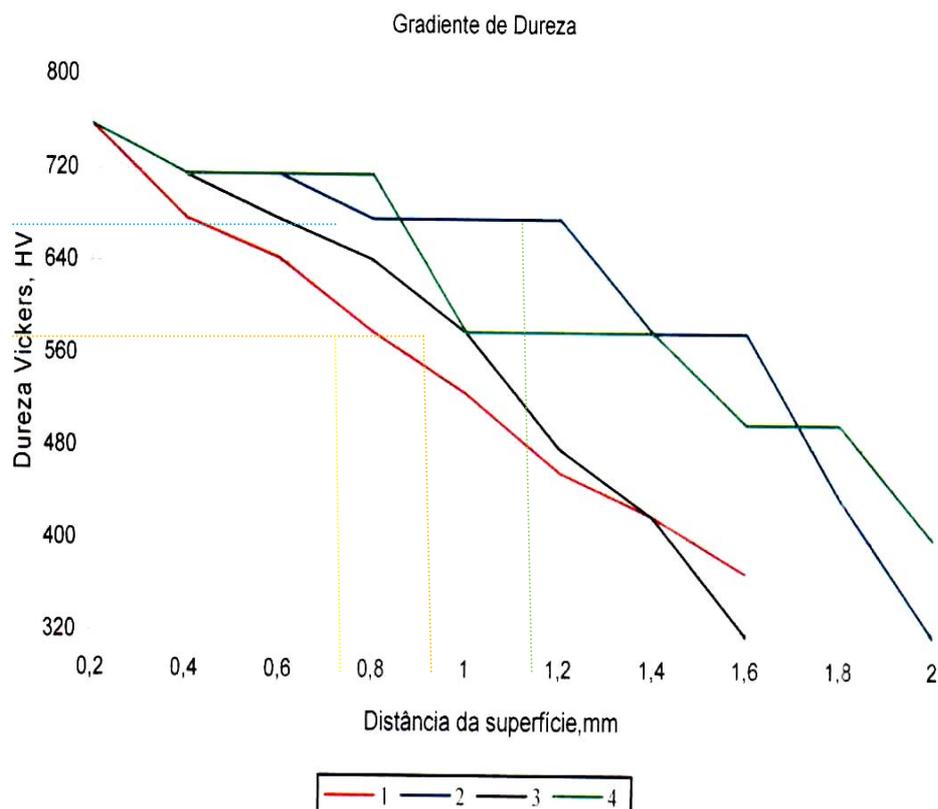
A seguir serão discutidos os resultados do Planejamento Fatorial 2<sup>2</sup> do ensaio do processo de Cementação em Banho de Sal do aço ABNT 8620, temperado em óleo e revenido, cujos dados de planejamento e respectivos exames macroscópicos são mostrados na Figura 51.



**Figura 51 – Macrografia do aço ABNT 8620 cementação Banho de Sal com %C = 1,0%, temperado em óleo e revenido.**

Fonte: O autor, 2013

Conforme o ensaio anterior (Figura 48), as camadas cementadas podem ser aproximadamente medidas pela escala mostrada em cada amostra, mas para uma melhor visualização, novamente será necessário observar os gradientes de dureza, mostrados na Figura 52.



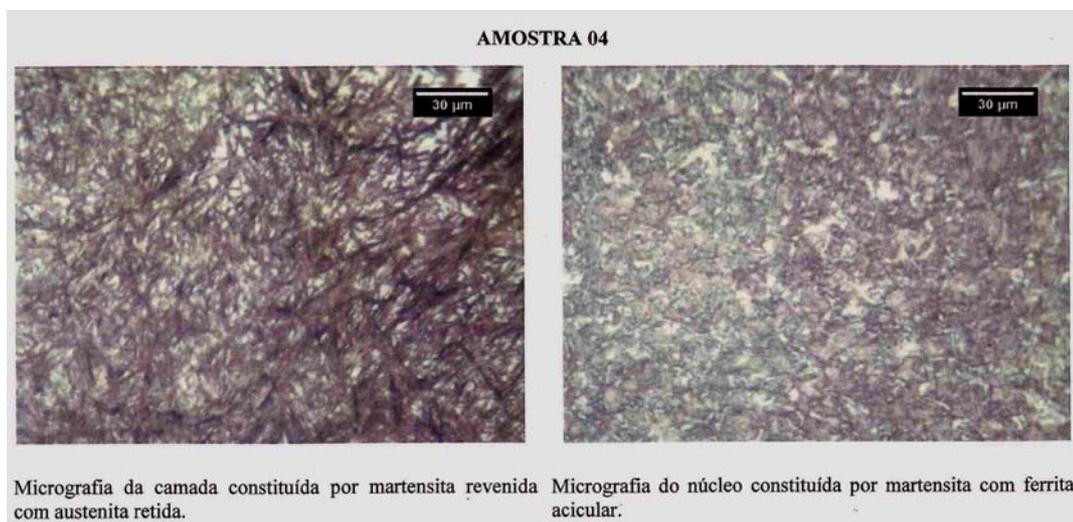
AMOSTRA	Dureza Verificada: VICKERS HV 0,5										
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	
5	6	757	677	642	579	526	458	420	371	--	--
6	7	757	715	715	677	677	677	579	579	438	318
7	8	757	715	677	642	579	479	420	318	--	--
8	9	757	715	715	715	579	579	579	501	501	402

**Figura 52 – Gradiente de dureza e profundidade de camada das amostras cementadas em banho de sal do aço ABNT 8620.**

Fonte: O autor, 2013

O gradiente de dureza do CP nº 5, representado pelo gráfico nº1 (vermelho), apresenta profundidade de camada em torno de 0,8 mm e dureza 579 HV próxima ao do objetivo do trabalho (610 HV). Nota-se nitidamente que a dureza diminui rapidamente com a profundidade. Isto, como já citado, deve ser evitado. Nota-se uma nítida linha divisória entre a camada cementada e o núcleo do CP, ao se visualizar o quadro correspondente da figura 51. Analisando-se o CP nº 6, gráfico 2 (azul), apresenta um gradiente de dureza bem elevado, 667 HV, na profundidade de 1,2mm. O CP nº7 e CP nº 8 diferente dos demais, apresentam um gradiente de dureza relativamente alto, mas na profundidade de 1,1 a 1,2 mm esta dureza é de 579 HV, mais próxima da profundidade desejada (610 HV). O CP nº 7 leva a vantagem de ter

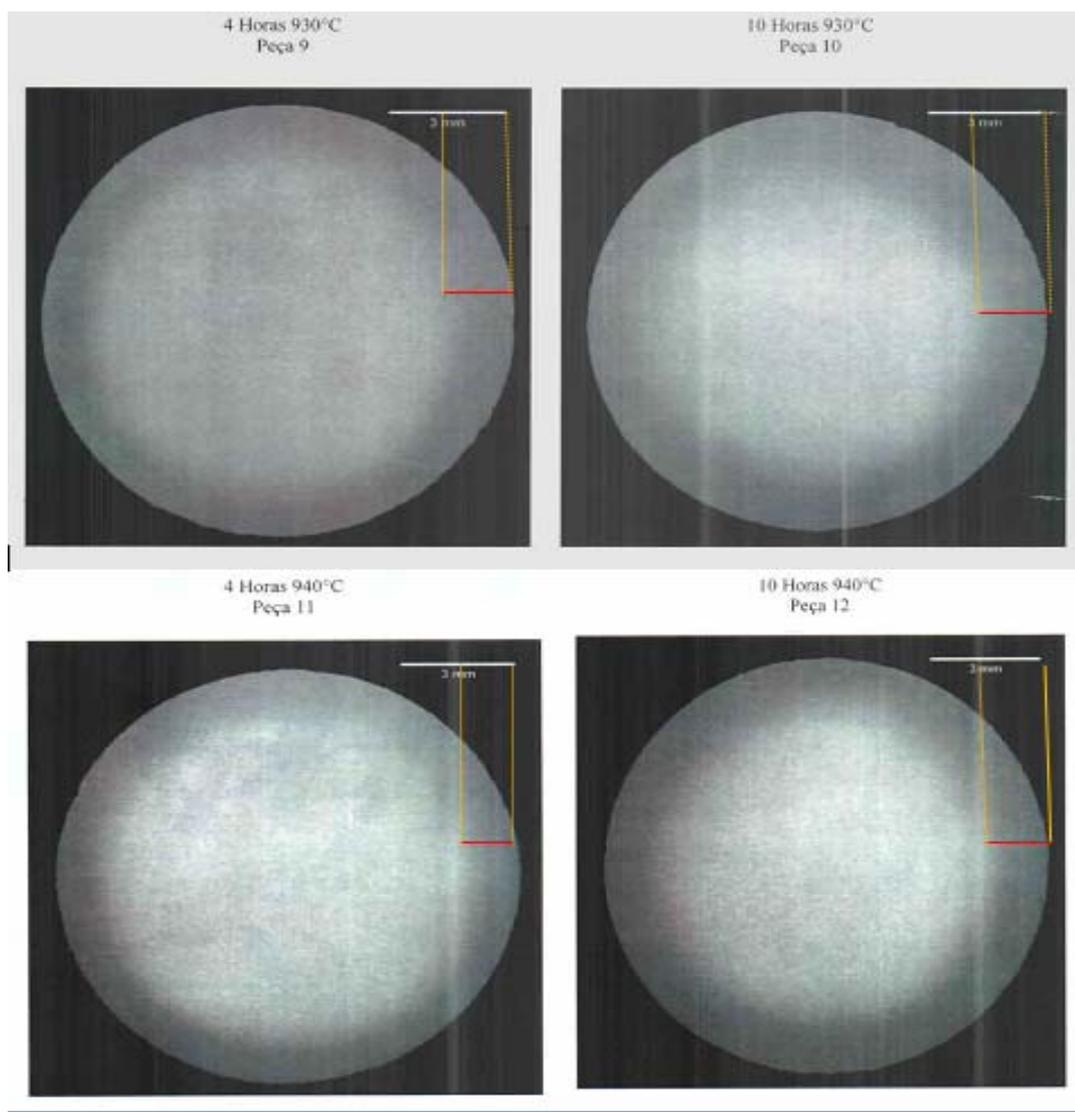
vido cementado em menor tempo e por apresentar uma dureza menor próxima ao núcleo (maior tenacidade). Sua microestrutura de camada e de núcleo é mostrada na Figura 53.



**Figura 53 – Micrografia do CP nº 7.**

Fonte: O autor, 2013

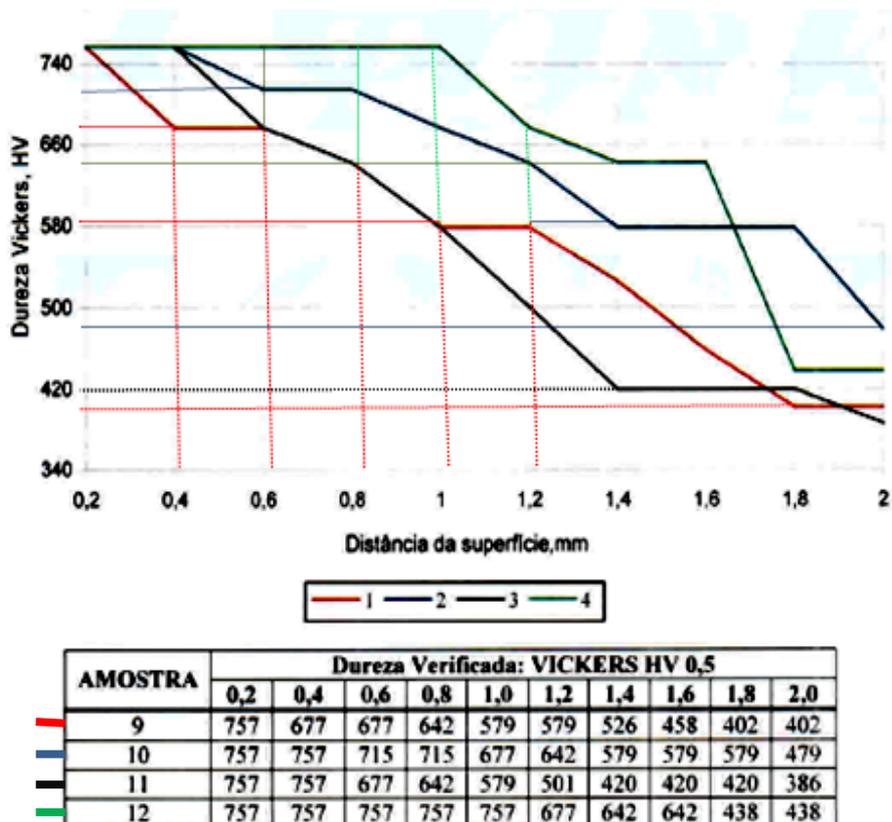
O último Planejamento Fatorial 2<sup>2</sup> processado; Cementação em Banho de Sal (1,0% de Carbono do aço ABNT 1020), temperado em água e revenido, será discutido a partir da análise dos resultados das Figuras 54 e 55.



**Figura 54 – Macrografia do aço ABNT 1020 cementação Banho de Sal temperado em água e revenido.**

Fonte: O autor, 2013

Novamente, a partir de uma breve visualização dos perfis de cementação, comparando-se com a escala (3mm) e a linha demarcatória (superfície-núcleo) dos mesmos, pode-se supor que todos os CP deram a camada desejada, mas quanto a dureza especificada somente analisando os dados do gradiente de dureza, apresentado na Figura 55.

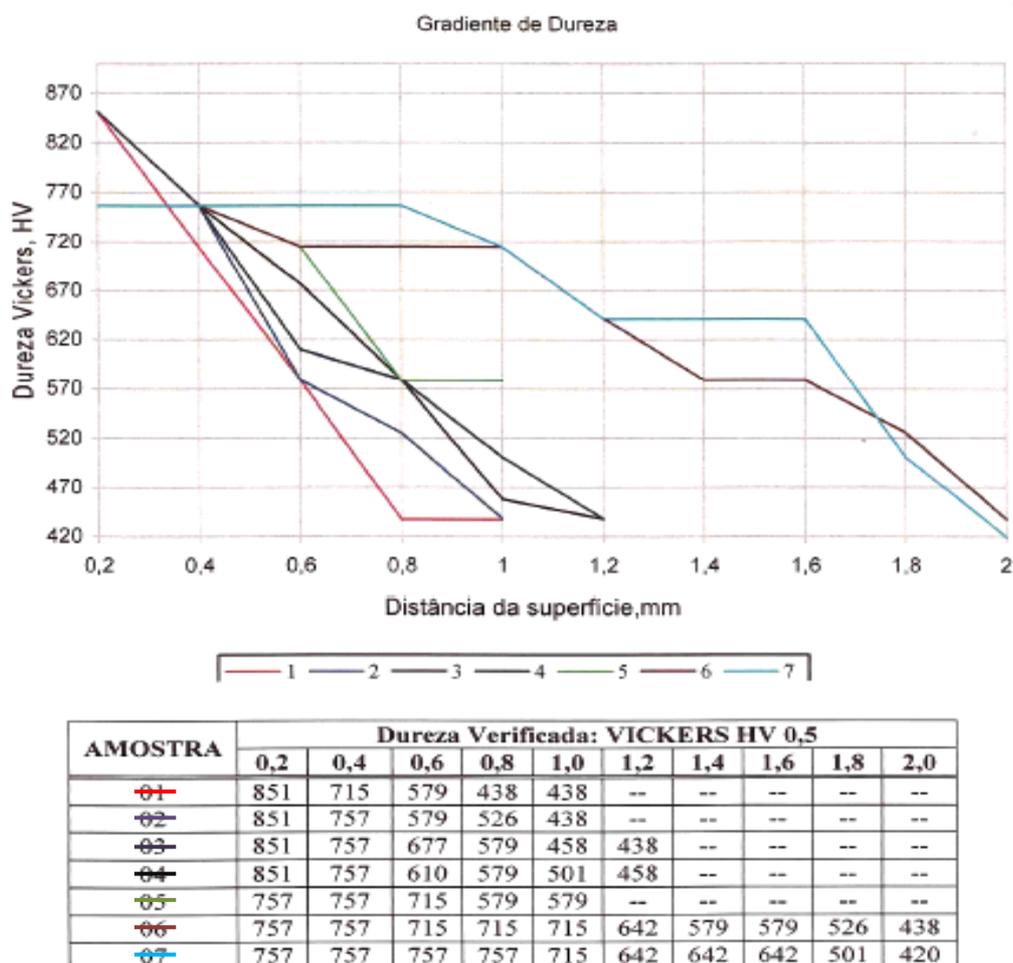


**Figura 55 - Gradiente de dureza e profundidade de camada das amostras cementadas em banho de sal do aço ABNT 1020.**

Fonte: O autor, 2013

Conclui-se, neste caso, que o CP nº 9 (gráfico vermelho) é o que mais se aproximou do resultado do projeto, apresentando uma profundidade entre 1,0 e 1,2 mm e dureza HV 579, em condições favoráveis de tempo (4 horas) e temperatura (930°C).

O Planejamento Fatorial  $2^3$ , ensaiado através da simulação, serão comparados com os resultados práticos, obtidos pelas cementações realizadas pela empresa TEMPERAÇÃO RIO, os sete CP do aço ABNT 1020 em banho de Sal e os quatro CP do aço 8620 em banho de sal. Primeiramente será discutido o ensaio feito com os 7 CP do aço ABNT 1020, mostrado na Figura 56.



**Figura 56 – Gradientes de Dureza para os CP do aço ABNT 1020 enviados a TEMPERAÇÃO para Cementação em Banho de Sal.**

Fonte: O autor, 2013

Lembrando que os CP foram listados em uma Planilha (Tabela 21), onde cada amostra seria cementada de acordo com um tempo em horas, então, de acordo com os resultados acima, conclui-se que o tempo é, realmente, o fator mais significativo, no processo de cementação. Logo:

O CP nº1, cementado em banho de sal durante 1 hora, apresentou, conforme o gráfico nº1, dureza superficial alta, mas como o tempo no forno foi muito curto, sua profundidade de camada foi baixa (0,6 mm), tendo um gradiente de carbono muito brusco. Sua camada cementada é mostrada na Figura 57.

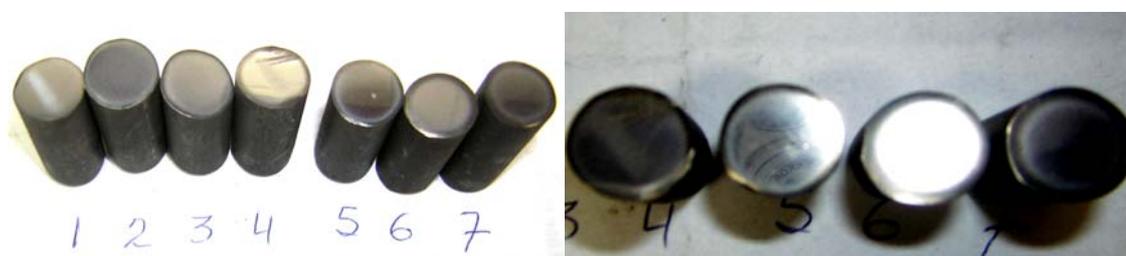


**Figura 57 – Perfil de Cementação**

Fonte: O autor, 2013

#### CP nº 1 aço 1020 TEMPERAÇÃO RIO

Os CP nº 2 e 3 também tiveram seus perfis similares ao CP nº1, ou seja, com espessura aquém da desejada. Os perfis subsequentes, em função do fator tempo (lembrando que este processo teve fixada a temperatura do banho em 910°C e a composição de carbono em torno de 0,90%), apresentaram camadas mais espessas, conforme mostra a Figura 58.

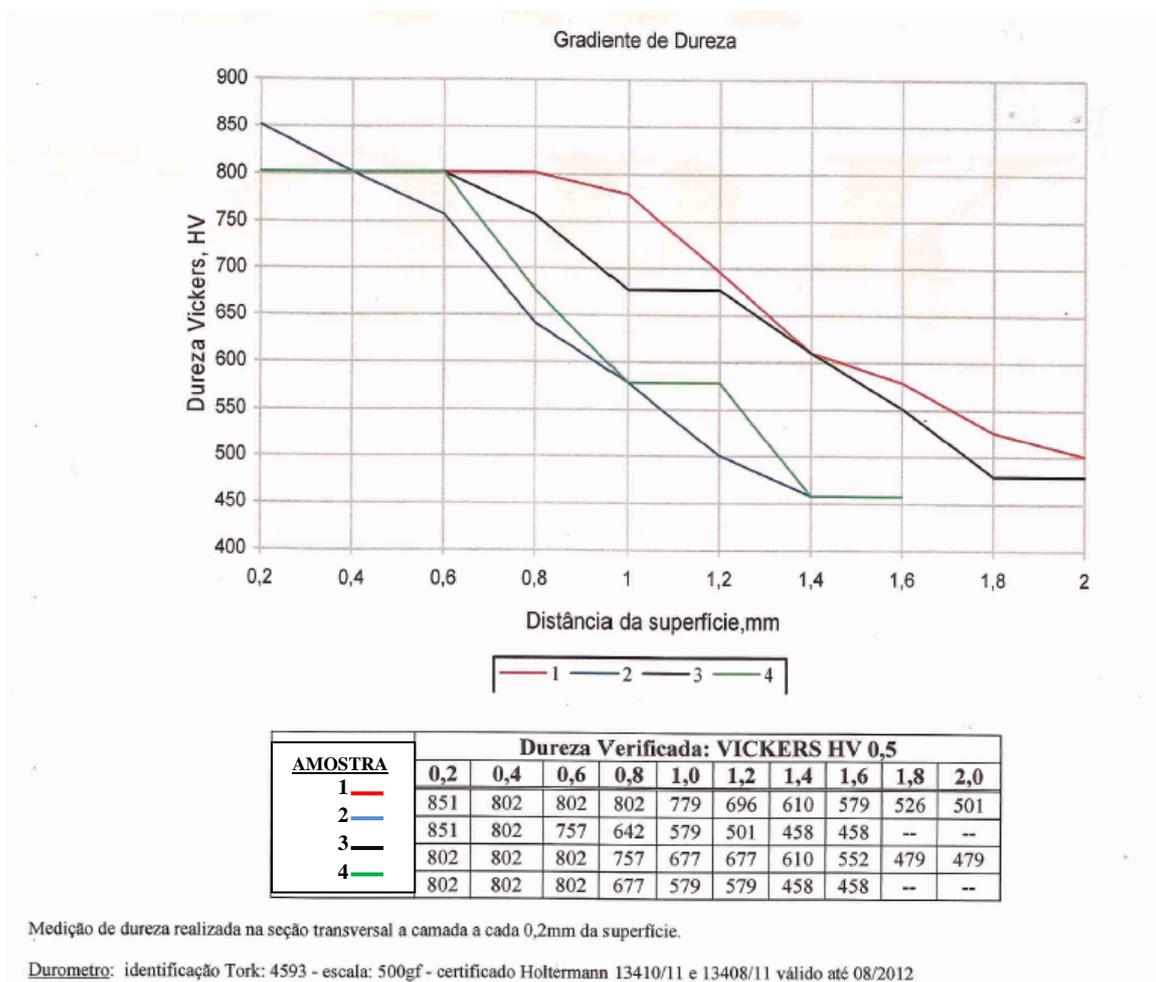


**Figura 58 – Perfis de Dureza dos CP da TEMPERAÇÃO RIO.**

Fonte: O autor, 2013

Conclui-se que os perfis de dureza e profundidades de camada mais significativas, em relação ao objetivo desta dissertação, foram apresentados pelos CP nº 4 e nº 5, sendo que este último foi o que mais se aproximou (579 HV e 1,0 mm). Os demais (6 e 7) excedem as exigências do projeto.

Encerrando-se a análise dos resultados dos planejamentos, serão mostrados os gráficos de gradiente de dureza e profundidade de camadas para a cementação em banho de sal para o aço ABNT 8620, encomendado à TEMPERAÇÃO RIO (conforme a Tabela 22), visualizados na Figura 59.



**Figura 59 – Gradientes de Dureza CP aço 8620 Cementação em Banho de Sal –  
TEMPERAÇÃO RIO.**  
Fonte: O autor, 2013

Os CP nº 1 e nº 2 são aqueles com as menores profundidades e dureza (1,0 mm e 579 HV), mas são também os que mais se aproximam das especificações que atendem o propósito do trabalho (1,1 mm e 610 HV), além da dureza superficial (851 HV) idêntica a da corrente de elos. Os CP nº3 e nº 4, por sua vez, estão com estes valores muito acima.

Neste propósito, o CP, que mais se aproximou das condições ideais de cementação foi o de nº2 (6 horas de forno, 920°C e 0,90% de Carbono), por ter o gradiente mais suave. Nota-se, neste resultado, uma grande semelhança com o ocorrido no ensaio nº 7 do planejamento 2<sup>2</sup> deste mesmo aço na BRASTÊMPERA.

A influência do tempo neste ensaio, também foi preponderante, pois se conseguiu um resultado satisfatório, utilizando-se baixa temperatura e um pequeno tempo de forno. Segundo

as informações verbais do gerente da Qualidade da TEMPERAÇÃO RIO, J. A. BARRIONUEVO, o custo por kg/camada de 1,1 mm em 6 horas de cementação líquida é de \$5,00 unidades monetárias e qualquer aumento de permanência no forno corresponderá a um consumo de energia e equipamento desnecessário, assim como um aumento da temperatura não acarretará grandes mudanças no resultado.

A dureza da camada cementada tende a evoluir constante até 12 horas de tratamento térmico aonde chega perto do seu máximo. Após este tempo a profundidade da camada vai crescendo mais lentamente, devido à difusão de carbono ser mais dificultada com a formação de uma camada cementada hipereutetoide na superfície da amostra.

Observando os resultados de dureza podemos destacar que a uma tendência da dureza evoluir e depois permanecer constante ao longo do processo e tende a certas variações aceitáveis dentro da teoria.

Outra conclusão que se tem é que se deve observar uma série de fatores. Um erro de avaliação produz uma microestrutura diferente com propriedades não desejadas. Os fatores principais a serem administrados são:

Temperatura:

Específica para o tratamento térmico que se deseja. Não deve ser excessivamente alta para não promover o crescimento de grão (queda da tenacidade).

Tempo:

As reações levam um tempo para ocorrerem. Deve haver a completa homogeneização da estrutura (austenitização). Não deve ser excessivamente longo para não ocorrer o crescimento de grão.

Velocidade de resfriamento:

Erro na escolha pode produzir microestruturas diferentes que levam a diferentes propriedades mecânicas. Com raras exceções, o revenimento dos aços é normalmente realizado entre 175 e 700°C e tempos que variam de 30 minutos até 4 horas.

Baseando-se em estudos metalográficos, de difração de raios X e de dilatométrica, o revenimento dos aços ao carbono e aços baixa-liga é dividido em três estágios:

ESTÁGIO I - 100 a 250° C: é chamado alívio de tensões, pois não se detecta alterações microestruturais. Há uma pequena diminuição da dureza e pequeno aumento da tenacidade.

ESTÁGIO II - 200 a 300°C:

- a dureza diminui significativamente.

- em aços contendo austenita retida, ocorre a decomposição desta para ferrita e cementita.

ESTÁGIO III - 250 a 350°C:

- acentuada queda de dureza
- transformação dos carbonetos de transição ( $\text{Fe}_2, 2\text{C}$ ) em cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )
- a martensita perde gradualmente a tetragonalidade e, conseqüentemente, sua dureza e resistência mecânica.

No presente trabalho, a temperatura de revenimento não excedeu os 200°C em virtude das necessidades do projeto inicial, cujo modelo a ser copiado, nem sequer fora revenido.

## 5 CONCLUSÕES

Os perfis teóricos de cementação apresentaram valores de profundidade efetiva de cementação bem próximos em relação aos valores obtidos experimentalmente, o que indica a importância do planejamento de experimentos realizado com base na segunda lei de Fick, para várias situações de contorno. Apesar de não se poder realizar na prática um planejamento fatorial  $2^3$ , proposto neste trabalho como a melhor alternativa para se definir os pontos ótimos do processo, a ação paralela de um planejamento  $2^2$  serviu para comparar os resultados obtidos dos ensaios realizados nos dois métodos de cementação (líquida e gasosa), apontando em ambos os ensaios, o tempo como o fator mais influente, seguido da temperatura. Para temperaturas maiores de cementação, também se registram valores superiores de enriquecimento em carbono, resultando em maiores Profundidades Efetivas de Cementação, embora uma temperatura muito alta possa causar problemas microestruturais ao aço. Nas amostras que ficaram expostas a temperaturas muito altas pode-se verificar uma queda na dureza superficial a qual pode estar provavelmente associada à descarbonetação.

O aço ABNT 8620 possui maior capacidade de cementação, comparado ao aço ABNT 1020. Tal característica confirma o efeito benéfico dos elementos de liga (cromo, níquel e molibdênio) sobre a cementação do aço-liga.

Quanto aos processos e seu custo-benefício, ambos são eficientes, mas conforme dados da literatura, o processo a gás é o mais limpo e menos prejudicial ao meio ambiente, além de ter apresentado os melhores resultados ao propósito deste trabalho.

Finalmente, este estudo proporcionou ao autor uma oportunidade de desenvolver um espírito crítico em estudos bibliográficos do tema em questão e assuntos correlatos. Foi obtida também uma maior compreensão dos métodos e procedimentos da pesquisa científica bem como a evidência de sua importância no desenvolvimento científico e industrial do país.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, ficam sugeridos os seguintes temas complementares, não pesquisados neste projeto:

- Aplicação de um Planejamento Fatorial Completo, otimizando outros tratamentos termoquímicos, como a Nitretação ou a Carbonitretação;
- Aplicação de um Planejamento Fatorial Completo, otimizando os processos mais modernos de cementação, como a cementação a vácuo ou a plasma.
- Aplicação de um Planejamento Fatorial Completo, otimizando as variáveis que afetam a microestrutura e propriedades dos aços temperados, como a temperatura de revenimento, velocidade de resfriamento após o revenimento e a composição do aço, incluindo seu teor de carbono, elementos de liga e impurezas.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Jorge Paulo Dantas de. A aplicação de planejamento estatístico multivariado no desenvolvimento de componentes do motor. 2011. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- ASHBY, M.F. Engenharia de Materiais, v.2: uma introdução a propriedades, aplicações e projeto; tradução de Arlete Simille Marques – Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- ASKELAND, D.R.; PHULÉ, P.P. Ciência e Tecnologia dos Materiais. São Paulo : Cengage Learning, 2008.
- ASM HANDBOOK, v. 4 : heat treating. Ed. T. Arai et al. Materials Park: ASM International, 1991, p325-328.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13178: Determinação e verificação da profundidade de cementação. Rio de Janeiro, 1994.
- BARRIÓNUEVO ANÍBAL, Jorge. Informação verbal fornecida ao autor em maio de 2012.
- BARROS NETO B., SCARMINO I.S., BRUNS R.E., Como fazer experimentos – Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria. Campinas: Unicamp, 2001.
- BAUMGARTEN, Júlio Frederico. Cementação Sólida empregando granulado a partir de carvão vegetal reciclado e ativador de CaCO<sub>3</sub> ecologicamente correto. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos Avançados) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2003.
- CALLISTER, Jr. William D. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CAMPOS S., Planejamento de Experimentos, Siqueira campos Associados, Porto Alegre, 1999, p3-10.
- CHIANCA GIESTEIRA, Márcio. Informação verbal fornecida ao autor em junho de 2012.
- CHIAVERINI V. Aços e Ferros Fundidos. 6. ed. São Paulo, SP: ABM, 1988.
- \_\_\_\_\_. Tecnologia Mecânica, 2. ed. São Paulo: MacGraw-Hill, 1986.
- COLPAERT, H. Metalografia dos produtos Siderúrgicos; revisão técnica André Luiz V. da Costa e Silva. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.
- COOPE UFRJ Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10696/>>  
Acesso em: Abril 2011

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Álvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. Ensaio dos materiais, 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GOBBI, S. J.; et al. Endurecimento Superficial dos Aços AISI 316L e AISI 304L por Cementação a Plasma em Baixas Temperaturas. 17º CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

HAMMES, G.; et al. Estudo da Cementação de Ferro Puro Sinterizado e Enriquecido Superficialmente com Molibidênio em Plasma DC. 17º CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

HINES, William W. Probability and Statistics in Engineering, Fourth Edition; New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

IFBA: Os tratamentos termoquímicos. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/metalografia/arq/termoquímicos.pdf>. Acesso em: 8 maio 2012.

INFOMET: Aços e Ligas e Aços Para Cementação. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php>. Acesso em: 26 maio 2012.

LEITÃO, Claudio José. Efeito da nitretação e da cementação na deformação de peças de aço carbono e baixa liga. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2010.

LOGUERCIO, João Francisco Canto. Desenvolvimento de um Aço SAE 5115 Microligado ao Nióbio para Cementação a Alta Temperatura. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

LOPES, Marcos Rocha. Estudo da revelação do grão austenítico em aço ABNT 1020 em função do processo McQuaid-Ehn (cementação) e evolução da profundidade da camada cementada. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria de Metalurgia e Materiais. Vitória, 2009.

MENETRIER, Ademir Reus. Estudos de Variáveis de Composição e processo para controle da compressibilidade. 2006. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

MONTGOMERY, D. C. Introduction to statistical quality control, Fourth Edition; New Jersey: John Wiley & Sons, 2001.

NORMA ASTM E 407 – 99. Standards Practice For Microetching Metals and Alloys. São Paulo: ASTM, 1999.

NORTON, Robert L. Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada, 2 ed. Porto Alegre: Bookman 2004.

NOVIKOV, I. Teoria dos tratamentos térmicos dos metais. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1994.

PADILHA, A. F.; Jr. F. S. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. São Paulo: ABM, 2003.

PFEIL, Walter.; PFEIL, Michèle. Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800: 2008 8. ed.- Rio de Janeiro: LTC, 2010.

PIMENTA, Diego Cristie; et al. Planejamento de Experimentos (DOE) Aplicado no Processo de Têmpera e Revenimento de Arames de Aço SAE 9254. Janus – Revista de Pesquisa Científica – Fatea, v. 5, n. 8, 2008.

SANDOR, Leonardo Taborda; FERREIRA, Itamar. Uma Metodologia para Avaliação dos Gradientes de Tenacidade à Fratura ao Longo da Camada Cementada do Aço SAE 5115. Revista Matéria, v. 11, n. 2, pp. 111 – 124. 2006.

SCHEUER, Cristiano José. Cementação a Baixa Temperatura do Aço Inoxidável Martensítico AISI 420 Assistida por Plasma. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SHACKELFORD, James F. Introdução à Ciência dos Materiais para Engenheiros, 6 ed. tradução Daniel Vieira; revisão técnica Nilson C. Cruz. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SILVA, André Luiz V. da Costa; MEI, Paulo Roberto. Aços e Ligas Especiais, 3 ed. São Paulo: Blucher, 2010.

SPECTRU INSTRUMENTAL CIENTÍFICO LTDA. Disponível em: <http://www.spectru.com.br/Metalurgia/acocomtratar.htm> Acesso em: 23 maio 2012.

SPIM, Jaime Álvares. Tratamentos térmicos e termoquímicos: Programa de Educação Continuada. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2002.

TRATAMENTO TÉRMICOS DOS AÇOS. Disponível em: <http://dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/tratterm2.pdf> Acesso em: 10 julho 2012.

VAN VLACK, Lawrence Hall. Princípios de Ciência dos Materiais; traduzido pelo Eng. Luiz Paulo Camargo Ferrão. São Paulo: Blucher, 1970.

VECCHIA, F. D.; SANTOS, C. A.; DEDAVID, B. A. Avaliação do Desempenho de uma Nova Mistura de Gases. 17º CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

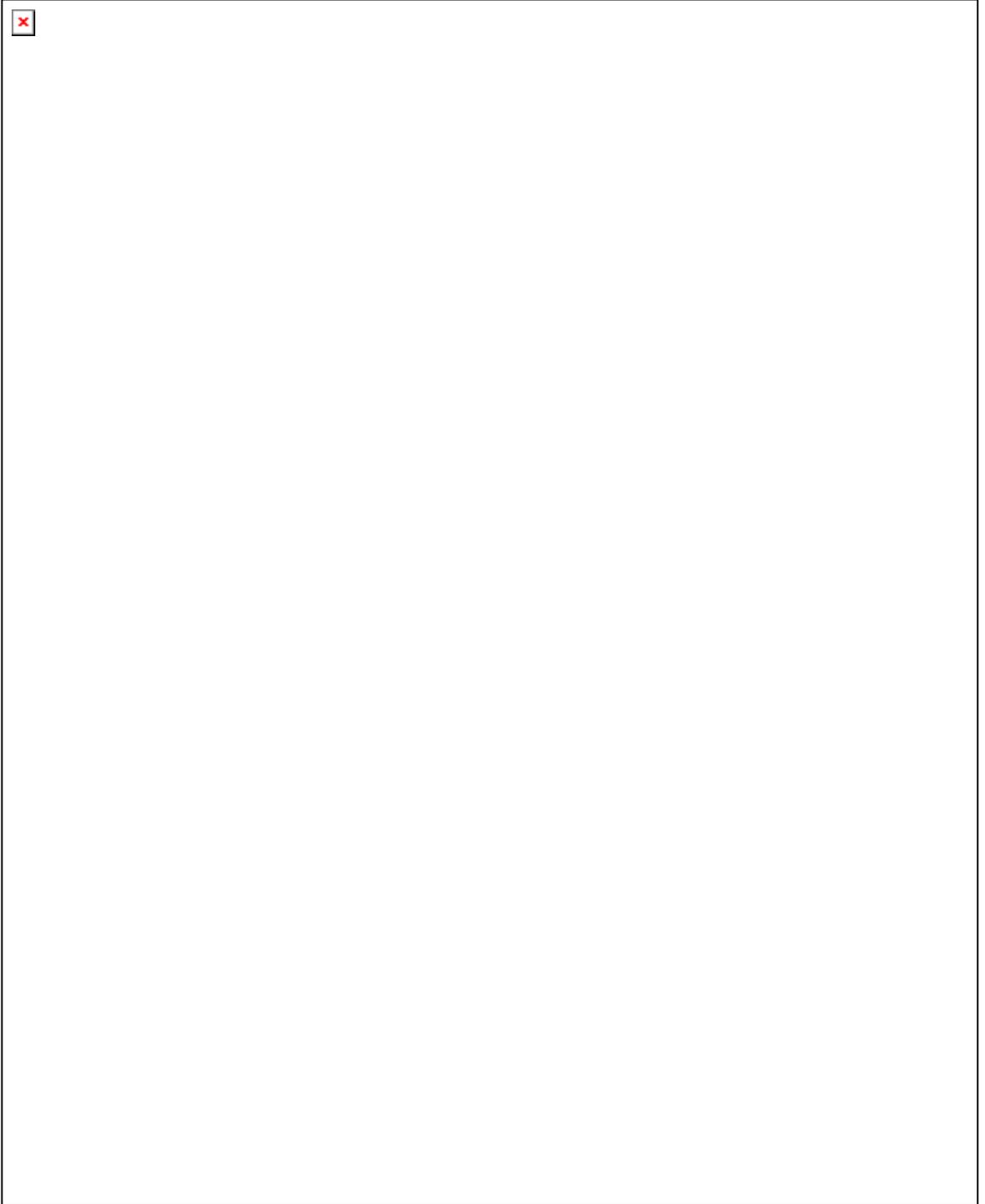
## ANEXOS

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo.

“Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar.

**ANEXO 1 – Relatório de ensaio da NFP automotive**



## ANEXO 2 – Relatório de ensaio tork nº 12044060 MESP

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 12044060MESP

Fl. 1/2

Empresa interessada : PAULO CESAR OLIVEIRA CARVALHO

Pedido de ensaio : 259971

Natureza do trabalho : **DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE ENDURECIMENTO**

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

QUANTIDADE.....: 01 amostra

MATERIAL.....: Elo de corrente

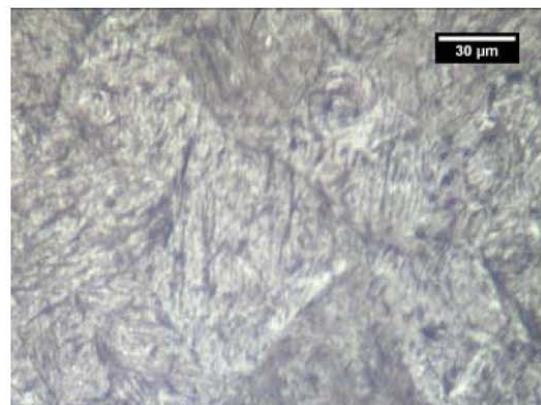
### REGIÕES ANALISADAS



**EXAME METALOGRÁFICO - MICROGRAFIA** - Preparação dos corpos de prova conforme ASTM E 3, ed 11  
Microataque com Nital 3% conforme ASTM E 407, ed 07  
Termos e definições conforme ASTM E 7, ed 03



Micrografia da camada região 1. Constituída por martensita revenida com austenita retida.



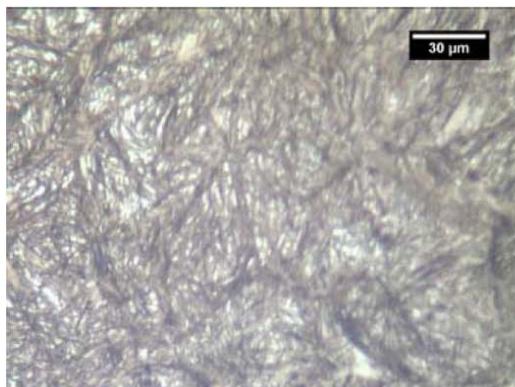
Micrografia do núcleo região 1. Constituída por martensita revenida perlita fina e ferrita de Widmannstätten em contorno de grão.

Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0056.

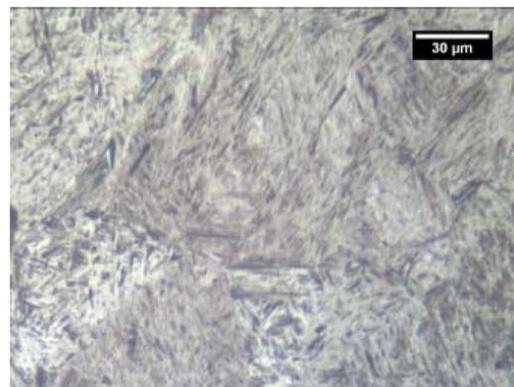
Os resultados apresentados no presente documento têm significação restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração. Laudos não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

## RELATÓRIO DE ENSAIO N°: 12044060MESP

Fl. 2/2



Micrografia da camada região 2. Constituída por martensita revenida com austenita retida.



Micrografia do núcleo região 2. Constituída por martensita revenida, perlita fina e ferrita de Widmannstätten em contorno de grão.



Micrografia no centro do caldeamento região 3. Observa-se falta de fusão, microestrutura constituída por martensita revenida.

Microscópio metalográfico - TNM 07 PL - identificação 4538 - certificado RBC/Micro C0149/09 - válido até 10/2013  
Lâmina padrão Identificação Tork: 4607 - certificado RBC/LabMess D2011/0000102 - válido até 11/2013

Procedimentos Tork: P-501, P-502, P-503, P-507, P-514 e P-515.

Local e Data dos Ensaios: São Paulo, 05 de Abril de 2012.

Emissão do Relatório: São Paulo, 05 de Abril de 2012.

Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0056.

Os resultados apresentados no presente documento têm significação restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração. Laudos não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

Empresa interessada : PAULO CESAR OLIVEIRA CARVALHO

Pedido de ensaio : 259971

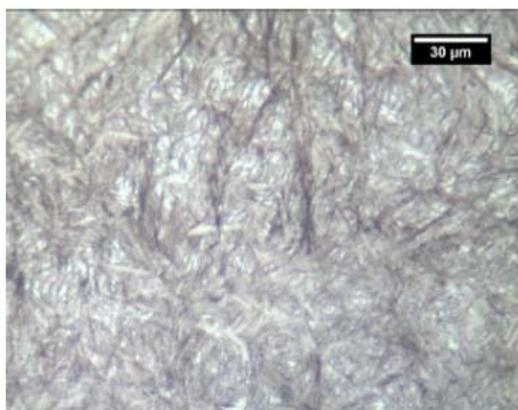
Natureza do trabalho : DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE ENDURECIMENTO

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

QUANTIDADE.....: 01 amostra

MATERIAL.....: Elo de corrente

**A - EXAME METALOGRAFICO - MICROGRAFIA** - Preparação dos corpos de prova conforme ASTM E 3, ed 11  
Microataque com Nital 3% conforme ASTM E 407, ed 07  
Termos e definições conforme ASTM E 7, ed 03



Nital 3%



Micrografia da camada constituída por martensita revenida e austenita retida. Micrografia do núcleo constituída por martensita revenida e ferrita de Widmannstätten em contorno de grão.

Microscópio metalográfico - TNM 07 PL - identificação 4538 - certificado RBC/Micro C0149/09 – valido até 10/2013  
Lâmina padrão identificação Tork: 4607 – certificado RBC/LabMess D2011/0000102 – valido até 11/2013

Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0056.

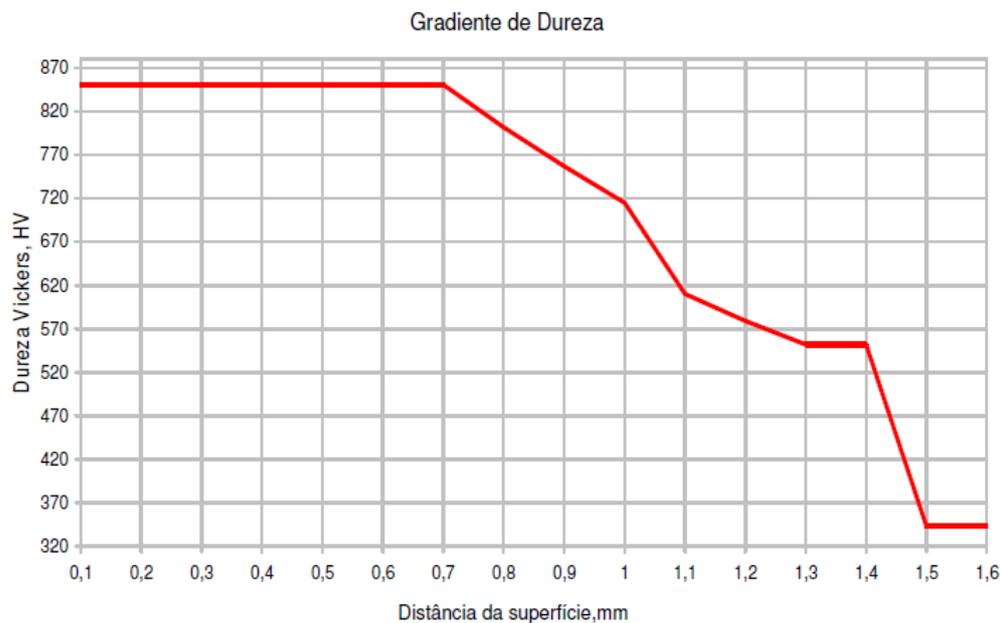
Os resultados apresentados no presente documento têm significação restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração. Laudos não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

**B - DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE ENDURECIMENTO**

Preparação conforme ASTM E 3, ed 11

Método de medição conforme ASTM E 384, ed 10

Método de determinação da camada superficial endurecida conforme SAE J 423, ed 08.



Dureza Verificada: VICKERS HV 0,5 a cada 0,1mm da superfície															
0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
851	851	851	851	851	851	851	802	757	715	610	579	552	552	343	343

Microdurômetro: Shimadzu - identificação Tork: 4231 - escala: 500gf - certificado RBC/Holtermann 13.407/11 - Holtermann 13.409/11 - válido até 08/2012  
 Medição de dureza realizada na seção transversal a camada a cada 0,1mm da superfície.

Procedimentos Tork: P-501, P-502, P-503, P-507, P-514, P-515, P-517 e P-525.

Local e Data dos Ensaios: São Paulo, 03 de Abril de 2012.

Emissão do Relatório: São Paulo, 05 de Abril de 2012.

Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0056.

Os resultados apresentados no presente documento têm significação restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração. Laudos não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.



ACOS ESPECIAIS PIRATINI

ISO/TS 16949: 2002



CERTIFICADO DE QUALIDADE  
QUALITY CERTIFICATE  
MILL'S TEST CERTIFICATE  
CERTIFICADO DE CALIDAD

RAZÃO SOCIAL: GERDAU ACOS ESPECIAIS S/A  
CNPJ: 07.359.641/0002-67

Nº 331683

NOTA: PRECISÃO DO PESAMENTO: 0,01g

Quantidade de Grau: 3838

SAE 8620

PRODUTO/PRODUCT: BARRA LAMINADA REDONDA SEM TRATAMENTO SEM ACABAMENTO

24850230  
CONDICIONAMENTO: 12,110,747

039483

3.972,00

3558/01

7764742 - 800512970

SAE 8620

NORMA/SPECIFICATION: PADRAO

12,110,747

ANÁLISE QUÍMICA/CHEMICAL COMPOSITION

	C	SI	Mn	P	S	Cr	NI	Mo	Al	V	Ti	Cu	N
	0,21	0,22	0,77	0,018	0,024	0,51	0,44	0,16	0,028	0,003	0,002	0,15	0,0120

ENSAIOS MECÂNICOS/MECHANICAL PROPS

DUREZA

H1B 203



ENSAIOS METALÓRGICOS/METALLOGRAPHIC TESTS

T. GRÃO AUSTENÍTICO

	AF	AG	BF	BG	CF	CG	DF	DG
	ASTM							
	2,5	0	0	0	0	0	1,0	0

METROLOGIA/CLASIFICACION RATING NUMBERS

17-36723-5

DATA: 08/08/06

CONFERIDO: [assinatura]

APROVADO  REPROVADO

PREPARAMENTO DE QUALIDADE/QUALITY MANAGEMENT  
CHARQUEADAS, 04.08.2006  
Sidnei de J. Oliveira  
CREA 27043